南秦岭勉略构造带黑沟峡火山岩年代学及地球化学特征

——新元古代勉略洋盆存在及俯冲的记录

徐通[1,2)]，裴先治[2,3)]，李瑞保[2,3)]，刘成军[2,3)]，陈有炘[2,3)]，李佐臣[2,3)]，裴磊[4)]，左文乾[1)]

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

内容提要： 黑沟峡火山岩位于南秦岭勉（县）略（阳）构造带略阳地区，由拉斑玄武岩及少量钙碱性安山岩组成。对黑沟峡火山岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学和岩石地球化学研究。结果显示，黑沟峡安山岩LA-ICP-MS U-Pb测年结果为807±13Ma（MSWD=3.6，n=14），限定其形成时代为新元古代中期。玄武岩SiO_2含量为43.54%～54.51%，富Na贫P，稀土配分曲线整体左倾，整体表现出N型洋脊玄武岩地球化学特征，其源区受到再循环物质的改造。安山岩SiO_2含量较高（57.92%～60.71%），Na_2O和K_2O含量变化大，Nb、Ta、P、Ti等负异常明显，La/Yb、Sc/Ni、Th/Yb等微量元素特征表现出大陆边缘弧火山岩地球化学特征；较高的$Mg^{\#}$值（40.40～60.72）以及变化较大的Cr、Ni含量、A/CNK值（0.58～1.62），表明安山岩为壳幔混合成因。本文研究表明，黑沟峡火山岩并非前人认为的晚古生代“双峰式火山岩”，而是新元古代勉略洋盆存在及俯冲作用的产物。结合区域资料，认为勉（县）略（阳）地区存在新元古代早中期弧—盆体系，且洋盆北向俯冲作用持续到800 Ma左右，该过程很可能是对Rodinia超大陆聚合事件的响应。

关键词： 勉略构造带；黑沟峡火山岩；新元古代弧—盆体系；南秦岭南缘；Rodinia超大陆

勉略（勉县—略阳）构造带是近十几年来发现的秦岭造山带内又一条板块缝合带，其与商丹（商南—丹凤）缝合带以及被二者分割的华北板块、秦岭微板块、扬子板块共同奠定了中央造山系中部“三山夹两缝”的基本构造格局（张国伟等，2001，2004，2016；裴先治，2001；Dong Yunpeng et al.，2011）。自20世纪70年代末至今勉略构造带的研究取得了大量的研究成果，但仍存分歧。经典观点认为勉略构造带是代表晚古生代—早中生代有限洋盆的蛇绿构造混杂岩带，带内蛇绿岩及不同性质火山岩均形成于晚古生代，相应的勉略洋为古特提斯的分支（张国伟等，2001，2004；冯庆来等，1996；李曙光等，1996，2003；Dong Yunpeng et al.，2011）。由于经典观点主要依据勉略构造带三岔子偏桥沟和石家庄一带的硅质岩中发现的早石炭世放射虫化石和泥盆纪牙形石化石（冯庆来等，1996）来限定蛇绿岩及相关火山岩的时代，受当时测试条件制约未获得系统的年代学测试数据，并且三岔子周边硅质岩现今已呈构造岩片形式产出，其构造归属（是否为蛇绿岩端元）仍待进一步研究，因此一直有学者对经典观点存在质疑（杨志华等，1999；冯益民等，2004），认为勉略带不具有板块缝合带性质，勉略地区在晚古生代—三叠纪时期不存在有限洋盆或小洋盆，而是泥盆纪—石炭纪时期的裂谷。近年来报道的勉略构造带内蛇绿岩及不同类型的岩浆岩（火山岩占主体）主体形成于新元古代（闫全人等，2007；王涛，2008；李瑞保等，2011；林振文等，2013；徐通等，2013，2016）。王宗起等（2009）认为勉略地区发育新元古代—早中生代洋盆，该洋盆在泥盆纪—早中生代处于持续南向俯冲、北向增生阶

注：本文为中国地质调查局地质调查项目（编号：1212011120161），国家自然科学基金资助项目（编号：41472191，41172186，40972136，40572121），高等学校博士学科点专项科研基金资助项目（编号：20110205110004）和中央高校基本科研业务专项基金资助项目（编号：CHD2011TD020，2013G1271092，2013G1271091）的成果。

收稿日期：2016-08-15；改回日期：2017-02-04；责任编辑：章雨旭。Doi：10.16509/j.georeview.2017.02.010

作者简介：徐通，男，1988年生。博士，工程师。从事构造地质学研究。通讯地址：710065，陕西省地质调查院。Email：xutong1988819@163.com。通讯作者：裴先治，男，1963年生。教授，博士生导师。从事构造地质学和区域地质学研究。Email：peixzh@263.net。

段,勉略构造带及邻区(南秦岭南缘及扬子板块西北缘)岩浆岩主体形成于晚古生代,新元古代仅发育古大洋及其对应的被动陆缘。总之,勉略构造带的研究仍存在很大分歧,这直接影响对秦岭微板块和扬子板块西北缘的构造演化乃至秦岭造山带形成演化、华北板块与扬子板块碰撞造山过程等大陆动力学基本地质问题的进一步理解。

依托相关研究项目,本文课题组对勉略构造带内的岩浆岩(火山岩占主体)进行了系统研究,将勉略带内火山岩分为洋壳型、俯冲早期 Adakitic 型、陆缘弧型及裂谷型,指示新元古代早中期(826 ~ 812Ma,闫全人等,2007)勉略洋盆的存在、洋盆初始俯冲(840Ma 左右,徐通等,2016)及新一轮陆内裂解(783Ma ~,王涛,2008;李瑞保等,2011;徐通等,2013)的发生。其中,洋壳型、俯冲早期 Adakitic 型、裂谷型火山岩前人已有较为详细的报道,而俯冲中晚期已有研究成果相对陆缘弧火山岩的分布规模而言仍显单薄(图 1)。本文对黑沟峡火山岩进行了研究,结果表明黑沟峡火山岩并非前人(李曙光等,1996)认为的晚古生代"大陆裂谷双峰式火山岩",而是一套新元古代中期勉略洋盆俯冲阶段形成的一套火山岩,其中玄武岩具 N-MORB 地球化学属性,为古洋壳残余,安山岩具陆缘弧地球化学属性,成岩时代为 807 ± 13Ma(MSWD = 3.6, n = 14),

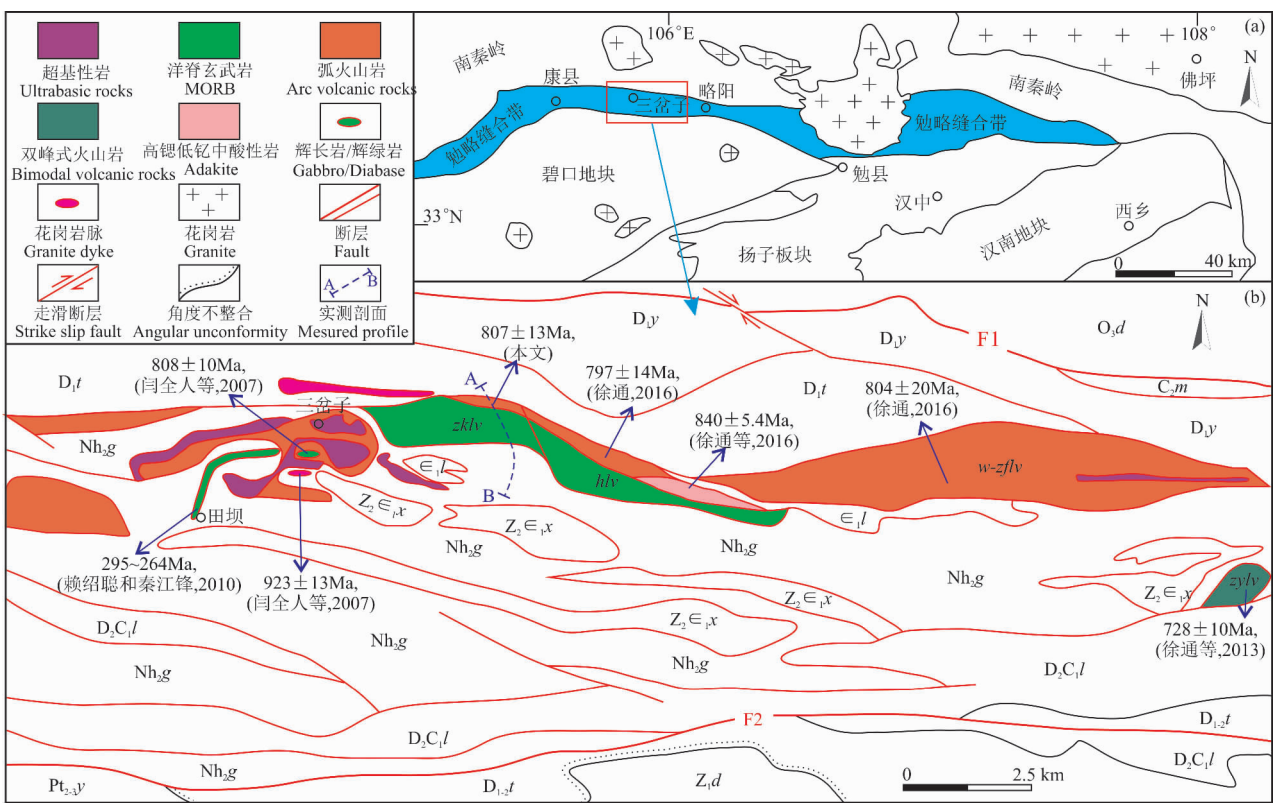


图 1 勉县—略阳缝合带及邻区构造图(a)和三岔子—横现河地区岩浆岩分布图(b)

Fig. 1 Tectonic map of Mianxian—Lüeyang tectonic zone and adjacent region(a) and distribution map of magmatic rocks in Sanchazi—Hengxianhe area(b)

C_2m—上石炭统泯河组;D_2C_1l—中泥盆统—下石炭统略阳组;$D_{1-2}t$—下—中泥盆统踏坡组;D_1y—下泥盆统羊汤寨组;D_1t—下泥盆统屯寨组;O_3d—上奥陶统大堡岩组;S_1d—下志留统迭部组;$\in_1l$—下寒武统临江组;$Z_2\in_1x$—上震旦统—下寒武统相公山白云岩;Z_1d—下震旦统陡山沱组;Nh_2g—上南华统关家沟组;$Pt_{2-3}y$—中—新元古界阳坝岩组;F_1—状元碑断裂;F_2—荷叶坝断裂;*zklv*—庄科岩片;*hlv*—黑沟峡岩片;*w-zflv*—西纸房沟岩片;*zylv*—张岩沟岩片

C_2m—Upper Carboniferous Minhe Fm.; D_2C_1l—Middle Devonian—Lower Carboniferous Lüeyang Fm.; $D_{1-2}t$—Lower—Middle Devonian Tapo Fm.; D_1y— Lower Devonian Yangtangzhai Fm.; D_1t— Lower Devonian Tunzhai Fm.; O_3d—Upper Ordovician Dabu Fm.; S_1d—Lower Silurian Diebu Fm.; $\in_1l$—Lower Cambrian Linjiang Fm.; $Z_2\in_1x$—Upper Sinian(Ediacaran)—Lower Cambrian Xianggongshan dolomite; Z_1d—Lower Sinian Doushantuo Fm.; Nh_2g—Upper Nanhuan(Cryogenian) Guanjiagou Fm.; $Pt_{2-3}y$—Mesoproterozoic—Neoproterozoic Yangba Fm.; F_1—Zhuangyuanbei fault; F_2—Heyeba fault; *zklv*—Zhuangke sliver; *hlv*—Heigouxia sliver; *w-zflv*—western part of Zhifanggou sliver; *zylv*—Zhangyangou sliver

指示勉略洋盆新元古代中期勉略洋盆俯冲作用的存在,为勉略构造带的进一步研究提供了新的依据。

1　区域地质背景

勉略构造带位于南秦岭南缘,北以状元碑断裂与秦岭微板块相接,南以荷叶坝断裂与扬子板块西北缘毗邻(图 1a、b)。勉略带康县—略阳地区分布有不同时代、不同性质的(变)沉积岩、岩浆岩,受印支期强烈构造作用改造后呈混杂堆积,现今多为断层接触关系,呈叠瓦状分布。勉略构造带内变岩浆岩多呈构造岩片出露,研究表明,勉略带康县—略阳一带分布有洋壳型、陆缘弧型、裂解型及后期岩脉等不同类型岩浆岩,形成时代跨度较大,为新元古代、早中生代等多期次岩浆作用的结果(图 1b)。

勉略带康县—略阳地区(变)沉积岩主要包括关家沟组(Nh_2g)、相公山白云岩($Z_2\in_1x$)、临江组($\in_1l$)、屯寨组(D_1t)、羊汤寨组(D_1y)、踏坡组($D_{1-2}t$)和略阳组(D_2C_1l)。其中,相公山白云岩、略阳组灰岩、临江组黑色岩系能干性相对较强,多呈构造岩片产出。关家沟组主体为一套变质火山—沉积岩系,底部含砾,向上火山碎屑、砾石含量逐渐减少过渡为正常沉积岩,且区域上愈向东泥质岩、碳酸盐岩含量有增多的趋势,主体为一套浅海相浊流沉积间有冰筏沉积。相公山白云岩为一套纯净的白云岩,几乎不含碎屑沉积物,与南方灯影组具有可对比性,为一套稳定的浅水台地相沉积;临江组为一套黑色岩系,主要为硅质岩、炭质板岩、炭质千枚岩夹薄层状灰岩组合,局部产磷锰矿层,主体为一套大陆边缘较深水相沉积;屯寨组、羊汤寨组、踏坡组和略阳组则为较稳定的被动陆缘碎屑—碳酸盐岩沉积。

黑沟峡火山岩出露于庄科火山岩岩片东段(图 1b)。野外出露自北向南分别为浅灰绿色绢云钠长石英片岩和灰绿色绿帘绿泥钠长片岩,均呈构造岩片夹持于屯寨组千枚岩、关家沟组绢云(炭质)千枚岩中,片理、断层产状主体北倾(图 2)。绿帘绿泥钠长片岩具有鳞片变晶结构,主要由绿泥石、绿帘石、钠长石、石英和少量方解石组成(图 3a、b),暗色矿物主要为绿泥石和绿帘石,绿泥石(约 30%),浅绿色,正低突起,黄—黄褐色,绿帘石(约 25%),正高突起,干涉色不均匀,钠长石(约 20%),可见典型的钠长石双晶、卡斯巴双晶,表面可见弱绢云母化,石英(约 10%),重结晶明显,方解石(约 10%)为后期充填。绢云钠长石英片岩具有鳞片变晶结构,主要矿物为石英、钠长石、绢云母和绿泥石,石英(约 35%),重结晶及定向排列明显(图 3c, d),钠长石(约 30%),多发生错断,局部保留有原始双晶,绢云母(15% ~20%),无色—黄褐色,多呈条带状,具有鲜艳干涉色,绿泥石(约 8%),浅绿色,正低突起,含少量磁铁矿(约 5%)。

2　测试方法

本文样品分别进行主量元素和微量元素分析。

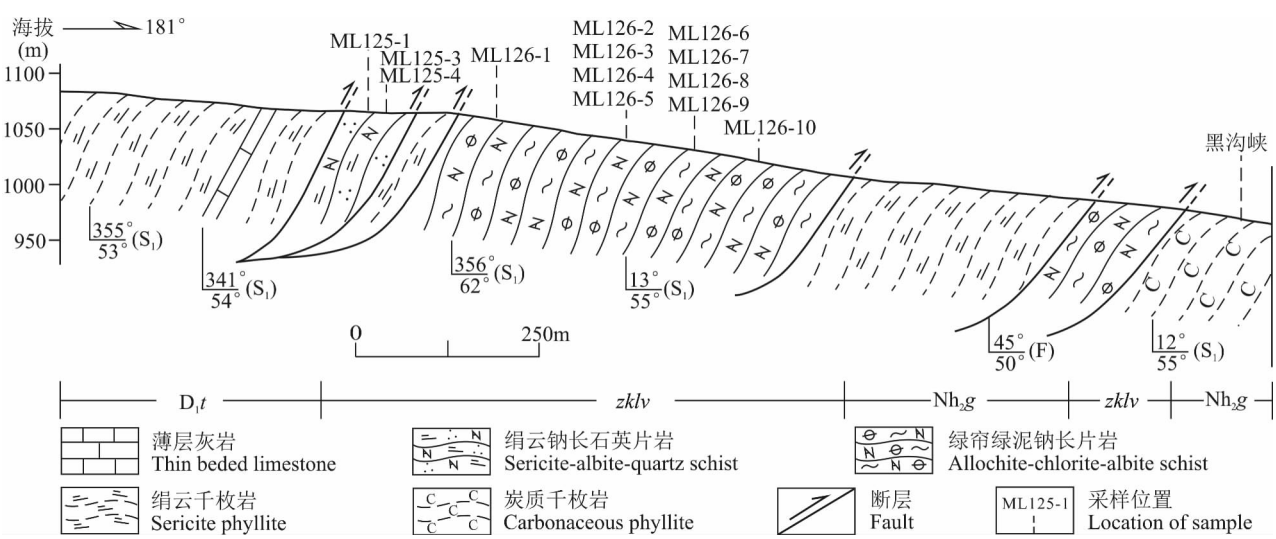


图 2 金家河地区黑沟峡剖面(图 1b 中剖面 A—B)

D_1t—下泥盆统屯寨组; Nh_2g—上南华统关家沟组; *zklv*—庄科岩片

Fig. 2 Mesured section in Heigouxia, Jinjiahe area. Lacation of this section is shown by the line labeled "A—B" on Fig. 1b

D_1t—Lower Devonian Tunzhai Fm. ; Nh_2g—Upper Nanhuan Guanjiagou Fm. ; *zklv*—Zhuangke sliver

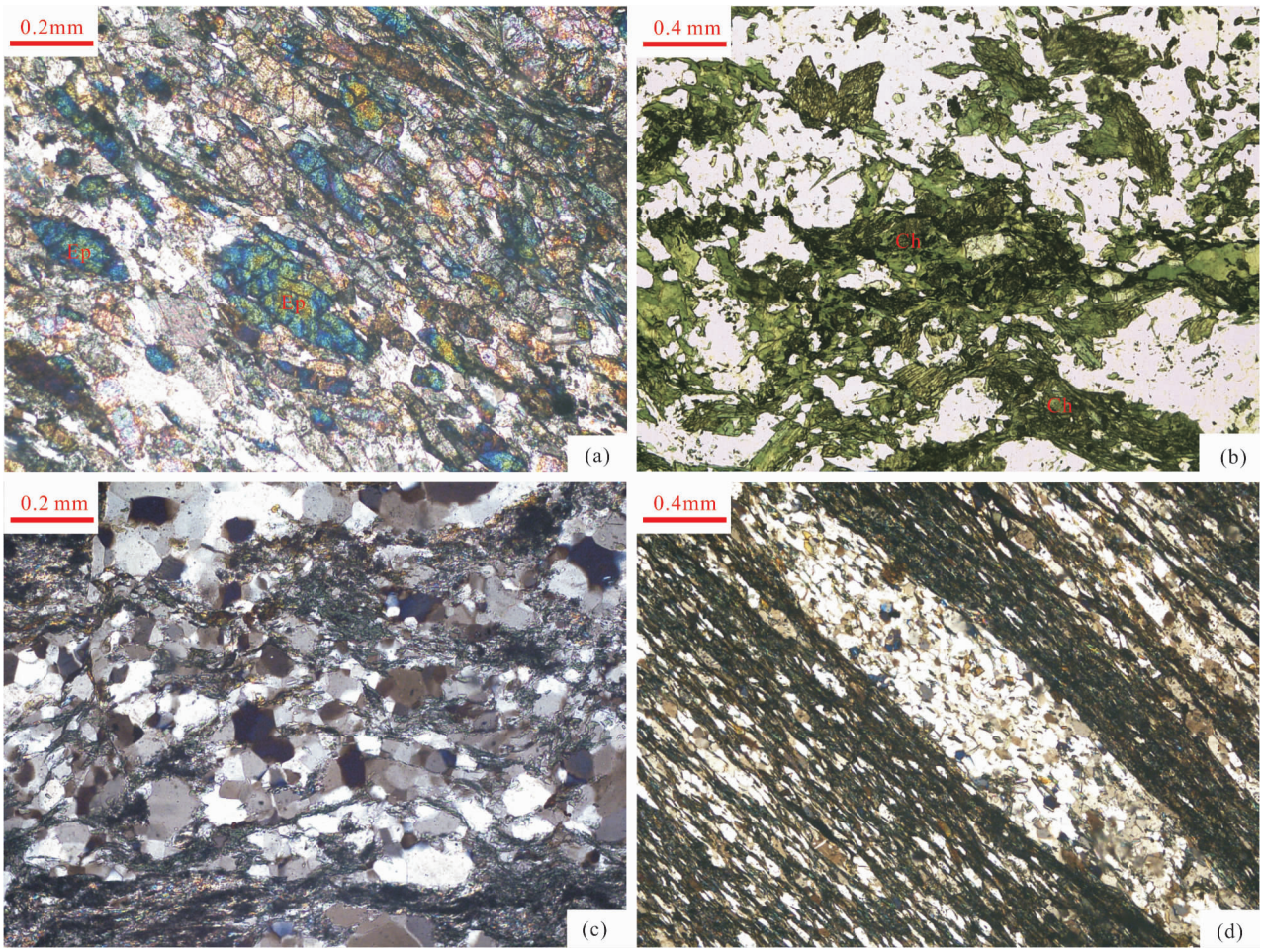


图 3 黑沟峡变火山岩显微照片

Fig. 3 Micrographs of Heigouxia metamorphic volcanic rocks

(a,b) 绿帘绿泥钠长片岩中矿物绿帘石、绿泥石化; (c,d) 绢云钠长石英片岩中矿物重结晶及定向排列; Ch—绿泥石; Ep—绿帘石

(a,b) epidotization and chloritization in allochite—chlorite—albite schist; (c,d) recrystallization and directional arrangement in sericite—albite—quartz schist; Ch—chlorite; Ep—epidote

采集样品为浅灰绿色绢云钠长石英片岩和灰绿色绿帘绿泥钠长片岩,所采样品较为新鲜,样品采集过程中尽量避开后期脉体和蚀变,靠边部至中心位置均有样品控制(图 2)。样品磨碎至 200 目后,在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主量和微量元素分析测试。主量元素由长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室用日本岛津 XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪测定,X 射线荧光光谱分析熔片法按国家标准 GB/T 14506. 28-1993,相对误差小于 2%。微量元素在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室采用 Thermo-X7 电感耦合等离子体质谱仪进行样品测定,相对误差小于 10%。化学分析测试流程参考 Chen Fukun 等(2000)。

锆石 U-Pb 同位素测年样品在河北省廊坊市地源矿物测试分选技术服务有限公司进行锆石挑选、制靶。测年所用锆石的阴极发光显微照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 Gatan MonoCL3 + X 型阴极荧光谱仪上完成。同位素测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序进行。分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193nmArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30μm,激光剥蚀样品的深度为 20 ~ 40μm。单个分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ,采用年龄为$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄,其加权平均值具有 95% 的置信度。实验原理和流程及仪器参数见 Yuan Honglin 等(2004)。锆石年龄计算

均采用国际标准锆石 91500 作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成的硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标，^{29}Si 作为内标元素进行校正，样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER(4.0 版，Macquarie University)软件，并采用 Andersen(2002)软件对测试数据进行普通铅校正，年龄计算及谐和图采用 ISOPLOT(2.49 版，Ludwig，2003)软件完成。

3　锆石 U-Pb LA-ICP-MS 定年

所采同位素测年样品 M125-1 的地理坐标为 N33°21.979′，E105°55.320′。用于测年的样品为绢云钠长石英片岩(变安山岩)，锆石晶体呈浅黄色—无色，大部分颗粒较小，呈自形浑圆状—短柱状，部分呈长柱状,个别颗粒较大。锆石 CL 图像(图 4)显示，晶体有少量溶蚀，个别破裂明显，生长环带较清晰。选取 24 颗锆石进行 LA-ICP-MS 分析，分析结果见表 1，其中 02、08、09、15、20、21、23 号点谐和度较差，剔除不用，选取其余 17 颗谐和度较好锆石进行分析。获得的 17 颗谐和度较好锆石(01、03～07、10～14、16～19、22、24 号点)在 U-Pb 谐和图上整体落在谐和曲线附近(图 5a)，可分为两组。第一组锆石(05、13、14 号点) $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄为 908～883Ma，其 Th/U 值为 0.55～0.72(>0.4)，Th、U 含量较高(分别为 33×10^{-6}～72×10^{-6}、60×10^{-6}～100×10^{-6})，锆石生长环带清晰，为岩浆成因锆石(Wu Yuanbao et al.，2004；Siebel et al.，2005)，该组锆石可与勉略构造带内较早期陆缘弧型岩浆作用相对应，为捕获锆石。第二组锆石(01、03～04、06～07、10～12、16～19、22、24 号点)是最年轻的一组锆石，分布较为集中，其 Th/U 值为 0.57～2.23(>0.4)，Th、U 含量较高(分别为 60×10^{-6}～904

表 1 黑沟峡安山岩样品(M092-2)LA-ICP-MS 锆石 U—Th—Pb 同位素分析结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U—Th—Pb isotopic analysis data of Heigouxia andesitic rocks($\times10^{-6}$) (sample M092-2)

测试点号	同位素含量($\times10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						年龄(Ma)						谐和度(%)
	Pb	Th	U		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{206}Pb^*)}$		$\frac{n(^{207}Pb^*)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb^*)}{n(^{238}U)}$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{206}Pb)}$		$\frac{n(^{207}Pb)}{n(^{235}U)}$		$\frac{n(^{206}Pb)}{n(^{238}U)}$		
					测值	±1σ	测值	±1σ	测值	±1σ	测值	±1σ	测值	±1σ	测值	±1σ	
1	59	778	359	2.17	0.0713	0.0024	1.3350	0.0274	0.1358	0.0021	965	20	861	12	821	12	105
2	23	174	154	1.13	0.1468	0.0050	2.8540	0.0573	0.1409	0.0022	2309	16	1370	15	850	13	161
3	15	188	252	0.75	0.0705	0.0024	1.2630	0.0259	0.1298	0.0020	944	20	829	12	786	11	105
4	6	81	93	0.88	0.0681	0.0026	1.2530	0.0333	0.1334	0.0022	870	30	825	15	807	12	102
5	5	54	99	0.55	0.0696	0.0027	1.4100	0.0388	0.1469	0.0024	916	31	893	16	883	13	101
6	27	339	152	2.23	0.0704	0.0028	1.3100	0.0382	0.1349	0.0022	940	33	850	17	816	13	104
7	5	64	105	0.61	0.0710	0.0033	1.2390	0.0452	0.1266	0.0023	957	46	819	20	768	13	107
8	6	83	81	1.02	0.0940	0.0036	1.6950	0.0467	0.1307	0.0022	964	143	822	37	770	14	107
9	80	1811	1643	1.10	0.1567	0.0049	3.6280	0.0579	0.1679	0.0025	2420	12	1556	13	1000	14	156
10	17	206	152	1.35	0.0703	0.0025	1.3060	0.0316	0.1346	0.0022	937	25	848	14	814	12	104
11	7	93	164	0.57	0.0691	0.0024	1.2680	0.0281	0.1330	0.0021	902	22	832	13	805	12	103
12	68	904	510	1.77	0.0728	0.0024	1.3190	0.0258	0.1313	0.0020	1009	18	854	11	795	12	107
13	3	33	60	0.55	0.0694	0.0029	1.4250	0.0449	0.1489	0.0026	910	37	899	19	895	14	100
14	10	72	100	0.72	0.0702	0.0032	1.4650	0.0539	0.1513	0.0028	935	46	916	22	908	15	101
15	24	274	255	1.07	0.0899	0.0029	1.6110	0.0311	0.1299	0.0020	1106	108	865	29	774	13	112
16	11	146	121	1.21	0.0691	0.0028	1.2030	0.0358	0.1262	0.0021	903	34	802	16	766	12	105
17	26	323	361	0.89	0.0675	0.0023	1.2170	0.0258	0.1309	0.0021	852	21	808	12	793	12	102
18	21	253	216	1.17	0.0691	0.0024	1.2800	0.0282	0.1345	0.0021	900	22	837	13	813	12	103
19	28	367	311	1.18	0.0659	0.0021	1.2510	0.0235	0.1378	0.0021	803	18	824	11	832	12	99
20	15	170	232	0.73	0.0748	0.0025	1.4480	0.0299	0.1406	0.0022	1062	19	909	12	848	13	107
21	38	527	500	1.05	0.0935	0.0030	1.7440	0.0331	0.1354	0.0021	1061	112	872	30	800	13	109
22	9	103	149	0.69	0.0700	0.0024	1.3050	0.0293	0.1352	0.0022	929	22	848	13	818	12	104
23	44	623	433	1.44	0.0786	0.0025	1.2850	0.0231	0.1188	0.0019	1161	16	839	10	723	11	116
24	5	60	84	0.71	0.0686	0.0027	1.3150	0.0389	0.1390	0.0024	888	34	852	17	839	13	102

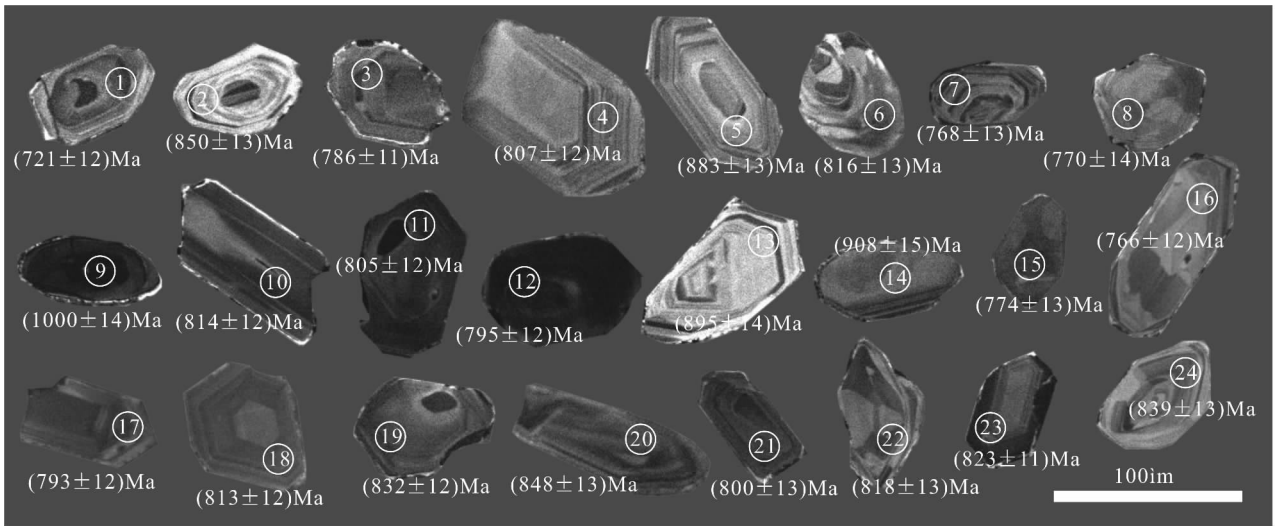


图 4 黑沟峡变安山岩锆石阴极发光图像及$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄(样品 M125-1)

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence images and $^{206}Pb/^{238}U$ ages of Heigouxia metamorphic andesitic rocks (sample M125-1)

$\times 10^{-6}$、$84 \times 10^{-6} \sim 510 \times 10^{-6}$),锆石生长环带清晰,为典型岩浆成因锆石(Wu Yuanbao et al., 2004; Siebel et al., 2005),其$^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 807 ± 13Ma(MSWD = 3.6, n = 14)(图 5b),可确定黑沟峡变安山岩的结晶年龄为 807 ± 13Ma。

4 岩石地球化学

4.1 主量元素

黑沟峡变火山岩主量元素分析结果如表 2。由于所采样品已发生绿片岩相变质,个别样品存在轻度蚀变,本文综合主量、微量元素对所采样品进行原岩恢复。在 *Si*—(*al* + *fm*)—(*c* − *alk*)(图 6a, Simonen, 1953)和 A—C—FM 原岩判别图解(图 6b, 王仁民等, 1987)(*Si*、*al*、*fm*、*c*、*alk*、*A*、*C*、FM 等参数的计算公式参考王仁民等, 1987)中,绿帘绿泥钠长片岩整体落入基性火山岩区域,两个绢云钠长石英片岩样品向泥质沉积物偏移为较多地壳物质混入所致(下文详述),表明所采黑沟峡样品为变火山岩样品,这与野外及镜下特征吻合。在抗蚀变元素 Nb/Y—10000 × Zr/TiO_2 岩石分类图(图 6d, Winchester and Floyd, 1976)中,绿帘绿泥钠长片岩样品全部落入亚碱性玄武岩区域,绢云钠长石英片

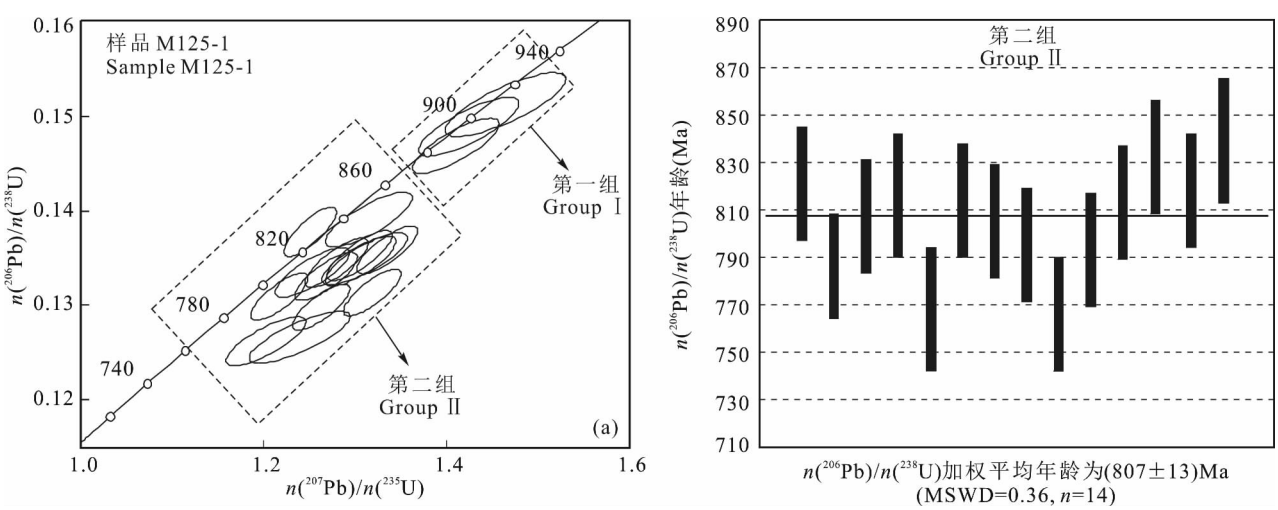


图 5 黑沟峡变安山岩锆石 U-Pb 谐和图和$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均图(样品 M125-1)

Fig. 5 Zircon LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagrams and U-Pb age histograms of Heigouxia metamorphic andesitic rocks (sample M125-1)

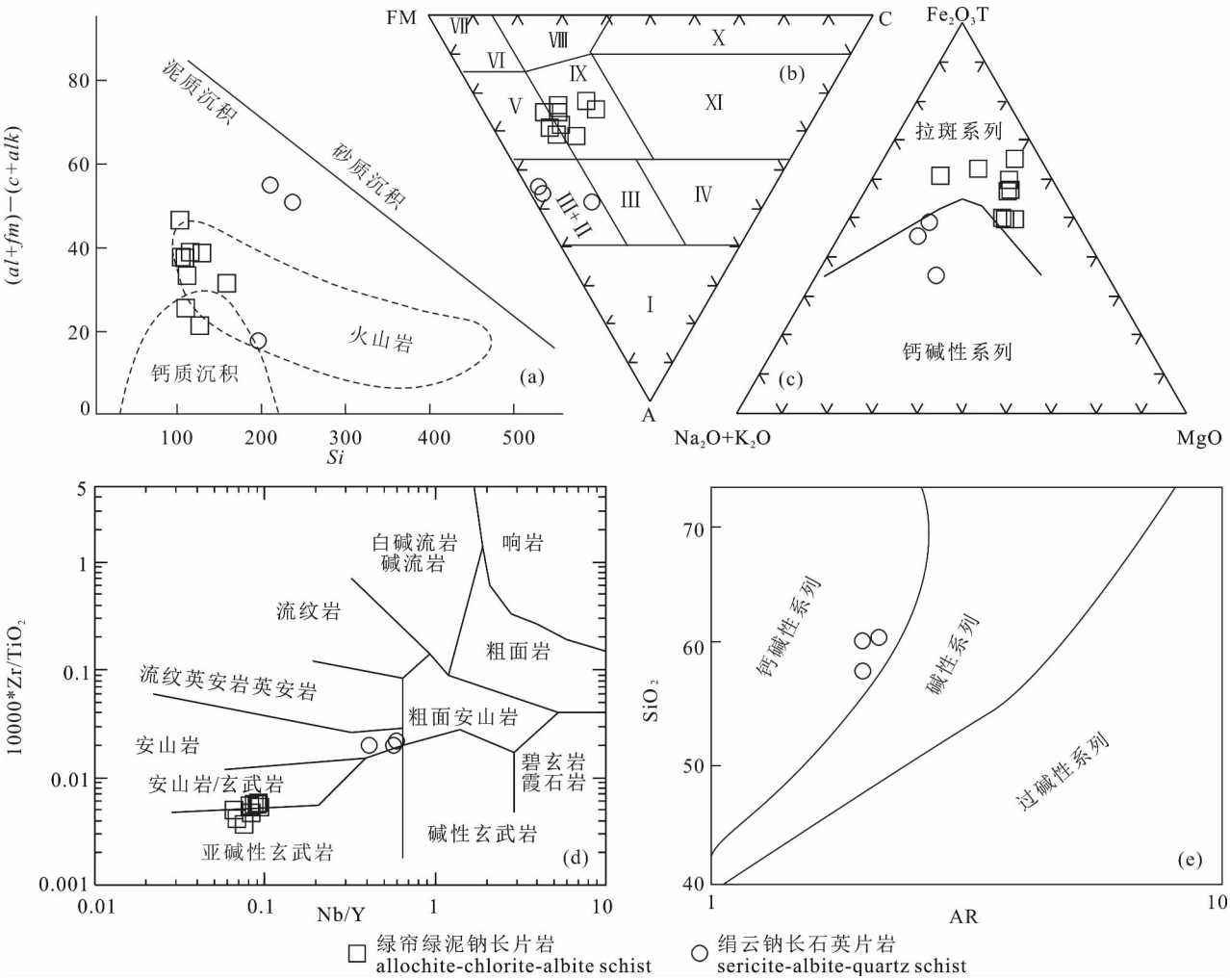


图 6 黑沟峡变火山岩 *Si*—(*al* + *fm*)—(*c* − *alk*)、A—C—FM、AFM、Nb/Y—10000 × Zr/TiO_2、AR—SiO_2 图解

Fig. 6 *Si*—(*al* + *fm*)—(*c* − *alk*), A—C—FM, AFM, Nb/Y—10000 × Zr/TiO_2 and AR—SiO_2 dirgrams of Heigouxia metamorphic volcanic rocks

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

Ⅰ—mudstone; Ⅱ—ferruginous mudstone; Ⅲ—neutral—acidic volcanic rock; Ⅳ—calcareous mudstone; Ⅴ—colloid chemical deposition and mudstone; Ⅵ—colloid chemical deposition; Ⅶ—ultrabasic rock; Ⅷ—ultrabasic rock and partial dolomitic rock; Ⅸ—basic rock and partial sedimentary calcareous rock; Ⅹ—sedimentary carbonate rock; Ⅺ—mud-calcareous sedimentary rock

岩则整体落入亚碱性安山岩区域。

黑沟峡玄武岩样品 SiO_2 含量(43.54% ~ 54.51%)变化较大,平均为 47.03%,TiO_2 含量(1.17% ~ 2.02%)平均为 1.57%,Na_2O 含量为 1.21% ~ 5.22%,K_2O 含量较低(0.01% ~ 0.78%),Na_2O/K_2O 变化较大,Al_2O_3 含量(13.49% ~ 17.78%)平均为 14.93%,Fe_2O_3T 含量(10.57% ~ 14.33%)平均为 12.58%,MgO 含量(3.17% ~ 8.62%)平均为 6.56%,$Mg^{\#}$ 为 32.87 ~ 59.33($Mg^{\#} = 100 \times n(Mg)/[n(Mg) + n(Fe_2O_3{}^T)]$,邓晋福等,2015),平均为 50.39。

安山岩样品 SiO_2 含量为 57.92% ~ 60.71%,TiO_2(含量 0.62% ~ 0.84%)平均为 0.76%,Na_2O 含量为 2.95% ~ 4.84%,K_2O 含量为 1.39% ~ 3.04%,Al_2O_3 含量(12.56% ~ 17.15%)平均为 15.29%,Fe_2O_3T 含量(5.68% ~ 8.88%)平均为 7.32%,MgO 含量(2.89% ~ 4.39%)平均为 3.43%,$Mg^{\#}$ 为 40.40 ~ 60.72,A/CNK 值介于 0.58 ~ 1.62,A/NK 值介于 1.33 ~ 2.11。在 AFM 图解(图 6c,Irvine and Baragar, 1971)中玄武岩样品整

表 2 黑沟峡火山岩主量元素分析结果(%)

Table 2 Major elements analysis data of Heigouxia volcanic rocks(%)

SiO_2	57.92	60.37	60.71	48.11	45.66	44.68	47.97	46.41	44.91	47.50	43.54	54.51
TiO_2	0.82	0.62	0.84	1.47	1.90	1.67	1.17	1.66	2.02	1.30	1.39	1.52
Al_2O_3	17.15	12.56	16.17	13.74	13.88	13.49	15.39	13.67	14.73	17.4	17.78	14.25
Fe_2O_3T	8.88	5.68	7.41	14.33	13.84	13.55	11.39	11.21	13.58	10.57	11.82	12.95
MnO	0.17	0.13	0.15	0.24	0.23	0.26	0.19	0.25	0.21	0.21	0.22	0.16
MgO	3.01	4.39	2.89	5.14	7.84	6.10	7.77	5.80	7.58	7.02	8.62	3.17
CaO	1.33	6.73	1.16	8.06	10.62	15.28	8.62	14.55	10.49	10.16	7.92	6.44
Na_2O	2.95	4.84	3.52	2.72	2.51	1.21	3.57	1.85	2.72	3.49	2.96	5.22
K_2O	3.04	1.39	2.65	0.78	0.10	0.01	0.30	<0.01	0.02	0.19	0.44	0.02
P_2O_5	0.23	0.11	0.20	0.33	0.17	0.16	0.09	0.15	0.20	0.15	0.15	0.18
烧失	3.53	3.03	4.40	5.80	2.92	4.03	2.88	4.91	3.07	2.94	4.07	1.29
总量	99.03	99.85	100.10	100.72	99.67	100.44	99.34	100.46	99.53	100.93	98.91	99.71
$Mg^{\#}$	40.40	60.72	43.82	41.77	53.12	47.38	57.71	50.85	52.75	57.05	59.33	32.87

体表现出拉斑玄武岩演化趋势，而安山岩样品则表现出钙碱性火山岩演化趋势。在 AR—SiO_2 图解(图 6e，Wright，1969)中，安山岩样品全部落入钙碱性区域。表明黑沟峡玄武岩样品为拉斑系列，安山岩为钙碱性系列。

4.2 稀土元素和微量元素

黑沟峡变火山岩稀土元素和微量元素分析结果如表 3。黑沟峡玄武岩稀土含量(39.96×10^{-6} ~ 72.49×10^{-6})变化较大，平均为 57.63×10^{-6}，∑LREE/∑HREE 为 1.23 ~ 2.30。球粒陨石标准化稀土配分曲线(图 7a)显示，稀土配分曲线整体左倾，轻重稀土分异较明显，$(La/Yb)_N$ 为 0.56 ~ 1.46，$(La/Sm)_N$ 为 0.55 ~ 0.98，$(Gd/Yb)_N$ 为 1.16 ~ 1.43，δEu 平均为 0.97。安山岩样品稀土元素含量(94.63×10^{-6} ~ 114.32×10^{-6})平均为 103.64×10^{-6}，∑LREE/∑HREE 为 6.03 ~ 7.64。球粒陨石标准化稀土配分曲线(图 7a)显示，稀土配分曲线整体右倾，轻重稀土分异明显，$(La/Yb)_N$ 为 5.92 ~ 8.44，$(La/Sm)_N$ 为 2.61 ~ 3.21，$(Gd/Yb)_N$ 为 1.59 ~ 1.85，δEu 平均为 0.79，整体表现出弱的铕负异常。

原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)显示黑沟峡玄武岩微量元素整体含量较低，曲线整体呈近水平，与标准 N-MORB 含量相当，P、Nb 表现出负异常，Sr、Th 表现出正异常。安山岩样品微量元素含量整体比玄武岩样品高，Nb、Ta、P、Ti 等负异

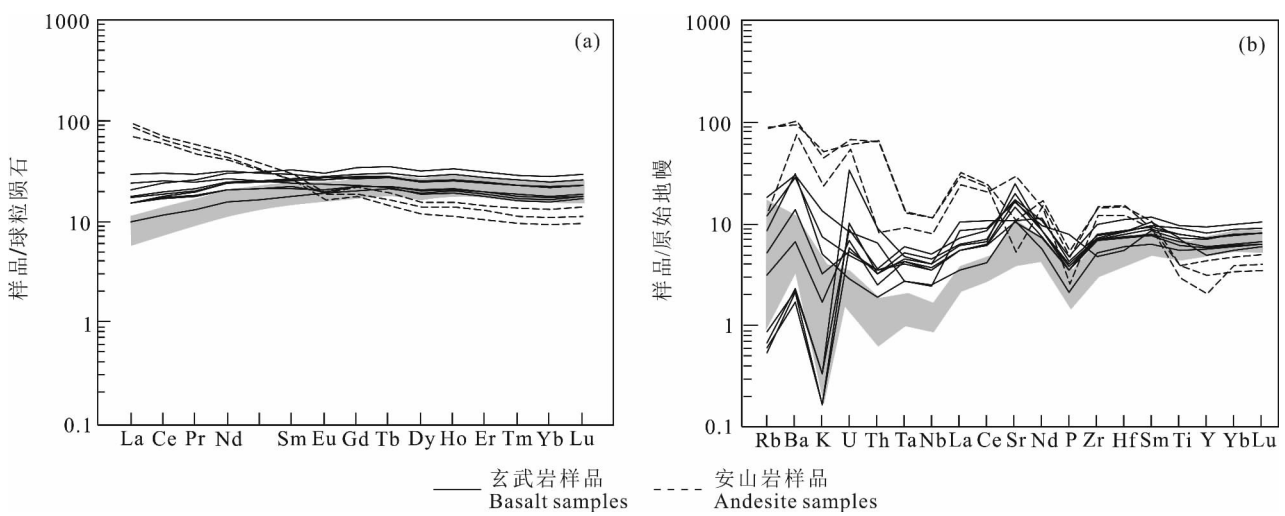


图 7 黑沟峡火山岩稀土元素球粒陨石标准化(a)及微量元素原始地幔标准化配分型式(b)(球粒陨石及原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough，1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized spidergrams of Heigouxia volcanic rocks (Chondrite data and primitive mantle data for normalization from Sun and McDonough，1989)

表 3 黑沟峡火山岩稀土、微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth and trance element analysis data of Heigouxia volcanic rocks($\times 10^{-6}$)

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cd	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
M125-1	16.86	1.48	13.40	133.20	142.17	20.55	64.32	19.77	56.07	228.68	19.24	157.47	8.08	0.09	3.65	648.09	22.08	43.08	5.53	22.39
M125-3	6.36	0.71	5.09	150.07	423.45	15.67	29.24	14.11	8.59	618.08	9.17	132.98	5.63	0.09	1.01	525.46	16.41	36.29	4.48	18.92
M125-4	8.10	0.97	9.46	120.16	110.43	17.58	47.54	17.12	55.46	110.82	13.90	164.93	8.11	0.10	2.78	715.14	20.29	39.92	4.99	20.03
M126-1	8.76	0.09	26.20	395.57	9.54	29.49	27.26	17.26	11.36	337.62	22.04	52.71	1.72	0.11	0.79	203.52	5.76	15.45	2.35	12.57
M126-2	5.34	0.25	38.96	390.48	226.85	42.88	104.75	17.95	1.95	340.89	36.12	78.66	2.59	0.07	0.10	44.86	3.70	10.84	1.88	11.30
M126-3	2.07	0.40	37.50	408.85	73.13	32.51	51.57	19.79	0.34	501.03	32.33	77.21	2.80	0.11	0.01	14.69	4.11	11.66	1.95	11.19
M126-4	5.66	0.26	36.36	246.42	248.94	41.18	106.06	15.57	5.31	223.01	25.06	57.33	1.73	0.10	0.30	210.34	2.38	7.20	1.26	7.37
M126-5	4.77	0.13	38.06	325.79	120.40	37.60	63.08	17.41	0.38	406.02	32.03	86.27	3.11	0.05	0.02	11.73	4.28	12.25	2.02	11.44
M126-7	5.93	0.32	39.76	363.58	197.48	41.68	100.53	19.1	0.42	355.37	41.21	108.85	3.53	0.17	0.03	15.69	4.89	14.61	2.45	13.93
M126-8	5.23	0.33	30.17	258.12	247.34	37.18	158.93	15.38	3.22	299.96	25.45	74.62	2.42	0.06	0.25	94.30	3.70	10.73	1.76	9.76
M126-9	11.31	0.10	33.76	271.15	295.61	46.95	203.78	16.09	7.35	215.76	26.18	76.57	2.44	0.05	0.58	191.54	3.66	10.54	1.72	9.66
M126-10	2.40	0.29	26.10	339.96	3.83	19.28	10.67	16.34	0.54	222.4	31.14	84.37	2.80	0.09	0.03	15.01	6.95	18.53	2.78	14.78

样品号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	δEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	∑REE
M125-1	4.58	1.14	4.52	0.72	3.99	0.88	2.41	0.35	2.29	0.36	4.47	0.54	11.64	5.60	1.27	0.76	6.50	3.03	1.59	114.32
M125-3	3.96	1.11	3.88	0.62	3.58	0.79	2.14	0.29	1.87	0.29	3.67	0.37	8.87	0.69	1.12	0.86	5.92	2.61	1.67	94.63
M125-4	3.97	0.97	3.72	0.54	3.03	0.65	1.74	0.25	1.62	0.25	4.65	0.52	13.10	5.35	1.42	0.76	8.44	3.21	1.85	101.98
M126-1	3.73	1.36	4.71	0.81	4.84	1.09	2.96	0.41	2.66	0.43	1.65	0.11	5.49	0.53	0.17	0.99	1.46	0.97	1.43	59.13
M126-2	4.13	1.61	6.05	1.13	7.09	1.65	4.52	0.66	4.21	0.66	2.52	0.17	2.90	0.21	0.14	0.98	0.59	0.56	1.16	59.41
M126-3	3.85	1.57	5.54	1.01	6.33	1.46	4.06	0.59	3.71	0.59	2.38	0.18	8.48	0.27	0.21	1.04	0.75	0.67	1.21	57.63
M126-4	2.74	1.11	4.14	0.79	4.94	1.16	3.13	0.44	2.85	0.45	1.78	0.11	4.01	0.16	0.06	1.00	0.56	0.55	1.17	39.96
M126-5	3.99	1.52	5.58	1.03	6.37	1.48	4.03	0.58	3.74	0.59	2.60	0.21	3.31	0.27	0.12	0.98	0.77	0.67	1.20	58.90
M126-7	4.99	1.73	7.05	1.31	8.15	1.89	5.16	0.73	4.74	0.75	3.28	0.24	5.47	0.30	0.18	0.89	0.70	0.62	1.20	72.37
M126-8	3.29	1.22	4.56	0.83	5.17	1.18	3.26	0.46	2.94	0.46	2.17	0.16	3.01	0.29	0.11	0.96	0.85	0.71	1.25	49.32
M126-9	3.41	1.16	4.58	0.84	5.31	1.22	3.29	0.48	3.06	0.48	2.25	0.17	2.05	0.29	0.10	0.90	0.81	0.67	1.21	49.41
M126-10	4.48	1.57	5.71	1.04	6.30	1.45	3.97	0.58	3.77	0.59	2.54	0.19	4.16	0.75	0.69	0.95	1.24	0.98	1.22	72.49

表 3 黑沟峡火山岩稀土、微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Rare earth and trance element analysis data of Heigouxia volcanic rocks($\times 10^{-6}$)

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cd	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd
M125-1	16.86	1.48	13.40	133.20	142.17	20.55	64.32	19.77	56.07	228.68	19.24	157.47	8.08	0.09	3.65	648.09	22.08	43.08	5.53	22.39
M125-3	6.36	0.71	5.09	150.07	423.45	15.67	29.24	14.11	8.59	618.08	9.17	132.98	5.63	0.09	1.01	525.46	16.41	36.29	4.48	18.92
M125-4	8.10	0.97	9.46	120.16	110.43	17.58	47.54	17.12	55.46	110.82	13.90	164.93	8.11	0.10	2.78	715.14	20.29	39.92	4.99	20.03
M126-1	8.76	0.09	26.20	395.57	9.54	29.49	27.26	17.26	11.36	337.62	22.04	52.71	1.72	0.11	0.79	203.52	5.76	15.45	2.35	12.57
M126-2	5.34	0.25	38.96	390.48	226.85	42.88	104.75	17.95	1.95	340.89	36.12	78.66	2.59	0.07	0.10	44.86	3.70	10.84	1.88	11.30
M126-3	2.07	0.40	37.50	408.85	73.13	32.51	51.57	19.79	0.34	501.03	32.33	77.21	2.80	0.11	0.01	14.69	4.11	11.66	1.95	11.19
M126-4	5.66	0.26	36.36	246.42	248.94	41.18	106.06	15.57	5.31	223.01	25.06	57.33	1.73	0.10	0.30	210.34	2.38	7.20	1.26	7.37
M126-5	4.77	0.13	38.06	325.79	120.40	37.60	63.08	17.41	0.38	406.02	32.03	86.27	3.11	0.05	0.02	11.73	4.28	12.25	2.02	11.44
M126-7	5.93	0.32	39.76	363.58	197.48	41.68	100.53	19.1	0.42	355.37	41.21	108.85	3.53	0.17	0.03	15.69	4.89	14.61	2.45	13.93
M126-8	5.23	0.33	30.17	258.12	247.34	37.18	158.93	15.38	3.22	299.96	25.45	74.62	2.42	0.06	0.25	94.30	3.70	10.73	1.76	9.76
M126-9	11.31	0.10	33.76	271.15	295.61	46.95	203.78	16.09	7.35	215.76	26.18	76.57	2.44	0.05	0.58	191.54	3.66	10.54	1.72	9.66
M126-10	2.40	0.29	26.10	339.96	3.83	19.28	10.67	16.34	0.54	222.4	31.14	84.37	2.80	0.09	0.03	15.01	6.95	18.53	2.78	14.78
样品号	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th	U	δEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$	∑REE
M125-1	4.58	1.14	4.52	0.72	3.99	0.88	2.41	0.35	2.29	0.36	4.47	0.54	17.64	5.60	1.27	0.76	6.50	3.03	1.59	114.32
M125-3	3.96	1.11	3.88	0.62	3.58	0.79	2.14	0.29	1.87	0.29	3.67	0.37	8.87	0.69	1.12	0.86	5.92	2.61	1.67	94.63
M125-4	3.97	0.97	3.72	0.54	3.03	0.65	1.74	0.25	1.62	0.25	4.65	0.52	13.10	5.35	1.42	0.76	8.44	3.21	1.85	101.98
M126-1	3.73	1.36	4.71	0.81	4.84	1.09	2.96	0.41	2.66	0.43	1.65	0.11	5.49	0.53	0.17	0.99	1.46	0.97	1.43	59.13
M126-2	4.13	1.61	6.05	1.13	7.09	1.65	4.52	0.66	4.21	0.66	2.52	0.17	2.90	0.21	0.14	0.98	0.59	0.56	1.16	59.41
M126-3	3.85	1.57	5.54	1.01	6.33	1.46	4.06	0.59	3.71	0.59	2.38	0.18	8.48	0.27	0.21	1.04	0.75	0.67	1.21	57.63
M126-4	2.74	1.11	4.14	0.79	4.94	1.16	3.13	0.44	2.85	0.45	1.78	0.11	4.01	0.16	0.06	1.00	0.56	0.55	1.17	39.96
M126-5	3.99	1.52	5.58	1.03	6.37	1.48	4.03	0.58	3.74	0.59	2.60	0.21	3.31	0.27	0.12	0.98	0.77	0.67	1.20	58.90
M126-7	4.99	1.73	7.05	1.31	8.15	1.89	5.16	0.73	4.74	0.75	3.28	0.24	5.47	0.30	0.18	0.89	0.70	0.62	1.20	72.37
M126-8	3.29	1.22	4.56	0.83	5.17	1.18	3.26	0.46	2.94	0.46	2.17	0.16	3.01	0.29	0.11	0.96	0.85	0.71	1.25	49.32
M126-9	3.41	1.16	4.58	0.84	5.31	1.22	3.29	0.48	3.06	0.48	2.25	0.17	2.05	0.29	0.10	0.90	0.81	0.67	1.21	49.41
M126-10	4.48	1.57	5.71	1.04	6.30	1.45	3.97	0.58	3.77	0.59	2.54	0.19	4.16	0.75	0.69	0.95	1.24	0.98	1.22	72.49

常明显(图 7b)。黑沟峡玄武岩稀土元素标及微量元素准化曲线与前人在庄科、张儿沟获得的 N-MROB 类似(图 7 阴影部分, 许继峰等, 1997; 李曙光等, 2003; 张宗清等, 2005; 徐通, 2016), 这与野外调查中庄科—黑沟峡岩片南部玄武岩呈带状展布吻合(图 1b),暗示其具有相似的地质意义。

5 讨论

5.1 岩石成因

由于总分配系数相同或很相近的元素比值基本不受分离结晶作用和部分熔融程度的影响,因而这些元素比值之间的相关变化可以较准确地检验地壳混染是否存在及程度。同化混染判别图(图 8)显示, 黑沟峡玄武岩 La/Yb—Nb/Ta、Th/Nb—Ce/Nb、Ta/Yb—Th/Yb 及 Ce/Pb—La/Nb 等元素比值之间正相关关系并不明显, 表明岩浆上升过程中地壳混染几乎不存在。

黑沟峡玄武岩球粒陨石标准化稀土配分曲线左倾, 微量元素蛛网图呈近水平型式, 约为 1 倍 N-MORB 含量, 在 Zr/Y—Nb/Y 图解(图 9a, Condie, 2005)和 Th/Nb—La/Sm 图解(图 9b, 典型 N-MORB、OIB 数据据 Sun and McDonough, 1989; 地壳数据据 Rudnick and Gao, 2003)

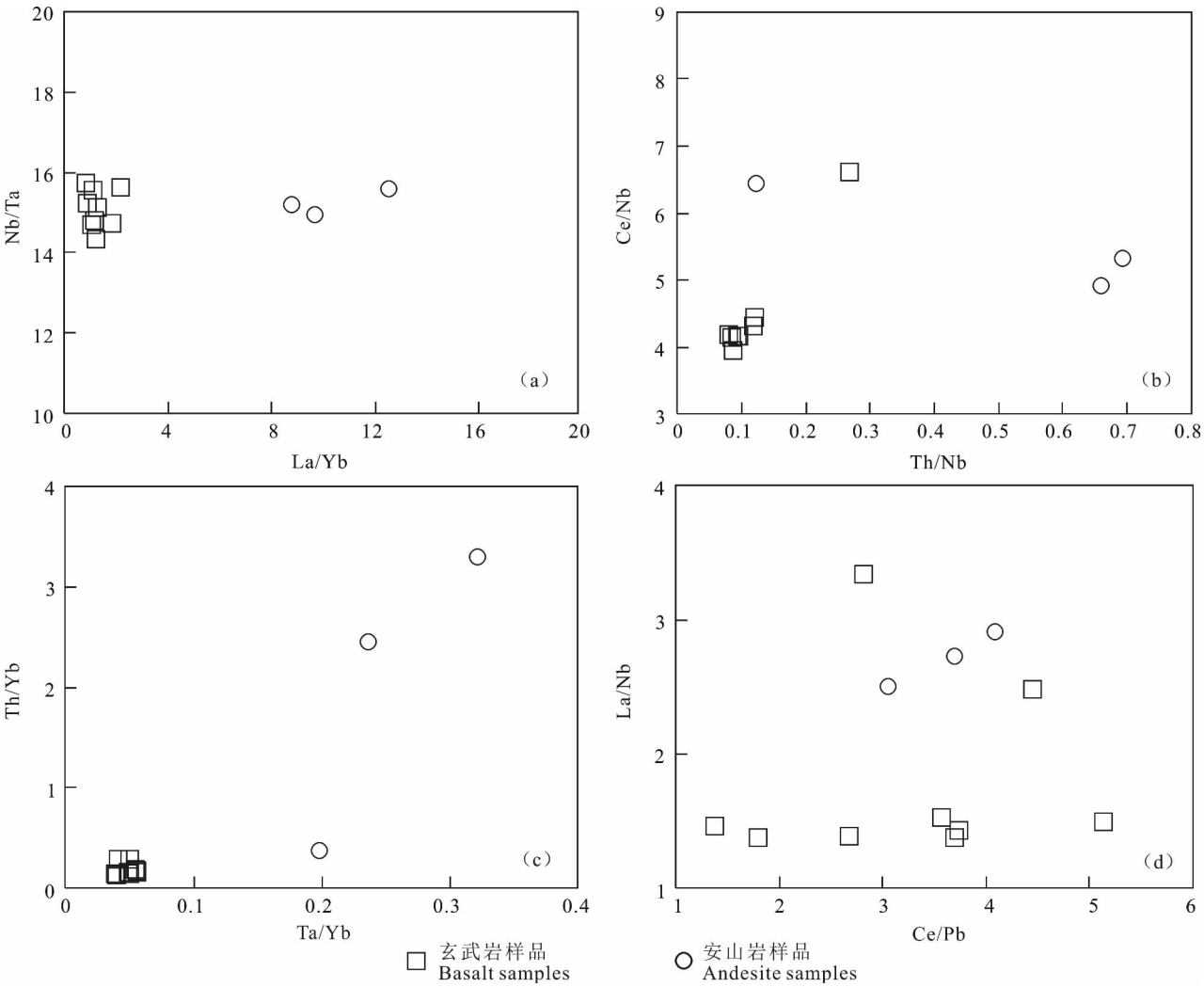


图 8 黑沟峡火山岩同化混染判别图解

Fig. 8 Assimilation hybrid discrimination diagrams of Heigouxia volcanic rocks

中，样品均落在 N-MORB 附近，$(La/Sm)_N$—$(Tb/Yb)_N$ 图解（图 9c，Xu Yigang et al.，2001）和 La/Sm—Sm/Yb 图解（图 9d，Aldanmaz et al.，2000）显示原始基性岩浆为亏损型尖晶石二辉橄榄岩高度熔融（约 10%）的产物，这与 N 型洋脊玄武岩十分相似。然而，黑沟峡玄武岩一些微量元素比值与典型 N-MORB 存在一定差异，如：黑沟峡玄武岩 Nb/U 值为 4.05 ~ 31.11，平均为 18.85；Nb/Ta 值为 14.52 ~ 16.00，平均为 15.14；Nb/La 值为 0.30 ~ 0.73，平均为 0.62；Ce/Pb 值为 1.38 ~ 5.13，平均为 3.25，均低于典型亏损地幔（典型 N-MORB 的 Nb/U、Nb/Ta、Nb/La、Ce/Pb 值分别为 49.57、17.65、0.93、25.00，Sun and McDonough，1989），而这些元素比值受分离结晶作用影响很小，且图 8 表明成岩过程中几乎未发生地壳物质混染，那么黑沟峡玄武岩地球化学特征特别是高场强元素特征可以代表其幔源性质。黑沟峡玄武岩较低的 Th 含量（$0.16 \times 10^{-6} \sim 0.75 \times 10^{-6}$）和较高的 Ce/Th 比值（24.71 ~ 51.62）、Ba/Th 比值（20.01 ~ 1314.63）并且缺乏明显的 Ce 负异常表明没有俯冲洋壳沉积物的加入，由于俯冲洋壳沉积物熔体具有较高的 Th（Pb）含量、低的 Ce/Th 比值（≈8）和 Ba/Th 比值（≈111）并呈现出明显的 Ce 负异常（Hole et al.，1984；Plank et al.，1998）；较低的 Nb/U（Ce/ Pb）比值、较高的 Ba/Th 比值（20.01 ~ 1314.63，平均为 340.90）以及变化较大的 Ba 含量（$11.73 \times 10^{-6} \sim 210.31 \times 10^{-6}$，平均为 89.08×10^{-6}）暗示存在一定的流体作用（Seghedi et al.，2004）。Nb/Ta、Nb/La 比值向地壳端元的偏移暗示其源区受到一定程度陆壳物质的混染（夏林圻等，2007）。

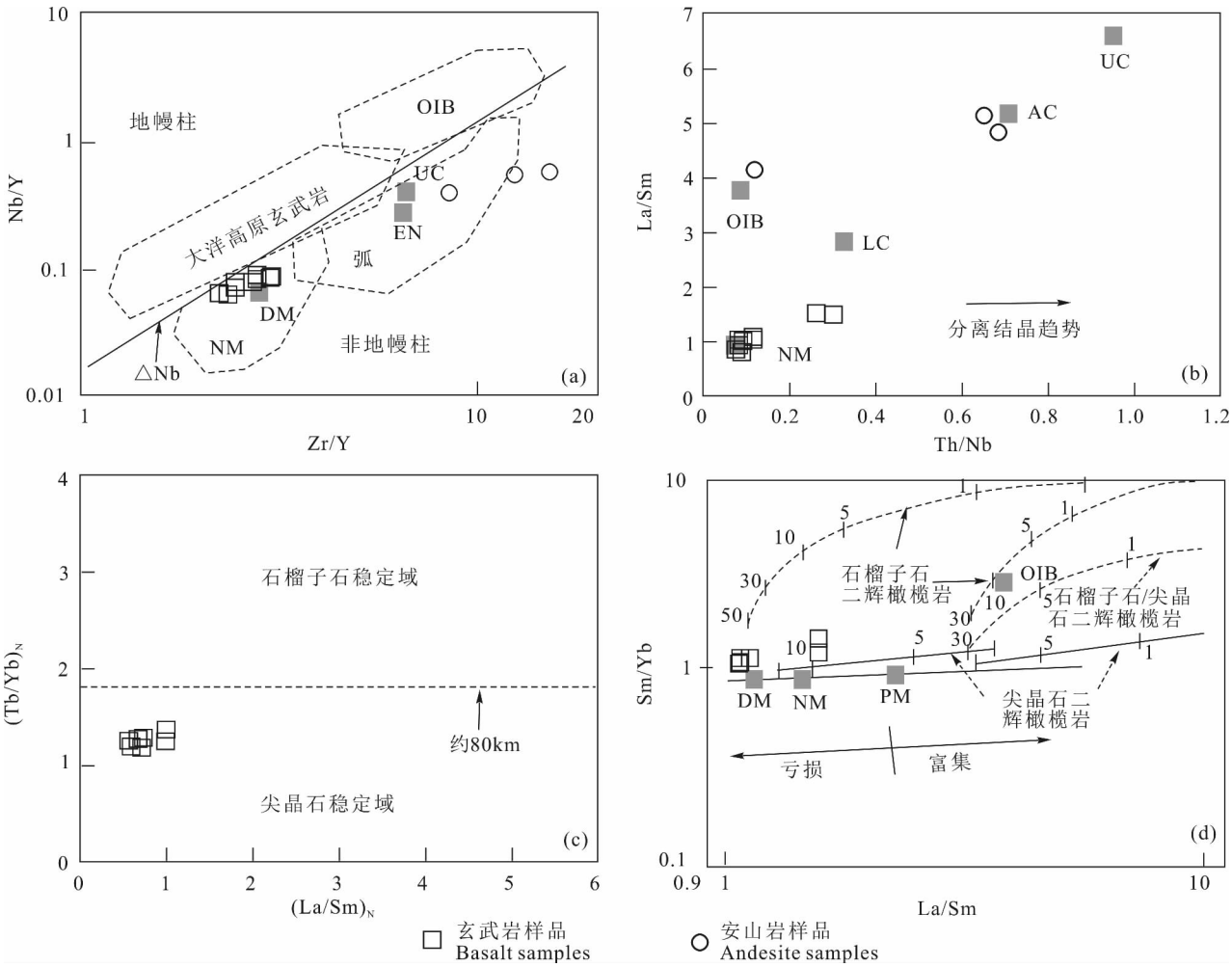


图 9 黑沟峡火山岩 Zr/Y—Nb/Y、Th/Nb—La/Sm、(La/Sm)N—(Tb/Yb)N、La/Sm—Sm/Yb 图解

Fig. 9 Zr/Y—Nb/Y, Th/Nb—La/Sm, (La/Sm)N—(Tb/Yb)N, and La/Sm—Sm/Yb diagrams of Heigouxia volcanic rocks

AC—平均大陆地壳; DM—亏损地幔; EN—富集组分; LC—下地壳; NM—正常洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; PM—原始地幔; UC—上地壳

AC—Average continental crust; DM—Depleted mantle; EN—Enriched composition; LC—Lower continental crust; NM—Normal mid-ocean ridge basalt; OIB—Ocean island basalt; PM—Primitive mantle; UC—Upper continental crust

黑沟峡玄武岩与原始基性岩浆相比具较低的 $Mg^{\#}$(32.87 ~ 59.33, 平均为 50.39)和 Cr(3.83×10^{-6} ~ 295.61×10^{-6}, 平均为 158.16×10^{-6})、Ni 含量(10.67×10^{-6} ~ 203.78×10^{-6}, 平均为 91.85×10^{-6}), 而岩浆演化过程中几乎未受陆壳物质混染, 暗示发生了一定程度的分离结晶作用(Rock, 1990)。在 Harker 图解(图 10)中, 黑沟峡变玄武岩 SiO_2 随着 MgO 的降低未明显升高, 这与上文所述的玄武岩受地壳混染微弱相吻合。黑沟峡玄武岩 MgO 与 CaO、Cr、Ni 表现出较好的线性关系, 暗示有富 Cr、Ni 矿物的分离结晶; Fe_2O_3、TiO_2 与 MgO 呈现出负相关关系, 表明未发生钛铁矿的分异结晶; 玄武岩样品整体表现出极弱的铕负异常, Al_2O_3 与 MgO 线性关系不明显, 暗示斜长石分离结晶作用较弱; 随着 MgO 降低, P_2O_5 含量略有增高的趋势, 但蛛网图显示明显的 P 负异常, 这可能和源区贫磷有关。在 $n(Si)/n(Ti)$—$n(Fe+Mg+Mn)/n(Ti)$ 图解(图 11a, Stanley and Russell, 1989)中, 玄武岩样品全部落在单斜辉石分离结晶线上, 且线性关系良好; 在 $Mg^{\#}$—CaO/ Al_2O_3 图解(图 11b, Späth et al., 2001)中, 大部分样品 $Mg^{\#}$ 与 CaO/Al_2O_3 线性关系良好(部分样品线性关系不甚明显可能是后期碳酸盐化所致), 表明单斜辉石是玄武质岩浆演化过程中主要的结晶分离矿物。

图 10 显示, 黑沟峡安山岩与玄武岩并非同源岩浆演化关系。黑沟峡安山岩样品 Nb/Ta 值

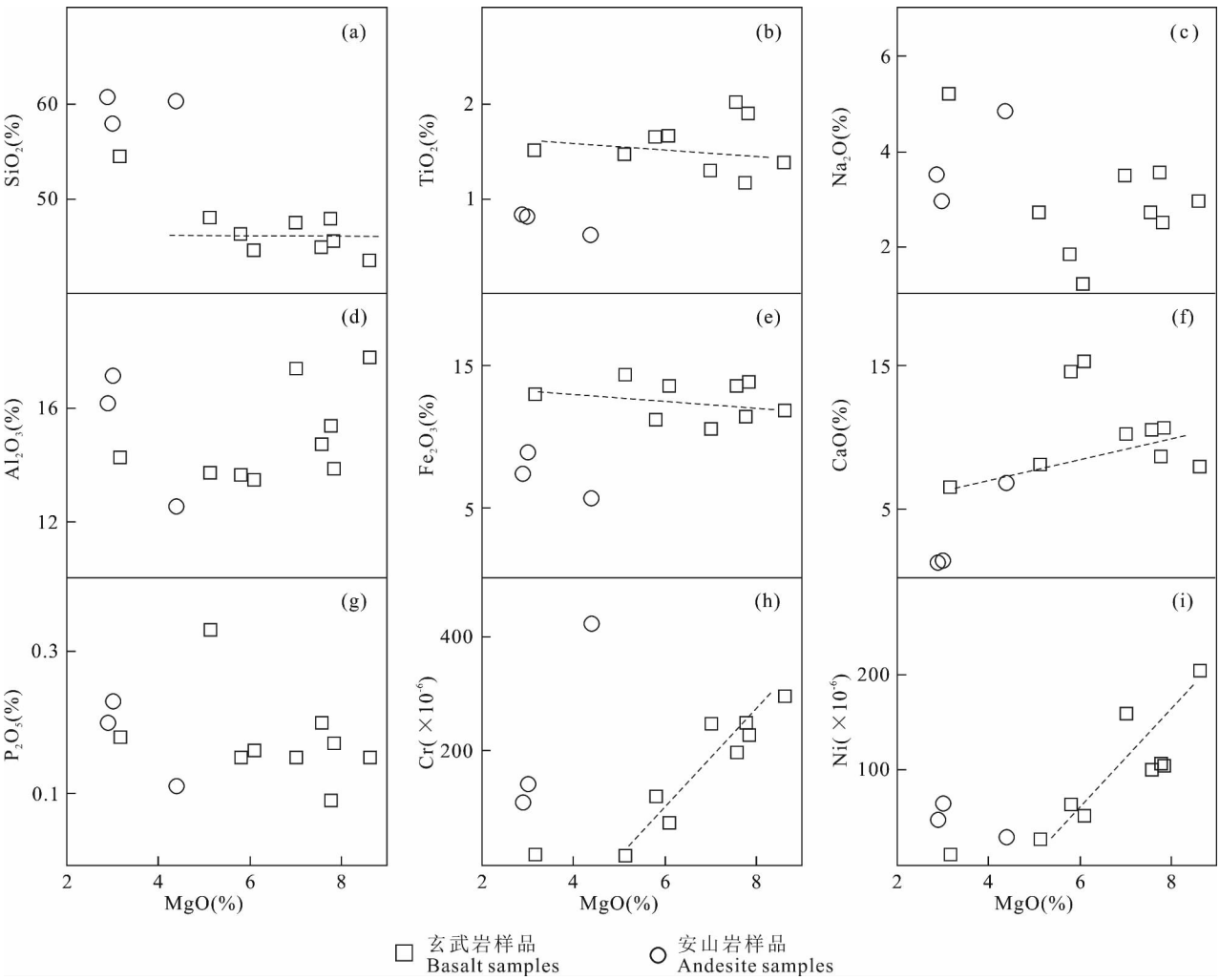


图 10 黑沟峡火山岩 Harker 图解

Fig. 10 Harker diagrams of Heigouxia volcanic rocks

(14.96 ~ 15.60)平均为 15.26，与中地壳接近(16.67)；Nb/U 值(5.03 ~ 6.36)平均为 5.70，与上地壳接近(4.44)；Nb/La 值(0.34 ~ 0.40)平均为 0.37，与上地壳接近(0.39)；Nb/Th 值(1.44 ~ 8.16)平均为 3.71，与下地壳接近(4.17)；La/Yb 值(8.78 ~ 12.52)平均为 10.31，与中地壳接近(10.94)(地壳数据据 Rudnick and Gao, 2003)，且安山岩样品 SiO_2 含量(57.92% ~ 60.71%，平均为 59.67%)较高，不可能与地幔橄榄岩相平衡(Jahn and Zhang Zongqing, 1984)，在同化混染判别图中(图 8)，黑沟峡安山岩样品不同元素比值间的正相关关系明显，表明成岩过程中有地壳物质的加入。另外，安山岩样品具较高的 $Mg^{\#}$ 值(40.40 ~ 60.72)和 Cr($110.43 \times 10^{-6} \sim 423.45 \times 10^{-6}$)、Ni($29.24 \times 10^{-6} \sim 64.32 \times 10^{-6}$)含量，暗示有地幔物质的加入。安山岩样品 A/CNK 值介于 0.57 ~ 1.62，准铝质、过铝质皆有且 A/CNK 值变化范围较大，两个样品 CIPW 标准矿物中出现刚玉分子(M125-1 为 6.08%，M125-4 为 7.04%)且远大于 1%，但其余两个样品未出现刚玉分子，表明黑沟峡安山岩并非单纯的壳源或幔源成因(Chappell and White, 1974)，而可能为壳幔混合成因。黑沟峡安山岩稀土元素含量与上地壳较为接近，暗示陆壳物质主体为上地壳组分，重稀土微右倾暗示基性端元可能为亏损地幔，地壳组分应多于地幔组分。

综上，黑沟峡安山岩与玄武岩具有不同的成岩模式，并非同源岩浆演化关系。黑沟峡玄武岩为亏损型尖晶石二辉橄榄岩高度熔融(约 10%)的产物，其源区为一个受再循环陆壳物质及流体改造过的地幔源区，在岩浆演化过程中以单斜辉石的结晶分离

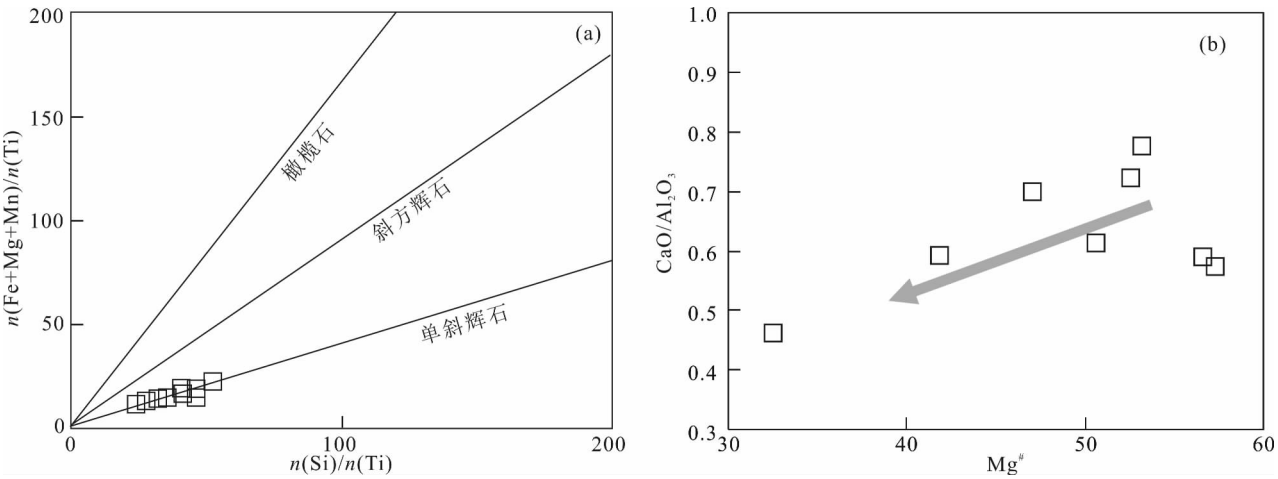


图 11 黑沟峡玄武岩 $n(Si)/n(Ti)$—$n(Fe+Mg+Mn)/n(Ti)$、$Mg^{\#}$—CaO/Al_2O_3图解

Fig. 11 $n(Si)/n(Ti)$—$n(Fe+Mg+Mn)/n(Ti)$ and $Mg^{\#}$—CaO/Al_2O_3 diagrams of Heigouxia basalt

为主; 黑沟峡安山岩则为黑沟峡玄武岩所代表的洋盆俯冲阶段"富水地幔楔"部分熔融后形成的基性岩浆在上升过程中熔融一定量地壳物质形成的, 为壳幔混合成因。

5.2　构造环境

黑沟峡玄武岩 Nb/La 值为 0.30 ~ 0.73(<1), Hf/Ta 值为 12.65 ~ 15.82(>5), La/Ta 值为 20.49 ~ 55.63(>15), Ti/Y 值平均为 314.03(<350), Ti/V 值平均为 28.44(<30), 可排除板内玄武岩可能性, 并将其限定为弧玄武岩或 N-MORB(Condie, 1989)。有 2 个样品的 Th/Yb 值(0.20)大于 0.10, 7 个样品(0.05 ~ 0.09)小于 0.10; 有 5 个样品的 Hf/Th 值(8.91 ~ 11.77)大于 8.00, 4 个样品(3.10 ~ 7.75)小于 8.00, 表明玄武岩样品整体具 N-MORB 性质, 部分样品仍保留一些"弧印记"(Condie, 1989)。在 Zr—Zr/Y 图解(图 12a, Pearce and Norry, 1979)中, 样品全部落入 N-MORB 区域, 在 Nb × 2—Zr/4—Yb 图解(图 12b, Meschede, 1986)中整体落入 N-MORB 区域, 两个样品有向弧区域偏移的趋势。由于勉略地区新元古代为大陆边缘弧而并非大洋岛弧(下文详述), 因而认为少量样品表现出的"弧印记"可能为源区再循环物质的加入所致。上述结果表明黑沟峡玄武岩形成于洋脊环境, 表征古老洋盆的存在。

黑沟峡安山岩 Sr 含量为 110.82×10^{-6} ~ 618.08×10^{-6}(2 个样品 $< 300 \times 10^{-6}$), Y 含量为 9.17×10^{-6} ~ 19.24×10^{-6}(平均为 14.10×10^{-6}), Sr/Y 值为 7.97 ~ 67.40(2 个样品 <20), Yb 含量为 1.62×10^{-6} ~ 2.29×10^{-6}(平均为 1.93×10^{-6} > 1.90×10^{-6}), $(La/Yb)_N$ 为 5.92 ~ 8.44, La/Yb 为 8.78 ~ 12.52, 表现出正常弧火山岩的地球化学特征(Castillo, 2006)。黑沟峡安山岩样品 La/Yb 值为 8.78 ~ 12.52, Zr/Y 值为 8.18 ~ 14.50, Ti/V 值为 24.77 ~ 41.91, Hf/Yb 值为 1.95 ~ 2.87, Sc/Ni 值为 0.21 ~ 0.21, 与大陆边缘弧安山岩具有相似性(Condie, 1986, 1989)。在 Sc/Ni—La/Yb 和 Th/Yb—La/Yb 构造环境判别图(图 12c、d, Condie, 1986)中安山岩样品整体落入大陆边缘弧区域。以上结果表明黑沟峡安山岩形成于大陆边缘弧环境。

5.3　构造意义

重新认识勉略带的时代、物质组成及构造意义, 绕不开对"三岔子蛇绿岩"及"黑沟峡大陆裂谷双峰式火山岩"等标志性研究成果的基本属性及时代的探讨, 前者通常被认为是一套具有成因联系的弧环境蛇绿岩, 后者被认为是"晚古生代勉略洋"打开前夜陆内裂解的产物。"三岔子蛇绿岩"是指三岔子周边的一套超基性岩(蛇纹岩)—辉长岩—辉绿岩—玄武(安山)岩—斜长花岗岩组合, 现今呈构造岩片产出且不同端元并未直接接触, 这增加了对其属性、时代及成因研究的难度。早前地学界主要依据略阳三岔子偏桥沟和石家庄一带的硅质岩中的早石炭世放射虫化石和泥盆纪牙形石化石来限定"三岔子蛇绿岩"及相关火山岩形成时代为晚古生代(冯庆来等, 1996), 相应的勉略洋盆存在时限为晚古生代—早中生代, 而这一认识与近年来报道的高精度测年资料差异较大, 如三岔子偏桥沟四方坝斜

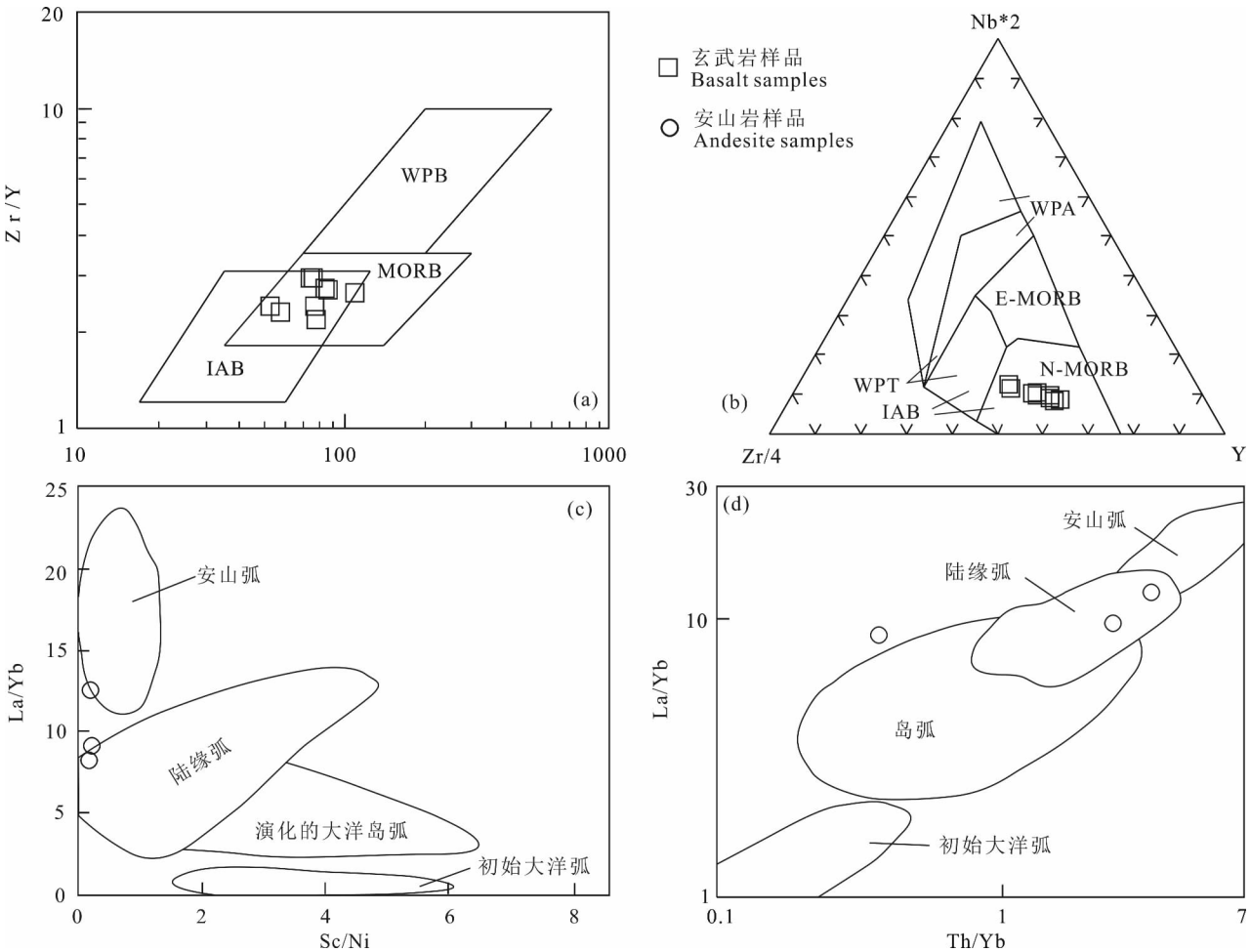


图 12 黑沟峡火山岩构造环境判别图解

Fig. 12 Tectonic discrimination diagrams of Heigouxia volcanic rocks

E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; IAB—弧玄武岩; MORB—洋脊玄武岩; N-MORB—正常洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩; WPA—板内碱性玄武岩; WPB—板内玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩

E-MORB—Enriched mid-ocean ridge basalt; IAB—Island arc basalt; MORB—Mid-ocean ridge basalt; N-MORB—Normal mid-ocean ridge basalt; OIB—Ocean-island basalt; WPA—Within-plate alkali basalt; WPB—Within-plate basalt; WPT—Within-plate tholeiitic basalt

长花岗岩年龄(923 ± 13Ma,闫全人等,2007)大于三岔子偏桥沟辉长岩年龄(808 ± 10Ma,闫全人等,2007),远大于三岔子田坝辉绿岩年龄(295 ~ 264Ma,赖绍聪和秦江锋,2010)。地球化学研究表明三岔子四方坝斜长花岗岩可能为辉长质岩石剪切深融作用的产物(徐通,2014),若二者具有成因联系,辉长岩年龄应大于斜长花岗岩年龄。因此,"三岔子蛇绿岩"主体可能为新元古代勉略洋俯冲阶段的产物,并有后期辉绿岩脉的灌入(赖绍聪等,1998;徐通,2014),并非真正意义的蛇绿岩,前人获得的晚古生代古生物可能为后期卷入的陆缘沉积物组成。

李曙光等(1996)认为"黑沟峡大陆裂谷双峰式火山岩"是一套玄武岩—英安岩/流纹岩组合,并获得其 Sm-Nd 等时线年龄为 242 ± 21Ma,Rb-Sr 等时线年龄为 221 ± 13Ma,代表火山岩的变质时代。黑沟峡火山岩位于庄科岩片,两个端元呈断层接触。本文课题组通过对庄科、黑沟峡两个岩片不同位置(庄科沟、黑沟峡、惠家沟和张儿沟)的研究表明,南部主体为一套纯净的玄武岩,北部为一套中性夹少量中酸性火山岩组合,且基性、中(酸)性火山岩呈断层接触。本文获得的黑沟峡火山岩基性端元具有 N-MORB 属性,且与庄科沟以及黑沟峡岩片东端惠家沟、张儿沟等地玄武岩具有相似的岩石学、地球化

学特征和构造意义，呈东西向带状分布(徐通，2016)，中性端元为钙碱性安山岩，未发现流纹岩/英安岩，表明黑沟峡火山岩并非前人认为的“双峰式火山岩”，而应结合区域火山岩展布重新认识。黑沟峡岩片北部中性夹少量中酸性火山岩部分包括张儿沟洋壳俯冲成因 Adakite(840 ±5Ma，2016)、惠家沟陆缘弧安山岩(797 ±14Ma，徐通，2016)和黑沟峡陆缘弧安山岩，本文获得黑沟峡中性火山岩具有陆缘弧地球化学属性，成岩时代为 807 ±13Ma(MSWD = 3.6，n = 17)，而并非前人认为的晚古生代中酸性火山岩。因而黑沟峡火山岩并非“晚古生代大陆裂谷型双峰式火山岩”，其基性端元应为古洋壳残片，代表新元古代勉略洋盆的存在，中性端元是新元古代洋盆北向俯冲中晚期形成的陆缘弧的一部分。

近年来的研究表明，勉略带内岩浆岩(火山岩为主体)可分为洋壳型、俯冲早期 Adakite、陆缘弧型及裂谷型等四大类。其中，洋壳型火山岩包括本文及前人报道的略阳地区庄科—黑沟峡 N 型洋脊玄武岩和康县地区关家沟组内呈构造岩片产出的 N-MORB、E-MORB 及 OIB 型火山岩(许继峰等，1997；裴先治，2001；裴先治等，2002；赖绍聪等，2003；李曙光等，2003；张宗清等，2005；徐通，2016)，闫全人等(2007)获得康县香子坝和水泉沟等地的洋壳型玄武岩锆石 SHRIMP 年龄为 826 ~812Ma，张宗清(2005)等获得略阳庄科洋壳玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄为 877 ±78Ma，指示勉略地区新元古代早中期洋盆的存在。洋壳火山岩北侧发育与之匹配的洋盆俯冲早期 Adakite 和较大规模陆缘弧岩浆岩(火山岩为主体)(李曙光等，2003；赖绍聪等，2003；张宗清等，2005；徐通等，2016)，其中，略阳张儿沟 Adakite 成岩年龄为 840 ±5Ma(徐通等，2016)，为洋盆俯冲早期洋壳部分熔融的产物；陆缘弧岩浆岩包括康县马家沟岩片、略阳三岔子古岩浆弧、黑沟峡岩片北部以及略阳纸房沟、五郎坪岩片，为安山岩夹少量玄武岩、玄武安山岩、流纹岩、英安岩组合，其中，略阳三岔子偏桥沟弧辉长岩、惠家沟弧安山岩、水得沟弧安山岩年龄介于 808 ~797Ma(闫全人等，2007；徐通，2016)，本文获得的黑沟峡陆缘弧安山岩年龄为 807 ±13Ma，进一步指示勉略地区存在新元古代早中期洋盆俯冲作用并一直持续到 800Ma 左右，而这一聚合过程并非局限于勉略地区，扬子板块西北缘同样存在新元古代早中期洋盆俯冲作用和对应的沟—弧—盆体系(裴先治，1992)，年代学测试结果多集中在 800Ma 之前(赵凤清等，2006；Druschke et al.，2006；Lai Shaocong et al.，2007；崔建堂等，2010)。发生于勉略地区及扬子板块西北缘的区域性聚合型岩浆事件很可能是对 Rodinia 超大陆聚合的响应。

新元古代中晚期(800 Ma 左右)勉略带及邻区(南秦岭及扬子板块西北缘)进入区域性裂解阶段。勉略地区大堡岩组中板内裂解型玄武岩(778 ~667Ma；王涛，2008)、横现河张岩沟大陆裂谷双峰式火山岩(728 ±10Ma；徐通等，2013)、琵琶寺裂解型玄武岩(783 ~754Ma；李瑞保等，2009)指示勉略地区在新元古代中晚期已由早前的会聚体制向裂解体制的转变。扬子板块西北缘后碰撞型花岗岩、裂谷型火山岩、裂谷型辉长岩及复式岩体的形成时代多集中在 809 ~730Ma(Zhou Meifu et al.，2002；Zhao Junhong and Zhou Meifu，2008，2009；Pei Xianzhi et al.，2009；徐学义等，2010；李佐臣等，2013)，南秦岭武当群裂谷型火山岩、耀岭河群裂谷型基性岩及老君殿裂谷型(花岗)闪长岩、吐雾山 A 型花岗岩形成时代多集中在 755 ~679Ma(陈志宏，2004；凌文黎等，2007)，表明勉略地区及邻区新元古代中晚期(800Ma ~)的伸展—裂解事件并不是局部的，而是区域性的。新元古代勉略地区及邻区在 800Ma 左右构造体制的转变在区域地幔性质的变化上也有明显体现。同位素研究表明，南秦岭及扬子板块北缘新元古代前幔源岩石高 $\varepsilon_{Nd}(t)$，但自中元古代晚期以来它们的源区开始向着 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 减小、地幔亏损程度降低的方向演变，至新元古代中期 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值明显减小，新元古代中期至早古生代晚期保持稳定(张成立等，2007)，反映出地表地质演化与深部地幔动力背景的良好耦合关系。

6　结论

(1) 黑沟峡火山岩为一套拉斑玄武岩及少量钙碱性安山岩组合，玄武岩表现出 N 型洋脊玄武岩地球化学特征，为勉略地区新元古代早中期古洋盆残余，岩浆演化过程中以单斜辉石分离结晶为主，岩浆源区有再循环物质加入。黑沟峡安山岩表现出大陆边缘弧安山岩地球化学属性，为壳幔混合成因，成岩年龄为 807 ±13Ma(MSWD = 3.6，n = 17)，为勉略地区新元古代早中期陆缘弧残余。

(2) 黑沟峡火山岩表征勉略地区新元古代早中期弧—盆体系的存在，指示勉略地区新元古代板块聚合过程一直持续到 800Ma 左右，为 Rodinia 超大

陆聚合事件在该地区的岩浆响应。

致谢:西北大学郭安林教授、中国地质科学院闫臻研究员及审稿专家提出宝贵意见和建议,谨致谢忱。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; the literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

陈志宏. 2004. 秦岭造山带东部新元古代热—构造事件及其地质意义. 导师:陆松年. 北京:中国地质科学院博士学位论文:1~124.

崔建堂, 韩芳林, 张拴厚, 王根宝, 王北颖, 王学平, 彭海练, 王金安, 郭岐明, 彭俟英, 崔海曼. 2010. 南秦岭西乡群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其构造地质意义. 陕西地质, 28(2):53~58.

邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 狄永军, 苏尚国, 赵国春, 段培新, 戴蒙. 2015. 关于火成岩常用图解的正确使用:讨论与建议. 地质论评, 61(4):717~734.

冯庆来, 杜远生, 殷鸿福, 盛吉虎, 许继锋. 1996. 南秦岭勉略蛇绿混杂岩带中放射虫的发现及其意义. 中国科学(D 辑), 26(增刊):78~82.

冯益民, 曹宣铎, 张二鹏. 2004. 勉县—略阳带大地构造属性之探讨. 地质论评, 50(3):295~303.

赖绍聪, 张国伟, 杨永成, 陈家义. 1998. 南秦岭勉县—略阳结合带蛇绿岩及弧火山岩地球化学及其大地构造意义. 地球化学, 27(3):283~292.

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. 勉略构造带三岔子辉绿岩墙锆石 U—Pb 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.

李瑞保, 裴先治, 丁仨平, 李佐臣, 冯建赟, 孙雨, 张亚峰, 刘战庆. 2009. 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. 地质学报, 83(11):1613~1623.

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):1164~1173.

李佐臣, 裴先治, 李瑞保, 裴磊, 刘成军, 陈国超, 陈有炘, 徐通, 杨杰, 魏博. 2013. 扬子地块西北缘刘家坪地区大滩花岗岩体年代学、地球化学及其构造环境. 地质论评, 59(5):869~884.

林振文, 秦艳, 周振菊, 岳素伟, 曾庆涛, 王立新. 2013. 南秦岭勉略带铧厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究. 岩石学报, 29(1):83~94.

凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 柳小明, 毛新武, 彭练红, 刘早学, 程建萍, 杨红梅. 2007. 南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义. 科学通报, 52(12):1445~1456.

裴先治. 1992. 碧口地区复理石岩系特征及其构造环境. 地球科学与环境学报, 14(1):42~49.

裴先治. 2001. 勉略—阿尼玛卿构造带的形成演化与动力学特征. 导师:张国伟. 西安:西北大学博士学位论文:1~154.

裴先治, 张国伟, 赖绍聪, 李勇, 陈亮, 高明. 2002. 西秦岭南缘勉略构造带主要地质特征. 地质通报, 21(8~9):486~493.

王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 郑松彦, 耿元生. 1987. 变质岩原岩图解判别法. 北京:地质出版社:1~199.

王涛. 2008. 南秦岭增生杂岩带构造岩石组合及其形成过程. 导师:王宗起. 北京:中国地质科学院博士论文:1~117.

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, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判断大陆玄武岩和岛弧玄武岩. 岩石矿物学杂志, 26(1):77~89.

徐通, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘成军, 陈有炘, 汪晓伟, 杨杰, 胡楠. 2013. 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. 中国地质, 40(06):1777~1792.

徐通. 2014. 勉略构造带三岔子—横现河地区蛇绿岩与相关火山岩地球化学、年代学及构造演化. 导师:裴先治. 西安:长安大学硕士学位论文:1~137.

徐通, 裴先治, 刘成军, 陈有炘, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊. 2016. 南秦岭勉略构造带张儿沟新元古代变安山岩地球化学特征及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄——Rodinia 超大陆聚合事件的记录. 地质论评, 62(2):434~450.

徐通. 2016. 秦岭南缘勉略构造带康县—略阳地区组成特征及构造演化研究. 导师:裴先治. 西安:长安大学博士论文:1~136.

许继峰, 于学元, 李献华, 韩吟文, 盛吉虎, 张本仁. 1997. 高度亏损的 N-MORB 型火山岩的发现:勉略古洋盆存在的新证据. 科学通报, 42(22):2414~2418.

徐学义, 陈隽璐, 李向民, 马中平, 王洪亮, 夏林圻, 夏祖春, 李平. 2010. 西乡群三郎铺组和大石沟组火山岩 U-Pb 定年及岩石成因研究. 岩石学报, 26(2):617~632.

闫全人, 王宗起, 闫臻, 向忠金, 陈隽璐, 王涛. 2007. 秦岭勉略构造混杂岩带康县—勉县段蛇绿岩块—镁铁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义. 地质评论, 53(6):755~763.

杨志华, 邓亚婷. 1999. 秦岭造山带组成结构与演化的新认识. 陕西地质, 17(2):16~32.

赵凤清, 赵文平, 左义成, 李宗会, 薛克勤. 2006. 陕西汉中地区新元古代岩浆岩 U-Pb 年代学. 地质通报, 25(3):383~388.

张成立, 高山, 袁洪林, 张国伟, 晏云翔, 罗静兰, 罗金海. 2007. 南秦岭早古生代地幔性质:来自超镁铁质、镁铁质岩脉及火山岩的 Sr—Nd—Pb 同位素证据. 中国科学(D 辑), 37(7):857~865.

张国伟, 张本仁, 袁学诚, 肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京:科学出版社:1~855.

张国伟, 程顺有, 郭安林, 赖绍聪, 姚安平. 2004. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合. 地质通报, 23(9~10):846~853.

张国伟, 等. 2016. 秦岭勉略构造带与中国大陆构造. 北京:科学出版社:1~501.

张宗清, 唐索寒, 张国伟, 杨永成, 王进辉. 2005. 勉县—略阳蛇绿杂岩带镁铁质—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.

Aldanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, Mitchell J G. 2000. Petrogenetic evolution of Late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey. Journal of Vlocanology and Geothermal Research, 102(1~2):67~95.

Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis. Chinese Science Bulletin, 51(3):257~268.

Chappell B W, White A R. 1974. Two contrasting granite types. Pacific Geology, 8: 173 ~ 174.

Chen Fukun , Hegner E, Todt W. 2000. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc. International Journal of Earth Sciences, 88: 791 ~ 802.

Chen Zhihong. 2004&. The Neoproterozoic tectono-thermal events in the eastern Qinling orogen, and the geo-tectonic significances. Supervisor: Lu Songnian. Beijing: Doctoral Dissertation of The Chinese academy of geological sciences: 1 ~ 124.

Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern united states. Geology, 94: 845 ~ 861.

Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts in basalts and andesites across the Archaean—Proterozoic boundary: identification and significance. Lithos, 23: 1 ~ 18.

Condie K C. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? Lithos, 79(3 ~ 4): 491 ~ 504.

Cui Jiantang, Han Fanglin, Zhang Shuanhou, Wang Genbao, Wang Beiying, Wang Xueping, Peng Hailian, Wang Jinan, Guo Qiming, Peng Aiying, Cui Haiman. 2010&. Zircon SHRIMP U-Pb dating and the tectonic significance of the Xixiang group in southern Qinling. Geology of Shaanxi, 28(2): 53 ~ 58.

Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Di Yongguo, Su Shangguo, Zhao Guochun, Duan Peixin, Dai Meng. 2015&. On the correct application in the common igneous petrological diagrams: discussion and suggestion. Geological Review, 61(4): 717 ~ 734.

Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, Liu Xiaoming, Genser J, Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling Orogen, China: Review and synthesis. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 213 ~ 237.

Druschke P A, Hanson A D, Yan Quanren, Wang Zongqi, Wang Tao. 2006. Stratigraphic and SHRIMP detrital zircon evidence for a Neoproterozoic continental arc, central China:Rodinia implications. The Journal of Geology, 114: 627 ~ 636.

Feng Qinglai, Du Yuansheng, Yin Hongfu, Sheng Jihu, Xu Jifeng. 1996 #. The discovery and its significance of the radiolaria in Mianlüe ophiolitic melange belt, South Qinling. Science in China (Series D), 26 (Suppl.): 78 ~ 82.

Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. 2004&. Discussion on the tectonic features of the Mianxian—Lüeyang zone. Geological Review, 50(3): 295 ~ 303.

Hole M J, Saunders A D, Marriner G F, Tamey J. 1984. Subduction of pelagio sediments: Implications for the origin of Ce-anomalous basalts from the Manana islands. Journal of the Geological Society, London, 141(3): 453 ~ 472.

Irvine T N, Baragar W R A. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. Canadian Journal of Earth Sciences, 8(5): 523 ~ 548.

Jahn B M, Zhang Zongqing. 1984. Arehean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implication. Contributions to Mineralogy and Petrology, 85: 224 ~ 243.

Lai Shaocong, Zhang Guowei, Yang Yongcheng, Chen Jiayi. 1998&. Geochemistry of the ophiolite and island arc volcanic rock in the Mianxian—Lüeyang Suture Zone, Southern Qinling and their tectonic significanes. Geochimica, 27(3): 283 ~ 292.

Lai Shaocong, Zhang Guowei, Pei Xianzhi, Yang Haifeng. 2003 #. Geochemistry and tectonic significance of ophiolite and ocean island volcanic rocks from Kangxian—Pipasi—Nanping structure zone, South Qinling. Science in China (Series D), 33(1): 10 ~ 19.

Lai Shaocong, Li Yongfei, Qin Jiangfeng. 2007. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Dongjiahe ophiolite complex from the western Bikou terrane. Science in China (Series D), 50 (Suppl. II): 305 ~ 313.

Lai Shaocong, Qin Jiangfeng. 2010&. Zricon U-Pb dating and Hf isotopic composition of the diabase dike swarm from Sanchazi area, Mianlüe Suture——Chronology evidence for the paleo-Tethys oceanic crust subduction. Journal of Earth Science and Environment, 32(1): 27 ~ 33.

Li Ruibao, Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuochen, Feng Jianyun, Sun Yu, Zhang Yafeng, Liu Zhanqing. 2009&. LA-CP-MS zircon U-Pb dating of the Pipasi basic volcanic rocks within the Mian-Lüe tectonic zone in the southern margin of West Qinling and its geological implication. Acta Geological Sinica, 83(11): 1613 ~ 1623.

Li Shuguang, Sun Weidong , Zhang Guowei, Chen Jiayi, Yang Yongcheng. 1996#. Geochronology and geochemistry of Heigouxia metamorphic volcanic rocks from Mian-Lüe Tectonic Belt, South Qinling: Evidence for the closing time of Paleozoic oceanic basin. Science in China (Series D), 26(3): 223 ~ 230.

Li Shuguang, Hou Zhenhui, Yang Yongcheng, Sun Weidong, Zhang Guowei, Li Qiuli. 2003 #. Geochronology and geochemistry of Sanchaizi magmatic arc, Mian-Lüe Tectonic Belt, South Qinling. Science in China (Series D), 33(12): 1164 ~ 1173.

Li Zuochen, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Pei Lei, Liu Chengjun, Chen Guochao, Chen Youxin, Xu Tong, Yang Jie, Wei Bo. 2013&. Geochronological and geochemical study on Datan granite in Liujiaping area, northwest Yangtze block and its tectonic sitting. Geological Review, 59(5): 869 ~ 884.

Lin Zhenwen, Qin Yan, Zhou Zhenju, Yue Suwei, Zeng Qingtao, Wang Lixin. 2013&. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachanggou area, Mian-Lüe Suture, South Qinling. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 83 ~ 94.

Ling Wenli, Ren Bangfang, Duan Ruichun, Liu Xiaoming, Mao Xinwu, Peng Lianhong, Liu Zaoxue, Cheng Jianping, Yang Hongmei. 2007 #. The U-Pb geochronology and geological significance of mafic intrusions from Wudangshan and Yaolinghe groups, southern Qinling. Chinese Science Bulletin, 52(12): 1445 ~ 1456.

Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex, version 3: a geochronological toolkit for microsoft excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1 ~ 70.

Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean basalts and continental tholeiites with the Nb—Zr—Y diagram. Chemical Geology, 56, 207 ~ 218.

Pearce J A, Norry M J. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks. Contributions to Mineralogy and Petrology, 69: 33 ~ 47.

Pei Xianzhi. 1992&. The features and the tectonic settings of the flysch formation in the Bikou area, the southern Qinling. Journal of Earth Science and Environment, 14(1): 42 ~ 49.

Pei Xianzhi. 2001&. Geological evolution and dynamics of the Mianlüe—A' nyemaqen tectonic zone, Central China. Supervisor: Zhang Guowei. Xi ' an: Doctoral Dissertation of Northwest University: 1 ~ 154.

Pei Xianzhi, Zhang Guowei, Lai Shaocong, Li Yong, Chen Liang, Gao Ming. 2002&. Main geological features of the Mianlüe tectonic belt on the southern margin of the West Qinling. Geological Bulletin of China, 21(8~9): 486~493.

Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Saping, Li Ruibao, Feng Jianyun, Sun Yu, Zhang Yafeng, Liu Zhanqing. 2009. Neoproterozoic Jiaoziding peraluminous granite in the northwestern margin of Yangtze block: Zircon SHRIMP U-Pb age and geochemistry and their tectonic significance. Earth Science Frontiers, 16(3): 231~249.

Plank T, Langmuir C H. 1998. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. Chemical Geology, 145: 325~394.

Rock N M S. 1990. Lamprophyres: the global occurrence petrology, origin and economic significance of some rocks of deep origin. Glasgow: Blackie & Sons Ltd, 1~285.

Rudnick R L, Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry, 3: 1~64.

Seghedi I, Downes H, Vaselli, Szak A. 2004. Post-collisional TertiaryQuaternary mafic alkalic magmatism in the Carpathian—Pannonian region: A review. Tectonophysics, 393: 43~62.

Siebel W, Blaha U, Chen Fukun, Rohrmüller J. 2005. Geochronology and geochemistry of a dyke—host rock association and implications for the formation of the Bavarian Pfahl shear zone, Bohemian Massif. International Journal of Earth Sciences, 94(1): 8~23.

Simonen A. 1953. Stratigraphy and sedimentation of the Svecofennidic, early Archean supracrustal rocks in southwestern Finland. Bulletin of the Geological Society, 160: 1~64.

Späth A, Roex A P, Opiyo-Akech N. 2001. Plume—lithosphere interaction and the origin of continental rift-related alkaline volcanism——the Chyulu Hills Volcanic Province, Southern Kenya. Journal of Petrololgy, 42: 765~778.

Stanley C R, Russell J K. 1989. Petrologic hypothesis testing with Pearce element ration diagrams derivation of diagram axes. Contributions to Mineralogy and Petrology, 103: 78~89.

Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD, Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society Special Publication, 42: 313~345.

Wang Renmin, He Gaopin, Chen Zhenzhen, Zheng Songyan, Geng Yuansheng. 1987 #. Recovery of metamorphic rocks. Beijing: Geological Publishing House: 1~199.

Wang Tao. 2008&. Tectonic—lithological assemblages of Southern Qinling accretionary complex and their formation process. Supervisor: Wang Zongqi. Beijing: Doctoral Dissertation of The Chinese academy of geological sciences: 1~117.

Wang Zongqi, Yan Quanren, Yan Zhen, Wang Tao, Jiang Chunfa, Gao Lianda, Li Qiugen, Chen Juanlu, Zhang Yingda, Liu Ping, Xie Chunlin, Xiang Zhongjin. 2009&. New division of the main tectonic units of the Qinling Orogenic Belt, central China. Acta Geologica Sinica, 83(11): 1527~1546.

Wright J R. 1969. A simple alkalinity ration and its application to questions of non-orogenic granite. Geological Magazine, 106: 370~384.

Winchester J A, Floyd P A. 1976. Geochemical magma type discrimination: Application to altered and metamorphosed igneous rocks. Earth and Planetary Science Letters, 28: 459~469.

Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. Chinese Science Bulletin, 49(15): 1554~1569.

Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2007&. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. Acta Petrol Mineral, 26(1): 77~89.

Xu Jifeng, Yu Xueyuan, Li Xianhua, Han Yinwen, Sheng Jihu, Zhang Benren. 1997#. The discovery of highly depleted N-MORB volcanic rock: the new evidence of Mianlüe old ocean basin. Chinese Science Bulletin, 42(22): 2414~2418.

Xu Tong, Pei Xianzhi, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei, Liu Chengjun, Chen Youxin, Wang Xiaowei, Yang Jie, Hu Nan. 2013&. Geochemistry characteristics, La-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic significance of Zhangyangou bimodal volcanic rocks in Hengxianhe area, Mian-Lüe tectonic zone. Geology in China, 40(06): 1777~1792.

Xu Tong. 2014&. Geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks in Sanchazi—Hengxianhe Area, Mianlüe Tectonic Zone and regionial tectonic evolution. Supervisor: Pei Xianzhi. Xi'an: Master's Degree Thesis of Chang'an University: 1~137.

Xu Tong, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, Chen Youxin, Li Ruibao, Li Zuochen, Pei Lei. 2016&. Geochemical Features and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of the Neoproterozoic Zhangergou Metamorphic Andesitic Rocks in the Mianxian—Lüeyang Area of South Qinling Orogen: Evidence for Amalgamation of Rodinia Supercontinent. Geological Review, 62(2): 434~450.

Xu Tong. 2016&. Component Features and Tectonic Evolution of Mianlüe Tectonic Zone in Kangxian—Lüeyang Area, South Margin of Qinling Orogen. Supervisor: Pei Xianzhi. Xi'an: Doctoral Dissertation of Chang'an University: 1~136.

Xu Yigang, Chung Sunlin, Jahn B, Wu Genyuan. 2001. Petrologic and geochemical constrains on the petrogenesis of Permian Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China. Lithos, 58: 145~168.

Xu Xueyi, Chen Juanlu, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Xia Linqi, Xia Zuchun, Li Ping. 2010&. Geochemistry and petrogenesis of vocanic rocks from Sanlangpu formation and Dashigou formation. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 617~632.

Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, Xiang Zhongjin, Chen Juanlu, Wang Tao. 2007&. SHRIMP analyses for ophiolitic—mafic blocks in the Kangxian—Mianxian section of the Mianxian—Lüeyang melange: their geological implications. Geological Review, 53(6): 755~763.

Yang Zhihua, Deng Yating. 1999&. New viewpoints of the composition, structure and evolution of Qinling orogenic belt. Geology of Shaanxi, 17(2): 16~32.

Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li Huiming, Günther D, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-Inductively coupled plasma-mass spectrometry. Geostandards and Geoanalytical Research, 28(3): 353~370.

Zhao Fengqing, Zhao Wenping, Zuo Yicheng, Li Zonghui, Xue Keqin. 2006&. U-Pb geochronology of Neoproterozoic magmatic rocks in Hanzhong, southern Shaanxi, China. Geological Bulletin of China, 25(3): 383~388.

Zhao Junhong, Zhou Meifu. 2008. Neoproterozoic adakitic plutons in the nort hern margin of the Yangtze Block, China: Partial melting of a

th ickened lower crust and implications for secular crustal evolution. Lithos, 104: 231 ~ 248.

Zhao Junhong, Zhou Meifu. 2009. Secular evolution of the Neoproterozoic lithospheric mantle underneath the northern margin of the Yangtze Block, South China. Lithos, 107: 152 ~ 168.

Zhang Chengli, Gao Shan, Yuan Honglin, Zhang Guowei, Yan Yunxiang, Luo Jinglan, Luo Jinhai. 2007#. The mantle nature of southern Qinling in early Palaeozoic: Sr—Nd—Pb isotopic evidence from ultramafic, mafic dikes and volcanic rocks. Science in China (Series D), 37(7): 857 ~ 865.

Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, Xiao Qinghui. 2001&. Qinling orogenic belt and continental dynamics. Beijing: Science Press: 1 ~ 855.

Zhang Guowei, Cheng Shunyou, Guo Anlin, Lai Shaocong, Yao Anping. 2004&. Mianlüe 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. Geological Bulletin of China, 23(9 ~ 10): 846 ~ 853.

Zhang Guowei, et al. 2016&. The Mianlüe tectonic zone of the Qinling Orogen and China continental tectonics. Beijing: Science Press: 1 ~ 501.

Zhang Zongqing, Tang Suohan, Zhang Guowei, Yang Yongcheng, Wang Jinhui. 2005&. Ages of metamorphic mafic—andesitic volcanic rock blocks and tectonic evolution complexity of Mianxian—Lüeyang ophiolitic melange belt. Acta Geological Sinica, 79(4): 531 ~ 539.

Zhou Meifu, Kennedy A K, Sun Min, Maopas J, Lesher C M. 2002. Neoproterozoic arc-related mafic intrusions along the northern margin of South China: implications for the accretion of Rodinia. Journal of Geology, 110: 611 ~ 618.

Ages and Geochemical Features of the Heigouxia Volcanic Rocks in the Mianxian—Lüeyang Area of South Qinling Orogen: Evidence for Existence and Subduction of Neoproterozoic Mianxian—Lüeyang Ocean

XU Tong[1,2], PEI Xianzhi[2,3], LI Ruibao[2,3], LIU Chengjun[2,3],
CHEN Youxin[2,3], LI Zuochen[2,3], PEI Lei[4], ZUO Wenqian[1]

1) *Shaanxi Geological Survey*, *Xi'an*, 710054;

2) *School of Earth Sceince and Resouces*, *Chang'an University*, *Xi'an*, 710054;

3) *Key Laboratory for the study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits*, *MLR*, *Xi'an*, 710054;

4) *School of Earth Sciences and Land Resources*, *China University of Geosciences*, *Beijing*, 100083

Abstract: Heigouxia volcanic rocks, located in Lüeyang area, Mianlüe tectonic zone, South Qinling Orogen, are a combination of tholeiite basalt and little calc-alkaline andesite, and their LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronological and petrogeochemical studies are determined in this paper. The results show that Zircon U-Pb age determined using laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry from Heigouxia andesitic sample is 807 ± 13Ma (MSWD = 3.6, n = 14), indicating the crystallized-age of the Heigouxia volcanic rocks in Middle Neoproterozoic. Heigouxia basaltic rocks possess the features of N-MORB on the whole, such as left-leaning REE patterns, Na-rich, and P-poor. The region of basaltic magma was reformed by recycled material. Heigouxia andesitic rocks have higher SiO_2 concentrations (43.54% ~ 54.51%) and instable varieties of Na_2O and K_2O. On account of the geochemical characteristics such as negative anomaly of Nb, Ta, P, Ti and La/Yb, Sc/Ni, Th/Yb ratios, Heigouxia andesitic rocks are deemed as the remnants of ancient continental marginal arc. Relatively high Mg# and large varieties of Cr, Ni, and A/CNK (0.58 ~ 1.62) indicate the crust—mantle mixing model of the andesitic rocks. Above all, Heigouxia volcanic rocks are considered as the product of Neoproterozoic Mianlüe Oecan and its subduction rather than Late Paleozoic bimodal volcanic rocks. Combined with regional geological data, the authors consider that there existed Neoproterozoic arc—basin system in Mianlüe area, and the north trend subduction did not quit until about ~800Ma. This process was likely to be response to the amalgamation of Rodinia supercontinent.

Keywords: Mianlüe tectonic zone; Heigouxia volcanic rocks; Neoproterozoic arc—basin system; Southern margin of the South Qinling Orogen; Rodinia Supercontinent

Acknowledgements: This study was supported financially by the National Nature Sciences Foundation of China (No. 41472191, 41172186, 40972136, 40572121), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (No. 20110205110004), the Fundamental Research Funds for the Central

Universities (No. CHD2011TD020, 2013G1271092, 2013G1271091), and China geological survey geological survey projects (No. 1212011120161).

First author: XU Tong, male, born in 1988, doctor, engineer. Mainly engaged in tectonic geology. Address: No. 25, Xiying Road, Xi'an, 710054. Email: xutong1988819@163.com. Corresponding author: PEI Xianzhi, male, born in 1963, professor. Email: peixzh@263.net.

Manuscript received on: 2016-08-15; Accepted on: 2017-02-04;; Edited by: ZHANG Yuxu.

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.010

著名勘查地球化学家谢学锦院士逝世

中国地质学会理事、中国地质学会勘查地球化学专业委员会主任委员,国际著名勘查地球化学家,中国勘查地球化学的开拓者和奠基人,中国科学院院士,中国地质调查局中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所名誉所长谢学锦先生,因病医治无效,于 2017 年 2 月 24 日 16 时 19 分,在北京逝世,享年 94 岁。

谢学锦先生 1923 年 5 月生于北平,其父为中国著名地质学家,《地质论评》首任编辑主任谢家荣先生。谢学锦先生 1941 年 8 月至 1945 年 7 月,在浙江大学物理系、化学系学习;1945 年 8 月至 1946 年 7 月,在重庆小龙坎动力油料厂工作,任技术员;1946 年 8 月至 1947 年 7 月,在重庆大学化学系学习并毕业;1947 年 8 月至 1949 年 10 月,在南京永利铔厂化工研究部工作,任技术员;1949 年 11 月至 1953 年 1 月,在南京矿产测勘处化验室工作,任技术员;1953 年 2 月至 1957 年 1 月,在地质部化探室、地球物理探矿处(局)、地球物理研究所工作,历任技术员、工程师、研究室主任;1957 年 2 月至今,在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(原地质部地球物理探矿研究所、地质矿产部地球物理地球化学勘查研究所)工作,历任工程师、高级工程师、教授级高级工程师、研究室主任、总工程师、副所长、名誉所长。谢学锦先生 1980 年 7 月加入中国共产党。

谢学锦先生 1980 年当选中国科学院地学部学部委员(中国科学院院士)。曾任国际地球化学填图计划和国际地科联全球地球化学基准工作组指导委员会委员和分析技术委员会主席、联合国教科文组织国际地质对比计划(IGCP)执行局委员、中国地质学会理事、中国地质学会勘查地球化学专业委员会主任委员,以及国际《地球化学勘查》杂志副主编、国际《地球化学:勘查·环境·分析》杂志编委、《国际地质标准通讯》编辑,并荣获国际应用地球化学家协会金奖(国际勘查地球化学界最高奖项)、何梁何利基金科学与技术进步奖、国家科学大会奖、国家科学技术进步奖等多项。

谢学锦先生开创了中国的勘查地球化学事业,提出并全面部署和系统指导了中国区域化探全国扫面计划,建议开展调查与科学相结合的地质大调查计划,提出了中国 76 种元素地球化学填图和多目标多尺度地球化学填图计划。发现了铜矿指示植物海州香薷,与前苏联学者各自独立地发现了热液矿床原生晕分带序列,提出了国际领先水平的中国地球化学填图和金矿勘查理论与方法技术、泛滥平原沉积物作为全球地球化学填图采样介质、地球化学块体理论、深穿透地球化学理论与方法技术、油气化探理论与方法技术。在国内外公开发表论著 180 余篇,代表性论著有《铜矿指示植物海州香薷》、《区域化探》、《金的勘查地球化学——理论与方法·战略与战术》、《地球化学块体——概念和方法学的发展》、《中国地球化学图集》、《Some problems, strategical and tactical in international geochemical mapping》等。谢学锦先生还广泛联络国外勘查地球化学家,共同倡议在中国建立全球地球化学填图研究中心,在他全力推动下,联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心于 2016 年 5 月 12 日正式在中国成立,标志着中国地球化学研究进入世界一流水平,并将引领全球地球化学发展。

谢学锦先生治学严谨、求真务实、勤奋探索、为人师表,把毕生精力奉献给了国家经济社会发展和地质科学事业,培养了一批地球化学杰出人才,是我国地质工作者的杰出典范。他的一生是开拓创新的一生,是殚精竭虑的一生,是无私奉献的一生,他的卓越贡献将永载史册!

谢学锦院士永垂不朽!

(史长义 供稿)

Famous Exploration Geochemist, Academician XIE Xuejin, Pasaway

Doi: 10.16509/j.georeview.2017.02.023