

胥晓春, 裴先治, 刘成军, 等. 西秦岭天水阴崖沟早古生代草滩沟群火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 851-865.
Xu Xiaochun, Pei Xianzhi, Liu Chengjun, et al. Geochemical characteristics of the Yinaigou Early Paleozoic Caotangou Group volcanic rocks in Tianshui of West Qinling Mountains and their geological significance[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 851-865(in Chinese with English abstract).

西秦岭天水阴崖沟早古生代草滩沟群火山岩地球化学特征及其地质意义

胥晓春¹ 裴先治^{1,2} 刘成军¹ 李瑞保^{1,2} 李佐臣^{1,2} 魏博¹
王元元¹ 刘图杰¹ 任厚州¹ 陈伟男¹ 陈有炘¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054;

2. 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要:天水阴崖沟草滩沟群中发育有变质火山岩,其岩石类型主要为变玄武岩、变安山岩、变英安岩和变流纹岩;研究区变火山岩主体属于拉斑系列,其原始岩浆来源于富集地幔;变火山岩的微量元素特征表现为富集大离子亲石元素Cs、Ba、Th和U,而相对亏损高场强元素Nb、Ta、P、Ti和Y;微量元素构造环境判别显示其形成于俯冲消减带之上的岛弧环境;结合已有年代学资料,显示天水—武山洋在晚奥陶世已经存在并开始俯冲,形成阴崖沟草滩沟群岛弧火山岩;同时从岩石组成、形成时代及地球化学特征来看,阴崖沟草滩沟群火山岩与东秦岭丹凤岩群火山岩相似,这为确定天水—武山构造带是早古生代商丹古缝合带的西延部分提供了证据。

关键词:草滩沟群;早古生代;岛弧环境;地球化学;天水地区;西秦岭

中图分类号:P588.1;P595 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)03-0851-15

1 前言

西秦岭天水地区位于祁连造山带与北秦岭造山带的结合部位,这对于研究中国大陆的形成演化过程具有重要的地质意义,是近年来的研究热点,前人在此做过大量工作,为本次研究奠定了基础^[1-17]。该区出露多套早古生代火山岩系,如李子园群火山岩、草滩沟群火山岩。其中,“草滩沟群”是从秦岭岩群中解体出来的一套绿片岩相沉积-火山岩系。自从20世纪90年代以来,已有一些学者对草滩沟群火山岩的地球化学特征和产出的大地构造背景进行过探讨,但对该套火山岩的形成环境存有争议。宋志高等^[1]认为草滩沟群火山岩具有双峰式火山岩的特征,显示了岛弧初期与裂谷末期阶段的活动背景,但缺乏详细的地球化学研究。孙民生^[10]得出草滩沟群形成于造山带背景下弧后盆地拉张裂谷的构造环境的认识。王德耀^[12]指出草滩沟群火山岩形成于岛弧初期与裂谷末期阶段的活动背景,为张裂弧后环境。闫全人等^[14]研究表明草滩沟群火山岩是俯冲板片熔融和地壳混染的产物,形成于岛弧构造环境。朱涛等^[16]认为草滩沟群火山岩的地球化学特征显示其成因与板块俯冲消减作用引

造背景进行过探讨,但对该套火山岩的形成环境存有争议。宋志高等^[1]认为草滩沟群火山岩具有双峰式火山岩的特征,显示了岛弧初期与裂谷末期阶段的活动背景,但缺乏详细的地球化学研究。孙民生^[10]得出草滩沟群形成于造山带背景下弧后盆地拉张裂谷的构造环境的认识。王德耀^[12]指出草滩沟群火山岩形成于岛弧初期与裂谷末期阶段的活动背景,为张裂弧后环境。闫全人等^[14]研究表明草滩沟群火山岩是俯冲板片熔融和地壳混染的产物,形成于岛弧构造环境。朱涛等^[16]认为草滩沟群火山岩的地球化学特征显示其成因与板块俯冲消减作用引

收稿日期:2013-10-15;改回日期:2014-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(41172186、40972136)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD020、2013G1271091、2013G1271092)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目(20110205110004)和中国地质调查局地质调查项目(200013000154)联合资助。

作者简介:胥晓春,男,1988年生,硕士生,构造地质学专业;E-mail:xu6695781@163.com。

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

起的地幔楔形区部分熔融有关,形成环境为岛弧构造环境。草滩沟群究竟形成于何种构造环境,还缺少详细的研究资料,这直接影响到对该区大地构造格架的确定及秦岭与祁连造山带之间构造关系的认识。本文在区域地质调研的基础上,结合前人资料,以西秦岭天水党川乡阴崖沟出露的一套草滩沟群变质火山岩为研究对象,进行地质、岩相学和地球化学特征研究,对其形成的大地构造环境背景进行探讨,为进一步了解秦岭造山带在早古生代的构

造格局及演化过程提供相应的依据。

2 区域地质概况

新阳—元龙韧性剪切带的南北两侧属不同大地构造单元(图1),北侧属祁连造山带东段,发育有古元古界陇山岩群中深变质基底岩系、中上奥陶统陈家河群岛弧型酸性火山岩—沉积岩系以及岛弧型深成岩体和碰撞型花岗岩类、下志留统葫芦河群浅变质沉积岩系和红土堡组基性火山岩系等组成;南侧属西

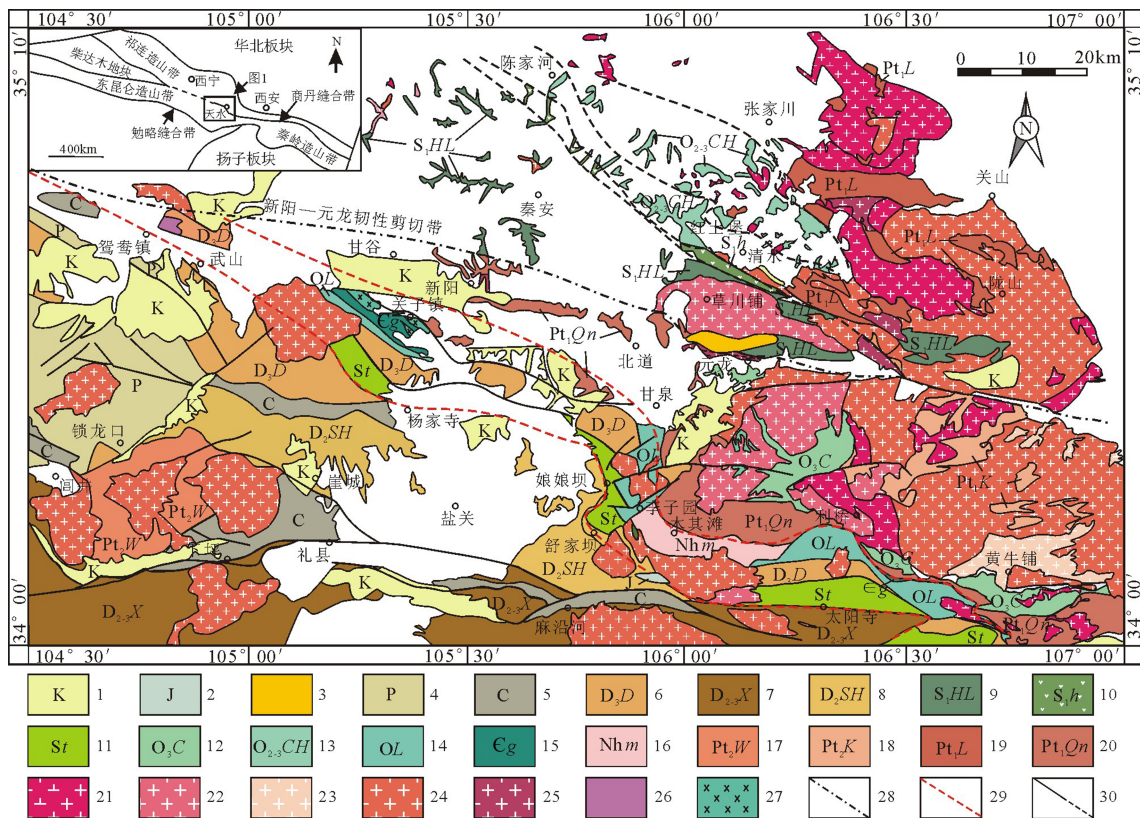


图1 西秦岭北缘天水地区地质构造略图

- 1—白垩系;2—侏罗系;3—晚三叠世小河子陆相酸性火山岩系;4—二叠系;5—石炭系;6—上泥盆统大草滩群;7—中—上泥盆统西汉水群;8—中泥盆统舒家坝群;9—下志留统葫芦河群;10—下志留统红土堡组变基性火山岩;11—志留系太阳寺岩组;12—上奥陶统草滩沟群;13—中—上奥陶统陈家河群;14—奥陶系李子园群;15—寒武纪关子镇蛇绿岩;16—南华系木其滩岩组;17—中元古界吴家山岩群;18—中元古界宽坪岩群;19—古元古界陇山岩群;20—古元古界秦岭岩群;21—加里东早期俯冲型闪长岩—石英闪长岩;22—加里东晚期碰撞型花岗岩;23—海西期花岗岩;24—印支期花岗岩;25—新元古代花岗质片麻岩;26—早古生代镁铁—超镁铁质岩;27—早古生代变形辉长岩—辉长闪长岩;28—主边界断裂;29—构造边界断裂;30—断层、推测断层

Fig.1 Schematic geological tectonic map of Tianshui area, north margin of Western Qinling

- 1—Cretaceous; 2—Jurassic; 3—Late Triassic Xiaohexi continental acid volcanic rocks; 4—Permian; 5—Carboniferous; 6—Upper Devonian Dacaoan Group; 7—Mid-upper Devonian Xihanshui Group; 8—Middle Devonian Shujiaba Group; 9—Lower Silurian Huluhe Group; 10—Meta-basaltic volcanic rocks of Lower Silurian Hongtubao Formation; 11—Silurian Taiyangsi Rock Formation; 12—Upper Ordovician Caotangou Group; 13—Middle-upper Ordovician Chenjiahe Group; 14—Ordovician Liziyuan Group; 15—Cambrian Guanzizhen ophiolite; 16—Nanhua Muqitan Rock Formation; 17—Mesoproterozoic Wujiashan Rock Group; 18—Mesoproterozoic Kuangpin Rock Group; 19—Paleoproterozoic Longshan Rock Group; 20—Paleoproterozoic Qinling Rock Group; 21—Early Caledonian subduction diorites and quartz diorites; 22—Late Caledonian collisional granites; 23—Hercynian granites; 24—Indosinian granites; 25—Neoproterozoic granitic gneiss; 26—Early Paleozoic mafic-ultramafic rocks; 27—Early Paleozoic deformed gabbro-gabbro diorites; 28—Main tectonic boundary; 29—Boundary fault; 30—Fault and inferred fault

秦岭造山带,主要由古元古界秦岭岩群中深变质基底岩系、中元古界宽坪岩群变质岩系、南华系木其滩岩组变质基性火山岩、寒武纪关子镇蛇绿岩带、奥陶系李子园群浅变质活动陆缘沉积-火山岩系、上奥陶统草滩沟群浅变质岛弧型火山-沉积岩系、志留系太阳寺岩组浅变质沉积碎屑岩系、上泥盆统大草滩群具磨拉石特点的河湖相粗碎屑岩系、加里东期岛弧型深成岩体以及中秦岭晚古生代沉积盆地组成^[7,9]。

草滩沟群变质火山岩在水天地区主要出露于党川石咀—花石山—阴崖沟—秦岭沟和利桥东南部一带,东西断续延伸百余千米,区域上斜交于新阳—元龙右行走滑型韧性剪切构造带,总体呈NW

向展布,地层出露不完整,大部分被早古生代花岗岩体所吞没,只有少量残留物出露。在花庙河地区与南侧秦岭岩群呈构造接触关系;而在利桥以东地带,北侧有花岗岩体侵入,南侧与秦岭岩群呈断层接触关系,同时在西岔地区的东侧与宽坪岩群也呈断层接触关系(图2)。根据岩石组合特征,可将草滩沟群自下而上划分为红花铺组(下、上段)和张家庄组(下、上段)。其中,红花铺组下段主要为灰色黑云母石英片岩、黑云母斜长石英片岩、二云母石英片岩、绢云母石英片岩夹绿泥绢云石英片岩及灰绿色变玄武安山岩、变安山岩或绿泥钠长片岩;上段主要为灰绿色绿泥阳起钠长片岩及变质中基性

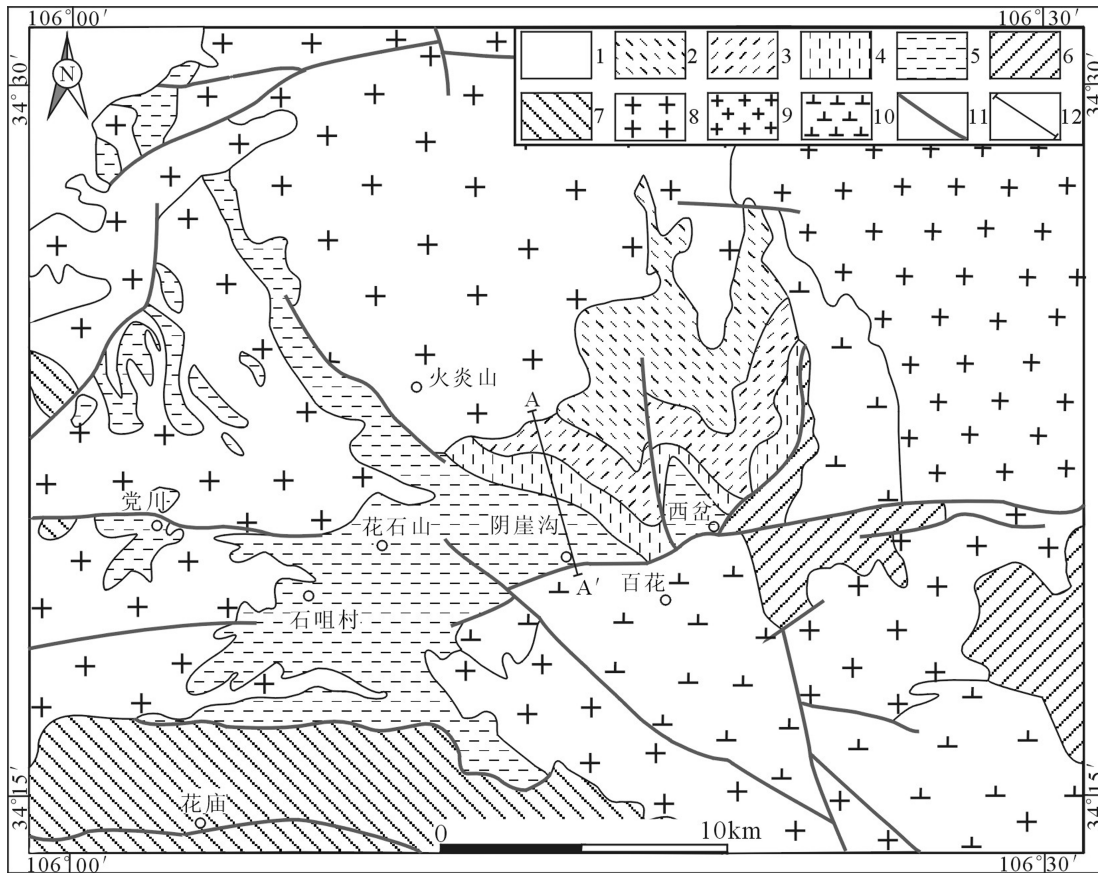


图2 天水地区阴崖沟地质简图

1—中—新生界;2—上奥陶统草滩沟群张家庄组上段;3—上奥陶统草滩沟群张家庄组下段;4—上奥陶统草滩沟群红花铺组上段;5—上奥陶统草滩沟群红花铺组下段;6—中元古界宽坪岩群;7—古元古界秦岭岩群;8—加里东期花岗岩;9—印支期花岗岩;10—加里东期闪长岩;11—断裂;12—实测剖面

Fig.2 Schematic geological map of Yinaiyou area in Tianshui area

1—Mesozoic—Cenozoic; 2—Upper member of Zhangjiashuang Formation of Upper Ordovician Caotangou Group; 3—Lower member of Zhangjiashuang Formation of Upper Ordovician Caotangou Group; 4—Upper member of Honghuapu Formation of Upper Ordovician Caotangou Group; 5—Lower member of Honghuapu Formation of Upper Ordovician Caotangou Group; 6—Mesoproterozoic Kuanping Rock Group; 7—Paleoproterozoic Qinling Rock Group; 8—Caledonian granites; 9—Indosinian granites; 10—Caledonian diorites; 11—Fracture; 12—Measured profile

火山碎屑岩为主。张家庄组下段主要为浅灰色—灰白色变石英砂岩、粉砂质板岩为主夹变含砾砂岩、粉砂质灰岩透镜体；上段主要为浅灰色—灰绿色变质英安岩、凝灰质砂岩、凝灰质板岩夹变石英粉砂岩、粉砂质板岩，偶夹火山角砾岩。

关于草滩沟群的形成时代，杨志超等^[18]依据陕西凤县张家庄组火山岩中所夹的灰岩夹层或透镜体及条带状泥质粉砂岩中获得的古生物化石限定其形成时代为奥陶纪。王洪亮等^[19]对采自甘肃省两当县张家庄乡桑园村南侧的草滩沟群变质中基性火山岩中挑选锆石进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定，在获得具重大意义的古老捕虏锆石年龄信息(4078±5)Ma的同时，测年样品的所有36个测点中有21个测点年龄集中在(456.4±5)Ma(MSWD=0.6)，该年龄基本代表了草滩沟群火山岩的成岩年龄，即该火山岩形成时代为晚奥陶世。

3 岩相学特征及剖面描述

3.1 岩相学特征

阴崖沟草滩沟群岩石类型以变中-基性火山岩

为主，有少量变中酸性火山岩，其中变中-基性火山岩普遍发生低绿片岩相区域变质作用，有少量的长英质糜棱岩夹层(图3-a)。现将样品岩相学特征描述如下：

变玄武岩(绿帘绿泥钠长片岩)：深灰绿色，细粒鳞片变晶结构，片状构造(图3-b)，局部发育有杏仁状构造。总体变形较强，糜棱岩化明显。主要矿物为绿泥石、石英、钠长石、绿帘石和绢云母，副矿物为锆石和铁质矿物。斑晶主要为钠长石，粒径为0.15~0.4 mm，基质粒度小于0.1 mm，主要由绢云母、绿泥石及其他隐晶质矿物组成，其中个别部位绢云母及其他隐晶质矿物呈较大条带状并发育定向排列(图3-c、d)，反映后期构造作用及重结晶作用。

变安山岩(绢云钠长片岩)：灰绿色，片状构造，变余斑状结构，斑晶占30%~40%，主要为钠长石，呈半自形—自形，粒径0.1~0.4 mm。基质具玻晶交织结构，钠长石微晶间隙部分被绿帘石、绢云母及其他隐晶质矿物所充填(图3-e)。

变英安岩(绿泥绢云石英片岩)：浅灰色，片状构造，变余斑状结构。斑晶占20%~30%，以钠长石

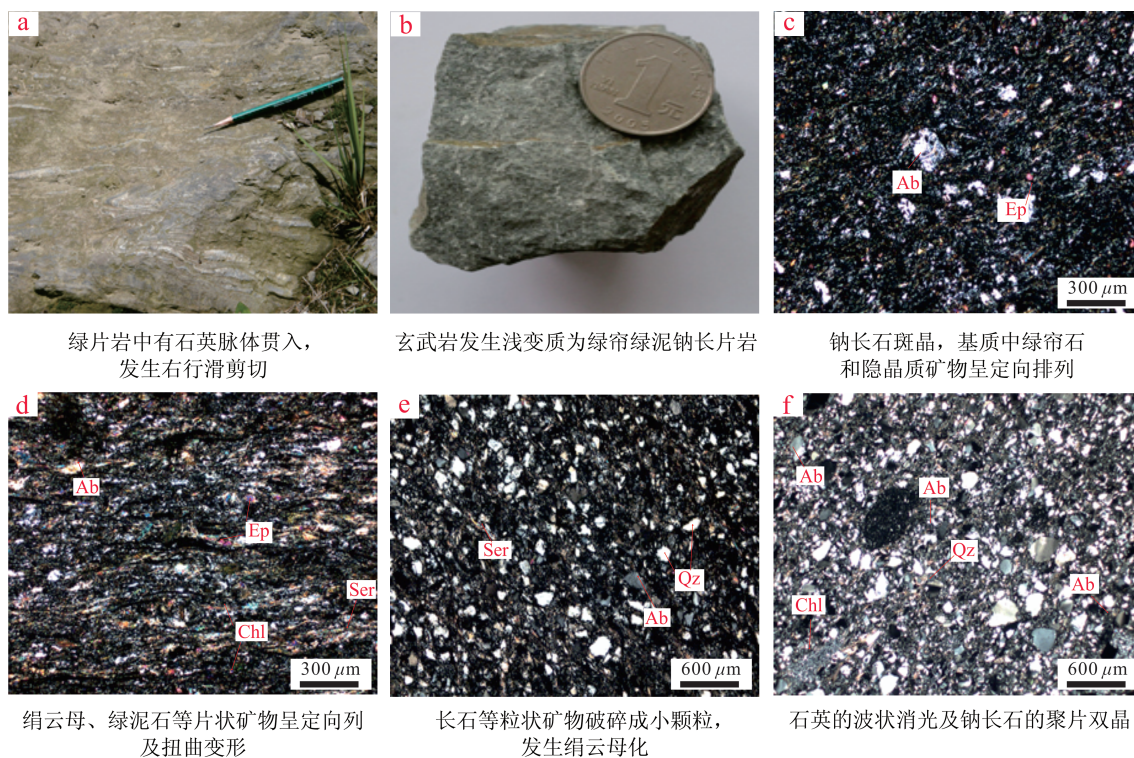


图3 岩石野外照片(a)、手标本(b)和显微照片(正交偏光)(c、d、e、f)

Chl—绿泥石；Ab—钠长石；Qz—石英；Ser—绢云母；Ep—绿帘石

Fig.3 Field photographs (a), specimen (b) and microphotographs (crossed nicols) (c, d, e, f) of metamorphic volcanic rocks

Chl—Chlorite; Ab—Albite; Qz—Quartz; Ser—Sericite; Ep—Epidote

和石英为主,粒径0.1~0.6 mm,钠长石斑晶呈半自形—自形,发育有聚片双晶,石英多呈港湾状或浑圆状,有些具波状消光。基质主要为绿泥石、绢云母及其他隐晶质矿物组成,且定向排列明显。

变流纹岩(绢云母钠长石片岩):灰白色,斑状结构,条带状构造,主要矿物为石英,绢云母,钠长石,绿泥石,方解石,含少量岩屑,副矿物为锆石,磁铁矿。斑晶主要为钠长石、石英。石英呈半自形—自形,具细粒化,波状消光等现象,钠长石呈半自形,发育聚片双晶及动力双晶,基质粒度小于0.1 mm,主要由绿泥石、绢云母及其他隐晶质矿物组成(图3-f)。

3.2 剖面描述

野外实测剖面位于阴崖沟一带,剖面(图4)起点坐标:34°21'N、106°17'E,终点坐标:34°19'N、106°17'E,总长约5 km。现将剖面由北到南按照自然产出顺序列述如下:

- (1) 火炎山花岗岩体(H_{ζγ})
- 侵入接触 —————
- 张家庄组下段(O_{zh}^a)
- (2) 浅灰—灰色黑云石英片岩 290 m
- (3) 浅灰绿色细粒绿帘绿泥钠长片岩,发育杆状构造 875 m
- 红花铺组上段(O_h^b)
- (4) 硅质岩夹层 15 m
- (5) 浅灰绿色细粒绿帘绿泥钠长片岩,发育杆状构造 1016 m
- 红花铺组下段(O_h^a)
- (6) 深灰—灰色黑云母石英片岩夹二云母石英片岩及绿帘绿泥钠长片岩 480 m

- (7) 灰绿色细粒绿帘绿泥钠长片岩 50 m
- (8) 深灰—灰绿色绢云母钠长片岩、黑云母石英片岩夹二云母石英片岩 >1000 m

=====断层接触=====

- (9) 百花岩浆杂岩体(B_δ)

4 岩石地球化学特征

本次研究共采集代表性岩石样品15件进行地球化学分析测试,重点对阴崖沟早古生代草滩沟群火山岩进行了主量、稀土和微量元素分析。分析测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室进行。主量元素采用X射线荧光光谱仪(XRF—1500)测定氧化物的含量,分析相对误差小于5%,微量元素和稀土元素利用酸溶法制备样品,再使用ICP-MS(Element II)测试,分析精度优于5%。其中12件样品采集于阴崖沟中,还有3件样品(TS157/2、TS157/3、TS158/1)采集于阴崖沟附近的石咀村,都属于草滩沟群,用于与阴崖沟的岩石样品进行对比,因此本文将其综合一起来讨论。其中,除TS154/1(变安山岩)、TS157/2(变流纹岩)和TS158/1(变英安岩)3件样品外,其他均为变玄武岩。阴崖沟火山岩主量元素、微量元素、稀土元素组成及参数见表1。

4.1 主量元素

阴崖沟火山岩样品中烧失量(LOI)中等,但变化范围较大,介于1.38%~9.73%,平均为3.94%,显示出不同岩石在后期蚀变过程中存在着差异。变玄武岩样品SiO₂含量介于44.24%~49.72%,TiO₂含量较低,变化于1.18%~2.09%,平均值为1.47%,

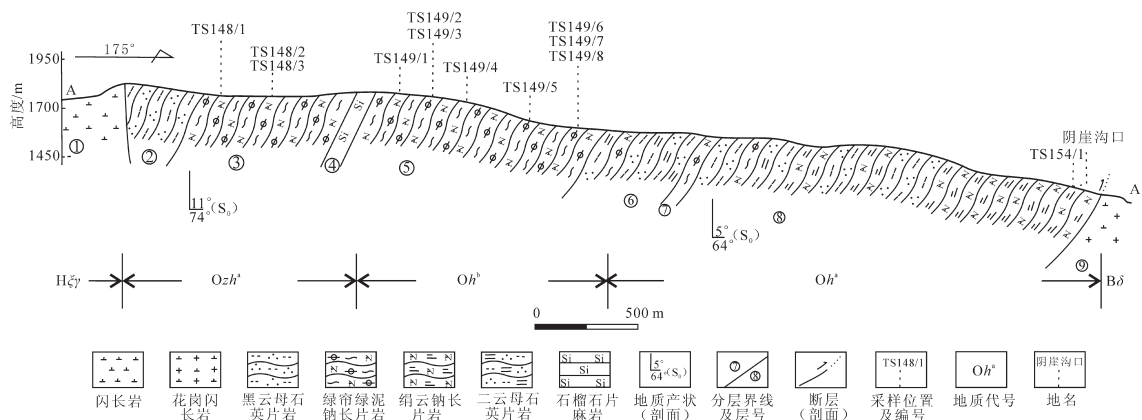


图4 天水阴崖沟实测地质剖面图
Fig.4 Measured profile of Yinaigou in Tianshui

表1 天水阴崖沟变火山岩的主量元素(%),微量元素和稀土元素(10^{-6})组成
 Table 1 Major element(%), trace element and REE (10^{-6}) compositions of Yinaigou in Tianshui

分析项目	TS148/1	TS148/2	TS148/3	TS149/1	TS149/2	TS149/3	TS149/4	TS149/5	TS149/6	TS149/7	TS149/8	TS154/1	TS157/2	TS157/3	TS158/1
SiO ₂	48.23	49.49	49.72	47.73	48.52	46.50	44.85	45.57	45.05	47.13	46.35	61.80	79.25	44.24	69.41
TiO ₂	1.95	1.44	1.58	1.37	1.52	1.56	1.26	1.18	1.26	1.29	1.19	1.08	0.49	2.09	0.55
Al ₂ O ₃	14.43	15.01	14.26	14.63	14.98	14.88	16.61	15.37	16.13	15.80	16.41	15.46	9.06	13.01	13.88
FeO ⁺	14.49	10.81	11.20	11.74	11.99	12.33	10.88	10.38	10.89	11.23	10.66	7.19	4.47	12.92	5.67
MnO	0.22	0.16	0.15	0.16	0.17	0.19	0.18	0.26	0.16	0.16	0.16	0.12	0.05	0.18	0.07
MgO	4.94	5.53	6.99	6.68	5.92	5.76	4.83	6.57	4.69	6.76	7.22	2.37	1.52	6.71	2.28
CaO	9.73	11.03	8.03	10.22	10.71	12.59	11.94	9.27	10.49	11.40	11.66	4.70	0.62	8.62	0.82
Na ₂ O	3.49	3.46	3.68	3.09	2.99	2.57	2.83	3.13	3.83	2.66	1.89	3.23	2.21	2.10	3.69
K ₂ O	0.18	0.22	0.35	0.29	0.25	0.25	0.75	0.13	0.09	0.17	0.06	1.42	1.14	0.48	1.82
P ₂ O ₅	0.28	0.18	0.21	0.20	0.24	0.29	0.24	0.25	0.29	0.20	0.24	0.27	0.13	0.30	0.13
LOI	1.80	2.08	3.50	3.36	2.28	2.60	5.41	8.09	7.47	2.66	4.24	2.60	1.38	9.73	1.96
TOTAL	99.74	99.41	99.67	99.47	99.57	99.52	99.78	100.20	100.35	99.46	100.08	100.24	100.32	100.38	100.28
Cr	28.90	162.00	80.90	180.00	138.00	119.00	170.00	145.00	152.00	186.00	164.00	30.10	58.40	52.50	55.30
Co	44.70	61.80	39.10	44.30	49.70	45.50	41.60	38.40	39.40	42.50	49.30	15.00	10.80	52.50	13.70
Ni	21.10	64.90	38.60	36.20	30.90	33.90	55.10	53.20	55.10	37.10	92.10	9.56	22.00	25.70	21.80
Cs	0.30	0.18	0.59	0.57	0.27	0.35	1.91	0.23	0.13	0.25	0.07	3.22	1.96	2.81	4.25
Rb	2.13	4.90	7.15	6.74	4.96	5.62	18.00	3.15	1.13	3.17	1.21	27.70	47.80	56.10	83.80
Ba	56.30	58.40	108.00	109.00	92.50	75.00	168.00	35.50	21.10	49.00	52.60	182.00	665.00	313.00	465.00
Th	1.05	1.02	2.08	0.90	1.14	1.78	1.66	1.29	1.67	0.89	0.65	1.76	11.20	18.40	15.10
U	0.31	0.63	0.40	0.29	0.42	0.65	0.24	0.32	0.19	0.26	0.17	0.46	2.83	2.72	2.28
Ta	0.29	0.20	0.20	0.22	0.27	0.32	0.28	0.23	0.28	0.21	0.19	0.34	0.53	0.97	0.70
Nb	3.23	2.25	2.82	2.81	3.50	3.97	3.65	3.11	3.60	2.63	2.51	3.92	6.86	10.90	8.92
Sr	198.00	242.00	240.00	261.00	321.00	330.00	372.00	541.00	341.00	422.00	458.00	223.00	724.00	77.70	41.00
Hf	1.21	1.31	1.93	1.16	1.41	1.21	0.95	0.52	0.84	0.95	0.77	4.30	5.22	4.91	5.10
Zr	28.50	33.10	85.60	31.50	27.20	26.20	20.80	12.70	17.90	28.20	20.50	137.00	201.00	187.00	173.00
Y	41.50	33.00	33.00	29.30	33.80	36.80	33.70	26.50	31.10	26.50	26.30	34.50	38.10	25.40	27.00
La	10.9	8.28	12.3	9.3	11.5	14.4	15.3	10.9	13.6	8.3	8.8	11.0	34.4	36.5	32.8
Ce	26.3	20.4	26.7	21.7	27.0	33.8	32.2	25.0	29.9	19.7	20.8	27.8	66.9	69.4	62.9
Pr	4.03	3.14	3.72	3.27	3.95	4.99	4.60	3.51	4.27	2.86	3.00	4.21	8.33	8.03	7.34
Nd	20.20	15.70	18.30	15.70	18.70	23.20	21.80	16.80	20.10	14.50	14.50	20.90	35.00	30.00	28.30
Sm	5.61	4.27	4.53	4.13	5.00	5.70	5.12	4.12	4.79	3.74	3.88	5.62	6.94	5.44	5.48
Eu	2.05	1.68	1.51	1.53	1.84	1.90	1.80	1.44	1.61	1.32	1.43	2.45	2.20	1.16	1.22
Gd	6.29	5.12	5.16	4.58	5.55	6.17	5.29	4.33	5.39	4.24	4.04	6.58	6.73	4.81	4.85
Tb	1.30	1.06	1.05	0.93	1.09	1.30	1.07	0.86	1.02	0.83	0.85	1.20	1.27	0.89	0.92
Dy	7.57	5.97	5.96	5.36	6.71	6.87	6.24	4.94	5.69	4.77	5.35	6.87	7.16	4.90	5.21
Ho	1.51	1.21	1.19	1.08	1.24	1.39	1.24	0.98	1.17	1.00	0.97	1.31	1.39	0.92	1.02
Er	4.50	3.73	3.68	3.26	3.70	4.16	3.65	2.91	3.33	2.92	3.03	3.94	4.31	2.87	3.29
Tm	0.62	0.53	0.55	0.49	0.54	0.60	0.57	0.45	0.52	0.45	0.43	0.59	0.67	0.46	0.53
Yb	3.86	3.39	3.25	2.88	3.17	3.61	3.39	2.63	2.99	2.60	2.71	3.78	3.76	2.93	3.46
Lu	0.47	0.42	0.48	0.39	0.45	0.51	0.49	0.37	0.44	0.36	0.37	0.48	0.55	0.39	0.48

Al_2O_3 含量在13.01%~16.61%,平均值为15.13%,除个别样品外,大多数样品的 Al_2O_3 含量小于16%; $\text{Mg}^\#$ ($\text{MgO}/(\text{FeO}+\text{MgO}) \times 100$ 的摩尔比)值变化范围较大,在52.78~73.04变化。Frey等^[20]认为原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值规定为68~75,按此划分,该区除了个别原始岩浆的生成物外,大多为经过演化的岩浆生成物,反映了岩浆经历了一定程度的结晶分异作用的演化。全铁 FeO^\dagger 含量变化于10.38%~14.49%, ALK ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$)变化也较大,为1.95%~4.03%,且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 含量, K_2O 含量低(0.06%~0.75%),显示出富钠低钾特征,属于低钾系列,可能与后生成岩作用过程中热液绿泥石化蚀变作用Na交代有关。

变中-中酸性火山岩中 SiO_2 含量介于61.80%~79.25%, TiO_2 含量0.49%~1.08%,平均值为0.71%,低于MORB(平均为1.5%)和OIB(平均为2.23%),而与岛弧火山岩的 TiO_2 含量(平均为0.8%)^[21]接近。 Al_2O_3 含量在9.06%~15.46%,总体低于变基性火山岩样品。 $\text{Mg}^\#$ 值变化于46.81~50.99。全铁 FeO^\dagger 含量变化于4.47%~7.19%, ALK 变化较大,为3.35%~5.51%,且含量 Na_2O 稍大于 K_2O 。

在Nb/Y-SiO₂图解(图5-a)上,多数样品落入亚碱性系列区域;其中,变基性火山岩样品均落入玄武岩区域。而变中-中酸性岩样品落入安山岩、英安岩和流纹岩区域,这与野外露头观察相一致,同时也表明原岩确实属于火山岩类。而在Zr-Y图解(图5-b)上,所有变基性火山岩样品都落入拉斑系列,变中-中酸性则落入拉斑系列与钙碱性系列的

过渡区域。上述特征表明阴崖沟变火山岩整体具有亚碱性之拉斑系列火山岩特征。

4.2 稀土、微量元素

变玄武岩样品的稀土元素含量为 $\sum \text{REE} = (67.59 \sim 108.61) \times 10^{-6}$,平均为 86.94×10^{-6} ,岩石的稀土元素分布型式呈LREE略富集型(图6-a), LREE/HREE 比值为2.50~3.69, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 1.65 \sim 3.07$,平均为2.38, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 1.22 \sim 1.88$,平均为1.50, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.20 \sim 1.45$,平均为1.32,这些特征与岛弧火山岩的稀土元素特征较为一致。 δEu 为0.95~1.23,平均值为1.05,无明显的Eu异常或弱的正异常,说明没有斜长石的结晶分异作用。Ce表现出略负异常($\delta\text{Ce} = 0.92 \sim 0.98$),表明岩体经历了后期表生作用的改造。

变中-中酸性火山岩样品中的稀土元素含量较高, $\sum \text{REE} = (157.80 \sim 179.61) \times 10^{-6}$,平均为 168.70×10^{-6} ,高于变玄武岩含量。稀土元素配分型式呈LREE富集的右倾型(图6-b), LREE/HREE 比值为5.95~8.29, $(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.17 \sim 8.40$,平均为6.99, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.12 \sim 4.22$,平均为3.70, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.13 \sim 1.44$,平均为1.30, δEu 为0.68~0.97,平均值为0.79,有较为明显的Eu负异常,说明在岩浆结晶分离过程中有斜长石的晶出。上述变火山岩样品稀土元素特征与岛弧型火山岩的稀土元素分布型式相似^[24,25]。

岩石微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图7-a、b),阴崖沟变玄武岩总体上富集大离子亲石元素(LILE)Cs、Ba、Sr、Th、U,相对亏损Rb、K和高场强元素(HFSE)Nb、P、Ta、Ti和Y,类似于低钾岛弧

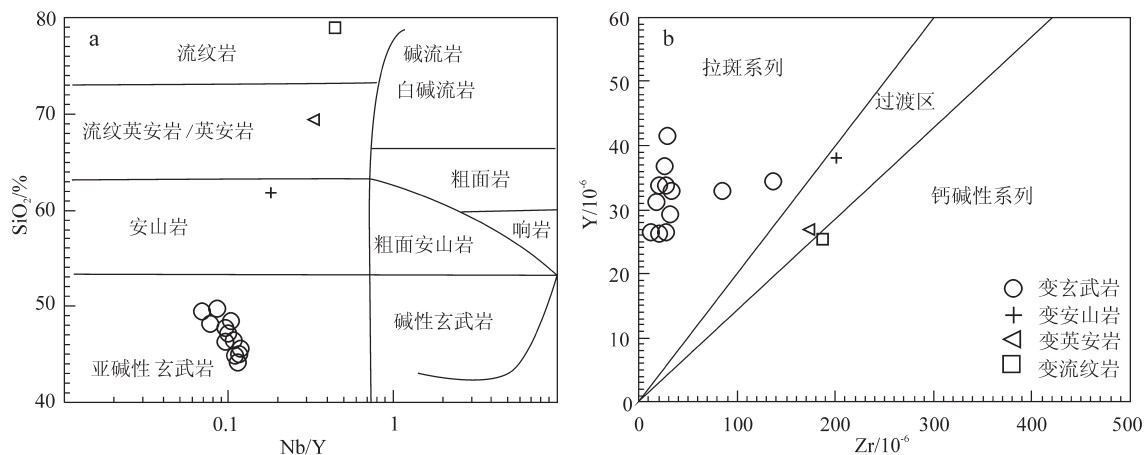


图5 变质火山岩Nb/Y-SiO₂图解(a)(据文献[22])、Zr-Y图解(b)(据文献[23])
Fig. 5 Nb/Y-SiO₂(a) (after Reference [22]) and (Zr-Y) (after Reference [23]) diagrams of metamorphic volcanic rocks

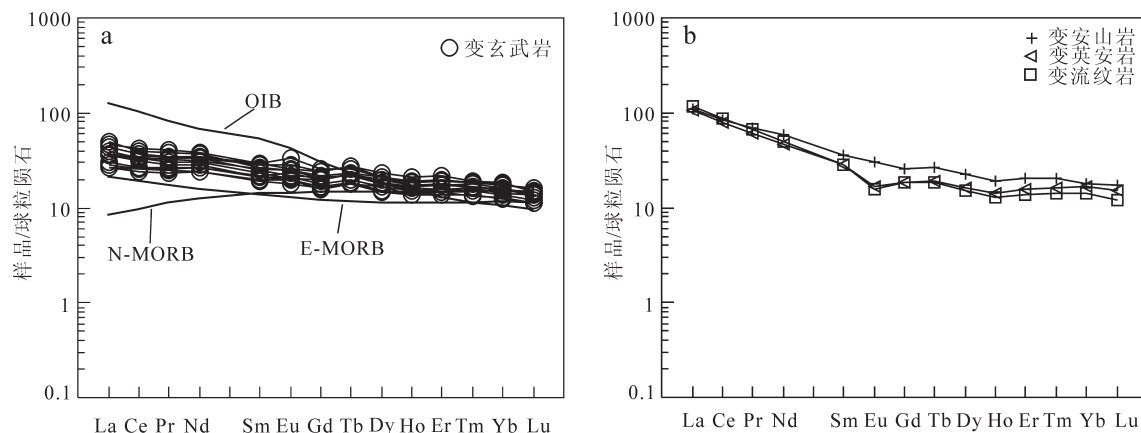


图6 变火山岩球粒陨石稀土元素配分型式(a,b)(球粒陨石数据引自文献[26]; 典型的N-MORB、E-MORB及OIB数据引自文献[27])

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns (a,b) of metamorphic volcanic rocks (chondrite data after Reference [26]; N-MORB, E-MORB and OIB data after Reference [27])

拉斑玄武岩。而变中-中酸性火山岩以富集大离子亲石元素Rb、Cs、Ba、Th、U,相对亏损K、Sr和高场强元素Nb、Ta、P、Ti和Y为特征。需要注意的是,所有样品中Yb值为 $2.60 \times 10^{-6} \sim 3.86 \times 10^{-6}$,Ta值为 $0.19 \times 10^{-6} \sim 0.97 \times 10^{-6}$,Ta/Yb比值在0.06~0.33,这与相应岛弧环境下 $Yb < 5 \times 10^{-6}$, $Ta < 1 \times 10^{-6}$, $Ta/Yb < 0.5$ ^[28]相类似。

5 讨论

5.1 构造环境分析

草滩沟群本身是一套沉积-火山岩组合,可能是俯冲带之上与岛弧相关的沉积构造环境。但要确定其形成的构造环境,就需依据其中的火山岩的

岩石类型以及详细地球化学特征来判断。不同岩系(拉斑、碱性等)的玄武质火山岩产生于不同的构造背景。从岩石类型上来看,阴崖沟草滩沟群火山岩主体属拉斑系列岩石,为变流纹岩-变英安岩-变安山岩-变玄武岩组合,与岛弧带中亚碱性玄武岩系列的火山岩及其岩石组合相似^[28]。从地球化学方面来看,通常认为高场强元素(如Zr、Ti、Nb、Hf、Th、Y等)在轻度蚀变和低级变质作用条件下具有良好的稳定性^[29],可以有效地判别变火山岩的构造环境。该区变火山岩中 $Yb < 5 \times 10^{-6}$, $Ta < 1 \times 10^{-6}$, $Ta/Yb < 0.5$,表现出与板块俯冲作用有关的岛弧岩浆作用的特点^[28];另外, $Zr < 130 \times 10^{-6}$, Zr/Y 比值 < 4 ,这与岛弧玄武岩中较低的Zr含量和Zr/Y相类似。Ti/Y

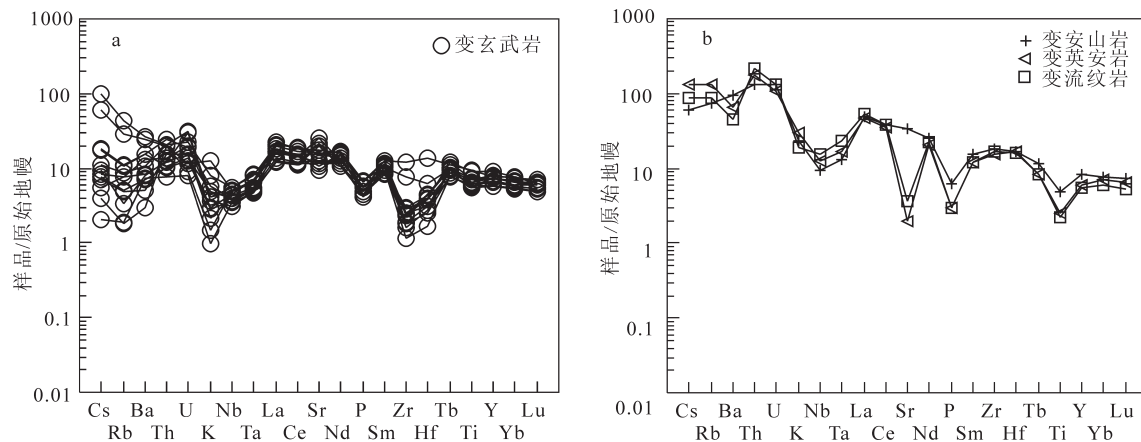


图7 变火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a,b)(原始地幔数据引自文献[27])

Fig.7 Primitive mantle normalized trace element spider diagram of metamorphic volcanic rocks (a,b) (primitive mantle after Reference [27])

比值为122~363, Nb/Y比值为0.07~0.42, 与岛弧玄武岩相近; Th/Ta比值为3.7~21.5, 明显大于2, 属于岛弧玄武岩范围^[25]。除极少数样品外, 大多数样品的La/Nb(3.15~5.02)、Th/Nb(0.25~1.69)与岛弧火山岩的La/Nb>1.4^[30,31]和Th/Nb>0.11^[32,33]相一致; 同时各样品均满足Ti/Y<350、Hf/Ta>5、La/Ta>15、Th/Yb>0.1、Nb/La<0.8、Hf/Th<8、Th/Nb>0.07, 明显不同于洋中脊玄武岩和板内玄武岩^[34]。变玄武岩稀土元素近平坦型的配分模式类似于岛弧拉斑玄武岩稀土特征^[35]; 而微量元素配分模式总体亏损Ta、Nb、Ti等, 具有典型岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩特征^[21,36,37], 暗示其与俯冲消减作用密切相关, 特别是Nb的负异常是岛弧火山岩的显著标志, 反映了板块俯冲环境中火山岩的典型特征^[25]。Nb-Nb/Th图解(图8-a)和La-La/Nb图解(图8-b)显示本区的基

性火山岩样品都落到弧火山岩区域; 中酸性火山岩在花岗岩构造环境(Yb+Ta)-Rb图解(图8-c)和Yb-Ta图解上(图8-d), 获得相同的结果, 落入到弧火山岩区域, 再次证明该区火山岩形成于岛弧构造环境。

通过上述样品岩石学、地球化学和微量元素的构造环境判别表明, 阴崖沟草滩沟群火山岩是俯冲消减带之上岛弧环境下构造岩浆活动的产物。

5.2 岩石成因

大量事实证明, 玄武质岩浆来源于地幔橄榄岩物质的部分熔融, 其形成过程和化学组成取决于部分熔融程度、岩石圈厚度、源区特征及地幔潜能温度等因素的控制^[40,41]。对于拉斑玄武岩的成因, 通常认为有以下4种成因模式: (1)富集岩石圈地幔来源^[42,43]; (2)软流圈来源, 其岩石特征主要受控于岩

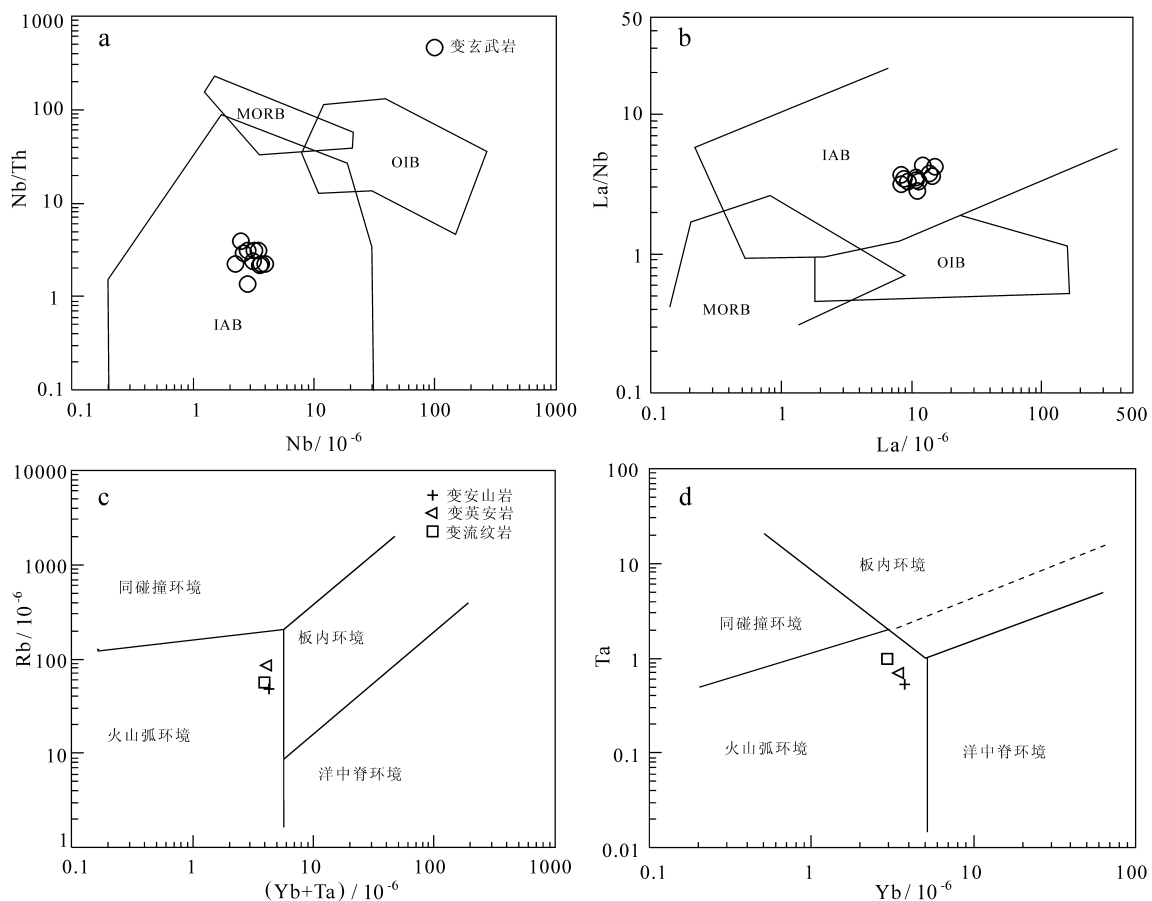


图8 变基性火山岩Nb-Nb/Th图解(a)和La-La/Nb图解(b)^[38]、变中-中酸性火山岩Yb+Ta-Rb构造环境判别图(c)和Yb-Ta构造环境判别图(d)^[39]

Fig.8 Nb-Nb/Th (a) and La-La/Nb (b)^[38] diagram of meta-basaltic volcanic rocks, Yb+Ta-Rb (c) and Yb-Ta (d)^[39] discrimination diagram of tectonic setting meta-intermediate-acidic volcanic rocks

浆源区及深度。通过对地幔橄榄岩做无水熔融实验已证明,拉斑玄武岩一般在低压(<10 kbar)无挥发分的条件下,程度较大的部分熔融所形成^[44,45]; (3)软流圈与岩石圈地幔之间的相互作用^[46]; (4)软流圈来源岩浆受到地壳混染影响^[47]。

稀土元素的特征可提供有关岩石成因过程的重要信息。变基性火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图显示大离子亲石元素(LILE)相对于高场强元素(HFSE)富集,在稀土元素配分曲线上与E-MORB型相似^[27],暗示该火山岩可能来源与富集地幔有关;值得注意的是,变基性火山岩中La/Th、Zr/Nb、La/Yb、La/Sm和Ce/Yb等不活动元素的比值指示其来源于富集地幔^[27];结合闫全人等^[14]对两当家庄草滩沟群火山岩中Sr、Nd、Pb同位素组成综合分析表明,草滩沟群变基性火山岩的岩浆源区为混染的富集地幔源区。变中-中酸性火山岩样品中不活动元素及其比值Ce/Yb、Zr/Sm和Zr/Y等与相应的典型中下地壳元素比值相似^[48],表明变中-中酸性火山岩的形成与中下地壳密不可分。

综上所述,天水地区阴崖沟火山岩形成于岛弧环境,结合区域构造演化分析,其形成过程可能是:在晚奥陶世—早志留世时期,随着天水—武山洋壳的不断俯冲,使消减的洋壳不断累积热量,导致温度和压力的升高,产生大量流体;流体的加入致使其上覆地幔楔发生富集,形成富集地幔。随着俯冲作用的加强,使得富集地幔部分熔融并形成基性岩浆,并且经历一定程度的结晶分异作用,形成该区基性火山岩,随着俯冲作用的不断加强,基性岩浆底侵地壳,导致中—下地壳物质(主要为下地壳)部分熔融形成中酸性岩浆,在经历后期多次变质、变形构造作用后呈现出现今的模样。

5.3 地质意义讨论

如前所述,天水阴崖沟草滩沟群变火山岩的地球化学特征表明其形成于岛弧构造环境,其形成年龄为 $(456.4 \pm 5) \text{ Ma}$ (MSWD = 0.6),为晚奥陶世^[19]。裴先治等^[4]在西秦岭天水地区厘定出的关子镇N-MORB型蛇绿岩套,由呈构造块体产出的蛇纹岩、变辉石岩、变辉长岩以及变玄武岩等组成,形成时代定为晚寒武世—早奥陶世;而关子镇蛇绿岩的西延武山蛇绿岩,被认为具E-MORB型特征,形成时代上限为晚奥陶世^[49,50],证实了西秦岭北缘早古生

代洋盆体系的存在;值得一提的是,西秦岭天水地区发育有大量同期岩浆岩类,且组成复杂,前人已经取得了大量高精度同位素年龄资料:红花铺英云闪长岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $(450 \pm 1.8) \text{ Ma}$ ^[51];唐藏石英闪长岩体的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄为 $(454 \pm 1.9) \text{ Ma}$ ^[52];陕西眉县斜峪关群岛弧型玄武岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $(472 \pm 11) \text{ Ma}$ ^[14];天水地区百花岩浆杂岩体中辉长岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素年龄为 $(449.7 \pm 3.1) \text{ Ma}$ ^[53];桦林沟辉长岩和鸳鸯镇辉长闪长岩中SHRIMP锆石U-Pb年龄分别为 $(440 \pm 3.1) \text{ Ma}$ 和 $(456 \pm 3) \text{ Ma}$ ^[53]。以上岛弧岩浆岩的年代学研究资料再次证明了西秦岭北缘地区在早古生代存在板块俯冲作用。此外,西秦岭天水地区秦祁结合部位还出露李子园群(狭义)沉积-火山岩组合^[6],以及本次研究的草滩沟群变质沉积-火山岩系。这些特征揭示出秦岭古洋盆经历了以E-MORB型蛇绿岩为标志的初始裂陷阶段,以N-MORB型蛇绿岩为标志的高度演化阶段以及以岛弧火山岩为标志的消减闭合阶段等构造演化过程^[50]。

商丹缝合带的西延问题为秦岭造山带盆山演化研究的重要问题之一。前人研究认为西秦岭以关子镇蛇绿岩为代表天水—武山构造带实际上属于商丹古缝合带的西延^[2,3]。商丹缝合带以丹凤地区出露的变基性火山岩为标志,地球化学特征显示其成因与板块的俯冲消减作用所引起的地幔楔部分熔融有关,形成于岛弧环境^[54,55],这与阴崖沟变火山岩在成因和形成环境上相似;从形成时代上看,利用丹凤资峪—郭家沟变玄武岩中所测Rb-Sr等时线年龄为 $(447.8 \pm 41.5) \text{ Ma}$ ^[56],SHRIMP锆石U-Pb年龄为 $(499.8 \pm 4) \text{ Ma}$ ^[57],Yan et al^[58]在周至县丹凤群枕状熔岩中的闪长岩脉用SHRIMP锆石U-Pb法测得年龄为 $(442 \pm 7) \text{ Ma}$,接近于草滩沟群变火山岩的形成时代。上述年代学和地球化学特征为天水—武山构造带作为商丹古缝合带的西延部分这一论点提供了新的证据。同时也表明,天水—武山洋从早古生代开始由南向北俯冲消减,在西秦岭关子镇蛇绿岩北侧出现以细尾子沟变超镁铁质岩—镁铁质岩为代表的初始岛弧,并形成以李子园群为代表的岛弧—弧前盆地变质火山—沉积岩系;随着古洋盆俯冲的继续,于晚奥陶世在西秦岭地区形成了草滩沟

群岛弧型火山-沉积岩系。总体来说,天水地区西秦岭北缘以武山和关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆(天水-武山洋)及关子镇岛弧型中基性岩浆杂岩、百花岛弧型基性-中酸性岩浆杂岩为代表的俯冲-碰撞型花岗质岩浆侵入活动带以及上奥陶统草滩沟群岛弧型火山岩-沉积岩组合为代表的古火山-岩浆岛弧带构成其早古生代的构造格局^[2,4,5]。这对于早古生代西秦岭北缘构造带的构造格局的重建及确定早古生代秦岭与祁连造山带之间的构造交接关系提供了有利依据。

6 结 论

(1)西秦岭天水阴崖沟晚奥陶世草滩沟群变质火山岩主要由变玄武岩-变安山岩-变英安岩-变流纹岩组成。地球化学特征显示其变基性火山岩属于拉斑系列,变中-中酸性火山岩则倾向于钙碱性系列。

(2)阴崖沟草滩沟群火山岩的微量元素特征与俯冲作用相关火山岩特征相似,即相对富集大离子亲石元素,而相对亏损高场强元素,尤其是Nb、Ta的负异常特征。这些特征说明阴崖沟草滩沟群变火山岩可能形成于岛弧环境;基性火山岩岩浆来源于富集地幔,中酸性火山岩岩浆则是由中-下地壳物质(主要为下地壳)部分熔融形成的产物。

(3)结合区域岩浆活动及已有年代学资料,表明在晚奥陶世天水-武山洋已经存在并开始俯冲,形成阴崖沟草滩沟群岛弧火山岩,揭示出该区火山岩是岛弧构造岩浆活动产物。同时也对西秦岭以关子镇蛇绿岩为代表的天水-武山构造带是东秦岭商丹古缝合带的西延部分这一论点提供新的证据。

致谢:在论文完成过程中得到魏方辉、高景民、吴树宽、王银川、徐通、胡楠和杨杰等硕士的大力帮助,在此表示感谢。

参考文献(References):

[1] 宋志高, 贾群子, 张治洮, 等. 北秦岭—北祁连(天水—宝鸡)间早古生代火山岩系及其构造连接关系的研究[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1991, 34: 1-82.
Song Zhigao, Jia Qunzi, Zhang Zhitao, et al. The Early Palaeozoic volcanic rock series and its interconnection relationship between the North Qinling and the North Qilian orogens[J]. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, 1991, 34: 1-82(in Chinese with English abstract).

[2] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 1-855.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics[M]. Beijing: Science Press, 2001: 1-855(in Chinese with English abstract).

[3] 裴先治. 东秦岭商丹构造带的组成与构造演化[M]. 西安: 西安地图出版社, 1997: 1-184.
Pei Xianzhi. Compositions and Tectonic Evolution of the Shangdan Structural Zone in the East Qinling, China[M]. Xi'an: Xi'an Cartographic Publishing House, 1997: 1-184(in Chinese with English abstract).

[4] 裴先治, 丁仁平, 胡波, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩的厘定及其地质意义[J]. 地质通报, 2004, 23(12): 1202-1208.
Pei Xianzhi, Ding Sapin, Hu Bo, et al. Definition of the Guanzhen ophiolite in Tianshui area, western Qinling, and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2004, 23(12): 1202-1208(in Chinese with English abstract).

[5] 裴先治, 李佐臣, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区岛弧型基性岩浆杂岩的地球化学特征及形成时代[J]. 中国地质, 2005, 32(4): 529-540.
Pei Xianzhi, Li Zuochen, Ding Sapin, et al. Geochemical characteristics and zircon U-Pb ages of island-arc basic igneous complexes in the Tianshui area, West Qinling[J]. Geology in China, 2005, 32(4): 529-540(in Chinese with English abstract).

[6] 裴先治, 刘会彬, 丁仁平, 等. 西秦岭天水地区李子园群变质火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2006, 30(2): 193-205.
Pei Xianzhi, Liu Huibin, Ding Sapin, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of the meta-volcanic rocks in the Liziyuan Group from Tianshui area, western Qinling orogen[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2006, 30(2): 193-205(in Chinese with English abstract).

[7] 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 地质学报, 2007, 81(6): 773-784.
Pei Xianzhi, Ding Sapin, Zhang Guowei, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating of Neoproterozoic granitoid gneisses in the North margin of West Qinling and geological implication[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(6): 773-784(in Chinese with English abstract).

[8] 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 2007, 37(增刊I): 224-234.
Pei Xianzhi, Ding Sapin, Zhang Guowei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the Baihua basic igneous complex, Tianshui area, West Qinling Mountains[J]. Science in China(Series D), 2007, 37(Supp. I): 224-234(in Chinese).

- [9] 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘早古生代天水—武山构造带及其构造演化[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1547–1564.
Pei Xianzhi, Ding Saping, Li Zuoichen, et al. Early Paleozoic Tianshui–Wushan tectonic zone of the northern margin of West Qinling and its tectonic evolution[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(11): 1547–1564(in Chinese with English abstract).
- [10] 孙民生. 草滩沟群火山岩特征及其形成环境分析[J]. 陕西地质, 1998, 16(1): 42–50.
Sun Minsheng. Analyses on volcanic characteristic and its formation setting of Caotangou Group in Feng County, Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 1998, 16(1): 42–50(in Chinese with English abstract).
- [11] 杨志华, 郭俊锋, 苏生瑞, 等. 秦岭造山带基础地质研究新进展[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 246–256.
Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, et al. New advances in the geological study of the Qinling orogen[J]. Geology in China, 2002, 29(3): 246–256(in Chinese with English abstract).
- [12] 王德耀. 草滩沟群、丹凤岩群火山岩对比及其构造环境分析[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 59–66.
Wang Deyao. Comparison volcanic rock of the Caotangou Group with that of the Danfeng Group and its analysis on structural circumstance[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(4): 59–66(in Chinese with English abstract).
- [13] 丁仁平, 裴先治, 刘会彬, 等. 西秦岭天水地区新阳新元古代花岗质片麻岩的锆石 LA–ICP–MS 定年及其地质意义[J]. 中国地质, 2006, 33(6): 1217–1225.
Ding Saping, Pei Xianzhi, Liu Huibin, et al. LA–ICP–MS zircon U–Pb dating of the Xinyang Neoproterozoic granitoid gneisses in the Tianshui area, western Qinling, and its geological significance[J]. Geology in China, 2006, 33(6): 1217–1225(in Chinese with English abstract).
- [14] 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质学报, 2007, 81(4): 488–501.
Yan Quanren, Wang Zongqi, Chen Junlu, et al. Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou Groups: Implications for the North Qinling orogens belt[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 81(4): 488–501(in Chinese with English abstract).
- [15] 温志亮, 赵仁夫, 王文, 等. 西秦岭熊山沟岩体地球化学及构造环境分析[J]. 中国地质, 2008, 35(4): 618–627.
Wen Zhiliang, Zhao Renfu, Wang Wen, et al. Geochemistry and tectonic environment of the Xiongshangou intrusion in the West Qinling[J]. Geology in China, 2008, 35(4): 618–627(in Chinese with English abstract).
- [16] 朱涛, 董云鹏, 王伟, 等. 草滩沟群火山岩的地球化学特征及其构造环境[J]. 西北地质, 2008, 41(1): 59–66.
Zhu Tao, Dong Yunpeng, Wang Wei, et al. The geochemical characteristics and tectonic setting of volcanics in Caotangou Groups[J]. Northwestern Geology, 2008, 41(1): 59–66(in Chinese with English abstract).
- [17] 何进忠, 姚书振. 新元古代以来甘肃西秦岭造山过程的地球化学证据及其成矿背景[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 637–656.
He Jinzhong, Yao Shuzhen. Geochemical evidence for the orogenic process of West Qinling in Gansu since Neoproterozoic and its metallogenic background[J]. Geology in China, 2011, 38(3): 637–656(in Chinese with English abstract).
- [18] 杨志超, 刘剑, 金勤海. 陕西省凤县红花铺、杨家岭火山岩系中腕足类等动物化石的发现及其意义[J]. 陕西地质, 1984, 2(增刊): 12–16.
Yang Zhichao, Liu Jian, Jin Qin Hai. The discovery and significance of Brachiopoda of volcanic rocks series in Honghuapu and Yangjialing of Feng County, Shaanxi Province[J]. Geology of Shaanxi, 1984, 2(supp.): 12–16(in Chinese with English abstract).
- [19] 王洪亮, 陈亮, 孙勇, 等. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1 Ga 的捕虏锆石[J]. 科学通报, 2007, 52(14): 1685–1693.
Wang Hongliang, Chen Liang, Sun Yong, et al. The nearly 4.1 Ga zircon xenocrysts have been discovered from The volcano rock of Ordovician in the West segment of North Qinling Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14): 1685–1693(in Chinese).
- [20] Frey F A, Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental Petrological data[J]. Journal of Petrology, 1978, 19: 463–513.
- [21] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[C]//Thorpe R S (ed.). Andesites, Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley and Sons, 1982: 525–548.
- [22] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. Chemical Geology, 1977, 20: 325–343.
- [23] Barrett T J, MacLean W H. Chemostratigraphy and hydrothermal alteration in exploration for VHMS deposits in greenstones and younger volcanic rocks [C]// Lentz D R(ed.). Alteration and Alteration Processes Associated with Ore–Forming System. Geological Association of Canada: Short Course Notes, 1994. 11: 433–467.
- [24] Henderson P. Rare Earth Element Geochemistry[M]. New York: Elsevier, 1984: 1–510.
- [25] Wilson M. Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach[M]. Springer, 1989: 1–466.

- [26] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth element: Meteorite studies[C]//Henderson P (ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [27] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [C]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313–345.
- [28] Condie K C. Geochemistry and tectonic setting of Early Proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States[J]. The Journal of Geology, 1986, 94: 845–864.
- [29] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. Longman Publishing Group, 1993: 1–352.
- [30] Condie K C. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust[J]. Lithos, 1999, 46: 95–101.
- [31] 赵振华. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1): 92–103.
Zhao Zhenhua. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 92–103(in Chinese with English abstract).
- [32] Hofmann A W. Chemical differentiation of the earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1988, 90(3): 297–314.
- [33] 孙书勤, 张成江, 黄润秋. 板块汇聚边缘玄武岩大地构造环境的Th、Nb、Zr判别[J]. 地球科学进展, 2006, 21(6): 593–598.
Sun Shuqin, Zhang Chengjiang, Huang Runqiu. The tectonic settings discrimination of the basalts in the convergent margin of plate by Th, Nb and Zr[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(6): 593–598(in Chinese with English abstract).
- [34] Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean– Proterozoic boundary—Identification and significance[J]. Lithos, 1989, 23: 1–18.
- [35] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island– arc basalts: Implications for mantle sources[J]. Chemical Geology, 1980, 30(3): 227–256.
- [36] Pearce J A. A “users guide” to basalt discrimination diagrams[J]. Overseas Geology, 1984, 4: 1–13(in Chinese).
- [37] Keppler H. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction– zone fluids[J]. Nature, 1996, 380: 237–240.
- [38] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的Ba–Th–Nb–La判别图[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 146–157.
Li Shuguang. Ba–Th–Nb–La diagrams used to identify tectonic environments of Ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 1993, 9(2): 146–157(in Chinese with English abstract).
- [39] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra–subduction zone ophiolites[C]//Kokelaar B P, Howells M F(eds.). Marginal Basin Geology: Volcanic and Associates Sedimentary and Tectonic Processes in Modern and Ancient Marginal Basins. Geological Society of London Publication, 1984, 16:77–94.
- [40] McKenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the Lithosphere[J]. Journal of Petrology, 1988, 29(3): 625–679.
- [41] 徐义刚. 拉张环境中的大陆玄武岩浆作用: 性质和动力学过程[C]//郑永飞主编. 化学地球动力学. 北京: 科学出版社, 1999: 119–167.
Xu Yigang. The continent basaltic magmatism in extensional environment: Nature and dynamic process [M]//Zheng Yongfei, (ed.). Chemical Geodynamics. Beijing: Science Press, 1999: 119–167(in Chinese with English abstract).
- [42] Zhi X C, Song Y, Frey F A, et al. Geochemistry of Hannuoba basalts, eastern China: Constraints on the origin of continental alkalic and tholeiitic basalt[J]. Chemical Geology, 1990, 88:1–33.
- [43] Song Y, Frey F A, Zhi X C. Isotopic characteristics of Hannuoba basalts, eastern China: Implications for their petrogenesis and the composition of subcontinental mantle[J]. Chemical Geology, 1990, 88:35–52.
- [44] Jaques A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0–15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1980, 73(3): 287–310.
- [45] Takahashi E, Shimazaki T, Tsuzaki Y, et al. Melting study of a peridotite KLB– 1 to 6.5 Gpa, and the origin of basaltic magmas[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1993, 342: 105–120.
- [46] Hoang N and Flower M. Petrogenesis of Cenozoic basalts from Vietnam: Implication for origins of a “diffuse igneous province”[J]. Journal of Petrology, 1998, 39: 369–395.
- [47] Hooper P R and Hawkesworth C J. Isotopic and geochemical constraints on the origin and evolution of the Columbia River Basalt[J]. Journal of Petrology, 1993, 34(6): 1203–1246.
- [48] Rudnick R L, Gao Shan. Composition of the continental crust [C]// Rudnick R L, Holland H D, Turekian K K (eds.). The Crust: Vol.3. Treatise on Geochemistry. Oxford: Elsevier– Pergamon, 2003: 1–64.
- [49] 李王晔, 李曙光. 西秦岭和东昆仑早古生代岩浆事件的锆石SHRIMP U–Pb定年[C]//2005年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要, 2005: 398–400.
Li Wangye, Li Shuguang. Ziron SHRIMP U– Pb dating of the

- Early Paleozoic magmatism in West Qinling and East Kunlun orogen[C]//National Symposium on Petrology and Geodynamics. 2005: 398-400(in Chinese with English abstract).
- [50] 董云鹏, 张国伟, 杨钊, 等. 西秦岭武山E-MORB型蛇绿岩及相关火山岩地球化学[J]. 中国科学(D辑), 2007(增刊I): 199-208.
Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Yang Zhao, et al. Geochemical characteristics of Western Qinling's E- MORB Ophiolites and associated volcanic rocks[J]. Science in China(Series D), 2007 (Supp.I): 199-208(in Chinese).
- [51] 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-ICP-MS定年及其地质意义[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 536-564.
Wang Hongliang, He Shiping, Chen Junlu, et al. LA-ICP-MS dating of zircon U-Pb and tectonic significance of Honghuapu subduction-related intrusions in the West segment of Northern Qinling Mountains[J]. Geoscience, 2006, 20(4): 536-564(in Chinese with English abstract).
- [52] 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义[J]. 现代地质, 2008, 22(1): 45-52.
Chen Junlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Tangzang quartz diorite pluton in the West segment of North Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. Geoscience, 2008, 22(1): 45-52(in Chinese with English abstract).
- [53] 李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究——对特提斯洋演化的制约[D]. 中国科学技术大学博士学位论文, 2008: 1-124.
Li Wangye. Geochronology and Geochemistry of the Ophiolites and Island-arc-type Igneous Rocks in the Western Qinling Orogen and the Eastern Kunlun Orogen: Implication for the Evolution of the Tethyan Ocean[D]. A Dissertation Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy in University of Science and Technology of China, 2008: 1-124(in Chinese with English abstract).
- [54] 张成立, 周鼎武, 韩松. 陕西商州地区丹凤变质火山岩的地球化学特征[J]. 地质科学, 1994, 29(4): 384-391.
Zhang Chengli, Zhou Dingwu, Han Song. The geochemical characteristics of Danfeng metavolcanic rocks in Shangzhou area, Shaanxi Province[J]. Scientia Geologica Sinica, 1994, 29(4): 384-391(in Chinese with English abstract).
- [55] 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 陕西商县—丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学[J]. 岩石学报, 1995, 11(1): 43-54.
Zhang Qi, Zhang Zongqing, Sun Yong, et al. Trace element and isotopic geochemistry of metabasalts from Dafeng Group (DFG) in Shangxian- Danfeng area, Shaanxi Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11(1): 43-54(in Chinese with English abstract).
- [56] 孙勇, 于在平, 张国伟. 东秦岭蛇绿岩的地球化学[C]//张国伟等编. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1988: 65-74.
Sun Yong, Yu Zaiping, Zhang Guowei. Geochemistry of the Ophiolite in the east Qinling[C]//Zhang Guowei (ed.). The Formation and Evolution of the Qinling Orogenic Belt. Xi'an: Northwest University Publishing House, 1988: 65-74(in Chinese with English abstract).
- [57] 陆松年, 于海峰, 李怀坤, 等. “中央造山带”早古生代缝合带及构造分区概述[J]. 地质通报, 2006, 25(12): 1368-1380.
Lu Songnian, Yu Haifeng, Li Huikun, et al. Early Paleozoic suture zones and tectonic divisions in the “Central China Orogen” [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(12): 1368-1380(in Chinese with English abstract).
- [58] Yan Q R, Chen J L, Wang Z Q, et al. Zircon U- Pb and geochemical analysis for leucocratic intrusive rocks in pillow lavas in the Danfeng Group, north Qinling Mountains, China[J]. Science in China, 2008, 51(2): 249-262.

Geochemical characteristics of the Yinaigou Early Paleozoic Caotangou Group volcanic rocks in Tianshui of West Qinling Mountains and their geological significance

XU Xiao-chun¹, PEI Xian-zhi^{1,2}, LIU Cheng-jun¹, LI Rui-bao^{1,2},
LI Zuo-chen^{1,2}, WEI Bo¹, WANG Yuan-yuan¹, LIU Tu-jie¹,
REN Hou-zhou¹, CHEN Wei-nan¹, CHEN You-xin¹

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

Abstract: There are volcanic rocks of Caotangou Group in Yinaigou, Tianshui. The main rock types of these metamorphic volcanic rocks are metabasalt, metaandesite, metadacite and metarhyolite. These metamorphic volcanic rocks of the study area basically belong to tholeiitic basalt, whose primary magma was derived from an enriched mantle source. The metamorphic volcanic rocks of Caotangou Group are characterized by high content of LILE (Cs, Ba, Th and U) and low content of HFSE (Nb, Ta, P, Ti and Y). The tectonic environment discrimination by trace elements reveals that metamorphic volcanic rocks were formed in an island arc setting above the subduction zone. Combined with the chronological data, the authors hold that the Tianshui-Wushan oceanic basin already existed in Early Paleozoic and began subducting then, leading to the formation of Caotangou Group island arc in Yinaigou, which was similar to things of Danfeng Group in west Qinling from the viewpoints of rock assemblage, forming time and geochemical characteristics. The results obtained by the authors provide evidence for the study of Tianshui-Wushan tectonic zone which served as the west extensional part of the Shangdan paleo-suture zone in Early Paleozoic.

Key words: Caotangou Group; Early Paleozoic; island arc setting; geochemistry; Tianshui area; West Qinling

About the first author: XU Xiao-chun, male, born in 1988, master candidate, majors in structural geology; E-mail: xu6695781@163.com.

About the corresponding author: PEI Xian-zhi, male, born in 1963, professor; E-mail: peixzh@263.net.