

勉略构造带横现河地区张岩沟双峰式火山岩的地球化学特征、LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义

徐 通¹ 裴先治^{1,2} 李瑞保^{1,2} 李佐臣^{1,2} 裴 磊³ 刘成军¹ 陈有忻¹
汪晓伟¹ 杨 杰¹ 胡 楠¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要:横现河地区张岩沟双峰式火山岩位于勉略构造带三岔子—略阳段, 由紧密共生的变质基性火山岩和变质中性火山岩组成, 其原岩为亚碱性玄武岩和亚碱性流纹—英安岩。中酸性火山岩稀土元素含量明显低于玄武岩, 表明中酸性火山岩为地壳部分熔融形成, 而非分离结晶成因。玄武岩具有较高的 Zr 含量与较高的 Zr/Y 值, 表现出板内玄武岩特征, 其具有的弧印记应为陆壳物质混染所致。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果表明, 流纹岩成岩年龄为 (728 ± 10) Ma ($n=4$, MSWD = 0.14)。结合区域地质背景, 认为张岩沟双峰式火山岩形成于地壳伸展机制下的大陆裂谷环境, 预示着该地区新元古代洋盆的打开。这一新成果, 对研究勉略带新元古代的构造演化以及探讨扬子地块北缘对 Rodinia 超大陆裂解的响应具有重要意义。

关 键 词:双峰式火山岩; 大陆裂谷; Rodinia; 张岩沟; 勉略构造带

中图分类号: P597+.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2013)06-1777-15

1 引 言

勉略构造带是一条横亘中国大陆中部, 以多条逆冲断裂为骨架, 由不同时代、不同性质构造岩片组成的巨型复合大陆构造带。其向西经康县、文县、南坪、玛曲、玛沁、花石峡连接阿尼玛卿—布青山构造混杂岩带, 向东经巴山弧形构造带直抵大别南缘, 是中央造山系的重要组成部分^[1-3]。有学者认为勉略构造带是于晚古生代初期开始扩张并逐渐形成的勉略洋在中晚三叠世洋盆俯冲碰撞形成的一条板块缝合带^[1-12]; 较新的研究显示, 勉略地区在新元古代已经有洋岛火山岩、弧—盆组合以及蛇绿岩的发育^[13-23];

也有学者认为勉略地区在晚古生代仅有裂谷发育, 而未形成分割性洋盆^[24-25]。勉略构造带经历过漫长的地质作用和多次构造叠加改造, 物质组成十分复杂, 而对带内物质组成的再认识无疑是未来寻求研究突破的关键。

火山岩浆活动是地球各圈层之间物质与能量交换的“使者”^[26], 其样式和特点与区域甚至全球构造动力机制存在紧密的联系^[27]。随着构造岩浆类型概念的提出^[26, 28], 构造环境被认为是火山岩地球化学特征的重要制约因素。勉略带内火山岩十分发育, 对带内火山岩形成年龄和地球化学特征的精细研究可以确定为带内物质组成和勉略带的构造属性以及恢复

收稿日期: 2013-06-05; 改回日期: 2013-10-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(1212011120161)、国家自然科学基金项目(41172186, 40972136, 40572121)、高等学校博士学科点专项科研项目(20110205110004)、中央高校基本科研业务专项基金项目(CHD2011TD020)共同资助。

作者简介: 徐通, 男, 1988 年生, 博士生, 构造地质学专业; E-mail: xutong1988819@163.com。

通讯作者: 裴先治, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学、区域地质学研究; E-mail: peixzh@263.net。

区域构造演化史提供良好的依据。前人对横现河地区张岩沟变质火山岩的研究较为薄弱,未明确指出其成岩年龄、地球化学特征及其构造环境。本文通过详细的野外调查和室内研究,并结合前人研究成果,基本查明横现河地区张岩沟变质火山岩及其围岩的空间展布情况,并对张岩沟变质火山岩进行了LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄以及主量、微量元素的测试和分析,从而确定张岩沟变质火山岩的性质和形成年代,并恢复其构造环境。

2 区域地质背景

横现河地区张岩沟变质火山岩位于勉略构造带

三岔子—略阳区段的横现河镇南西,呈楔状构造岩块被中泥盆统一下石炭统略阳组和上南华统关家沟组围限,南北宽约 800 m,东西长约 1200 m,与周边地层均呈断层接触关系(图 1)。陕西省地质调查院(2007)完成的《1:25 万略阳县幅区域地质调查报告》^①中将该套变质火山岩与嘉陵江横现河北—鱼洞子北呈东西向展布的一套火山岩岩片统称为纸房沟岩组(图 1),认为纸房沟岩组以基性—酸性双峰式火山岩、大洋玄武岩、岛弧玄武岩—安山玄武岩—酸性火山岩为主,表现出极其复杂的构造环境和地质背景。较早的研究成果^②认为该套混杂岩为一套沉积砾岩或经构造作用改造后的砾岩,也有学者认为该套变

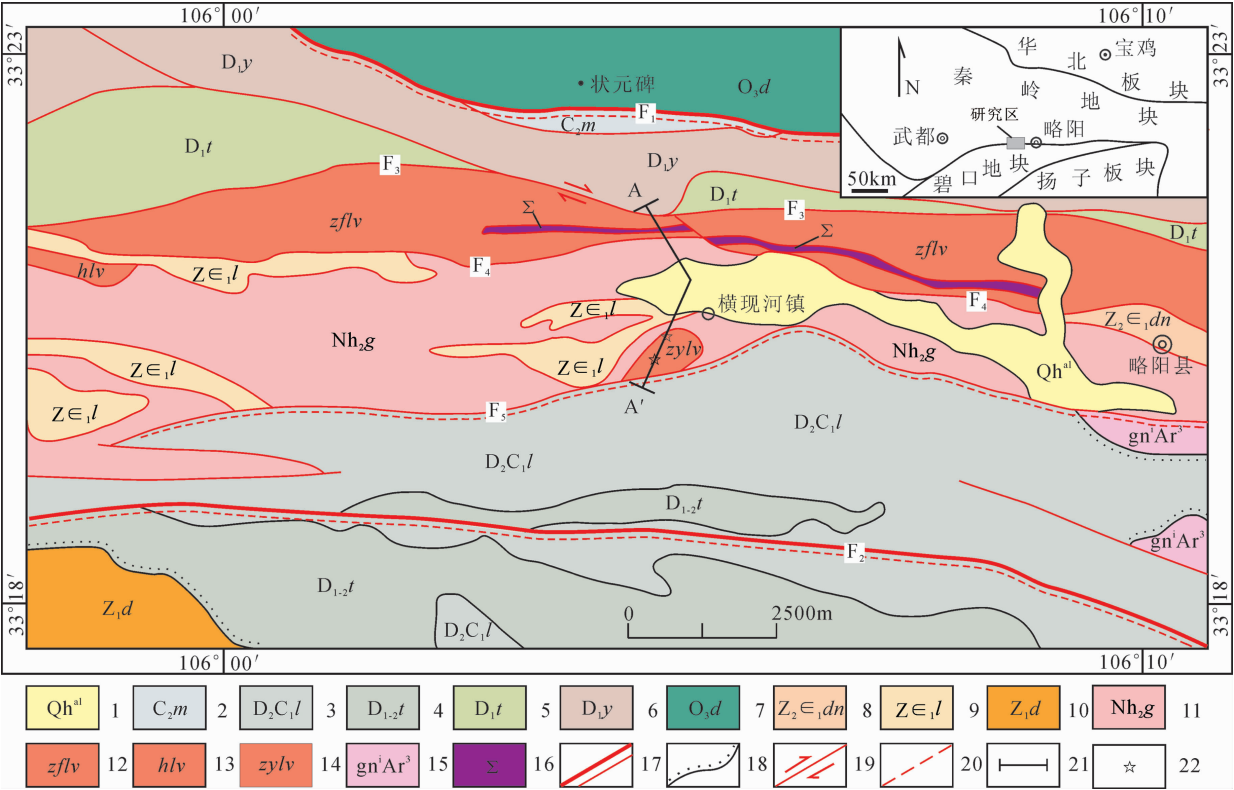


图 1 勉略构造带横现河地区地质简图

1—第四系;2—岷河组;3—略阳组;4—踏坡组;5—屯寨组;6—羊汤寨组;7—大堡岩组;8—灯影组;9—临江组;10—陡山沱组;11—关家沟组;12—纸房沟岩片;13—黑沟峡岩片;14—张岩沟变质火山岩片;15—鱼子洞岩群;16—蛇绿岩;17—勉略构造带边界断层、次级断层;18—角度不整合;19—走滑断层;20—韧性剪切带;21—实测剖面;22—采样位置;
F₁—状元碑断裂;F₂—夹门子沟断裂;F₃—水沟岩断裂;F₄—马家沟—横现河断裂;F₅—寺沟门—略阳断裂

Fig.1 Sketch geological map of Hengxianhe area, Mian-Lue tectonic zone

1-Quaternary; 2-Minhe Formation; 3-Lueyang Formation; 4-Tapo Formation; 5-Tunzhai Formation; 6-Yangtangzhai Formation; 7-Dabu Formation; 8-Dengying Formation; 9-Linjiang Formation; 10-Doushantuo Formation; 11- Guanjiagou Formation; 12-Zhifanggou sliver; 13-Heigouxia sliver; 14-Zhangyangou sliver; 15-Yudongzi rock group; 16-Ophiolite; 17-Boundary faults of Mianlue tectonic zone, secondary faults; 18-Angular unconformity; 19-Strike slip fault; 20-Ductile shear belt; 21-Measured profile; 22-Sampling location; F₁-Zhuangyuanbei fault; F₂-Jiamenzigou fault; F₃-Shuigouyan fault; F₄-Majiagou-Hengxianhe fault; F₅-Sigoumen-Lueyang fault

①陕西省地质调查院. 1:25 万略阳幅区域地质调查报告[R]. 2007: 1-352.
②陕西地矿局. 1:5 万徐家坪—两河口地区区调联测报告[R]. 1994: 1-150.

质火山岩及周围岩层为一套碰撞-逆冲型泥沙质构造混杂岩^[29]。

研究区勉略构造带北侧以区域性大断裂状元碑断裂为界,属南秦岭地区,发育有大堡岩组(O_3d)和“白龙江”群,为一套碎屑岩、碳酸盐岩、硅质岩沉积组合,局部夹有火山岩岩块。勉略构造带南侧以区域性断裂夹门子沟断裂为界(图 1),主要由中新元古代碧口群变质火山-沉积岩和踏坡组(D_{1-2t})沉积岩组成。研究区勉略带内主要出露有略阳组(D_2C_1l)、踏坡组(D_{1-2t})、羊汤寨组(D_{1y})、临江组($Z\epsilon_1l$)和关家沟组(Nh_2g)。其中,略阳组(D_2C_1l)为一套台地相碳酸盐岩沉积;踏坡组(D_{1-2t})为粗-细碎屑岩构成的韵律型-旋回型沉积层序;羊汤寨组(D_{1y})为一套浅海陆棚相浅变质陆源碎屑岩夹碳酸盐岩沉积,局部夹火山岩,研究区出露大量灰-深灰色千枚岩,为碎屑岩变质的产物;临江组($Z\epsilon_1l$)为一套硅质-镁质碳酸盐岩沉积,主要为白云岩、白云质灰岩、硅质岩组合,上部白云岩多具花边状构造,局地含硅质条带及团块,下

部为炭质板岩、变粉砂岩,产磷锰矿层^①。本次野外地质调查过程中,在临江组地层内发现有铁锰矿层的出露,表明研究区临江组地层可能属于临江组下部地层,为浅海陆棚相沉积;关家沟组(Nh_2g)为一套以砾质碎屑岩为特征的弧前盆地海底扇沉积地层^[30],研究区砾石含量较少,应属关家沟组下岩段,为一套浊积流沉积组合。

3 实测剖面及岩相学特征

3.1 剖面描述

野外实测剖面位于横现河地区张岩沟一带(图 1),剖面(图 2)起点 A 坐标: $N33^{\circ}21'$ 、 $E106^{\circ}04'$,终点 A' 坐标: $N33^{\circ}20'$ 、 $E106^{\circ}05'$,总长约 4 km。现将剖面由北到南列述如下:

羊汤寨组(D_{1y})

- (1)灰-深灰色绢云母千枚岩夹少量绿泥绢云母千枚岩及灰岩透镜体
- 纸房沟岩片($zflv$)

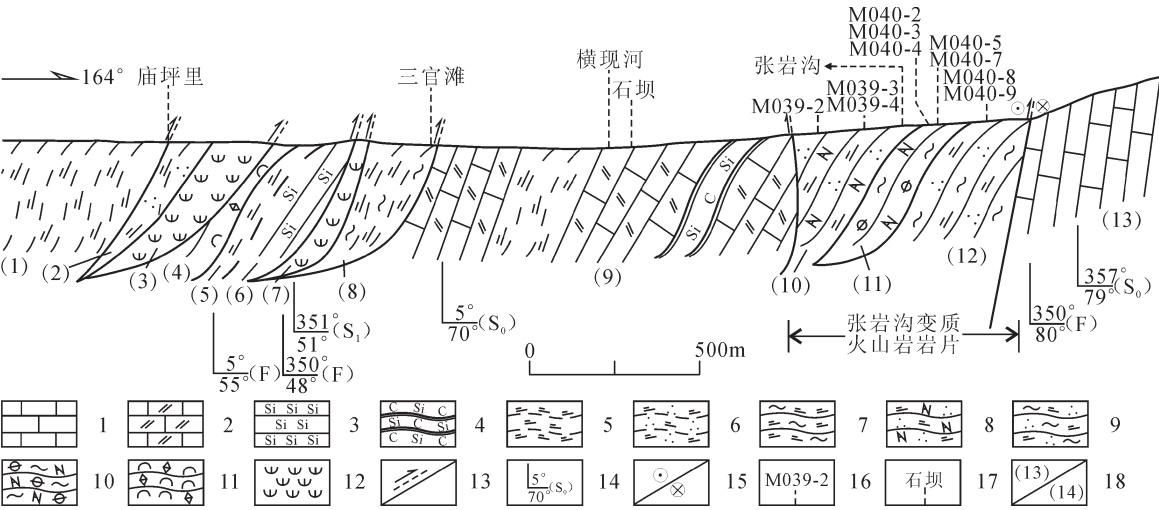


图 2 勉略构造带横现河地区实测地质剖面

- 1—中厚层状灰岩;2—中层状白云质灰岩;3—中层状硅质岩;4—炭硅质板岩;5—绢云千枚岩;6—绢云石英千枚岩;
- 7—绿泥绢云千枚岩;8—绢云钠长石英片岩;9—绢云绿泥石英片岩;10—绿帘绿泥钠长片岩;11—滑石菱镁片岩;
- 12—蛇纹岩;13—断层(剖面);14—地质产状(剖面);15—左行剪切(剖面);16—采样位置及编号;17—地名;18—分层界线及层号

Fig.2 Measured geological section of Hengxianhe area, Mian-Lue tectonic zone

- 1-Medium-thick bedded limestone; 2-Medium bedded dolomitized limestone; 3-Medium bedded silicite;
- 4-Carbonaceous-siliceous slate; 5-Sericite phyllite; 6-Sericite-quartz phyllite; 7-Chlorite-sericite phyllite; 8-Sericite-albite-quartz schist; 9-Sericite-chlorite-quartz schist; 10-Allochite- chlorite-albite schist; 11-Talc-magnesite schist; 12-Serpentinite;
- 13-Fault (section); 14-Attitude of strata (section); 15-Left-lateral shear (section); 16-Location and serial number of sample;
- 17-Place name; 18-Layering boundary and serial number

①陕西省地质调查院. 1:25 万略阳幅区域地质调查报告[R]. 2007: 1-352.

(2)灰白色—亮灰色绢云石英千枚岩 蛇纹岩夹层	150 m
(3)灰绿色—墨绿色块状蛇纹岩,岩石已发生绿帘石化, 局部蚀变为纤维状石棉	190 m
(4)灰白色—灰色薄层状滑石菱镁片岩	90 m
关家沟组(Nh ₂ g)	
(5)灰—深灰色绢云母千枚岩	30 m
(6)灰白色中薄层状硅质岩夹少量硅质灰岩及白云质 灰岩	140 m
蛇纹岩夹层	
(7)绿色—墨绿色块状蛇纹岩,岩石已发生绿帘石化,局 部蚀变为纤维状石棉	50 m
关家沟组(Nh ₂ g)	
(8)灰—深灰色绿泥绢云千枚岩	250 m
临江组(Z ₆ l)	
(9)灰色中厚层状白云质灰岩,夹炭硅质板岩、绢云千枚 岩及少量铁锰矿层	1200 m
张岩沟变质火山岩岩片(zylv)	
(10)灰白色绢云钠长石英片岩	560 m
(11)灰绿色绿帘绿泥钠长片岩	210 m
(12)浅灰绿色绿泥绢云石英片岩	240 m
略阳组(D ₂ C ₁ l)	
(13)深灰色中厚层状灰岩	>500 m

3.2 岩相学特征

横现河地区张岩沟变质火山岩由灰绿色绿帘绿泥钠长片岩(变玄武岩)、灰白色绢云钠长石英片岩(变流纹岩)和浅灰绿色绿泥绢云石英片岩(变英安岩)组成,其分布位置及产状见图 2,现将样品岩相学特征描述如下:

(1)灰绿色绿帘绿泥钠长片岩(变玄武岩)(样品 M040-2、M040-3、M040-4、M040-5 和 M040-7),其中样品 M040-2 的手标本及显微照片见图 3-a、3-d。灰绿色绿帘绿泥钠长片岩具鳞片变晶结构,片状构造,主要矿物组成为绿泥石(约 35%)、石英(约 30%)、斜长石(约 15%)、碱性长石(约 8%)、绿帘石(约 5%)、绢云母(约 5%)和方解石(约 2%),副矿物为锆石、铁质矿物。(变)斑晶主要为长石、石英和方解石,粒径为 0.15~1 mm,石英呈半自形,具细粒化、碎斑状消光、波状消光等现象;长石呈半自形,发育有聚片双晶、格子双晶以及卡氏双晶,具细粒化、错断等现象;方解石呈半自形,具错断、机械双晶等现象。基质粒度小于 0.1 mm,主要由绢云母、绿泥石及其他隐晶质矿物组成,其中个别部位绢云母及其他隐晶质矿物呈较大条带状并定向排列(图 3-d),反映后期

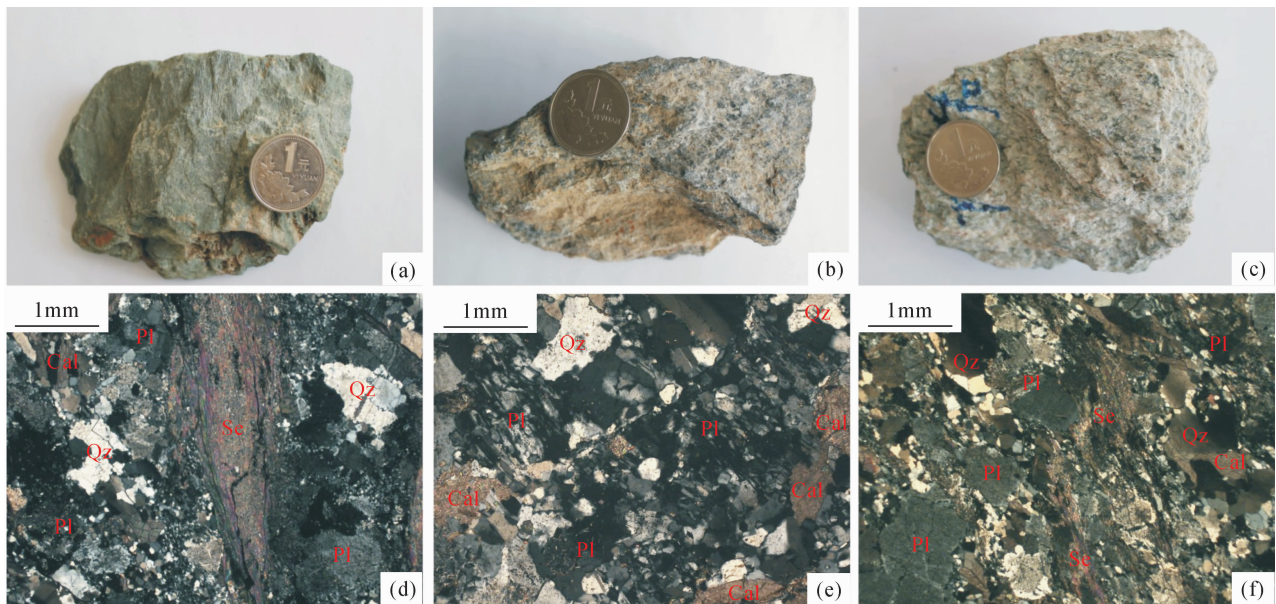


图 3 横现河地区张岩沟变质火山岩岩石照片和显微照片(正交偏光)

a—变玄武岩;b—变流纹岩;c—变英安岩;d—片状矿物重结晶及定向排列;e—斜长石机械双晶;f—石英颗粒碎斑状消光及波状消光

Cal—方解石;Pl—斜长石;Qz—石英;Se—绢云母

Fig.3 Photographs and microphotographs (crossed nicols) of Zhangyangou metamorphic volcanic rocks in Hengxianhe area
a—Meta-basalt; b—Meta-rhyolite; c—Meta-andesite; d—Crystallization and orientation of flake mineral; e—Mechanical twin of plagioclase;
f—Porphyroclastic extinction and wavy extinction of quartz

Cal—Calcite; Pl—Plagioclase; Qz—Quartz; Se—Sericite

构造作用及重结晶作用。

(2)灰白色绢云钠长石英片岩(变流纹岩)(样品 M039-2、M039-3 和 M039-4),其中样品 M039-2 的手标本及显微照片见图 3-b、3-e。灰白色绢云钠长石英片岩具(变余)斑状结构,条带状构造,主要组成矿物为石英(约 35%)、绢云母(约 25%)、斜长石(约 15%)、碱性长石(约 10%)、绿泥石(约 8%)、方解石(约 5%),含少量岩屑(约 2%),副矿物为锆石、磁铁矿等。(变)斑晶主要为长石、石英和方解石,粒径为 0.2~6 mm,石英呈半自形—自形,具细粒化、熔蚀、碎斑状消光、波状消光等现象;长石呈半自形,发育有聚片双晶、格子双晶以及机械双晶(图 3-e),具细粒化、动态重结晶等现象;方解石呈半自形—他形,主要分布于长石错断部位及裂隙。基质粒度小于 0.1 mm,主要由绢云母和绿泥石及其他隐晶质矿物组成,其中绢云母定向排列较为明显。

(3)浅灰绿色绿泥绢云石英片岩(变英安岩)(样品 M040-8、M040-9),其中样品 M040-8 的手标本及显微照片见图 3-c、3-f。浅灰绿色绿泥绢云石英片岩具(变余)斑状结构,片状构造和条带状构造,主要组成矿物为石英(约 45%)、绢云母(约 20%)、绿泥石(约 20%)、斜长石(约 5%)、方解石(约 5%)组成、碱性长石(约 3%),少量岩屑(约 2%),可见少量锆石、钛磁铁矿等副矿物。(变)斑晶主要为石英、长石和方解石,粒径为 0.2~3 mm,石英呈半自形—自形,具细粒化、碎斑状消光、波状消光等现象;长石呈半自形,发育有聚片双晶、格子

双晶以及卡氏双晶,具细粒化、错断、动态重结晶等现象;方解石呈半自形,主要分布于长石、长石的错断部位及裂隙。基质粒度小于 0.1 mm,主要由绢云母、绿泥石及其他隐晶质矿物组成,其中绢云母定向以及片状矿物和粒状矿物分带排列较为明显(图 3-f),表明与构造运动的密切联系。

4 岩石地球化学特征

选取 10 件样品送长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室进行全岩主量、微量元素分析。主量元素用日本岛津 XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪测定,分析精度和准确度优于 2%。微量元素采用 Thermo-X7 电感耦合等离子体质谱仪进行样品测定,分析精度和准确度优于 10%。样品测试及计算结果见表 1、表 2,采样位置见图 1、图 2。

4.1 主量元素特征

由于张岩沟变质火山岩烧失量较高,本文对主量元素重新进行了干体系计算并投图。在 $Si-[(c+alk)-Si-(al+fm)]$ 图解(图 4-a)和 A-C-FM 图解(图 4-b)中,样品几乎全部落入火山岩区域,表明原岩为火山岩,这与野外及镜下特征相符。在 $Zr/TiO_2 \times 0.0001-SiO_2$ (图 5-a)中,张岩沟绿帘绿泥钠长片岩落入玄武岩区域,绢云钠长石英片岩和绿泥绢云石英片岩则落入流纹岩—英安岩区域,缺少中性岩系列,呈现出良好的“双峰式”分布特征。在 SiO_2-Nb/Y 图

表 1 横现河地区张岩沟变质火山岩主量元素含量(%)

Table 1 Major element concentrations of Zhangyangou metavolcanite in Hengxianhe area

分析项目	M039-2	M039-3	M039-4	M040-2	M040-3	M040-4	M040-5	M040-7	M040-8	M040-9
SiO ₂	63.34	70.73	64.50	45.30	46.78	51.99	44.75	45.34	63.48	63.76
TiO ₂	0.39	0.27	0.66	1.65	1.40	1.18	1.26	1.38	0.28	0.31
Al ₂ O ₃	14.98	14.61	15.43	18.43	16.66	14.82	15.76	15.88	17.15	16.71
TF ₂ O ₃	3.50	2.26	4.98	14.69	12.34	10.35	11.75	12.84	3.41	3.03
MnO	0.19	0.04	0.07	0.10	0.13	0.10	0.16	0.15	0.04	0.04
MgO	1.51	1.24	0.59	6.74	5.96	3.74	5.62	6.22	1.31	0.90
CaO	3.07	1.31	2.17	2.24	4.77	5.20	7.07	6.00	2.83	3.92
Na ₂ O	6.38	3.81	6.29	4.86	4.85	5.13	4.68	4.02	6.09	4.82
K ₂ O	1.81	3.46	1.67	0.16	0.10	0.19	0.09	0.16	1.64	2.04
P ₂ O ₅	0.09	0.10	0.18	0.37	0.33	0.44	0.32	0.32	0.13	0.12
LOI	5.24	2.84	3.29	5.78	7.25	6.51	9.12	8.25	2.93	4.49
Total	100.50	100.67	99.83	100.32	100.57	99.65	100.58	100.56	99.29	100.14

表 2 横现河地区张岩沟变质火山岩微量元素含量(10^{-6})

Table 2 Trace element concentrations (10^{-6}) of Zhangyangou metavolcanite in Hengxianhe area

分析项目	M039-2	M039-3	M039-4	M040-2	M040-3	M040-4	M040-5	M040-7	M040-8	M040-9
Li	0.30	12.69	0.26	47.20	47.25	23.02	46.21	47.59	0.11	8.58
Be	0.59	0.96	0.46	0.35	0.28	0.53	0.31	0.39	0.82	0.38
Sc	3.46	2.36	2.22	21.38	26.67	14.07	26.05	28.91	1.79	1.41
V	43.14	34.73	50.56	191.96	272.28	140.18	271.15	279.36	32.90	34.16
Cr	28.41	9.52	18.01	27.50	27.79	30.25	23.56	43.35	10.72	10.46
Co	5.18	2.29	9.47	37.15	30.91	20.68	32.20	32.80	5.07	5.11
Ni	14.88	6.05	15.10	24.17	17.32	26.44	14.82	26.87	7.42	8.29
Cu	9.27	13.91	24.03	20.94	11.55	63.35	80.45	47.80	8.40	9.59
Zn	50.28	30.05	62.01	297.01	181.19	184.76	172.62	183.60	55.75	36.58
Ga	12.90	15.23	14.16	26.36	20.43	24.61	19.75	21.07	14.83	17.52
Rb	44.32	66.56	38.63	4.53	2.34	4.21	2.00	4.07	32.71	23.13
Sr	430.73	130.74	158.67	138.19	284.71	289.12	402.88	310.54	503.86	278.51
Y	10.99	4.10	8.39	20.96	18.66	32.18	18.36	19.91	5.71	3.60
Nb	5.87	4.19	9.41	8.60	7.48	10.28	7.63	7.47	3.16	2.46
Se	1.01	0.80	1.30	2.71	2.16	4.19	2.01	2.00	0.97	0.79
Cd	0.04	0.04	0.06	0.05	0.07	0.09	0.11	0.08	0.04	0.05
In	0.02	0.02	0.03	0.08	0.08	0.09	0.07	0.07	0.03	0.02
Cs	1.77	1.94	1.60	0.12	0.08	0.16	0.07	0.13	1.53	3.18
Ba	473.33	1205.00	506.21	56.84	63.91	84.03	66.02	78.70	409.22	296.42
La	25.24	25.37	35.94	45.40	27.31	46.19	22.26	23.35	11.65	13.25
Ce	51.10	47.36	72.18	96.26	54.51	114.90	48.55	50.02	38.83	29.19
Pr	5.39	5.33	7.94	11.38	6.99	16.19	6.48	6.71	3.18	3.45
Nd	19.00	18.87	28.25	45.56	29.18	68.55	27.90	29.32	13.39	13.42
Sm	2.98	2.85	4.29	7.95	5.67	12.63	5.48	5.68	2.62	2.26
Eu	0.76	0.58	0.91	1.89	1.63	2.34	1.54	1.54	0.64	0.57
Gd	2.64	2.03	3.39	6.68	5.25	10.75	5.02	5.20	2.19	1.75
Tb	0.38	0.23	0.41	0.88	0.73	1.48	0.72	0.75	0.28	0.20
Hf	6.33	3.11	4.01	3.95	3.36	5.16	3.26	3.25	3.06	1.75
Dy	2.06	1.01	1.94	4.34	3.84	7.21	3.83	4.11	1.31	0.95
Ho	0.46	0.20	0.39	0.88	0.83	1.43	0.84	0.91	0.25	0.18
Er	1.21	0.51	0.94	2.31	2.19	3.59	2.23	2.43	0.63	0.46
Tm	0.17	0.07	0.13	0.31	0.30	0.46	0.31	0.33	0.09	0.06
Yb	1.13	0.51	0.74	1.91	1.91	2.86	2.05	2.12	0.52	0.38
Lu	0.18	0.08	0.10	0.30	0.31	0.44	0.33	0.33	0.08	0.06
Ta	0.37	0.22	0.35	0.44	0.38	0.29	0.38	0.40	0.15	0.07
Pb	13.84	10.77	12.41	5.11	6.98	23.04	9.00	7.12	9.30	4.98
Bi	0.07	0.06	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Th	5.64	6.13	8.86	2.29	2.12	0.21	2.08	2.11	0.37	2.06
U	1.01	0.79	1.35	0.59	0.39	0.17	0.40	0.41	0.17	0.07
Zr	221.72	110.91	144.68	143.74	125.08	221.06	122.10	121.94	118.55	70.70
δ Eu	0.81	0.70	0.70	0.77	0.90	0.60	0.88	0.85	0.80	0.85
(La/Yb) _N	15.06	33.31	32.90	15.99	9.62	10.89	7.33	7.43	15.12	23.47
(La/Sm) _N	5.33	5.60	5.27	3.59	3.03	2.30	2.56	2.59	2.80	3.69
(Gd/Yb) _N	1.88	3.19	3.72	2.82	2.21	3.03	1.98	1.98	3.40	3.71
ΣREE	112.68	105.02	157.55	226.07	140.66	289.02	127.54	132.79	75.65	66.18

解(图 5-b)中样品整体落入亚碱性区域,表明变质火山岩的原岩为亚碱性系列。

张岩沟变质基性火山岩 SiO₂ 含量 (44.75%~51.99%) 变化较大, 平均为 46.83%;TiO₂ 含量为 1.18%~1.65%,平均为 1.37%;全碱含量(4.18%~5.02%)相对较高,Na₂O/K₂O 为 25.13~52.00;Al₂O₃ 含量 (14.82%~18.43%)和 TFe₂O₃ 含量(10.35%~14.69%)中等,MgO(3.74%~6.74%)含量较低。变质中酸性火山岩 SiO₂ 含量(63.34~70.73%)较高,平均为 65.16%;A/CNK 为 0.83~1.18,平均为 0.99;全碱含量(6.86%~8.19%) 相对较高,Na₂O/K₂O 为 1.10~3.71,σ 值为 1.91~3.30;TiO₂ 含量(0.27%~0.66%,平均为 0.38%)、MgO 含量 (平均为 1.11%)、TFe₂O₃ 含量 (平均为 3.44%)较低。

4.2 稀土元素、微量元素特征

球粒陨石标准化稀土配分曲线(图 6-a)显示,张岩沟变质基性火山岩稀土含量较高 ($132.79\times10^{-6}\sim289.02\times10^{-6}$) 且变化较大,平均为 183.22×10^{-6} ,ΣLREE/ΣHREE 为 7.21~11.82; 稀土配分曲线强烈右倾,轻重稀土分异明显,(La/Yb)_N 为 7.33~15.99; (La/Sm)_N 为 2.30~3.59, 轻稀土分异较强,(Gd/Yb)_N 为 1.98~3.03,重稀土分异较轻稀土略低;整体表现出弱的铕负异常,个别异常较明显。变质中酸性火山岩稀土含量低于基性岩,为 $66.18\times10^{-6}\sim157.55\times10^{-6}$,平均为 103.41×10^{-6} ,ΣLREE/ΣHREE 为 12.70~21.59;稀土配分曲线强烈右倾,轻重稀土分异明显,(La/Yb)_N 为 15.06~33.31,平均为 23.97;轻稀土分异较强,(La/Sm)_N 为 2.59~5.60, 重稀土分异程度较轻

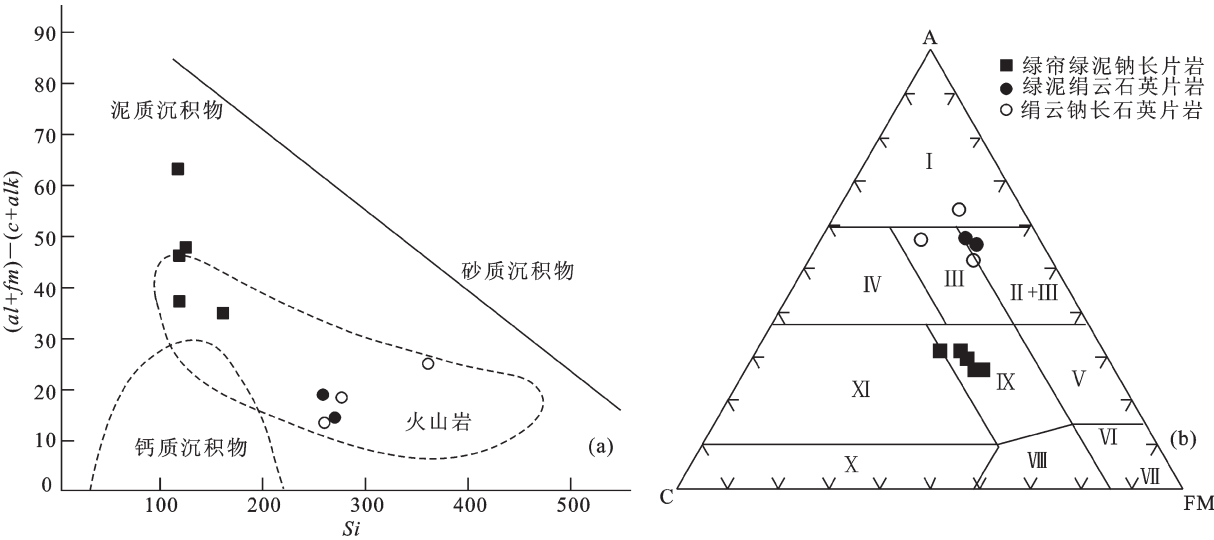


图 4 横现河地区张岩沟变质火山岩 Si-(al+fm)-(c+alk)图解(a)、A-C-FM 图解(b)
I—纯泥质岩; II—铁质泥质岩; III—中性—酸性火山岩; IV—钙质泥质岩; V—胶体化学沉积及泥质岩; VI—胶体化学沉积;
VII—超基性岩; VIII—超基性火山岩及部分白云质岩石; IX—基性火山岩及部分沉积灰质岩石; X—碳酸盐沉积岩;
XI—泥灰质沉积岩(图 a 据文献[31];图 b 据文献[32])

Fig.4 Si-[(al+fm)-(c+alk)] and A-C-FM diagrams of Zhangyanggou metavolcanite in Hengxianhe area
I -Mudstone; II -Ferruginous mudstone; III -Intermediate-acidic volcanic rocks; IV -Calcareous mudstone; V -Colloid chemical deposition and mudstone; VI -Colloid chemical deposition; VII -Ultrabasic rocks; VIII -Ultrabasic rock and partial dolomitic rocks; IX -Basic rock and partial sedimentary calcareous rocks; X -Carbonate sedimentary rocks; XI -Marly sedimentary rocks (Fig. a after reference [31]; Fig. b after reference [32])

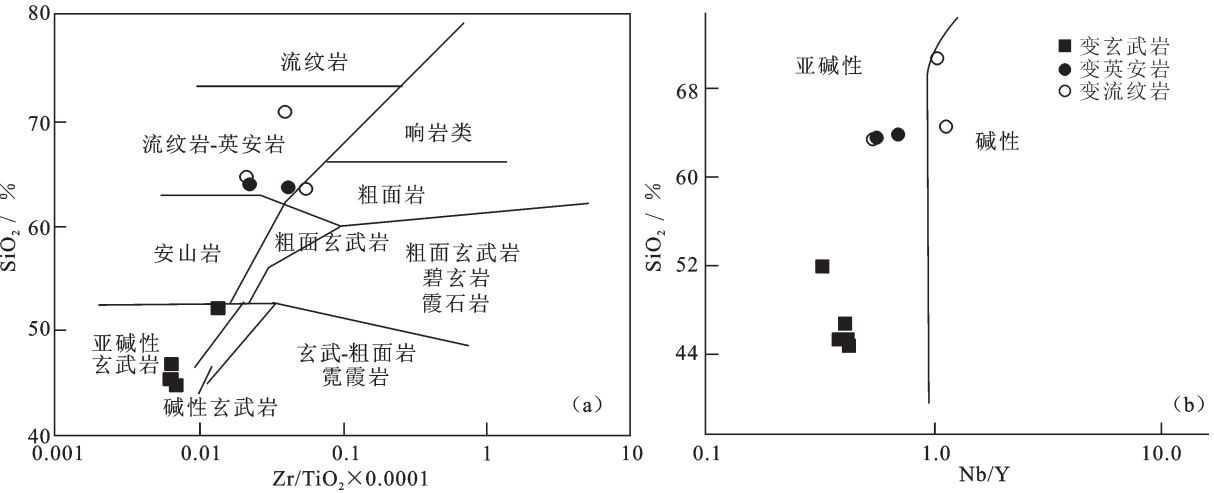


图 5 横现河地区张岩沟变质火山岩 Zr/TiO₂×0.0001-SiO₂ 图解(a)、Nb/Y-SiO₂ 图解(b) (据文献[33])
Fig.5 Zr/TiO₂×0.0001-SiO₂ and Nb/Y-SiO₂ diagrams of Zhangyanggou metavolcanite in Hengxianhe area
(after reference [33])

稀土略低,(Gd/Yb)_N 为 1.88~3.72,表现出弱的钕负异常。

由于张岩沟火山岩发生的绿片岩相变质作用和后期可能的流体交代作用对大离子亲石元素含量影响较大,本文选取了稳定性较好的高场强元素、稀土

元素来反映原岩特征。原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-b)显示,张岩沟变质基性火山岩高场强元素整体强烈富集,Nb、Ta、Ti、P、Sr 等相对亏损,曲线整体位于典型俯冲带玄武岩区域之上。变质中酸性火山岩高场强元素含量整体低于变质基性火山岩,

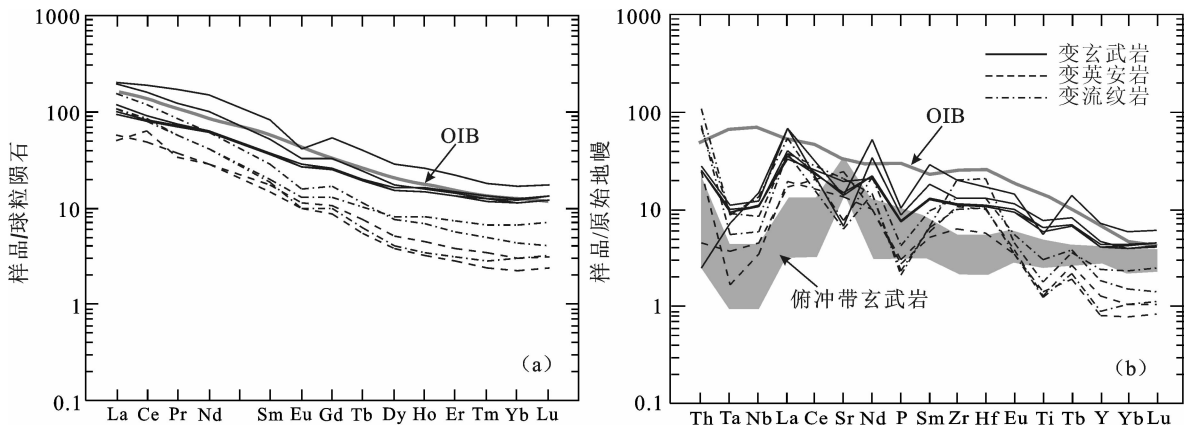


图 6 横现河地区张岩沟变质火山岩稀土元素配分型式(a)和原始地幔标准化蛛网图(b)
(球粒陨石数据据文献[34];OIB、原始地幔数据据文献[35];俯冲带玄武岩数据据文献[36])
Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle normalized trace elements diagrams (b) of Zhangyangou metavolcanite in Hengxianhe area (chondrite values after Reference [34], primitive mantle values after reference [35], data of island arc basalts after reference [36])

Nb、Ta、Ti、P 等相对亏损。

5 锆石 U-Pb 年代学

5.1 分析方法

为了获取张岩沟双峰式火山岩的形成年限,本次工作选取变流纹岩样品(M039-2)进行锆石挑选并制靶,锆石原位 U-Pb 同位素分析用西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器进行测定,分析仪器为 Elan 6100 DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas 200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm Arm 系统准分子激光器,激光剥蚀斑束直径为 30 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用 SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标元素进行校正。样品同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(4.0 版)软件,普通铅校正采用 Andersen 软件,年龄计算和成图采用 ISOPLOT(2.49 版)软件处理完成。

5.2 测试结果

样品 M039-2 为变流纹岩,锆石晶体呈浅黄色—无色,大部分颗粒较大,呈自形长柱状,个别颗粒较小呈短柱状。锆石 CL 图像(图 7)显示,晶体有少量溶蚀,破裂明显,韵带较清晰。选取 24 颗锆石进行 LA-ICP-MS 分析,分析结果见表 3,锆石因后期变质事件发生铅丢失整体分布在谐和曲线下方,仅 12 号点落在谐和曲线上(图 8-a)。

第一组、第二组和第四组锆石均为捕获的早期

锆石,年龄大于 1 Ga, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄比较接近锆石形成年龄,第三组锆石 ^{238}U 含量明显高于其他三组锆石,不仅可以第三组和其他组区分开,而且较高的 ^{238}U 含量表明 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄要比 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄更加适合作为其形成年龄。第一组(3、5~6、8~10、12、16、18 号点) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 (2383 ± 32) Ma (MSWD=0.98)(图 8-b),第二组锆石(11、13~15、19~24 号点) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 (2198 ± 39) Ma (MSWD=1.2)(图 8-c),第四组锆石(1 号点)年龄为 (2604 ± 50) Ma,为最早期的捕获锆石。捕获锆石组成较为复杂,但整体分布在两个年龄段,可以与更早期的地质事件相对应。第三组锆石(2、4、7 和 17 号点)为样品中最年轻的锆石, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (728 ± 10) Ma (MSWD=0.14)(图 8-a),其 Th/U 值为 0.48~1.42,韵带发育,为岩浆成因锆石,该组锆石年龄应代表流纹岩的成岩年龄。虽然样品 M039-2 锆石测点整体位于谐和曲线下方,但三组捕获锆石年龄与带内其他部位获得的谐和性较好的捕获锆石年龄具有较好的对应性且较为接近,暗示后期变质作用对成岩锆石年龄信息影响不大。另外,笔者在样品 M039-5 锆石中获得的年龄信息和本文获得的样品 M039-2 年龄信息十分接近,M039-5 中最年轻一组锆石年龄为 (725 ± 12) Ma,其余均为更老的捕获锆石,且捕获锆石年龄和样品 M039-2 十分接近,锆石整体发生铅丢失,落在谐和线下方(裴先治,未刊资料),进一步印证了该套双峰式火山岩成岩年龄

表 3 横现河地区张岩沟变质中酸性火山岩样品(M039-2)La-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 3 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope analytical data of Zhangyangou acidic-intermediate metavolcanite sample (M039-2) in Hengxianhe area

分组	测试点号	同位素含量/ 10^{-6}				Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma			
		^{208}Pb	^{232}Th	^{238}U	比值		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
第一组	3	22	244	375	0.65		5.859	0.0922	0.2727	0.0041	0.0449	0.0006	2411	51
	5	16	165	415	0.40		5.972	0.0921	0.2712	0.0041	0.0495	0.0007	2452	50
	6	58	1639	564	2.91		3.949	0.0774	0.1836	0.0030	0.0171	0.0003	2412	54
	8	44	423	416	1.02		5.775	0.0898	0.2649	0.0040	0.0496	0.0006	2436	49
	9	50	507	526	0.96		5.676	0.0906	0.2655	0.0041	0.0527	0.0007	2403	50
	10	64	687	786	0.87		3.918	0.0627	0.1906	0.0029	0.0444	0.0006	2336	50
	12	51	209	298	0.70		9.255	0.1395	0.4498	0.0068	0.1087	0.0014	2338	48
	16	27	281	301	0.94		6.584	0.0996	0.3171	0.0049	0.0390	0.0005	2355	47
	18	18	179	330	0.54		5.246	0.0781	0.2580	0.0039	0.0426	0.0006	2319	47
	11	33	330	623	0.53		3.810	0.0578	0.1963	0.0030	0.0464	0.0006	2237	49
第二组	13	43	401	636	0.63		3.866	0.0604	0.2027	0.0031	0.0485	0.0006	2208	49
	14	30	170	286	0.59		6.394	0.1097	0.3324	0.0052	0.0745	0.0012	2223	50
	15	41	558	555	1.01		3.643	0.0583	0.1977	0.0030	0.0308	0.0004	2148	49
	19	24	161	295	0.55		6.563	0.1077	0.3377	0.0053	0.0586	0.0009	2242	48
	20	48	403	504	0.80		3.694	0.0621	0.1956	0.0031	0.0469	0.0006	2192	49
	21	42	671	784	0.86		3.621	0.0627	0.1978	0.0031	0.0271	0.0004	2139	49
	22	44	364	460	0.79		5.451	0.0801	0.2743	0.0042	0.0512	0.0006	2281	46
	23	55	470	315	1.49		6.302	0.0975	0.3346	0.0052	0.0449	0.0006	2189	47
	24	46	320	522	0.61		3.554	0.0603	0.1979	0.0031	0.0512	0.0007	2106	49
	2	20	426	879	0.48		1.889	0.0303	0.1200	0.0018	0.0231	0.0003	1867	55
第三组	4	57	1743	1230	1.42		2.060	0.0409	0.1185	0.0019	0.0236	0.0004	2044	57
	7	50	766	1067	0.72		1.912	0.0297	0.1197	0.0018	0.0312	0.0004	1893	53
	17	39	534	1027	0.52		1.941	0.0290	0.1199	0.0018	0.0327	0.0004	1919	49
第四组	1	21	265	192	1.38		10.65	0.1703	0.4418	0.0067	0.0390	0.0006	2604	50
													2359	30
													2493	15

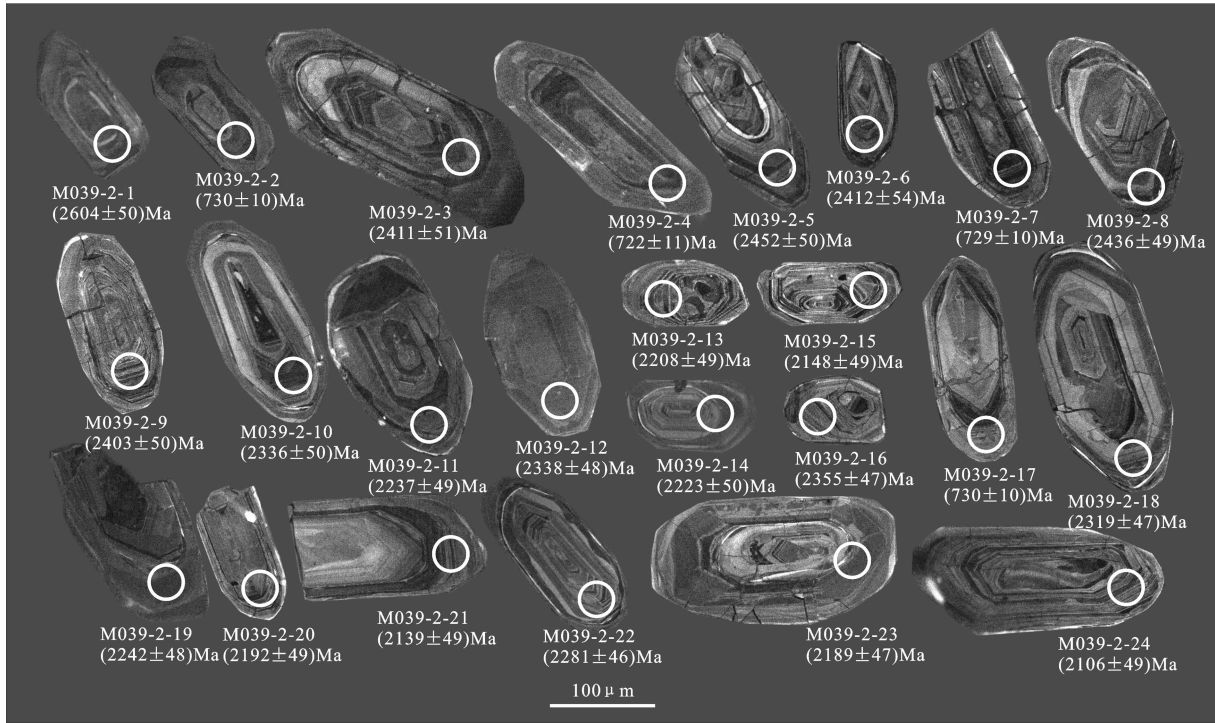


图 7 张岩沟变质中酸性火山岩样品(样号 M039-2)锆石 CL 照片及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄
(2、4、7 和 17 号点为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)

Fig.7 Cathodoluminescence (CL) images and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from Zhangyangou acidic-intermediate metavolcanite (sample M039-2)
(The ages of points 2, 4, 7 and 17 are $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages)

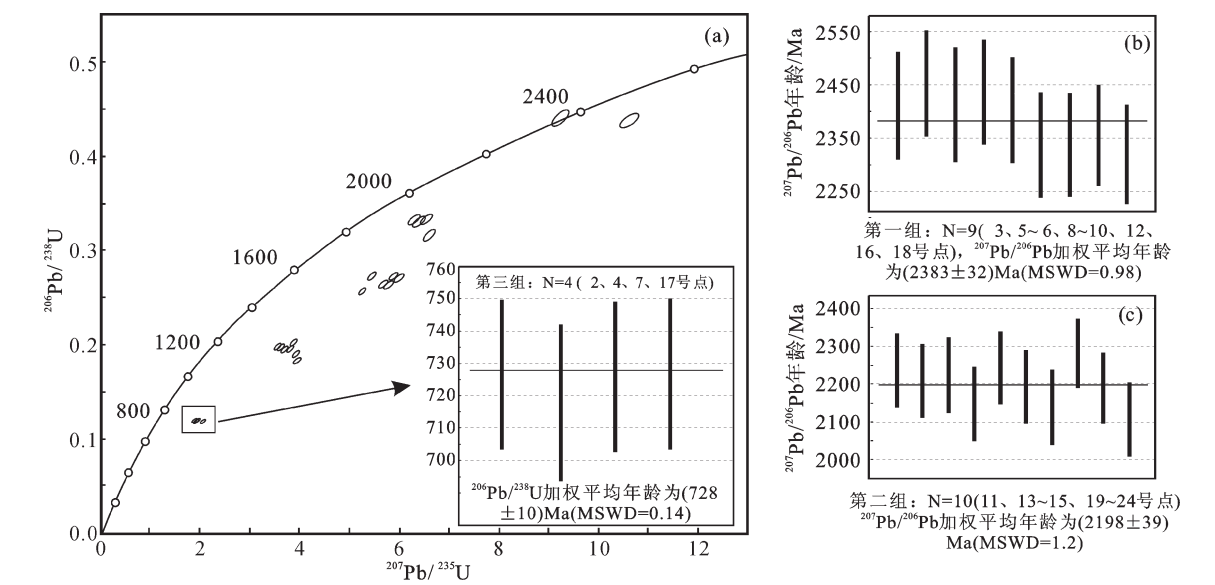


图 8 张岩沟变质中酸性火山岩样品(样号 M039-2)锆石 U-Pb 谐和图和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均图
Fig.8 Zircon U-Pb concordia and $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age diagrams of Zhangyangou acidic-intermediate metavolcanite (sample M039-2)

(728±10) Ma 的可靠性。

6 讨论

6.1 构造环境

双峰式火山岩的最显著特征是火山岩组合中出现的成分间断, Daly^[37]称之为 Daly gap, 基性火山岩和中酸性火山岩组合是双峰式火山岩的常见组合。研究发现, 双峰式火山岩可产生于大陆裂谷、洋内岛弧、成熟岛弧、活动陆缘、弧后盆地等不同的构造环境, 但主要形成于大陆裂谷环境^[38-44]。

张岩沟中酸性火山岩地球化学特征主要受控于其壳源性质, 并非成岩环境, 因此本文主要通过基性火山岩地球化学特征来确定该套双峰式火山岩的形成环境。横现河地区张岩沟玄武岩 Nb/La 值为 0.18~0.34, 与上地壳(0.39)接近; Nb/U 值基本介于 14.64~19.07, La/Sm 值为 3.66~5.71, Th/Nb 值基本介于 0.27~0.28, 与中下地壳 (分别为 7.69~25.00、2.86~5.22、0.24~0.65) 相近^[45], 表明受到较强的陆壳物质混染。而陆壳物质的混入会对玄武岩 Ti、Ta、Nb 等元素的含量产生较大影响, 导致高场强元素段呈现 Ti、Ta、Nb 谷, 在构造环境恢复的过程中可能误判为弧环境^[46-47]。Zr、Y 等元素的含量受地壳物质混染影响不大, 可以较准确地反映玄武岩的形成环境^[48], 张岩沟玄武岩具有较高的 Zr 含量($121.94 \times 10^{-6} \sim 221.06 \times 10^{-6}$)与较高的 Zr/Y 值(6.13~6.87), 在 Zr-Zr/Y 图解(图 9)中, 样品全部落入板内玄武岩区域, 表明其形成于板内环境。另外, 张岩沟双峰式火山岩形成于新元古代中晚南华世 (728±10) Ma, 结合区域地质背景, 扬子板块及周缘在中晚南华世已经处于大陆减薄的体制下, 不可能是弧-陆俯冲碰撞事件的产物, 而应形成于大陆裂谷环境。

6.2 岩石成因

双峰式火山岩的基性端元源自地幔岩部分熔融的成因模式基本得到学术界认同。酸性端元通常认为有两种成因, 即基性岩浆分离结晶成因和地壳物质部分熔融成因。基性岩浆分离结晶成因是指中酸性端元和基性端元具有共同的幔源母岩浆, 在分离结晶过程中几乎没有陆壳物质的加入^[49-50], 两个端元岩石具有相似的微量元素特征^[51], 且基性端元比例较大; 地壳物质部分熔融成因是指基性岩浆在侵入地壳的过程中, 使地壳物质发生部分熔融而产生中酸性岩浆^[52-53], 中酸性端元比基性端元产出面积

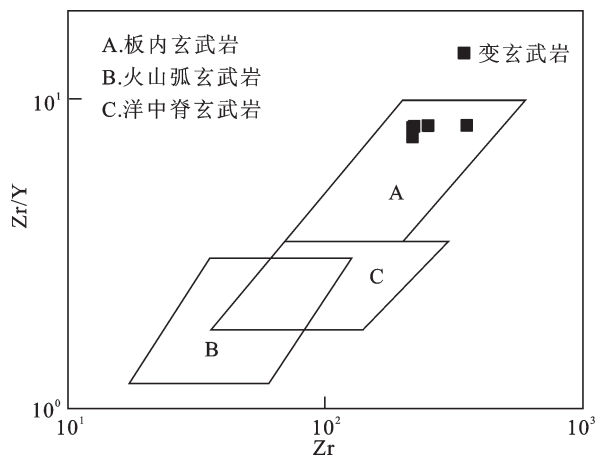


图9 张岩沟变质基性火山岩 Zr-Zr/Y 构造环境判别图解(据文献[48])

Fig.9 Zr-Zr/Y tectonic environments discrimination diagram of Zhangyangou basic metavolcanite (after Reference [48])

大得多^[54-55]。张岩沟地区出露的基性火山岩面积较小, 并且区域上缺少同时代相似构造环境基性岩的大规模出露, 表明中酸性火山岩不大可能是结晶分离成因; 另外, 在球粒陨石标准化稀土配分曲线中, 张岩沟基性火山岩含量明显高于中酸性火山岩, 且中酸性岩无十分明显的铕负异常, 这用分离结晶成因是无法解释的^[56-57], 因此判定中酸性火山岩为地壳物质部分熔融形成的。另外, 我们注意到, 张岩沟玄武岩稀土元素含量与典型 OIB(198.96×10^{-6})十分接近^[58], 且稀土总含量高于中酸性样品(图 6-a), 玄武岩样品高场强元素段整体含量高于典型俯冲带玄武岩含量^[59], 与典型 OIB 含量较为接近(图 6-b), 暗示其源区可能为类似 OIB 的富集型源区。

6.3 构造意义

勉略构造带的构造属性和年限一直是争论的焦点, 学术界对此也持有不同的观点。经典观点认为勉略构造带是于晚古生代初期开始扩张并逐渐形成的勉略洋在中晚三叠世洋盆俯冲碰撞形成的一条板块缝合带^[1-12]。但近年来的同位素年代学研究表明, 勉略带内许多典型镁铁—超镁铁质岩均形成于新元古代, 并认为与 Rodinia 超大陆的汇聚及裂解存在密切联系^[13-23]。

扬子板块周缘新元古代岩浆活动十分发育, 目前学术界对它们的成因主要存在三种对立观点: ①地幔柱模式, 认为扬子地块周缘新元古代早期(>900 Ma)岩浆岩形成于岛弧环境, 与 Rodinia 超大陆的汇

聚相对应,而新元古代中期(860~740 Ma)的岩浆岩形成于板内环境,并与导致 Rodinia 超级大陆裂解的地幔柱活动存在密切联系^[58-64];②岛弧模式,认为扬子地块周缘新元古代岩浆岩形成于大陆边缘弧环境,俯冲汇聚过程可能持续到 0.74 Ga 或更晚^[65-70];③板块—裂谷模式^[71-72],认为扬子和华夏陆块的造山运动持续到约 820 Ma,之后的岩浆活动形成于岩石圈伸展环境。

闫全人等^[14]对勉略带康县—勉县蛇绿岩块—镁铁质岩块的 SHRIMP 测年结果表明,康县附近的大堡、香子坝、水泉沟等变质基性火山岩以及三岔子偏桥沟、勉县峡口驿、宁强县大安镇观音岩等辉长岩均形成于新元古代(808~841 Ma)。值得注意的是,闫全人等^[14]获取的上述新元古代年龄中出现许多南华纪年龄信息(694~765 Ma),并且这些锆石普遍发生铅丢失而落在谐和线下,表明带内后期构造—热事件对 U—Pb 体系影响的普遍性。铼厂沟陆缘弧型双峰式火山岩 LA—ICP—MS 锆石 U—Pb 年龄为 (802±5) Ma,表明勉略地区在(802±5) Ma 仍处于板块汇聚体制下^[23];勉略带琵琶寺洋岛—洋脊型基性火山岩 LA—ICP—MS 锆石 U—Pb 年龄为 783~754 Ma^[16],表明在 783~754 Ma 勉略地区局部已经形成了有限洋盆。近两年,本文课题组在勉略带略阳—康县一带进行了密集、系统的野外调查和室内分析工作,初步确定带内较大火山岩片(庄科、黑沟峡、纸房沟等岩片)内的火山岩具有良好的分带性和时空对应关系,获得北部弧带内不同位置中酸性火山岩年龄均介于 800~847 Ma(裴先治,未刊资料),结合本文获得的张岩沟大陆双峰式火山岩年龄 (728±10) Ma,认为将 800 Ma 作为勉略地区初始裂解的年限可能更为妥当。考虑到 Rodinia 超大陆裂解过程在扬子周缘也可能是穿时的,对于整个扬子板块而言本文更倾向于地幔柱模式。

7 结 论

(1)横现河地区张岩沟变质火山岩由紧密共生的灰绿色绿帘绿泥钠长片岩、灰白色绢云钠长石英片岩和浅灰绿色绿泥绢云石英片岩组成,其原岩为亚碱性玄武岩和亚碱性流纹岩—英安岩,缺少中性端元,具有典型的“双峰式”组合特征。

(2)张岩沟中酸性火山岩为地壳部分熔融产物,而非分离结晶成因。玄武岩表现出板内玄武岩特征,

其具有的弧印记应为陆壳物质混染所致。结合区域地质背景,判定张岩沟双峰式火山岩为地壳减薄机制下大陆裂谷环境下的产物。

(3)张岩沟双峰式火山岩形成于新元古代中晚南华世(728±10) Ma 大陆裂谷环境,预示着该地区新元古代洋盆的打开,是 Rodinia 超大陆裂解在扬子北缘的响应。

致谢: 研究成果为许志琴院士主持的中国地质调查局地质调查项目“中央造山带构造格架、南北板块汇聚及中国大陆钻探岩心综合研究”的一部分。室内外工作得到胡波、林广春等讲师和魏方辉、高景民、吴树宽、王银川等硕士的大力帮助,论文修改过程中得到审稿老师许多中肯的意见和建议,在此表示衷心感谢。

参考文献(References):

[1] 张国伟,程顺有,郭安林,等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合 [J]. 地质通报, 2004, 23(9/10): 846—853.
Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling—Dabie—with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23 (9/10): 846—853 (in Chinese with English abstract).

[2] 李曙光,孙卫东,张国伟,等. 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[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 223—230.
Li Shuguang, Sun Weidong, Zhang Guowei, et al. Geochronology and geochemistry of Heigouxia metamorphic volcanic rocks from Mianlue tectonic zone, South Qinling Mountains: Evidence for the closing time of Paleozoic oceanic basin [J]. Science in China(Series D), 1996, 26(3): 223—230(in Chinese).

[3] 裴先治. 勉略—阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征[D]. 西北大学博士学位论文, 2001: 1—154.
Pei Xianzhi. Geological Evolution and Dynamics of the Mianlue—A’nyemaqen Tectonic Zone, Central China [D]. The Northwest University Ph.D.Thesis, 2001: 1—154(in Chinese with English abstract).

[4] 张国伟,孟庆任,赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B 辑), 1995, 25(9): 994—1003.
Zhang Guowei, Meng Qingren, Lai Shaocong. Structure of the Qinling orogenic belt [J]. Science in China (Series B), 1995, 25(9): 994—1003(in Chinese).

[5] 张国伟,张宗清,董云鹏. 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[J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101—114.
Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. Structural characteristics and tectonic significance of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogenic belt [J]. Acta

- Petrologica Sinica, 1995, 11 (2): 101-114 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 秦岭造山带的造山过程及动力学特征[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 193-200.
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, et al. Orogenic process and dynamic characteristics of the Qinling orogenic belt[J]. Science in China(Series D), 1996, 26(3): 193-200(in Chinese with English abstract).
- [7] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-855.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855(in Chinese with English abstract).
- [8] 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学(D 辑), 2003, 33(12): 1121-1135.
- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Lai Shaocong, et al. Mianlue tectonic zone and Mianlue paleo-suture on the southern margin of the central orogenic system in Qinling-Dabie [J]. Science in China (Series D), 2003, 33 (12): 1121-1135 (in Chinese with English abstract).
- [9] 冯庆来, 杜远生, 殷鸿福, 等. 南秦岭勉略蛇绿混杂岩带中放射虫的发现及其意义[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(增刊): 78-82.
- Feng Qinglai, Du Yuansheng, Yin Hongfu, et al. The discovery and its significance of the radiolaria in Mianlue ophiolitic melange belt, south Qinling Mountains [J]. Science in China (Series D), 1996, 26 (Supp.): 78-82(in Chinese with English abstract).
- [10] 杜远生, 盛吉虎, 韩欣, 等. 南秦岭勉(县)—略(阳)构造混杂岩带的泥盆纪—石炭纪古海洋演化[J]. 古地理学报, 1999, 1(4): 54-60.
- Du Yuansheng, Sheng Jihu, Han Xin, et al. Palaeocean evolution of Devonian -Carboniferous in tectonic melange zone of Mianxian -Lueyang in South Qinling Mountains [J]. Journal of Palaeogeography, 1999, 1 (4): 54-60 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李亚林, 李三忠, 张国伟. 秦岭勉略缝合带组成与古洋盆演化[J]. 中国地质, 2002, 29(2): 129-134.
- Li Yalin, Li Sanzhong, Zhang Guowei. Composition of the Mianlue suture zone and its relation with the evolution of the old oceanic basin [J]. Geology in China, 2002, 29 (2): 129-134 (in Chinese with English abstract).
- [12] 王娟, 李鑫, 赖绍聪, 等. 印支期南秦岭西荏河、五龙岩体成因及构造意义[J]. 中国地质, 2008, 35(2): 207-216.
- Wang Juan, Li Xin, Lai Shaocong, et al. Petrogenesis of the early Triassic Xichahe and Wulong plutons in the South Qinling Mountains and their tectonic significance [J]. Geology in China, 2008, 35(2): 207-216 (in Chinese with English abstract).
- [13] 王宗起. 南秦岭中段碰撞造山带及其与陆缘盆地演化的耦合关系[D]. 中国科学院地质研究所博士学位论文, 1998: 1-103.
- Wang Zongqi. The Coupling Relationship Between the Middle Part of South Qinling Mountains Orogenic Belt and the Evolution of Continental Margin Basin [D]. The Chinese Academy of Geological Sciences Ph.D.Thesis, 1998: 1-103 (in Chinese with English abstract).
- [14] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭勉略构造混杂岩带康县—勉县段蛇绿岩块—镁铁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 755-763.
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, et al. SHRIMP analyses for ophiolitic—mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang melange: Their geological implications [J]. Geological Review, 2007, 53 (6): 755-763 (in Chinese with English abstract).
- [15] 张宗清, 唐索寒, 张国伟, 等. 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 [J]. 地质学报, 2005, 79(4): 531-539.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Zhang Guowei, et al. Ages of metamorphic mafic -andesitic volcanic rock blocks and tectonic evolution complexity of Mianxian-Lueyang ophiolitic melange belt [J]. Acta Geological Sinica, 2005, 79(4): 531-539(in Chinese with English abstract).
- [16] 李瑞保, 裴先治, 丁仁平, 等. 西秦岭南缘勉略带琵琶寺基性火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1613-1623.
- Li Ruibao, Pei Xianzhi, Ding Saping, et al. LA-CP-MS zircon U-Pb dating of the Pipasi basic volcanic rocks within the Mian-Lue tectonic zone in the southern margin of West Qinling and its geological implication [J]. Acta Geological Sinica, 2009, 83 (11): 1613-1623(in Chinese with English abstract).
- [17] 张宗清, 张国伟, 付国民, 等. 秦岭变质地层年龄及其构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(3): 216-222.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Fu Guomin, et al. Ages and significance of metamorphic strata in Qinling Mountains[J]. Science in China(Series D), 1996, 26(3): 216-222(in Chinese with English abstract).
- [18] 张宗清, 唐索寒, 王进辉, 等. 秦岭蛇绿岩的年龄: 同位素年代学和古生物证据, 矛盾及其理解 [C]//张旗主编. 蛇绿岩与地球动力学. 北京: 地质出版社, 1996: 146-149.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Wang Jinhui, et al. Ages of Ophiolite in Qinling Mountains: Isotopic Geochronology and Palaeontological Evidence, Contradiction and Understanding[C]// Zhang Qi (ed.). The Ophiolite and Geodynamics. Beijing: Geological Publishing House, 1996: 146-149 (in Chinese with English abstract).
- [19] 张宗清, 唐索寒, 宋彪, 等. 秦岭造山带晋宁期强烈地质事件及其构造背景[J]. 地球学报, 1997, 18(增刊): 43-45.
- Zhang Zongqing, Tang Suohan, Song Biao, et al. Jinning strong geological events to take place in the Qinling Orogenic Belt and their tectonic setting [J]. Acta Geoscientica Sinica, 1997, 18(Supp.): 43-45(in Chinese with English abstract).
- [20] 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 秦岭勉略带中安子山麻粒岩的年龄[J]. 科学通报, 2002, 47(22): 1751-1755.

- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, et al. The Age of Anzishan granulite in Mian-Lue tectonic zone, Qinling Mountains [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (22): 1751-1755 (in Chinese).
- [21] 张宗清, 张国伟, 唐索寒. 南秦岭变质地层同位素年代学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1-256.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan. Isotope Chronology of Metamorphic Stratum in Qinling Mountains [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1-256 (in Chinese with English abstract).
- [22] 张宗清, 张国伟, 刘敦一, 等. 秦岭造山带蛇绿岩、花岗岩和碎屑沉积岩同位素年代学和地球化学 [M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1-348.
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Liu Dunyi, et al. Isotope Chronology and Geochemistry of Ophiolite, Granite and Clastic Sedimentary Rocks in Qinling Orogenic Belt [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1-348 (in Chinese with English abstract).
- [23] 林振文, 秦艳, 周振菊, 等. 南秦岭勉略带铀厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究 [J]. 岩石学报, 2013, 29(1): 83-94.
- Lin Zhenwen, Qin Yan, Zhou Zhenju, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachanggou area, Mian-Lue suture, South Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 83-94 (in Chinese with English abstract).
- [24] 杨志华, 邓亚婷. 秦岭造山带组成结构与演化的新认识 [J]. 陕西地质, 1999, 17(2): 16-32.
- Yang Zhihua, Deng Yating. New viewpoints of the composition, structure and evolution of Qinling orogenic belt [J]. Geology of Shaanxi, 1999, 17(2): 16-32 (in Chinese with English abstract).
- [25] 冯益民, 曹宣铎, 张二鹏. 勉县—略阳带大地构造属性之探讨 [J]. 地质论评, 2004, 50(3): 295-303.
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. Discussion on the tectonic features of the Mianxian-Lueyang zone [J]. Geological Review, 2004, 50(3): 295-303 (in Chinese with English abstract).
- [26] 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应 [J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 135-148.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, et al. Response of volcanism to the India-Asia collision [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 135-148 (in Chinese with English abstract).
- [27] 赖绍聪, 秦江峰. 南秦岭勉略缝合带蛇绿岩与火山岩 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 1-257.
- Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. Ophiolitic and Volcanic Rocks in Mian-Lue Suture, Southern Qinling Mountains [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-257 (in Chinese with English abstract).
- [28] 邓晋福, 赵海玲, 莫宣学, 等. 中国大陆根柱构造——大陆动力学的钥匙 [M]. 北京: 地质出版社, 1996: 1-110.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, et al. Continental Roots-plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics [M]. Beijing: Geology Press, 1996: 1-110 (in Chinese with English abstract).
- [29] 李亚林, 张国伟, 王成善, 等. 秦岭勉县—略阳地区的构造混杂岩及其意义 [J]. 岩石学报, 2001, 17(3): 476-482.
- Li Yalin, Zhang Guowei, Wang Chengshan, et al. Characteristics and implication of the tectonic melanges in Mianxian-Lueyang area, Qinling orogenic belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2001, 17(3): 476-482 (in Chinese with English abstract).
- [30] 卢海峰, 王宗起, 王涛, 等. 西秦岭关家沟组的沉积环境及其物源 [J]. 现代地质, 2005, 19(3): 394-402.
- Lu Haifeng, Wang Zongqi, Wang Tao, et al. Sedimentary environment and provenance of the Guanjiagou formation of the Western Qinling Mountains [J]. Geoscience, 2005, 19(3): 394-402 (in Chinese with English abstract).
- [31] Simonen, A. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland [J]. Bulletin of the Geological Society of Finland, 1953, 160: 1-64.
- [32] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 1-199.
- Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. Recovery of Metamorphic Rocks [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 1-199.
- [33] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325-343.
- [34] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth element: Meteorite studies [C]//Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- [36] Tatsumi Y, Eggins S M. Subduction Zone Magmatism [M]. Cambridge, Boston: Black Well Science, 1995: 1-211.
- [37] Daly R A. The geology of Ascension Island [J]. Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences, 1925, 60: 1-80.
- [38] Duncan A R, Erlank A J, Marsh J S. Regional geochemistry of the Karoo igneous province [J]. Geological Society of South Africa Special Publication, 1984, 13: 355-388.
- [39] Garland F, Hawkesworth C J, Mantovani M S M. Description and petrogenesis of the Parana rhyolites, Southern Brazil [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 1193-1227.
- [40] Geist D, Howard K A, Larson P. The generation of oceanic rhyolites by crystal fractionation: The basalt-rhyolite association at Volcan Alcedo, Galapagos Archipelago [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 965-982.
- [41] Frey F A, Gerlach D C, Hickey R L, et al. Petrogenesis of the Laguna del Maule volcanic complex, Chile (36°S) [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1984, 88: 133-149.
- [42] Donnelly T W, Rogers J J W. Igneous series in island arcs: The northeastern Caribbean compared with world-wide island-arc assemblages [J]. Bulletin Volcanologique, 1980, 43: 347-382.

- [43] Hochstaedter A G, Gill J B, Kusakabe M, et al. Volcanism in the Sumisu Rift. I. Major element, volatile and stable geochemistry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 100: 179–194.
- [44] Hochstaedter A G, Gill J B, Morris J D. Volcanism in the Sumisu Rift. II. Subduction and non-subduction related components[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1990, 100: 195–209.
- [45] Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the continental crust [C] // Rudnick R L, Holland H D, Turekian K K (eds.). The Crust: Vol.3. Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier–Pergamon, 2003: 1–64.
- [46] Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in Large Igneous Province research[J]. Lithos, 2005, 79: 271–297.
- [47] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, 26(1): 77–88. Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2007, 26 (1): 77–88(in Chinese with English abstract).
- [48] Pearce J A. Trace element characteristics of Lava from destructive plate boundaries [C] // Thorpe R S (ed.). Andesites, Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley and Sons, 1982: 525–548.
- [49] Grove T L, Donnelly–Nolan J M. The evolution of young silicic lavas at Medicine Lake Volcano, California: Implications for the origin of compositional gaps in calc–alkaline series lavas [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92: 281–302.
- [50] Macdonald R, Sparks R S J, Sigurdsson H, et al. The 1875 eruption of Askja volcano, Iceland: Combined fractional crystallization and selective contamination in the generation of rhyolitic magma[J]. Mineralogical Magazine, 1987, 51: 183–202.
- [51] Brouxel M, Lapierre H, Michard A, et al. The deep layers of a Paleozoic arc: Geochemistry of the Copley–Blaklala series, northern California [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1987, 85: 386–400.
- [52] Holmes A. The problem of the association of acid and basic rocks in central complexes[J]. Geological Magazine, 1931, 68: 241–255.
- [53] Sigurdsson H. Generation of Icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer[J]. Nature, 1997, 269: 26–28.
- [54] Davies G R, Macdonald R. Crustal influences in the petrogenesis of the Naivasha basalt–comendite complex: Combined trace element and Sr–Nd–Pb isotope constraints[J]. Journal of Petrology, 1987, 28: 1009–1031.
- [55] Huppert H E, Sparks R S J. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust [J]. Journal of Petrology, 1988, 29: 599–624.
- [56] Marlina A E, John F. Geochemical response to varying tectonic settings: An example from southern Sulawesi (Indonesia) [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(7/8): 1155–1172.
- [57] Coish R A, Hickey R, Frey F A. Rare earth element geochemistry of the Betts Cove ophiolite, New foundland: Complexities in ophiolite formation [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46: 2117–2134.
- [58] Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn–rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 85–109.
- [59] Li Xianhua, Zhu Weiguang, Zhong Hong, et al. The Tongde picritic dikes in the Western Yangtze Block: Evidence for Ca. 800 Ma mantle plume magmatism in South China during the breakup of Rodinia[J]. Journal of Geology, 2010, 118(5): 509–522.
- [60] Zhu Weiguang, Zhong Hong, Li Xianhua, et al. SHRIMP zircon U–Pb geochronology, elemental, and Nd isotopic geochemistry of the Neoproterozoic mafic dykes in the Yanbian area, SW China[J]. Precambrian Research, 2008, 164(1/2): 66–85.
- [61] Lin Guangchun, Li Xianhua, Li Wuxian. SHRIMP U–Pb zircon age, geochemistry and Nd–Hf isotope of Neoproterozoic mafic dyke swarms in Western Sichuan: Petrogenesis and tectonic significance[J]. Science in China(Series D), 2007, 50(1): 1–16.
- [62] 凌文黎, 王歆华, 程建萍. 扬子北缘晋宁期望江山基性岩体的地球化学特征及其构造背景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20 (4): 218–221. Ling Wenli, Wang Xinhua, Cheng Jianping. Geochemical features and its tectonic implication of the Jinningian Wangjiangshan gabbros in the North Margin of Yangtze Block [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2001, 20(4): 218–221(in Chinese with English abstract).
- [63] 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA–ICP–MS 锆石 U–Pb 同位素年代学的约束 [J]. 岩石学报, 2006, 22(2): 387–396. Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, et al. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: Constraint from the ELA–ICP–MS U–Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(2): 387–396(in Chinese with English abstract).
- [64] 杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 等. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的厘定及其地质意义[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 647–657. Yang Chonghui, Geng Yuansheng, Du Lilin, et al. The identification of the Grenvillian granite on the western margin of the Yangtze Block and its geological implications [J]. Geology in China, 2009, 36(3): 647–657(in Chinese with English abstract).
- [65] Zhou Meifu, Yan Danping, Wang Changliang, et al. Subduction–related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006, 248: 286–300.
- [66] Zhao Junhong, Zhou Meifu. Neoproterozoic adakitic plutons and arc magmatism along the western margin of the Yangtze Block,

- South China[J]. *Journal of Geology*, 2007, 115: 675–689.
- [67] Zhao Junhong, Zhou Meifu. Neoproterozoic adakitic plutons in the northern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a thickened lower crust and implications for secular crustal evolution [J]. *Lithos*, 2008, 104: 231–248.
- [68] Chen Yuelong, Luo Zhaohua, Zhao Junxiang, et al. Petrogenesis and dating of the Kangding complex, Sichuan Province[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 48(5): 622–634.
- [69] Sun Weihua, Zhou Meifu, Yan Danping, et al. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China) [J]. *Precambrian Research*, 2008, 167: 213–236.
- [70] Zhao Xinfu, Zhou Meifu, Li Jianwei, et al. Association of Neoproterozoic A – and I –type granites in South China: Implications for generation of A –type granites in a subduction – related environment[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257, 1–2: 1–15.
- [71] Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, et al. Rift melting of juvenile arc –derived crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan orogen, South China[J]. *Precambrian Research*, 2008, 163(3–4): 351–383.
- [72] Zheng Yongfei, Zhang Shaobing, Zhao Zifu, et al. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: Implications for growth and reworking of continental crust[J]. *Lithos*, 2007, 96: 127–150.

Geochemical characteristics, LA–ICP–MS zircon U–Pb dating and tectonic significance of Zhangyangou bimodal volcanic rocks in Hengxianhe area, Mian–Lue tectonic zone

XU Tong¹, PEI Xian–zhi^{1,2}, LI Rui–bao^{1,2}, LI Zuo–chen^{1,2}, PEI Lei³, LIU Cheng–jun¹,
CHEN You–xin¹, WANG Xiao–wei¹, YANG Jie¹, HU Nan¹

(1. School of Earth Science and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. School of Earth Science and Land Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Zhangyangou bimodal volcanic rocks are located in Hengxianhe area, Sanchazi–Lueyang segment of Mian–Lue tectonic zone. The bimodal volcanic rocks consist of metamorphosed basic volcanic rocks and metamorphosed acid–intermediate rocks in close association, and the protoliths are sub–alkaline basalt and sub–alkaline rhyolitic–dacite. On account of the higher REE concentrations in basalt than in rhyolitic–dacite, the authors hold that the origin of rhyolitic–dacite was partial melting of the crustal material rather than the fractional crystallization of the basaltic magma. Basic volcanic rocks show the intraplate geochemical characteristics such as high Zr concentrations and Zr/Y ratios, and their marks of arc result from the hybridism of the crustal material. The result of U–Pb isotope dating by means of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry makes it clear that the formation age of the rhyolite is (728 ± 10) Ma ($n=4$, MSWD=0.14). Combined with the regional geological background, the authors consider that Zhangyangou bimodal volcanic rocks were formed in a continental rift environment under the crust extensional mechanism. The formation of Zhangyangou bimodal volcanic rocks heralded the opening of Neoproterozoic Ocean. This new achievement is of important significance both for the further study of the evolution of Mian–Lue tectonic zone and the breakup of Rodinia supercontinent and other continents on the north margin of the Yangtze block.

Key words: bimodal volcanic rocks; continental rift; Rodinia; Zhangyangou; Mian–Lue tectonic zone

About the first author: XU Tong, male, born in 1988, doctoral candidate, mainly engages in the study of tectonic geology; E–mail: xutong1988819@163.com.

About the corresponding author: PEI Xian–zhi, born in 1963, doctor, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of structural geology and regional geology; E–mail: peixzh@263.net.