

doi: 10.12029/gc20200311

李康宁, 刘伯崇, 狄永军. 2020. 三叠纪西秦岭西北部洋俯冲的记录: 来自镁安山岩/高镁安山岩的证据[J]. 中国地质, 47(3): 709–724.
Li Kangning, Liu Bochong, Di Yongjun. 2020. Triassic oceanic subduction in northwestern West Qinling Mountain: Evidence from MA/HMA [J].
Geology in China, 47(3): 709–724(in Chinese with English abstract).

三叠纪西秦岭西北部洋俯冲的记录: 来自镁安山岩/高镁安山岩的证据

李康宁^{1,2}, 刘伯崇¹, 狄永军²

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;
2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

摘要: 三叠纪以来, 西秦岭地区构造-岩浆活动极为强烈, 中酸性侵入岩呈北西向弧状分布, 前人做了大量卓有成效的工作, 但对出露较少的火山岩鲜有研究。本次工作选取青海省同仁县麦秀和甘肃省夏河县甘加、德乌鲁 3 个地区的安山岩, 从岩石学、岩石地球化学、年代学等进行分析。结果显示安山岩均属于钙碱性系列, 具有富钾火山岩的特征。其中, 麦秀安山岩中既有高镁安山岩, 也有镁安山岩, 而甘加与德乌鲁安山岩属于镁安山岩, 为洋壳俯冲作用形成的两种典型火山岩类型。西秦岭地区安山岩形成时间东早西晚, 由西向东安山岩基性程度降低, K_2O 、 Na_2O 、 ΣREE 等含量增高, MF 、 FL 、 DI 、 La/Sm 等值变大, SI 、 Mg^* 等值降低, 并且呈明显的线性特征, 构成同仁—合作镁安山岩(镁闪长岩)岩浆弧组合, 和北部隆务峡蛇绿岩带一起, 组成岩性分布极性, 从而判断出西秦岭西北部在三叠纪存在隆务峡蛇绿岩代表的洋壳板块向南俯冲作用。

关键词: 镁安山岩; 高镁安山岩; 俯冲; 地质调查工程; 西秦岭; 青海

中图分类号: P542.4; P588.14⁴ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2020)03-0709-16

Triassic oceanic subduction in northwestern West Qinling Mountain: Evidence from Mg andesite and high-Mg andesite

LI Kangning^{1,2}, LIU Bochong¹, DI Yongjun²

(1. *Third Institute of Geology and Mineral Exploration of Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 730050, Gansu China*; 2. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 10083, China*)

Abstract: Since the Triassic, tectono-magmatic activity in West Qinling Mountains has been very intense and the intermediate-acid intrusive rocks are distributed in a NW-trending arc. A lot of effective work has been done by previous researchers, but research on volcanic rocks with less exposure remain insufficient. Petrological, geochemical and chronologic analysis was used for andesite in

收稿日期: 2017-06-02; 改回日期: 2018-04-25

基金项目: 国家重点研发计划深地资源勘查开采专项“深部矿产资源三维找矿预测评价示范”课题(2017YFC0601506)下属“甘肃省玛曲—合作地区资源潜力评价与深部找矿预测示范”专题、中国地质调查局项目“甘肃省夏河—合作地区金矿整装勘查区矿产调查与找矿预测”(12120100000160901-60)及甘肃省基础地质调查研究项目“甘肃玛曲—合作整装勘查区深部找矿预测”联合资助。

作者简介: 李康宁, 男, 1986 年生, 硕士生, 工程师, 长期从事矿产地质调查与评价工作; E-mail: 379607468@qq.com。

Maixiu County and Tongren County of Qinghai Province and Ganjia and Dewulu areas in Xiahe County of Gansu Province. The results show that andesite belongs to calc-alkaline series and shows the characteristics of potassium-rich volcanic rocks. Maixiu andesite contains both high-magnesium andesite and magnesian andesite, while Ganga and Deuru andesite belongs to magnesian andesite, being two typical types of volcanic rocks formed by oceanic crust subduction. The formation of andesite in West Qinling area occurred early in the East and late in the west. From west to east, andesite in West Qinling Mountain presents the following characteristics: 1) The values of SiO_2 and alkali decrease; 2) The formation of andesite took place earlier; 3) The values of K_2O , Na_2O , ΣREE increase; 4) The values of MF, FL, DI, La/Sm is larger; 5) The values of SI, $\text{Mg}^\#$ decrease, with significant linear features. The magmatic arc assemblage of Xiahe-cooperative magnesian andesite (mafic diorite) is composed of Tongren-Hezuo magnesian magmatic arc assemblage and Longwu gorge ophiolite belt in the north. Polarity indicates that the oceanic crust plate represented by Longwu gorge ophiolite subducted southward in the Triassic in the northwestern part of West Qinling Mountain.

Key words: Mg andesite; high Mg andesite; subduction; geological survey engineering; West Qinling Mountain; Qinghai

About the first author: LI Kangning, male, born in 1986, engineer, master, majors in mineral assemblage and evaluation in the field; E-mail:379607468@qq.com.

Fund support: Supported by National Key R & D Program of China (No. 2017YFC0601506), China Geological Survey Program (No.121201004000160901) and The provincial basic geological survey project of Gansu Province "deep prospecting prediction of Maqu-Hezuo integrated exploration area in Gansu Province".

1 引 言

西秦岭位于华北板块南缘祁连—北秦岭加里东构造带和扬子板块北缘海西构造带的拼结部位,是诸多地块和造山带汇聚交接地带(任纪舜等,1991;闫臻,2002;冯益民等,2003;张旗等,2009)。三叠纪以来的印支运动,奠定了西秦岭地区的构造格局(张国伟等,1995),这一时期西秦岭岩浆活动强烈,火山岩发育,并产出有金、银、铜、铅、锌、钼等大量矿产资源。这些岩浆事件不仅是中生代复杂的俯冲-碰撞造山过程的重要记录,也是西秦岭地区乃至中国大陆中央造山带地质构造演化的深部动力学机制和背景的重要指示,并对成矿规律研究和指导矿产勘查具有实际意义。

西秦岭在印支期可能受到特提斯构造域以及环太平洋构造域远程效应的共同作用(殷勇等,2009),构造演化极为复杂,争议较大,主要聚焦于三点:一是进入三叠纪以来西秦岭有无洋盆:任纪舜等(1980,1995)、冯益民等(2003)、张国伟等(2001,2004)、车自成等(2017)认为,处于华北板块与扬子板块之间的秦、祁、昆结合带的古特提斯洋在三叠纪之前已经闭合,三叠纪进入板内演化阶段。多数学者(潘国强等,1997;潘桂棠等,1997,2016;王清晨等,1998;张克信等,2001;Liu et al.,2011)均主张秦祁昆古特提斯洋在三叠纪才趋于闭

合消亡,但洋盆闭合时限问题争议较大:刘树文(2011)认为印支期勉略洋向北俯冲,并于248~216 Ma闭合;姜耀辉(2010,2012)、秦江峰(2011)则认为秦岭造山带在晚三叠世Caiman阶段还处于活动大陆边缘环境,中国南北大陆的碰撞始于晚三叠世Norian阶段(~211 Ma)。第三个焦点是对于古洋盆俯冲方向认识不一,绝大数学者倾向于扬子地块与华北地块之间的特提斯洋向北俯冲,以勉略蛇绿岩的发育为标志。但是最新的侵入岩大地构造图(邓晋福等,2016)显示,研究区所在的西秦岭西北段更靠近同仁—武山—天水蛇绿岩带,这条蛇绿岩带所代表的洋在武山—天水一带为向南俯冲,西秦岭西段同仁—合作一带是否也具有这种趋势?显然,这些问题的解决均依赖于本区的岩浆事件。

高镁安山岩(HMA)、镁安山岩(MA)为与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类型(邓晋福等,2010),一般认为产于洋俯冲带上面的弧盆系内,高镁安山岩是俯冲带上面的楔形地幔在俯冲洋壳放出 H_2O 的条件下发生局部熔融的产物;镁安山岩则是俯冲洋壳脱水熔融产生的岩浆与上覆楔形地幔发生相互作用后形成的岩浆。它们比普通的岛弧安山岩具更高的 $\text{Mg}^\#$ 值、 MgO 、 Cr 、 Ni 和较低的 Al_2O_3 和 CaO 含量及 FeO_T/MgO 比值(甘成势等,2016)。本文选取西秦岭西北部具特殊构造意义的高镁安山岩、镁安山岩进行研究,从岩石组合与区域变化、

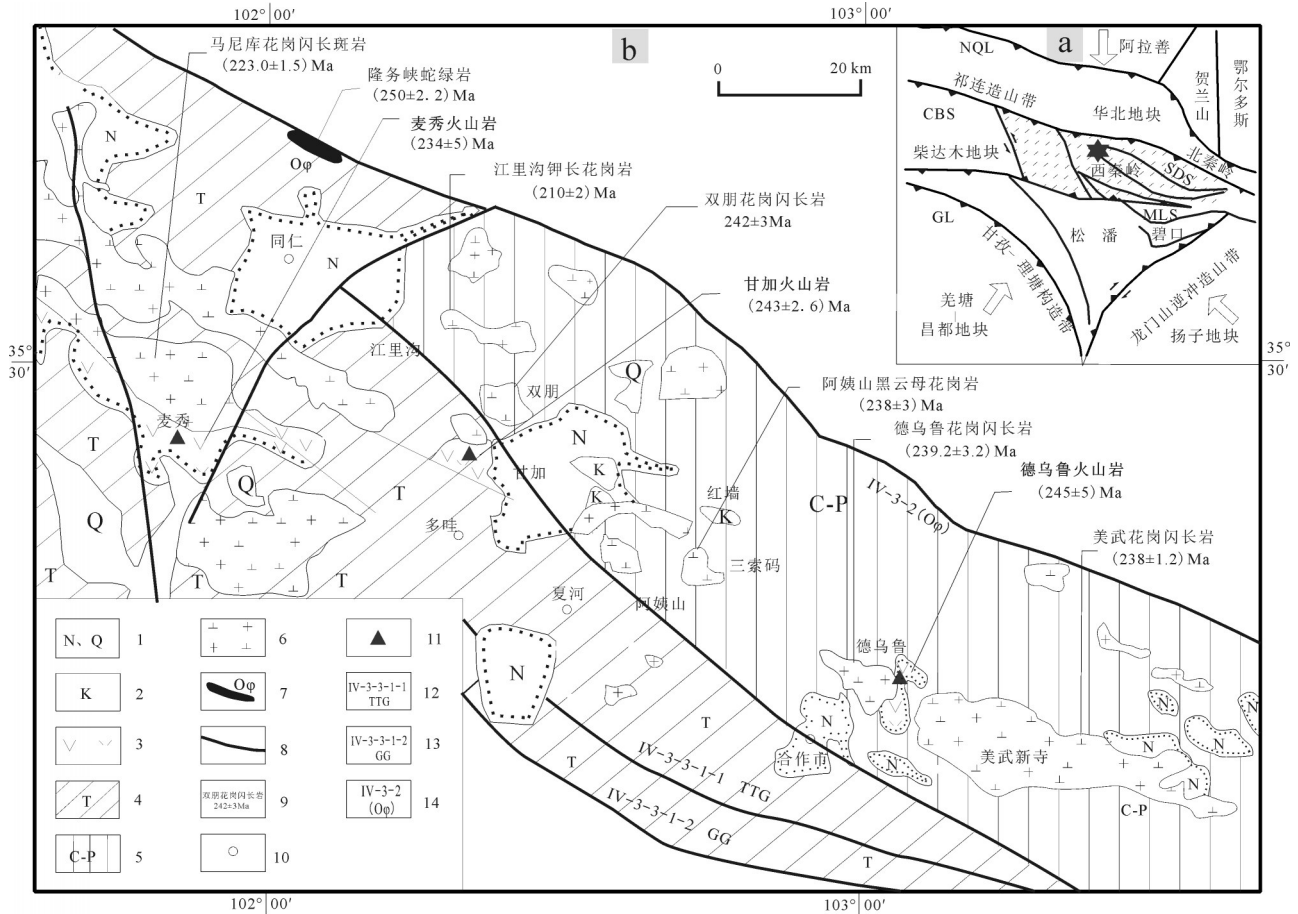


图1 西秦岭同仁—合作地区岩浆岩分布图(据冯益民等,2002修改)

1—新近系、第四系;2—白垩系;3—晚三叠世火山岩;4—三叠系;5—石炭系、二叠系;6—花岗岩;7—蛇绿岩;8—断裂;9—岩体名称及年龄;10—地名;11—采样点;12—武山南英云闪长岩—奥长花岗岩—花岗闪长岩岩浆弧;13—同仁—岷县花岗岩—花岗闪长岩岩浆弧;14—同仁—武山—天水蛇绿岩

Fig. 1 The distribution of magmatic rocks in Tongren-Hezuo area of West Qinling Mountain (modified from Feng Yiming et al; 2002)

1—Neogene and Quaternary; 2—Cretaceous; 3—Late Triassic volcanic rocks; 4—Triassic; 5— Carboniferous and Permian; 6—Granite; 7—Ophiolite; 8—Fault; 9—Rock body name and age; 10—Place name; 11—Sampling point; 12—South Wushan quartz-dolomitic diorite-syenite-granodiorite magmatic arc; 13—Tongren-Minxian granite-granodiorite magmatic arc; 14—Tongren-Wushan-Tianshui ophiolite

年代学、地球化学特征等方面进行讨论。

2 地质背景

研究区位于西秦岭西北部甘、青交界处夏河—同仁一带(图1a)。区域上出露的地层主要为早中三叠世果木沟组、江里沟组、古浪堤组,早三叠世果木沟组、江里沟组为半深海浊流沉积,而中三叠世古浪堤组则变为陆棚浅海—河流三角洲沉积(闫臻等,2008),为一套退积型海相复理石建造。各个时期的砂岩碎屑组成具有相似性,沉积物源主要来自研究区北部中秦岭隆起的增生杂岩及陆缘弧,是一套形成于活动大陆边缘背景的碎屑沉积组合,呈现

出安第斯型大陆边缘弧前沉积的特征(Taylor et al., 1985; 邓晋福等,2007)。

西秦岭北部侵入岩呈弧形北西向展布,以石英闪长玢岩、花岗闪长岩组合为主,也有少量花岗斑岩、英云闪长岩分布,其化学成分与火山岩相当,均属钙碱性系列。多呈岩株、岩脉分布。岩石组合类似于陆缘弧或洋内岛弧的火成岩构造组合(邓晋福等,2007,2015),侵入岩时代集中在210~250 Ma(图1b)。花岗质侵入岩的形成来源于古元古—中元古代基性下地壳的部分熔融及俯冲沉积物熔体—地幔楔的相互反应(徐学义等,2014; 黄雄飞,2016)。

3 样品特征与测试方法

本次分析的样品主要取自甘青交界的青海同仁县麦秀、甘肃夏河县甘加以及合作市德乌鲁岩体东部一带的火山岩(图1b),主要岩性有辉石安山岩、角山安山岩、杏仁状安山岩等(表1)。

3.1 火山岩地质特征

麦秀火山岩主要分布于青海省同仁县麦秀—多哇东一带,角度不整合于三叠纪砂板岩之上,火山岩岩石组合主要为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、英安岩等。局部地区火山碎屑岩与陆源碎屑岩互层,偶夹煤线,可见植物化石 *Cladophlebis.sp.*, (cf. *kaiana Sze*)。

甘加火山岩主要分布于甘肃省夏河县西北侧甘加一带,角度不整合于早、中三叠世地层之上,主要岩石组合为安山岩、流纹岩、英安岩、熔结凝灰岩、火山角砾岩、集块岩等。

德乌鲁火山岩主要分布于德乌鲁岩体和美仁岩体之间,与下二叠统呈角度不整合接触,德乌鲁花岗闪长岩体与其呈侵入接触关系,以中酸性的安山岩、英安岩、流纹英安岩为主,局部见中酸性火山碎屑岩,以熔结凝灰岩居多,火山角砾岩次之。

3.2 安山岩岩石学特征

辉石安山岩:主要分布于青海省同仁县麦秀地区。灰黑色,斑状结构,块状构造,主要由斑晶(30%~50%)和基质(50%~70%)组成。斑晶主要为斜长石、辉石、角闪石;其中辉石为短柱状,长轴0.2~2 mm,体积百分比10%~20%,多已蚀变为绿泥石、阳起石;基质具交织结构,主要为斜长石、绢云母、绿泥石等。

角闪安山岩:主要分布于甘、青交界多哇乡—甘加乡一带。灰黑、灰绿色,斑状结构,块状构造,主要由斑晶(20%~40%)和基质(60%~70%)组成。斑晶主要为斜长石和角闪石组成;角闪石呈长柱状,长轴0.24~1.6 mm,体积百分比10%~20%,部分角闪石已蚀变为绿泥石;基质具交织结构,成分主要为斜长石、绢云母、绿泥石等。

杏仁状安山岩:主要分布于甘肃省合作市德乌鲁一带,灰绿色,斑状结构,基质具交织结构,气孔—杏仁构造。气孔形态以长条形、椭圆形为主,具定向性,大小在0.1~0.5 mm,体积百分比约10%,斑晶

为斜长石(中长石),具环带结构,体积百分比20%~30%,长轴主要介于0.15~0.6 mm;大多数斜长石被次生物绢云母和方解石集合体完全交代,角闪石和辉石微量。基质(70%~80%)具霏细—显微嵌晶结构,主要组成为斜长石、暗色矿物。岩石具有较强的绿泥石化、阳起石化。

3.3 测试方法

样品测试由国土资源部中南矿产资源监督检测中心完成。主量元素采用X-射线荧光光谱法(XRF)分析,分析仪器为X荧光光谱仪(型号RIX2100),采GB/T4506.28~93硅酸盐岩石化学分析方法,FeO采用容量滴定法测定,分析精度优于1%且误差小于5%。稀土元素和微量元素采用等离子体质谱法(ICP-MS),仪器为Agi-lent公司等离子体质谱仪(型号Agilent 7500a),分析误差为5%~10%。

锆石U-Pb年代测试工作在西北大学大陆动力学国家重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成。采用Plesovice和Qinghu标准锆石作为外标进行基体校正;成分标样采用NIST SRM 612,其中²⁹Si作为内标元素。样品的同位素比值及元素含量计算采用GLITTER_ver 4.0程序,普通铅校正采用ComPbCorr#3.17校正程序(Andersen, 2002),U-Pb谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用Isoplot/Exver3程序(Ludwig, 2003)完成。

样品测试结果见表1。

4 岩石地球化学特征

4.1 主量元素

研究区安山岩SiO₂含量52.33%~62.15%,平均57.26%,在经典的TAS火山岩岩石类别判别图解中(图2),绝大数样点落入安山岩区域,个别样品落在流纹岩区域。由于部分样品的烧失量较高,笔者选择受蚀变作用较弱,活动性不强的高场强微量元素比值进一步对岩石名称提供约束。在Nb/Yb-Zr/TiO₂-图解中(图3),麦秀安山岩绝大多数样品落入安山岩区,以及安山玄武岩界线附近;甘加安山岩落在英安岩与粗安岩的界线附近;德乌鲁安山岩落点较为分散,但也基本在安山岩—英安岩—粗安岩区域。

表1 西秦岭安山岩主量元素(%)、微量元素(10^{-6})含量及主要参数
 Table 1 The content of major elements (%), trace elements (10^{-6}) and main parameters of andesite in West Qinling Mountain

样号	ZK10 -1	ZK10 -2	ZK10 -3	ZK10 -36	ZK11 -3	ZK11 -4	ZK11 -6	ZK11 -9	ZK11 -15	ZK11 -20
产地	青海省同仁县麦秀地区(数据据 Li Xiaowei et al., 2013)									
岩性	辉石安山岩									
SiO ₂	53.75	56.96	56.22	57.29	55.78	56.31	55.08	55.64	55.16	55.58
TiO ₂	0.62	0.82	0.71	0.82	0.69	0.64	0.73	0.74	0.6	0.72
Al ₂ O ₃	15.34	18.46	17.4	17.94	15.99	15.9	17.53	17.88	14.96	18.01
Fe ₂ O ₃	2.47	2.32	2.21	2.18	3.28	2.54	2.50	2.42	2.39	2.35
FeO	4.57	3.36	3.32	3.40	5.10	4.07	3.88	3.74	4.55	3.76
MnO	0.09	0.06	0.1	0.04	0.05	0.09	0.05	0.06	0.09	0.05
MgO	6.39	2.89	4.64	3.01	6.14	8.05	4.53	3.59	6.88	2.78
CaO	7.06	6.6	5.89	6.06	2.1	3.12	6.31	8.09	7.94	8.62
Na ₂ O	1.81	2.6	2.53	2.44	1.9	2.76	2.29	2.34	1.67	2.45
K ₂ O	0.71	1.9	1.72	1.19	2.05	0.77	1.83	1.69	0.28	1.24
P ₂ O ₅	0.17	0.02	0.07	0.05	0.06	0.1	0.09	0.1	0.09	0.08
LOI	6.63	3.92	4.01	4.4	6.37	5.89	4.88	4.11	5.1	4.8
Tatol	99.62	99.90	98.82	98.82	99.51	100.23	99.70	100.40	99.71	100.45
La	14.4	23.9	21.7	15.0	15.0	13.9	15.5	15.5	13.4	15.8
Ce	32.1	48.2	42.1	33.6	29.2	29.3	31.4	31.3	27.2	31.6
Pr	3.76	5.43	4.74	3.95	3.18	3.47	3.7	3.71	3.17	3.67
Nd	14.8	21.1	17.5	15.8	11.9	13.5	14.6	14.1	12.6	14
Sm	3.26	4.41	3.38	3.39	2.11	2.58	2.99	2.99	2.76	2.72
Eu	0.8	1.02	0.93	0.91	0.5	0.72	0.83	0.92	0.73	0.84
Gd	3.2	4.12	3.3	3.31	2	2.58	2.85	2.99	2.55	2.85
Tb	0.5	0.65	0.54	0.6	0.32	0.41	0.44	0.47	0.42	0.43
Dy	3.15	3.9	3.21	3.56	2.19	2.58	2.75	2.84	2.57	2.75
Ho	0.62	0.76	0.65	0.73	0.48	0.53	0.52	0.56	0.52	0.53
Er	1.82	2.2	1.76	2.00	1.40	1.43	1.48	1.56	1.56	1.56
Tm	0.28	0.32	0.27	0.32	0.23	0.24	0.22	0.24	0.24	0.24
Yb	1.81	2.09	1.66	1.97	1.53	1.42	1.53	1.61	1.5	1.5
Lu	0.25	0.3	0.25	0.3	0.24	0.24	0.23	0.22	0.24	0.23
Y	17.2	22.7	16.7	19	13	15.2	15	16.2	15.6	14.7
Cs	23.1	15.9	16	29.3	23	21.2	21.9	19.9	24.2	22.5
Rb	20.7	32.6	124	25.4	91.9	32.4	68.4	63.4	7.79	45.2
Ba	186	166	113	251	76.6	190	305	323	142	273
Th	4.09	8.04	6.46	4.52	4.76	4.89	4.72	4.64	4.7	5.39
Nb	4.36	7.15	5.45	5.26	5.43	4.94	5.17	5.34	4.94	5.5
Ta	0.32	0.54	0.42	0.37	0.39	0.34	0.36	0.36	0.36	0.4
Ce	32.1	48.2	42.1	33.6	29.2	29.3	31.4	31.3	27.2	31.6
Sr	185	252	144	240	60.7	170	201	251	260	341
Nd	14.8	21.1	17.5	15.8	11.9	13.5	14.6	14.1	12.6	14
Zr	99.5	142	113	110	104	96.6	109	108	93.9	106
Hf	2.63	3.8	3.09	2.84	2.93	2.74	2.98	2.98	2.61	2.88
Li	46.4	67.1	25.4	34.3	40.2	50.2	41.6	20.7	17.2	25.2
Mg [#]	62.62	48.63	60.92	50.03	57.62	69.33	56.83	51.96	64.67	45.73
MF	52.44	66.25	54.36	64.95	57.70	45.06	58.49	63.18	50.21	68.75
FL	26.30	40.54	41.91	37.46	65.29	53.08	39.50	33.25	19.72	29.98
SI	40.05	22.12	32.18	24.64	33.25	44.27	30.13	26.05	43.63	22.09
DI	40.15	53.46	51.98	54.06	59.20	52.99	49.40	47.86	37.38	47.60
ΣREE	80.75	118.4	101.99	85.44	70.28	72.9	79.04	79.01	69.46	78.72
LREE	69.12	104.06	90.35	72.65	61.89	63.47	69.02	68.52	59.86	68.63
HREE	11.63	14.34	11.64	12.79	8.39	9.43	10.02	10.49	9.6	10.09
LREE/HREE	5.94	7.26	7.76	5.68	7.38	6.73	6.89	6.53	6.24	6.80
La/Sm	4.42	5.42	6.42	4.42	7.11	5.39	5.18	5.18	4.86	5.81
La/Yb	7.96	11.44	13.07	7.61	9.80	9.79	10.13	9.63	8.93	10.53
Th/Yb	2.26	3.85	3.89	2.29	3.11	3.44	3.08	2.88	3.13	3.59

续表1

样号	2014 IV-1	2014 IV-2	2014 IV-10	2014 IV-19	2014 IV-20	2014 IV-21	D-8	D-9	D-10	D-13	D-14	D-11	D-12
地点	甘肃省夏河县甘加地区						甘肃省夏河县德乌鲁南一带						
岩性	安山岩		角闪安山玢岩				杏仁状安山岩					角闪 安山岩	安山质 凝灰岩
SiO ₂	57.14	56.67	59.29	59.72	61.05	61.05	57.66	54.8	62.15	58.1	60.66	58.68	52.33
TiO ₂	0.588	0.608	0.61	0.682	0.75	0.618	0.71	0.66	0.62	0.72	0.65	0.65	0.57
Al ₂ O ₃	17.26	16.12	15.78	17.29	15.18	16.66	16.49	16.23	17.92	17.98	15.79	16.7	14.59
Fe ₂ O ₃	2.24	2.06	0.532	0.865	1	0.526	0.66	2.48	1.74	1.09	1.06	0.98	1.05
FeO	3.46	4.71	5.44	4.85	4.02	4.92	6.85	3.95	3.37	4.87	3.93	4.55	5.19
MnO	0.08	0.108	0.121	0.102	0.086	0.086	0.12	0.13	0.08	0.09	0.07	0.1	0.12
MgO	2.35	4.22	3.56	2.7	3.01	1.8	3.28	2.81	1.34	3.4	3.08	4.21	4.66
CaO	5.9	7.32	4.78	4.09	4.26	4.12	4.61	5.39	3.24	6.2	4.38	5.37	6.44
Na ₂ O	2.84	2.27	2.82	3.02	2.93	3.16	2.08	2.82	3.65	3.21	3.6	3.79	0.82
K ₂ O	1.06	1.56	3.06	2.78	3.24	2.56	2.26	2.18	1.98	1.61	1.07	1.69	0.79
P ₂ O ₅	0.076	0.069	0.122	0.162	0.128	0.164	0.11	0.12	0.16	0.1	0.16	0.12	0.07
LOI	6.4	3.45	2.93	2.87	3.58	3.48	4.64	7.91	3.5	2.25	5.19	2.37	12.48
Tatol	99.39	99.17	99.05	99.13	99.23	99.14	99.47	99.48	99.75	99.62	99.64	99.21	99.11
La	27.1	1.23	33.3	38	41.8	34.7	26.21	24.71	29.18	24.05	38.41	24.65	19.85
Ce	58.9	2.75	72.6	83.7	93	75.7	49.17	46.34	57.19	47.13	71.8	47.49	36.98
Pr	6.28	0.28	7.66	8.67	9.68	8.14	5.83	5.61	6.48	5.77	8.56	5.79	4.57
Nd	30	1.1	29.2	33.2	36.5	31	21.22	20.39	23.64	21.62	31.15	21.75	17.18
Sm	4.62	0.23	5.44	6.21	6.88	5.87	4.1	3.87	4.22	4.38	5.67	4.24	3.37
Eu	1	0.042	1.14	1.37	1.04	1.31	1.02	0.88	1.21	1.06	1.22	1.06	0.74
Gd	4.01	0.2	4.88	5.39	6.2	5.17	3.52	3.28	3.57	3.73	4.75	3.48	3.04
Tb	0.6	0.029	0.68	0.73	0.89	0.7	0.55	0.5	0.52	0.65	0.63	0.54	0.51
Dy	3.52	0.18	3.82	3.85	4.96	3.67	2.84	2.52	2.47	3.64	3.15	2.94	2.92
Ho	0.7	0.031	0.74	0.73	0.97	0.68	0.53	0.48	0.44	0.72	0.59	0.55	0.59
Er	1.91	0.091	2.02	1.96	2.64	1.77	1.47	1.33	1.12	2.12	1.66	1.5	1.7
Tm	0.3	0.013	0.3	0.29	0.39	0.26	0.24	0.2	0.16	0.34	0.25	0.25	0.27
Yb	1.96	0.088	2.1	1.88	2.66	1.69	1.53	1.3	0.95	2.12	1.61	1.52	1.7
Lu	0.28	0.011	0.3	0.26	0.36	0.23	0.23	0.19	0.13	0.33	0.23	0.22	0.27
Y	17.4	1.07	18.5	17.5	23.6	16.7	14.1	12.6	11.3	18.9	15.9	14.7	15.7
Cs	14.8	6.67	11.7	5.17	6.46	14.5	6.77	13.7	10.3	3.44	6.59	11.3	11.2
Rb	48.4	68.5	139	114	172	121	78.5	94.9	67.2	35.5	44.3	54.2	25.4
Ba	142	354	775	611	562	562	558	403	605	403	552	451	391
Th	8.48	6.83	13	12.6	18.9	11.3	7.25	8.52	9.46	6.67	16.8	7.79	5.81
Nb	12.4	11.8	12.1	11.8	14.9	11	13.7	11	22.2	9.69	8.73	8.84	6.74
Ta	0.62	0.65	0.72	0.67	0.92	0.68	1	1	1.7	0.7	0.8	0.7	0.5
Ce	58.9	2.75	72.6	83.7	93	75.7	49.17	46.34	57.19	47.13	71.8	47.49	36.98
Sr	157	217	336	498	240	399	186	127	240	388	546	375	209
Nd	83.8	1.1	29.2	33.2	36.5	31	21.22	20.39	23.64	21.62	31.15	21.75	17.18
Zr	182	178	173	206	266	245	157	157	241	193	193	167	140
Hf	4.8	4.44	4.64	5.21	7.02	5.92	4.6	5.8	7.6	5.8	7	6	4.8
Li	61.8	18	48.6	64.1	67	47.8	66.6	49.3	34.8	27.2	107.1	48.3	93.6
Mg [#]	64.40	82.98	79.40	69.96	76.79	51.93	72.14	69.59	39.40	77.95	77.65	85.43	86.42
MF	70.81	61.60	62.65	67.91	62.52	75.16	69.60	69.59	79.22	63.68	61.83	56.78	57.25
FL	39.80	34.35	55.16	58.65	59.16	58.13	48.49	48.12	63.47	43.74	51.60	50.51	20.00
SI	19.67	28.48	23.10	18.99	21.20	13.88	21.68	19.73	11.09	23.98	24.18	27.66	37.25
DI	56.56	48.78	60.80	64.67	66.95	67.08	55.96	58.33	72.75	53.87	63.78	58.09	40.54
ΣREE	141.18	6.275	164.18	186.24	207.97	170.89	118.46	111.6	131.28	117.66	169.68	115.98	93.69
LREE	127.9	5.632	149.34	171.15	188.9	156.72	107.55	101.8	121.92	104.01	156.81	104.98	82.69
HREE	13.28	0.643	14.84	15.09	19.07	14.17	10.91	9.8	9.36	13.65	12.87	11	11
LREE/HREE	9.63	8.76	10.06	11.34	9.91	11.06	9.86	10.39	13.03	7.62	12.18	9.54	7.52
La/Sm	5.87	5.35	6.12	6.12	6.08	5.91	6.39	6.39	6.91	5.49	6.77	5.81	5.89
La/Yb	13.83	13.98	15.86	20.21	15.71	20.53	17.13	19.01	30.72	11.34	23.86	16.22	11.68
Th/Yb	4.33	77.61	6.19	6.70	7.11	6.69	4.74	6.55	9.96	3.15	10.43	5.13	3.42

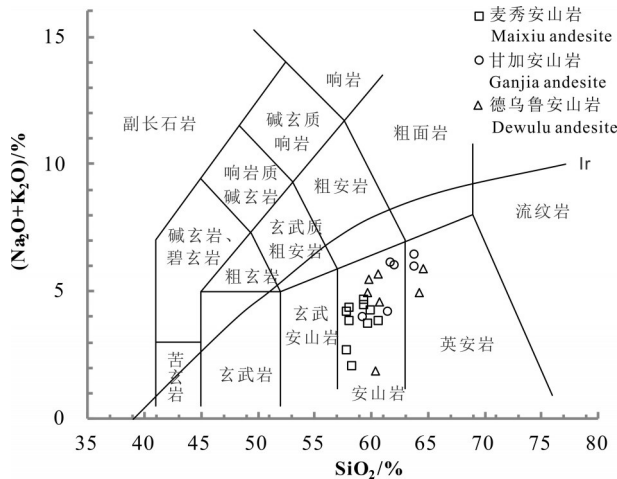


图2 安山岩TAS分类图解
(据 Le Maitre, 1989)

Fig. 2 TAS classification of andesite in the study area
(after Le Maitre, 1989)

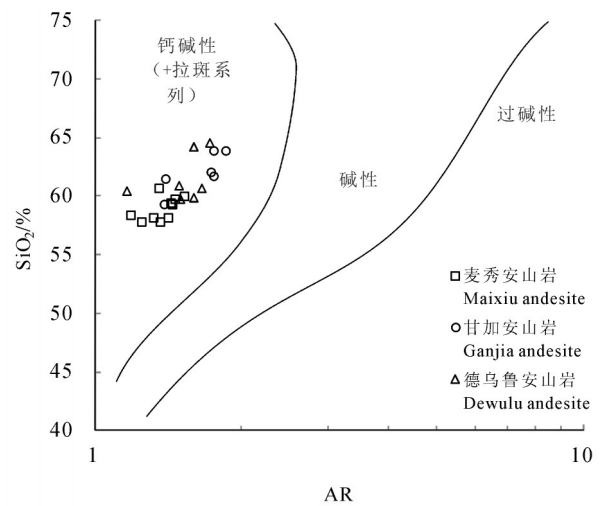


图4 安山岩AR-SiO₂图解
(据 Wright, 1969)

Fig. 4 SiO₂-AR diagram of andesite in the study area
(after Wright, 1969)

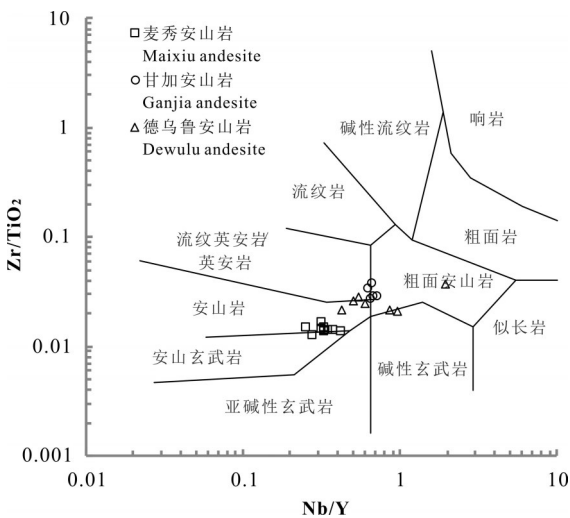


图3 安山岩Nb/Y-Zr/TiO₂-分类图解
(据 Winchester, 1977)

Fig. 3 Nb/Y-Zr/TiO₂-classification of andesite in the study area
(after Winchester, 1977)

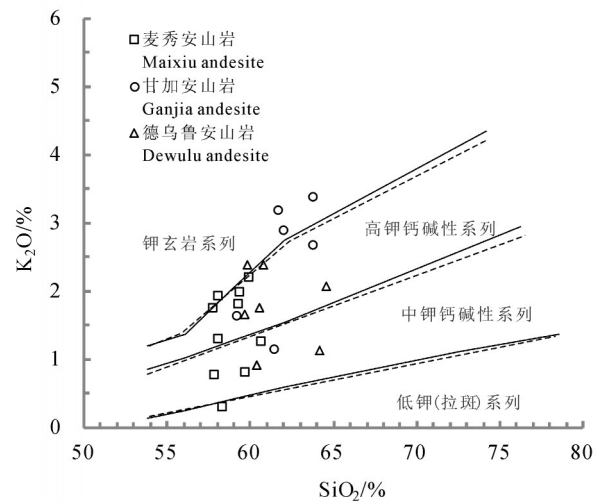


图5 安山岩SiO₂-K₂O图解
(据 Peccerillo, 1976)

Fig. 5 SiO₂-K₂O diagram of andesite in the study area
(after Peccerillo, 1976)

研究区安山岩全碱(Na₂O+K₂O)变化范围较大,为1.61%~6.17%,平均4.3%,Na₂O/K₂O比值较大,为0.9%~5.96%,平均1.89%;Al₂O₃含量较高,为14.72%~18.48%,平均16.75%;TiO₂含量少,为0.58%~0.83%,平均0.67%;MgO含量1.34%~8.05%,平均3.88%。

研究区火山岩样品在硅碱图中主要落于亚碱性系列,据火山岩碱度率异变图(图4)可知,研究区火山岩具有钙碱岩浆系列的演化趋势,属于钙碱性

系列。在SiO₂-K₂O图解(图5)中,样品主要落于中高钾钙碱性-中钾钙碱性区域。

4.2 稀土、微量元素特征

安山岩的稀土总量(∑REE)为69.46×10⁻⁶~207.97×10⁻⁶, (La/Yb)_N=5.46~22.03, (La/Sm)_N=2.85~4.59, (Ce/Yb)_N=4.7~16.72,轻重稀土分异不明显;具有Eu负异常,δEu=0.48~0.93,平均0.76,显示岩浆演化过程中可能存在斜长石分离结晶作用或部分熔融过程中有斜长石的残留。在稀土元素球粒陨

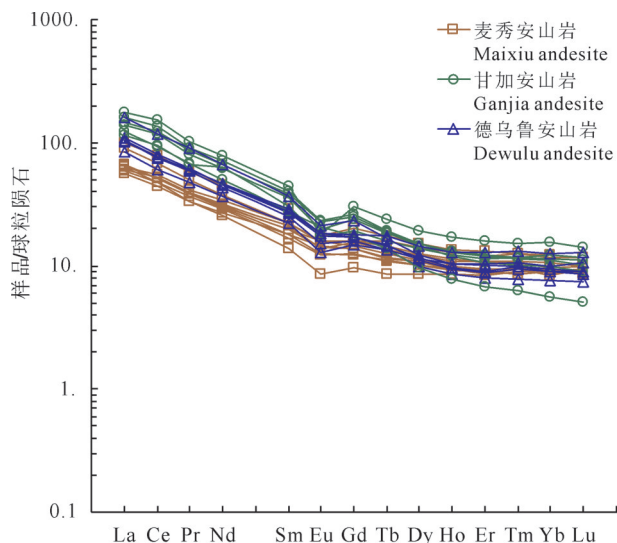


图6 稀土元素球粒陨石标准化分布型式图
(球粒陨石标准化值据 Sun, 1989)

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns
(after Sun, 1989)

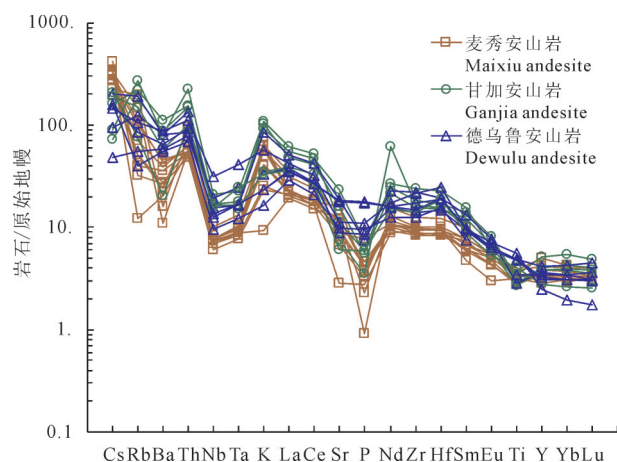


图7 微量元素原始地幔标准化蛛网图
(原始地幔标准化值据 Sun, 1989)

Fig.7 Primitive mantle-normalized trace element
spider diagram
(after Sun, 1989)

石标准化配分型式图解(图6)上,配分曲线呈右倾型,轻稀土元素(LREE)富集,重稀土相对亏损。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图7)中,表现为高场强元素 Nb、Ta、P、Ti、HREE 等相对亏损,而大离子亲石元素 K、Rb、Th 等则相对富集。这些特征指示该火山岩源区为来自于斜长石分离结晶后的地壳残余岩浆。Sr 强烈负异常表明岩浆发

生了明显的斜长石分离结晶作用,P 和 Ti 亏损说明岩浆经历了磷灰石以及钛铁矿等矿物的分离结晶作用或部分熔融过程中有这些矿物的残留。Nb、Ta 明显亏损,形成 Nb-Ta 谷地,但较浅,与岛弧环境的深谷不同,可能与岩浆源区岩石中陆壳组分的参与有关(夏林圻等,2007)。由于 Ba 离子与 Ca 离子的半径相近,Ba 可能替代 Ca 进入钾长石中,随着钾长石在源区的残留,岩石显示了比较明显的 Ba 亏损。

4.3 安山岩岩浆演化

原生岩浆是指地幔部分熔融形成的未经明显分离结晶作用的原始岩浆,并且在岩浆上升过程中未受到地壳明显混染(路凤香等,2001)。研究区安山岩镁值($Mg^{\#}$)除 1 个样品为 69.33 外,其余均介于 32.61~64.67,低于原生岩浆(68~73)(邓晋福等,1987)。麦秀安山岩固结指数(SI)为 22.09~44.27,平均 31.84,接近(少数样品大于)原始岩浆($SI \geq 40$),岩浆分异程度较差。而甘加安山岩(平均 20.89)、德乌鲁安山岩(平均 23.65)的固结指数均小于 40。安山岩长英指数(FL)为 19.72~65.29,铁镁指数(MF)为 45.06~79.22,所有样品的长英指数和铁镁指数小于 90,表明安山岩岩浆分离结晶作用程度较低。研究区晚三叠世安山岩并非来源于幔源的原生岩浆,而是在岩浆演化过程中发生了明显的熔融、分异以及混染作用。

研究区安山岩中 MgO 与 SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、MF、FL、SI、DI、 $Mg^{\#}$ 、 ΣREE 、La/Sm 等都具有明显的相关性。从图 8 可看出,随着 MgO 含量的增高(德乌鲁安山岩(东)→麦秀安山岩(西)), SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 、 K_2O+Na_2O 、MF、FL、DI、 ΣREE 、La/Sm 等含量明显降低,呈线性负相关性;而 SI、 $Mg^{\#}$ 等参数随 MgO 含量的增高而增高,呈现出明显的正相关性。说明研究区岩石在化学演化上是连续的,为同源岩浆演化的结果,并在演化过程中有陆壳物质的参与。

5 讨 论

5.1 安山岩形成时代

本次对甘加安山岩进行了锆石 U-Pb 测年。锆石为粉色,半自形双锥柱状,晶体长 0.01~0.16 mm。部分锆石晶型不完整,棱角显钝,少数晶棱、晶面模糊不清,表明锆石在后期可能遭受了热液溶

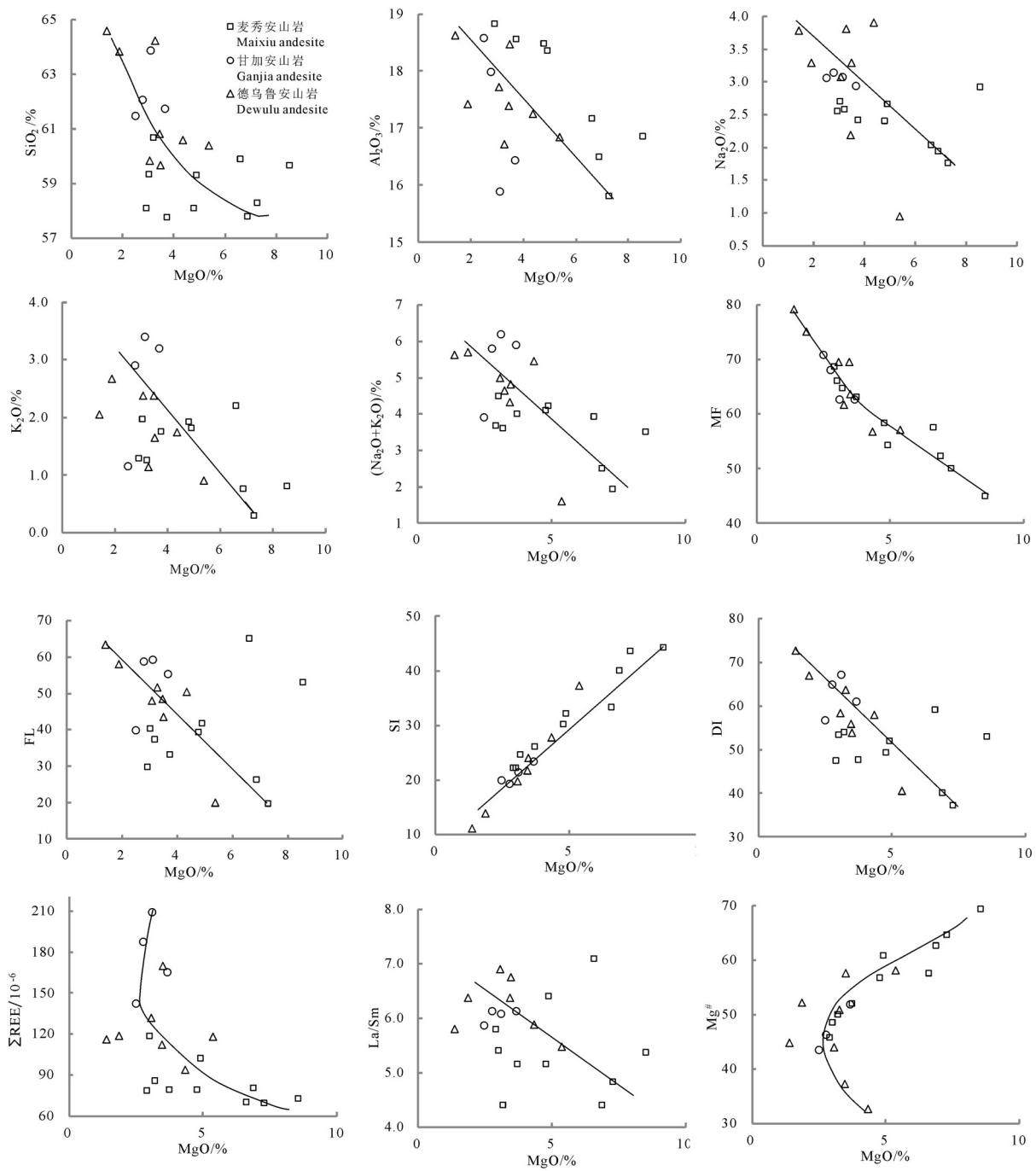


图8 安山岩主要元素/参数-MgO哈克图解
Fig.8 Major elements/parameters-MgO Hack diagrams

蚀作用。阴极发光图像(图9)显示出典型的岩浆韵律环带和明暗相间的条带构造,核幔结构较为清晰,核部颜色较暗,幔部有较清晰的震荡环带,属于岩浆结晶的产物。从CL图像上观察可以看出这些测点多位于明显的岩浆环带上,测年结果代表了岩浆锆石的年龄。安山岩锆石U-Pb谐和图和年龄权

重平均值分布图见图10。安山岩锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U数据点基本集中分布在谐和线附近,其下交点年龄为(249±10)Ma,²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄的加权平均值为(243.3±2.6)Ma,即可代表火山岩浆喷发时代。

青海省地质矿产局在本区火山岩及碎屑岩组采到植物化石 *Cladophlebis. sp.*, (cf. *kaoviana* Sze)^①, 其

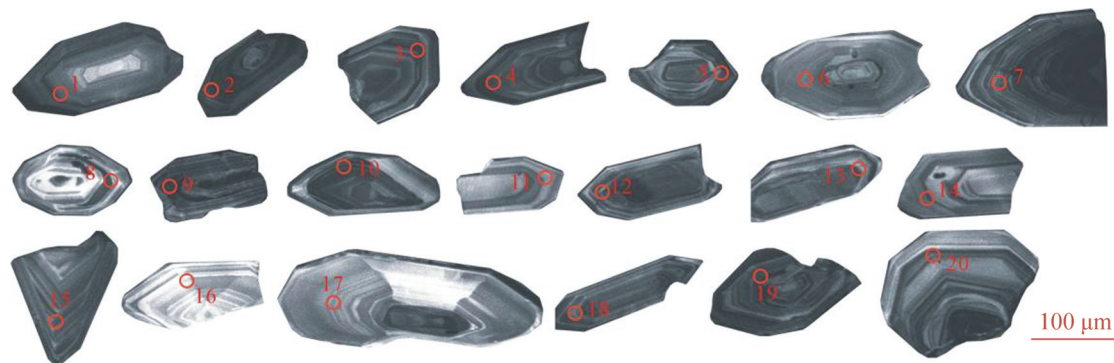
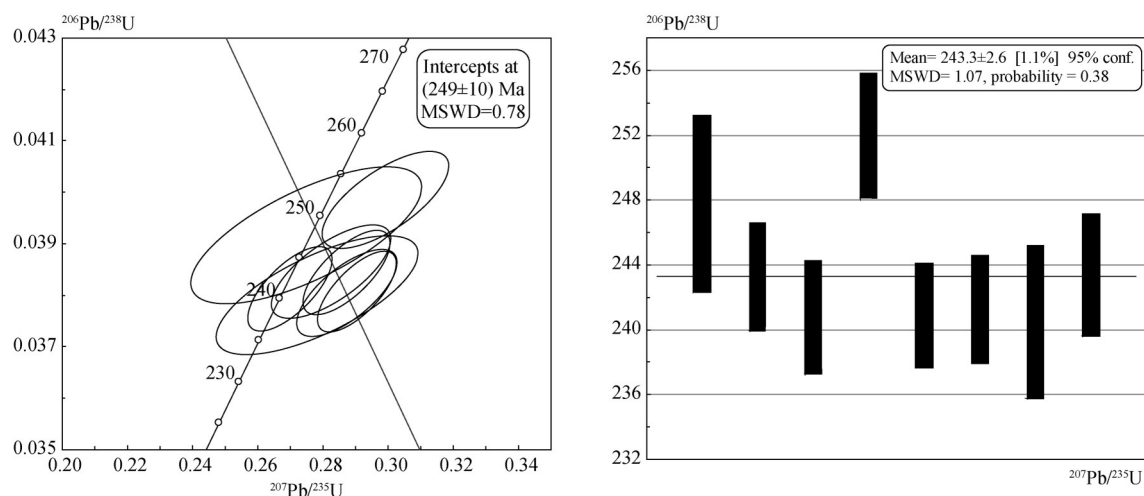


图9 甘加安山岩锆石阴极发光图像

Fig.9 Zircon cathodoluminescence photos of Ganjia andesite

图10 甘加安山岩锆石U-Pb年龄谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ U年龄权重分布图Fig.10 Concordia diagram of zircon U-Pb and distribution diagram of zircon $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ weighted mean ages of Ganjia andesite

时代为晚三叠世。李小伟等(2013)获得麦秀安山岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素年龄为 $(234\pm 5)\text{Ma}$,侵入该套火山岩的马尼库岩体,其Rb-Sr等时线年龄为 $(220.99\pm 0.83)\text{Ma}$,锆石U-Pb年龄平均值为 $(223.0\pm 1.5)\text{Ma}$,属于晚三叠世中期。李注苍等(2016)获取的德乌鲁火山岩的锆石U-Pb同位素年龄为 $(245\pm 5)\text{Ma}$,与火山岩相邻产生的德乌鲁花岗闪长岩的锆石U-Pb同位素年龄为 $(239.2\pm 3.2)\text{Ma}$,说明德乌鲁火山岩与侵入岩近于同期形成,为中三叠世。综合对比区域测年可知,西秦岭地区三叠纪安山岩喷发时代为234~245 Ma,并具有东早西晚的特点。

5.2 安山岩构造环境

钙碱性安山岩是板块聚敛边缘的典型岩石类型,为活动陆缘环境和岛弧岩浆杂岩的重要组成部分,是洋盆存在的关键证据之一。Condie(1986)对世界上不同板块边缘安山岩进行了详细研究,进一

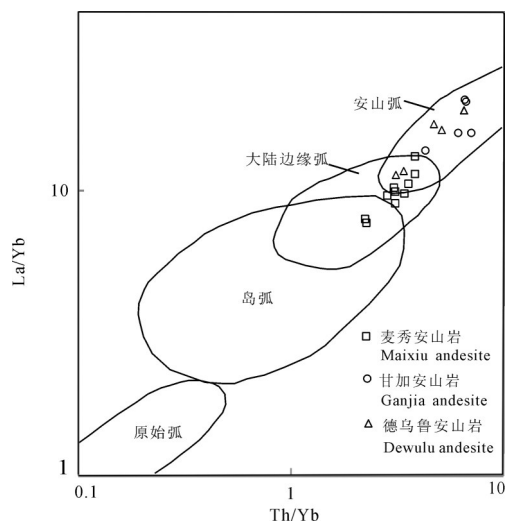


图11 安山岩构造环境La/Yb-Th/Yb判别图解

Fig.12 La/Yb-Th/Yb discriminant diagram of tectonic environment of andesite

表2 不同构造环境安山岩主要参数(据Condie,1986;元素含量单位 10^{-6})
Table 2 Andesite in different tectonic settings (after Condie, 1986; unit 10^{-6})

参数	原始弧	岛弧	大陆边缘	安第斯安山岩	研究区安山岩(平均值)		
					麦秀安山岩	甘加安山岩	德乌鲁安山岩
Th	≤1	1~3	2~5	4~8	4.1~8(5.22)	6.8~19(11.85)	5.8~16.8(8.9)
La	2~5	5~15	10~25	20~40	13.4~23.9(16.41)	27.1~41.8(34.98)	19.8~38.4(26.72)
La/Yb	≤0.8	0.5~3	1~4	3~7	7.6~13.1(9.89)	13.8~20.5(17.23)	11.3~30.7(18.65)
Zr/Y	<3	3~7	4~12	12~50	5.8~8(6.6)	9.4~14.7(11.50)	8.9~21.3(12.51)
Ti/Zr	>50	40~50	40~50	≤40	34.6~44.7(39.41)	15.1~21.1(18.48)	30.1~39(34.75)

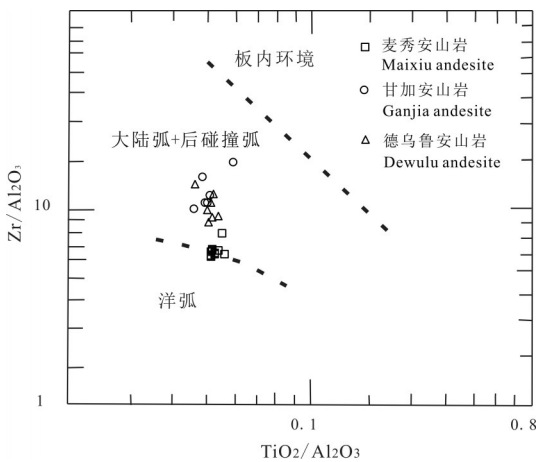


图12 Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃判别图

Fig.12 Zr/Al₂O₃-TiO₂/Al₂O₃ discriminant diagram of tectonic environment

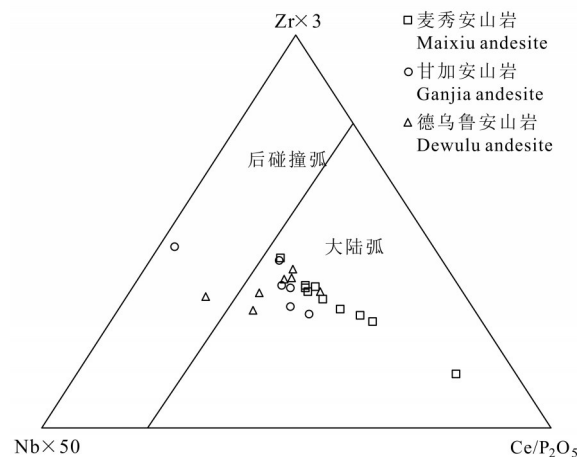


图13 Zr×3-Nb×50-Ce/P₂O₅判别图

Fig.13 Zr×3-Nb×50-Ce/P₂O₅ discriminant diagram of tectonic environment

步统计出不同构造环境安山岩的微量元素特征(表2)。通过对比分析可以看出,研究区安山岩的微量元素组成更接近于安第斯山安山岩,又具有大陆边缘弧的某些特点,尤其是麦秀安山岩。这与安山岩构造环境 La/Yb-Th/Yb 图解(图11)的投图的结果基本一致。

对比安山岩化学组成特征,研究区绝大多数安山岩为富钾火山岩(Muller et al.,1992)(SiO₂=41.6%~62.1%, Na₂O=0.7%~4.9%, K₂O=0.4%~8.4%, 0.4<K₂O/Na₂O<8.9),可按照 Muller et al.,(1992)提出的联合图解来判别富钾火山岩的产出构造环境。

首先,根据钾质火山岩的成分范围对研究区的火山岩进行筛选,选取其中钾质火山岩进行初步投图(图12),样品全部落入了大陆弧(CAP)和后碰撞弧(PAP)区域,可以得出研究区钾质火成岩应该形成于大陆弧或后碰撞弧的环境中,与洋弧(IOP+LPO)和板内环境(WIP)无关。在 Zr×3-Nb×50-Ce/P₂O₅图解(图13)中,绝大多数样品落入了大陆弧

(CAP)区域,研究区富钾火山岩(安山岩)的形成环境应该相当于Muller提出的大陆弧(安第斯型),又由于这些样品落点靠近后碰撞弧,说明研究区安山岩成熟度较高,具有向后碰撞弧演化的趋势。

5.3 安山岩成因机制

研究区安山岩具有高铁钙碱特征,为一类特殊的高镁/镁安山岩,依据识别镁安山岩的 SiO₂-MgO图解(图14a)、FeO*/MgO-SiO₂图解(图14b),可以看出,麦秀安山岩既有高镁安山岩,也有镁安山岩,而甘加与德乌鲁安山岩均属于镁安山岩。

研究区安山岩稀土元素总量较高,轻稀土元素富集,具负铕异常;微量元素方面,富集大离子亲石元素(Ba、K、Rb等),相对亏损高场强元素(Nb、Ta和Ti),以及相容元素(Cr、Ni、Co等)强烈亏损,表明该火山岩可能产出于陆壳混染的板内构造环境或者与洋壳俯冲作用有关的构造环境(Lassiter et al., 1997; Rudnick et al., 2003; 龙晓平等, 2006)。

如果岩浆在上升过程中受到了陆壳物质的混

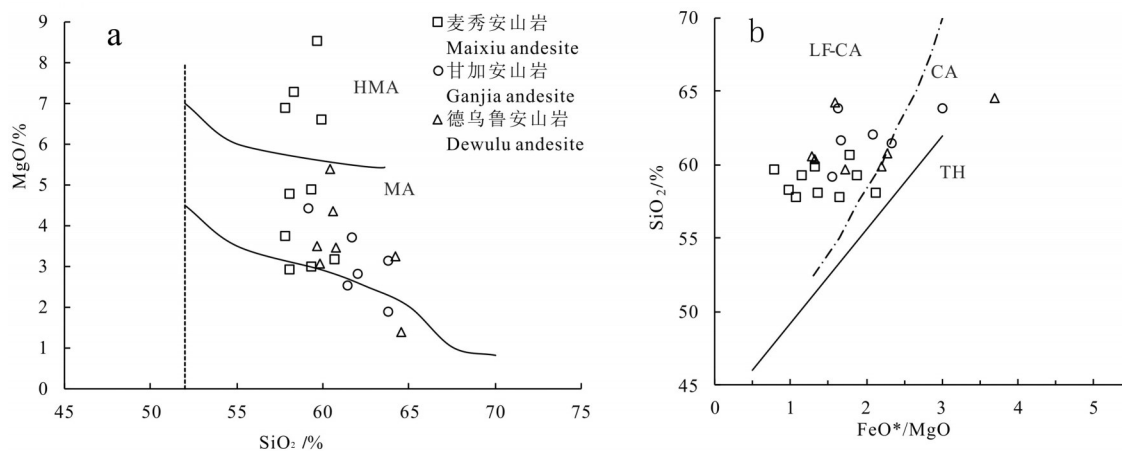


图14 高镁/镁安山岩 SiO₂-MgO(a)、SiO₂-FeO*/MgO(b)判别图解(据邓晋福等,2010,2015)

HMA—高镁安山岩;MA—镁安山岩;LF-CA—低铁钙碱性系列;CA—钙碱性系列;TH—拉斑玄武系列

Fig.14 SiO₂-MgO(a), SiO₂-FeO*/MgO discriminant diagram of HMA/MA (after Deng Jinfu et al., 2010, 2015)

HMA—High magnesia andesite; MA—Magnesia andesite; LF-CA—Low iron calc-alkaline series; CA—Calc-alkaline series; TH—Tholeiite series

染,则 La/Sm 比值会迅速增高,一般在 5 以上 (Muller, 2000)。研究区除麦秀安山岩中有 3 个样品 La/Sm 比值小于 5 外,其余均大于 5,加之微量元素原始地幔标准化配分模式图上较浅的 Nb-Ta 谷以及与上地壳相似的配分曲线,都说明安山岩在形成过程发生过明显的陆壳混染作用。

另外,富钾火山岩是一类兼具壳幔双重地球化学特征的特殊岩石组合,成岩过程中必须有地壳物质的参与,将地壳物质引入富钾火山岩成岩过程的主要动力机制即是地壳深俯冲作用,俯冲地壳物质析出流体对地幔岩石的交代作用是导致富钾火山岩具特殊地球化学特征的主要原因 (O'Connor, 1965)。研究区三叠纪富钾安山岩与大别—苏鲁造山带南北两侧晚中生代富钾火山岩具有良好的对应性 (邱检生等, 2003),表明该区安山岩的形成受到了俯冲洋壳析出流体的交代作用,同时还叠加了俯冲陆壳析出流体的交代作用,是多次富集事件综合作用的结果。

一直以来,人们普遍认为中国南北大陆的拼合是特提斯洋向北俯冲,扬子板块与华北板块碰撞拼接的结果,以勉略蛇绿岩缝合带为标志。但是邓晋福等 (2016) 最新的侵入岩大地构造图显示,麦秀—甘加—德乌鲁高镁/镁安山岩更靠近同仁—武山—天水蛇绿岩带,其西北侧的隆务峡蛇绿岩 (张克信等, 2007) 为同仁—武山—天水蛇绿岩带西延部分 (图 1, IV-3-2(O_q))。通过前面讨论,麦秀—甘

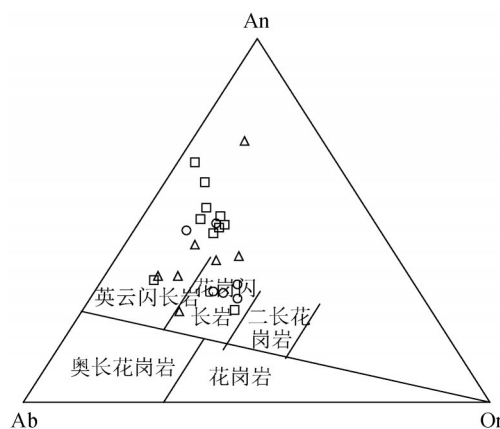


图15 安山岩 An-Ab-Or 图解(据 O'Connor, 1965)

Fig.15 An-Ab-Or classification diagram of andesite in the study area (after O'Connor, 1965)

加—德乌鲁高镁/镁安山岩为洋壳俯冲的产物,其对应的结晶岩石为英云闪长岩、花岗闪长岩组合 (图 15)。事实上,在麦秀火山岩周围有大面积的英云闪长岩 (斜长花岗斑岩) 分布,时代为中三叠世,为岩浆弧外带的典型组合,即同仁—合作 TTG 岩浆弧 (图 1, IV-3-3-1-1(TTG))。这样就构成了隆务峡蛇绿岩—同仁合作 TTG 岩浆弧俯冲极性,进一步说明麦秀—甘加—德乌鲁一带高镁/镁安山岩为隆务峡蛇绿岩代表的洋壳板块向南俯冲造成,而不是阿尼玛卿洋壳板块向北俯冲的结果。西秦岭是一条复合型造山带,该造山带是由一系列微板块与许多小洋盆组成的多岛小洋盆,具有多幕俯冲 (Yin et al., 2004)。

西秦岭西北部的洋壳俯冲具有明显的俯冲极性:由西而东,安山岩基性程度降低,安山岩形成时间越早, K_2O 、 Na_2O 、 ΣREE 等含量增高, MF、FL、DI、La/Sm等值变大, SI、 $Mg^\#$ 等值降低,并且呈明显的线性特征。西秦岭安山岩东早西晚的特征,亦与中国南北大陆由东向西、剪刀式拼合相一致(卢欣祥,1998;姜耀辉等,2010)。

综上所述认为,研究区高镁安山岩/镁安山岩的形成与隆务峡蛇绿岩代表的洋壳板块的向南俯冲有关,为洋壳俯冲过程中岩浆在不同深度、不同演化阶段的产物,并在上升过程中受到岩石圈地壳物质的同化混染作用。俯冲隧道内的板片-地幔相互作用是形成火山岩地幔源区的关键过程,俯冲地壳物质是形成板块边界火山岩重要的组分来源(代富强等,2015;肖庆辉等,2016),俯冲洋壳板片脱水,使地幔楔橄榄岩加水熔融,形成高镁安山质岩浆,通过火山通道溢出地表,最后冷凝固形成高镁安山岩;俯冲洋壳板片脱水部分熔融,形成的熔体上升与地幔楔橄榄岩发生反应,形成镁安山质岩浆,溢流出地表冷凝固形成的镁安山岩。

6 结 论

(1)西秦岭西北段安山岩均属于钙碱性系列,总体高 Al_2O_3 ,低 TiO_2 。稀土元素中等富集,轻、重稀土元素分馏不明显,具Eu负异常。微量元素中,K、Ba、Th、Rb等大离子亲石元素明显富集,Ta、Ti、Nb、P等高场强元素相对亏损,Nb-Ta谷明显但较浅,岩石的形成受到陆壳混染影响。

(2)西秦岭西北段富钾火山岩(包括高镁安山岩/镁安山岩)具有安第斯型活动大陆边缘弧火山岩的特征,为俯冲洋壳在地幔深部发生高程度部分熔融作用的产物。西秦岭西北段高镁安山岩/镁安山岩的存在,说明在西秦岭西北段一个很长的时间内(249~234 Ma),存在洋壳俯冲作用,至少在晚三叠世早期((234±5) Ma),西秦岭地区的洋盆仍未完全闭合。

(3)本次研究结合区域调查资料,西秦岭西北部不但发育代表洋壳俯冲的镁安山岩/高镁安山岩组合,也发育TTG岩套,从中国侵入岩大地构造图上很容易判读出洋的俯冲方向:即隆务峡蛇绿岩代表的洋壳板块向南俯冲。

致谢:刘晓箫女士帮助绘制了相关图件,甘肃省地调院黄增宝博士仔细阅读了初稿,并提出许多有益的建议,在此表示感谢。

注释

①青海省地质矿产局.1991.多福顿幅、温库河幅区域地质调查报告[R].

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192:59-79.
- Che Zicheng, Luo Jinhai, Liu Liang. 2017. The Regional Tectonics of China and Its Adjacent Areas [M]. Beijing: Science Press, 58-59.
- Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic continental accretion in the southwestern United States[J]. *J. Geol.*, 94: 845-865.
- Dai Fuqiang, Zhao Zifu, Zheng Yongfei. 2015. Plate sheet mantle interaction: Genesis of andesitic volcanic rocks in the Dabie orogenic belt[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 45(Supp. 1): 15-20 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Lu Fengxiang, E Molan. 1987. Hannuoba basalt magma origin and the rise of the $P-T$ route[J]. *Geological Review*, 33(4): 317-324 (in Chinese).
- Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Liu Cui, Zhao Guochun, Wu Zongxu, Liu Yong. 2007. Igneous rock assemblages and tectonic environment: Discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 392-402(in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Liu Cui, Feng Yanfang, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Kong Weiqiong, Cao Wenyan. 2010. High magnesian andesite / diorite (HMA) and magnesian andesite / diorite (MA): Two typical igneous rocks related to oceanic subduction[J]. *Geology in China*, 37(4): 1112-1118 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shangguo, Zhao Guochun, Meng Fei, Ma Shuai, Yao Tu. 2015. Igneous tectonic assemblage of magmatic arc and ocean land transition[J]. *Geological Review*, 61 (3): 473-484 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Su Shangguo, Xiao Qinghui, Wu Guangying. 2016. Intrusive Tectonic Map of China (1: 2500000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1-100 (in Chinese).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng. 2002. Structure, Orogeny and Dynamics of the Western Qinling Mountains Orogenic belt[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1-263 (in Chinese).
- Feng Yimin, Cao Xuanduo, Zhang Erpeng, Hu Yunxu, Pan Xiaoping,

- Yang Junlu, Jia Qunzi, Li Wenming. 2003. Evolution, tectonic framework and nature of the western Qinling Mountains orogenic belt[J]. *Northwestern Geology*, 36(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Gan Chengshi, Wang Yuejun, Zhang Yuzhi. 2016. The identification and implications of the Late Jurassic shoshonitic high-Mg andesite from the Youjiang basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11): 3281–3294 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiongfei. 2016. Petrogenesis of the Indosinian Granitic Magmatism and tectonic evolution of the West Qinling Orogenic Belt[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1–125 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jin Guodong, Liao Shiyong. 2010. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, central China: Implications for a continental arc to continent–continent collision[J]. *Lithos*, 117, 183–197.
- Jiang Yaohui, Jin Guodong, Liao Shiyong. 2012. Petrogenesis and tectonic implications of ultrapotassic microgranitoid enclaves in Late Triassic arc granitoids, Qinling orogen, central China[J]. *International Geology Review*, 54 (2): 208–226 .
- Lassiter J C and De Paolo D J. 1997. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints[C]//Mahoney J (ed.). *Large Igneous Provinces: Continental, Oceanic and Planetary Flood Volcanism. Geophysical Monography 100. American Geophysical Union*, 335–355.
- Le Maitre R W. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. Blackwell, Oxford: 193.
- Li Xiaowei, Mo Xuanxue, Yu Xuehui, Ding Yi, Huang Xiongfei, Wei Ping, He Wenyan. 2013. Petrology and geochemistry of the Early Mesozoic pyroxene andesites in the Maixiu Area, West Qinling, China: Products of subduction or syn–collision? [J]. *Lithos*, 172–173.
- Li Zhucang, Li Yongjun, Qi Jianhong. 2016. Geochemical characteristics and tectonic environment analysis of Huari volcanic rocks of Lower Triassic formation in Western Qinling Mountains[J]. *Northwestern Geology*, 49(1): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shuwen, Li Qiugen, Tian Wei. 2011. Petrogenesis of Indosinian granitoids in middle–segment of south Qinling tectonic belt: Constraints from Sr–Nd isotopic systematics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(3): 610–638.
- Long Xiaoping, Sun Min, Yuan Chao, Xiao Wenjiao, Chen Hanlin, Zhao Yongjiu, Cai Keda, Li Jiliang. 2006. Restricting the formation mechanism of Carboniferous volcanic rocks in eastern Junggar and the Junggar basin closure time[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (1): 31–40(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Users manual for isoplot/Ex(rsv.3.0): A Geochronologica Toolkit for Microsoft excel: Berkley[J]. Geochronology Center Special Publication, No. 1a: 1–55.
- Lu Xinxiang. 1998. The tectonic evolution of Qinling Mountains revealed by granites in Qinling Mountains. *Advances in the study of granites in Qinling Mountains* [J]. *Advances in Geosciences*, 13 (2): 213–214 (in Chinese).
- Muller, Rocknms, Groves. 1992. Geochemical discrimination between shonitic and potassic volcanic rocks from different tectonic settings: A pilot study[J]. *Mineral Petrol*, 46: 259–289.
- Muller, Groves. 2000. *Potassic Igneous Rocks and Associated Gold–Copper Mineralization*[M]. 3rd ed. Berlin: Springer–Verlag, 252.
- O’Connor J T. 1965. A classification for quartz–rich igneous rocks based on feldspar ratios [G]. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 525B: B79–B84.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. 1997. *The Formation and Evolution of Geological Structure of Eastern Tethys* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 86–97(in Chinese).
- Pan Guitang, Xiao Qinghui. 2016. *Tectonic Map of China (1:2500000)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–70 (in Chinese).
- Pan Guoqiang, Zhao Lianze, Xia Mulin. 1997. Tectonic model of the Dabieshan collision orogen and its geological evolution[J]. *Regional Geology of China*, 16(1): 43–50 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 58(1): 63–81.
- Qin Jiangfeng, Lai Shaocong. 2011. The genesis and deep dynamics of Late Triassic Granites in the Qinling Mountains orogenic belt [M]. Beijing: Science Press, 1–267 (in Chinese).
- Qiu Jiansheng, Xu Xisheng, Jiang Shaoyong. 2003. Causes of deep crustal subduction and potassium rich volcano rocks[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 191–197(in Chinese with English abstract).
- Ren Jishun, Jiang Chunfa, Zhang Zhengkun. 1980. *Tectonics and evolution of China* [M]. Beijing: Science Press, 1–106(in Chinese).
- Ren Jishun, Zhang Zhengkun, Niu Baogui. 1991. Study on the process of assembling the Qinling Orogenic Belt and the Yangtze Block in the Yangtze Region [C]//Ye Lianjun, Qian Xianglin, Zhang guowei. *Selected Papers on the Academic Symposium of Qinling Mountains Orogenic Belt*. Xi’an: Northwestern University Press, 99–110(in Chinese).
- Rudnick R L, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. In: Holland H D and Turekian KK (eds.). *The Crust Vol. 3 Treatise on Geochemistry*[J]. Oxford: Elsevier–Pergamon, 1–64.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotope systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication*, 42: 313–345.
- Taylor S R and Mc Lennan S M. 1985. *The continental crust its*

- composition and evolution— an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. *Science*, 231(4739): 751–752.
- Wang Qingchen, Cong Bolin. 1998. Tectonic framework of the ultrahigh–pressure metamorphic zone from the Dabie Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(4): 481–492 (in Chinese with English abstract).
- Wright J B A. 1969. Simple alkalinity ratio and its application to questions of nonorogenic granite genesis[J]. *Geol. Mag.*, 106(4): 370–384.
- Winchester, P A Floyd. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325–343.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Pingzhong. 2007. Discrimination of continental basalts and island arc basalts using geochemical methods[J]. *Journal of Petrology and Mineralogy*, 26(1): 77–88 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Li Tingdong, Pan Guitang, Lu Songninan, Ding Xiaozhong, Deng Jinfu, Feng Yinmin, Liu Yong, Kou Caihua, Yang Linlin. 2016. A petrological approach to the identification of Oceanic and terrestrial transformations the identification of oceanic arcs and initial subduction [J]. *Geology China*, 43(3): 721–737 (in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Chen Juanlu, Gao Ting, Li Ping, Li Ting. 2014. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 371–389 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen. 2002. Deposition and Mineralization of the Late Paleozoic Arc Basin in West Qinling Mountains[D]. Beijing: Institute of Geology and Geophysics, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 20–50 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang. 2008. Restoration of tectonic prototype of sedimentary basin in orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2001–2013 (in Chinese with English abstract).
- Yin Hongfu, Zhang Kexin, Feng Qinglai. 2004. The archipelagic ocean system of eastern Eurasian Tethys[J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(1): 230–236.
- Yin Yong, Yin Xianming. 2009. Porphyry–type Cu–Mo–Au mineralization related to adakitic and Himalayan granites of the northern West Qinling Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(5): 1239–1252 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. 1995. Tectonic characteristics and tectonic significance of the main tectonic lithostratigraphic units in the Qinling Mountains orogenic belt[J]. *Chinese Journal of Petrology*, 11(2): 101–113 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng. 2001. Qinling Mountains Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 40–90 (in Chinese).
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Yao Anping. 2004. The continental tectonic junction of Western Qinling Mountains and Songpan in Chinese tectonics [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 23–32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Huang Jichun, Yin Hongfu, Wang Guocan, Wang Yongbiao, Feng Qinglai, Tian Jun. 2000. Application of radiolarians and other fossils in non–Smithstrata: Exemplified by the Animaqing mélange belt in eastern Kunlun Mountains[J]. *Science in China (Series D)*, 43(4): 364–374.
- Zhang Kexin, Yin Hongfu, Zhu Yunhai. 2001. Geological Mapping Theory, Method and Practice in Orogenic Melange Area [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1–165 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Zhu Yunhai, Lin Qixiang, Kou Xiaohu, Fan Guangming, Chen Fengning, Luo Genming. 2007. The discovery of the mafic ultramafic zone for the first time in the long valley area of Tongren County, Qinghai [J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 661–667 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Yin Xianming, Yin Yong, Jin Weijun, Wang Yuanglong, Zhao Yanqing. 2009. The prospecting problems of gold–copper mineralization in Western Qinling Mountains related to adakite and Himalaya type granite related[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(12): 3103–3122 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 车自成, 罗金海, 刘良. 2017. 中国及其邻区区域大地构造学[M]. 北京: 科学出版社, 58–59.
- 代富强, 赵子福, 郑永飞. 2015. 板片–地幔相互作用: 大别造山带碰撞后安山质火山岩成因[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 45(增刊1): 15–20.
- 邓晋福, 路凤香, 鄂莫岚. 1987. 汉诺坝玄武岩岩浆起源及上升的 $p-t$ 路线[J]. *地质论评*, 33(4): 317–324.
- 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 刘翠, 赵国春, 吴宗絮, 刘勇. 2007. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 13(3): 392–402.
- 邓晋福, 刘翠, 冯艳芳, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孔维琼, 曹文燕. 2010. 高镁安山岩/闪长岩类(HMA)和镁安山岩/闪长岩类(MA): 与洋俯冲作用相关的两类典型的火成岩类[J]. *中国地质*, 37(4): 1112–1118.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国, 赵国春, 孟斐, 马帅, 姚图. 2015. 岩浆弧火成岩构造组合与洋陆转换[J]. *地质论评*, 61(3): 473–484.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 苏尚国, 肖庆辉, 伍光英. 2016. 中国侵入岩大地构造图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社, 1–100.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋. 2002. 西秦岭造山带结构造山过程及动力学[M]. 西安: 西安地图出版社, 1–263.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 胡云绪, 潘晓萍, 杨军录, 贾群子, 李文明. 2003. 西秦岭造山带的演化构造格局和性质[J]. *西北地质*, 36(1): 1–10.

- 甘成势,王岳军,张玉芝. 2016. 右江盆地晚侏罗世钾玄质高镁安山岩的厘定及其构造意义[J]. 岩石学报, 32(11): 3281-3294.
- 黄雄飞. 2016. 西秦岭印支期花岗质岩浆作用与造山带演化[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1-125.
- 李注苍,李永军,齐建宏. 2016. 西秦岭下三叠统华日组火山岩地球化学特征及构造环境分析[J]. 西北地质, 49(1): 26-32.
- 龙晓平,孙敏,袁超,肖文交,陈汉林,赵永久,蔡克大,李继亮. 2006. 东准噶尔石炭系火山岩的形成机制及其对准噶尔洋盆闭合时限的制约[J]. 岩石学报, 22(1): 31-40.
- 卢欣祥. 1998. 秦岭花岗岩揭示的秦岭构造演化过程——秦岭花岗岩研究进展[J]. 地球科学进展, 13(2): 213-214.
- 路凤香,桑隆康. 2001. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 10-11.
- 秦江峰,赖绍聪. 2011. 秦岭造山带晚三叠世花岗岩成因与深部动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1-267.
- 潘桂棠,陈智梁,李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 86-97.
- 潘桂棠,肖庆辉. 2016. 中国大地构造图(1:2500000)[M]. 北京: 地质出版社, 1-70.
- 潘国强,赵连泽,夏木林. 1997. 大别山碰撞造山带的构造模型及其地质演化[J]. 地质通报, 16(1): 43-50.
- 邱检生,徐夕生,蒋少涌. 2003. 地壳深俯冲与富钾火山岩成因[J]. 地学前缘, 10(3): 191-197.
- 任纪舜,姜春发,张正坤. 1980. 中国大地构造及其演化[M]. 北京: 科学出版社, 1-106.
- 任纪舜,张正坤,牛宝贵. 1991. 论秦岭造山带—中朝与扬子陆块的拼合过程[C]//叶连俊,钱祥麟,张国伟. 秦岭造山带学术讨论会论文集[M]. 西安: 西北大学出版社, 99-110.
- 王清晨,从柏林. 1998. 大别山超高压变质带的大地构造框架[J]. 岩石学报, 14(4): 481-492.
- 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别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 26(1): 77-88.
- 肖庆辉,李廷栋,潘桂棠,陆松年,丁孝忠,邓晋福,冯益民,刘勇,寇彩化,杨琳琳. 2016. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别[J]. 中国地质, 43(3): 721-737.
- 徐学义,陈隽璐,高婷,李平,李婷. 2014. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报, 30(2): 371-389.
- 闫臻. 2002. 西秦岭晚古生代弧前盆地沉积与成矿作用[D]. 北京: 中国科学院研究生院地质与地球物理研究所, 20-50.
- 闫臻,王宗起,李继亮. 2008. 造山带沉积盆地构造原型恢复[J]. 地质通报, 27(12): 2001-2013.
- 殷勇,殷先明. 2009. 西秦岭北缘与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的斑岩型铜-钼-金成矿作用[J]. 岩石学报, 25(5): 1239-1252.
- 张国伟,张宗清,董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义[J]. 岩石学报, 11(2): 101-113.
- 张国伟,张本仁,袁学诚. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 40-90.
- 张国伟,郭安林,姚安平. 2004. 中国大陆构造中的西秦岭松潘大陆构造结[J]. 地学前缘, 11(3): 23-32.
- 张克信,殷鸿福,朱云海. 2001. 造山带混杂岩区地质填图理论、方法与实践[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1-165.
- 张克信,朱云海,林启祥,寇晓虎,樊光明,陈奋宁,罗根明. 2007. 青海同仁县隆务峡地区首次发现镁铁质-超镁铁质岩带[J]. 地质通报, 26(6): 661-667.
- 张旗,殷先明,殷勇,金惟俊,王元龙,赵彦庆. 2009. 西秦岭与埃达克岩和喜马拉雅型花岗岩有关的金铜成矿及找矿问题[J]. 岩石学报, (12): 3103-3122.