



# 北祁连东段红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩地球化学特征及构造环境

何世平<sup>1,2</sup>, 王洪亮<sup>1</sup>, 徐学义<sup>1</sup>, 张宏飞<sup>2</sup>, 任光明<sup>1</sup>

(1. 西安地质矿产研究所 陕西 西安 710054; 2. 中国地质大学 地球科学学院 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 北祁连东段天水-宝鸡地区早古生代火山岩包括红土堡基性熔岩和陈家河中酸性火山岩。地球化学分析结果表明, 红土堡基性熔岩和陈家河中酸性火山岩中所夹基性火山岩的特征相似, 属于拉斑玄武岩, 两者  $\text{TiO}_2$  含量较高(1.50%~2.73%),  $\sum\text{REE}$  分别为  $65.97 \times 10^{-6} \sim 133.46 \times 10^{-6}$  和  $78.04 \times 10^{-6} \sim 175.55 \times 10^{-6}$ , LREE 轻度富集 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N$  分别为 2.00~4.40 和 2.71~4.40],  $\text{Eu}$  异常不明显或略具  $\text{Eu}$  负异常( $\delta\text{Eu}$  分别为 0.85~1.10 和 0.85~0.99), 两者 LILE 明显富集, HFSE(尤其是 Ta、Nb) 强烈亏损,  $\text{Nb}/\text{La}$  较低(0.28~0.43), 显示出与岛弧拉斑玄武岩(IAT)的亲源性; 同时, 基性熔岩的  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  均为正值(+2.22~+4.08), 暗示其源区类似亏损地幔源区,  $\text{Zr}/\text{Nb} = 17.21 \sim 36.33$ ,  $\text{Ce}/\text{Nb} = 5.73 \sim 8.17$ , 又具有 N-MORB 的地球化学特征; 两者的 Sr、Nd、Pb 同位素组成十分相似, 显示出基性熔岩主要来自亏损地幔(DM)和富集地幔端员(EM I 或 EM II)混合源区, 可能有少量地壳物质混染。陈家河中酸性火山岩属于钙碱性系列,  $\sum\text{REE} = 127.51 \times 10^{-6} \sim 276.01 \times 10^{-6}$ , LREE 显著富集 [ $(\text{La}/\text{Yb})_N = 4.79 \sim 13.51$ ], 多数具有弱负  $\text{Eu}$  异常( $\delta\text{Eu} = 0.53 \sim 1.20$ ); 微量元素分配型式类似于岛弧花岗岩, 具明显的 Nb、Ta、Zr、Hf 低谷。综合研究表明, 北祁连最东段陈家河中酸性火山岩形成于岛弧环境, 而其南部的红土堡玄武岩形成于弧间裂谷环境(或初始弧后盆地), 是早古生代晚期北祁连东段岛弧带扩张向弧后盆地演化的早期产物。这些研究成果为秦祁结合部位沟弧盆体系的存在提供了佐证。

**关键词:** 地球化学 构造环境 火山岩 红土堡 陈家河 北祁连东段

中图分类号: P588.14; P59; P542

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2007)04-0295-15

## Geochemical characteristics and tectonic environment of Hongtubu basalts and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt

HE Shi-ping<sup>1,2</sup>, WANG Hong-liang<sup>1</sup>, XU Xue-yi<sup>1</sup>, ZHANG Hong-fei<sup>2</sup> and REN Guang-ming<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CGS, Xi'an 710054, China; 2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Early Paleozoic volcanic rocks in Tianshui and Baoji areas along the eastern segment of North Qilian orogenic belt consists of Hongtubu basaltic lavas and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks. Geochemical analyses show that Hongtubu basaltic lavas are similar to the intercalated basalts in Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in characteristics, both fallen in the tholeiite series with high  $\text{TiO}_2$  (1.50%~2.73%). Their  $\sum\text{REE}$  are  $65.97 \times 10^{-6} \sim 133.46 \times 10^{-6}$  and  $78.04 \times 10^{-6} \sim 175.55 \times 10^{-6}$  respectively, both are slightly en-

收稿日期: 2006-10-31; 修订日期: 2007-01-19

基金项目: 中国地质调查局国土资源大调查资助项目(1212010510416)

作者简介: 何世平(1963-), 男, 副研究员, 主要从事大地构造、地球化学研究, E-mail: xakeyi@163.com.

riched in LREE [ $(La/Yb)_N$  being 2.00~4.40 and 2.71~4.40 respectively], and both have no obvious Eu anomaly or weak Eu negative anomaly ( $\delta Eu$  being 0.85~1.10 and 0.85~0.99 respectively). Basalts from two groups are typically characterized by selected enrichment of LILEs, low abundances of HFSEs relative to N-MORB, and prominent troughs of Nb and Ta, with low Nb/La ratio (0.28~0.43), which indicates the affinity of these volcanic rocks to island arc tholeiite (IAT). In addition,  $\epsilon Nd(t)$  (+2.22~+4.08) values of basalts suggest that their mantle sources are similar to the depleted mantle source.  $Zr/Nb = 17.21 \sim 36.33$  and  $Ce/Nb = 5.73 \sim 8.17$ , implying geochemical characteristics of N-MORB. Sr, Nd and Pb isotopes from Hongtubu basalts are similar to those in Chenjiahe basalts in composition. In the diagrams of  $\epsilon Nd(t)$ -( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) $_t$ , ( $^{207}Pb/^{204}Pb$ ) $_t$ -( $^{206}Pb/^{204}Pb$ ) $_t$ , ( $^{87}Sr/^{86}Sr$ ) $_t$ -( $^{206}Pb/^{204}Pb$ ) $_t$  and  $\epsilon Nd(t)$ -( $^{206}Pb/^{204}Pb$ ) $_t$  for basalts, the data are fallen in the DM, EM I and EM II areas, probably with a little crustal contamination, indicating that the magma of basalts might have had a mixed origin. The intermediate-acid volcanic rocks from Chenjiahe belong to the calc-alkaline series, they have relatively high abundances of REE ( $\sum REE = 127.51 \times 10^{-6} \sim 276.01 \times 10^{-6}$ ), and are significantly enriched in LREE [ $(La/Yb)_N = 4.79 \sim 13.51$ ]. Most intermediate-acid volcanic rocks show weak Eu negative anomaly ( $\delta Eu = 0.53 \sim 1.20$ ). The trace element patterns of Chenjiahe acid volcanic rocks are similar to those of the ocean ridge granite (ORG), with marked troughs of Nb, Ta, Zr and Hf. A synthetic study shows that the Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt were formed in an island-arc setting, whereas the Hongtubu basalts were formed in an intra-arc rift setting (or an initial back-arc basin setting), probably being products of the early spreading evolution of the island-arc system towards the back-arc basin in the eastern segment of North Qilian during late Early Paleozoic. The results obtained provide evidence for the existence of the trench-arc-basin system at the juncture of Qilian and North Qinling orogenic belts.

**Key words:** geochemistry; tectonic environment; volcanic rocks; Hongtubu; Chenjiahe; eastern segment of North Qilian

北祁连造山带中早古生代火山岩广泛分布,前人对其岩石学、地球化学、大地构造归属等方面做了大量卓有成效的研究工作(夏林圻等,1991,1996,1998;赖绍聪等,1995;何世平等,1996,2006;张旗等,1997;张招崇,1997;钱青等,2001;宋忠宝等,2005)。然而,对出露于北祁连最东段甘肃清水县和陕西宝鸡望家坡—常家沟一带早古生代变火山岩形成的构造环境没有统一认识,直接影响到对北秦岭、北祁连两个造山带的相互衔接关系和区域成矿地质背景的认识。

甘肃省天水地区清水县和陕西省宝鸡地区望家坡—常家沟一带变火山岩系位于北秦岭—北祁连结合部位,北祁连造山带一侧(图1),是甘肃省秦安县葫芦河群变火山岩系的东延部分。按照岩石组合类型,变火山岩系可大致分为南、北两部分,南部为红土堡变基性火山岩组合,北部为陈家河变中酸性火山岩组合。前人多认为陈家河变中酸性火山岩形成于岛弧环境(宋志高等,1991a,1991b;张维吉等,1994),而对红土堡变基性火山岩形成的构造环境主

要有两种认识:①产于大陆边缘弧后盆地或弧后裂陷—小洋盆火山作用环境(宋志高等,1991b;张彦杰等,2003,2004;胡波等,2005);②主要形成于陆内裂陷—裂谷环境(樊双虎等,1993;张维吉等,1994)。上述争论的焦点主要是未将区域上早古生代变火山岩系作为一个整体进行研究。

本文在详细野外地质调查的基础上,将红土堡变基性火山岩和陈家河变中酸性火山岩作为一个整体进行了系统的岩石地球化学研究,探讨了火山岩源区,分析了红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩的形成构造环境,提出陈家河中酸性火山岩形成于岛弧环境,而红土堡基性火山岩形成于弧间裂谷(或初始弧后盆地)环境,是早古生代北祁连东段岛弧带扩张向弧后盆地演化早期的产物。

## 1 区域地质概况

本文论及的清水—宝鸡变火山岩系是原“牛头河群”分解出的早古生界葫芦河群的组成部分。“牛头

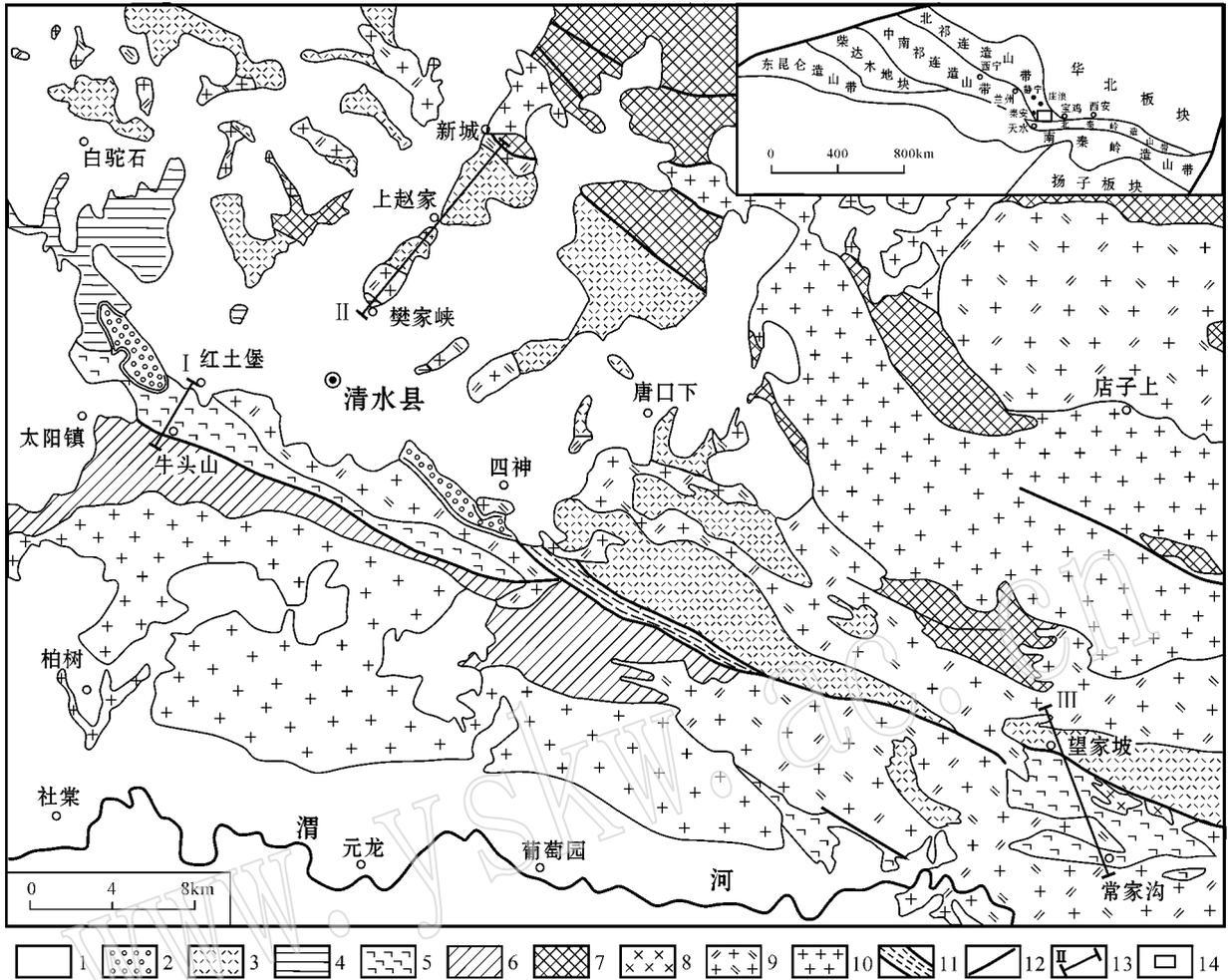


图 1 北祁连造山带东段地质构造略图(据 2004 修编的 1:25 万天水市幅和宝鸡市幅地调资料)

Fig. 1 Sketch geological map showing geology and structure of the eastern segment of the northern Qinling orogenic belt (modified after 1:250 000 Geological Map of Tianshuishi Unit and Baojishi Unit, 2004)

1—新生界 2—白垩系 3—晚奥陶世陈家河中酸性火山岩( $O_3ch^b$ ) 4—晚奥陶世陈家河变质碎屑岩( $O_3ch^a$ ) 5—晚奥陶世红土堡变基性火山岩( $O_3ht$ ) 6—南华—奥陶纪葫芦河群变质碎屑岩(Nh-Ohl) 7—元古古代陇山岩群( $Pt_1l$ ) 8—辉长岩 9—印支期二长花岗岩( $\eta_2^3$ ) 10—加里东期花岗岩( $\gamma_3$ ) 11—韧性剪切带 12—断层 13—剖面位置及编号 14—研究区

1—Cenozoic 2—Cretaceous 3—Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks( $O_3ch^b$ ) 4—Chenjiahe meta-clastic rocks( $O_3ch^a$ ) 5—Hongtubu meta-basaltic volcanic rocks( $O_3ht$ ) 6—Meta-clastic rocks of the Huluhu Group(Nh-Ohl) 7—Longshan Rock Group( $Pt_1l$ ) 8—gabbro 9—Indosinian monzogranite( $\eta_2^3$ ) 10—Caledonian granites( $\gamma_3$ ) 11—ductile shear zone 12—fault 13—section location and its serial number 14—study area

河群”由甘肃西秦岭地质队于 1963 年命名,原指天水以北沿牛头河以及向西分布的变质地层,依岩性对比认为属前寒武纪。宋志高等(1991a)将陕、甘边界的“牛头河群”解体为元古宙陇山岩群深变质岩系、早古生界葫芦河群浅变质岩系和元古宙秦岭群深变质岩 3 部分。其中,葫芦河群包括寒武纪陆源泥质-碎屑沉积建造、奥陶纪火山-沉积建造和志留纪碎屑岩建造。裴先治等(2004)<sup>①</sup>将葫芦河群进一

步解体为 3 部分:中新元古界葫芦河岩群深变质陆源碎屑岩系,早古生代红土堡基性火山岩组,早古生代陈家河群变质碎屑岩、中酸性火山岩。徐学义等(2006)<sup>②</sup>将其时代分别厘定为:南华—奥陶纪葫芦河群变质碎屑岩,晚奥陶世红土堡变基性火山岩,晚奥陶世陈家河变质碎屑岩、中酸性火山岩。

清水-宝鸡早古生代火山岩系分布于渭河断裂北侧,由于黄土高原覆盖和加里东—印支期花岗岩

① 裴先治,丁仁平,李勇等. 2004. 天水市幅 1:25 万区域地质调查(修测)成果报告. 长安大学地质调查研究院,甘肃省地质调查院.

② 徐学义,何世平,王洪亮等. 2006. 西北地区重要成矿带基础地质综合研究成果报告. 西安地质矿产研究所.

侵入,呈北西-南东向带状断续展布,沿清水县牛头河流域的新城—红土堡和宝鸡望家坡—常家沟出露较好,向西北延至秦安县葫芦河上游的李家河—杨家寺以及静宁县、庄浪县一带。红土堡基性火山岩于清水县南部红土堡和宝鸡常家沟出露面积较大,陈家河群中酸性火山岩分布于红土堡基性火山岩北部,于清水县北上赵家—新城和宝鸡望家坡发育较全(图1)。

红土堡基性火山岩为一套低绿片岩相变质基性

火山岩系,主要岩性有:灰绿色块状变玄武岩、杏仁状枕状变玄武岩,少量辉长(绿)岩墙顺层侵入其间,变玄武岩中夹有少量薄层状、透镜状灰色硅质岩。红土堡基性火山岩出露不全(图2),南部被逆冲断层所限,北部为第四系覆盖。基性火山岩整体上构成向斜构造,变玄武岩岩枕被压扁拉长,通过岩枕产出形态判断,基性火山岩系向北倾为正常产状。在宝鸡常家沟一带,红土堡基性火山岩遭受印支期二长花岗岩侵吞,多呈残留体状产出(图3)。

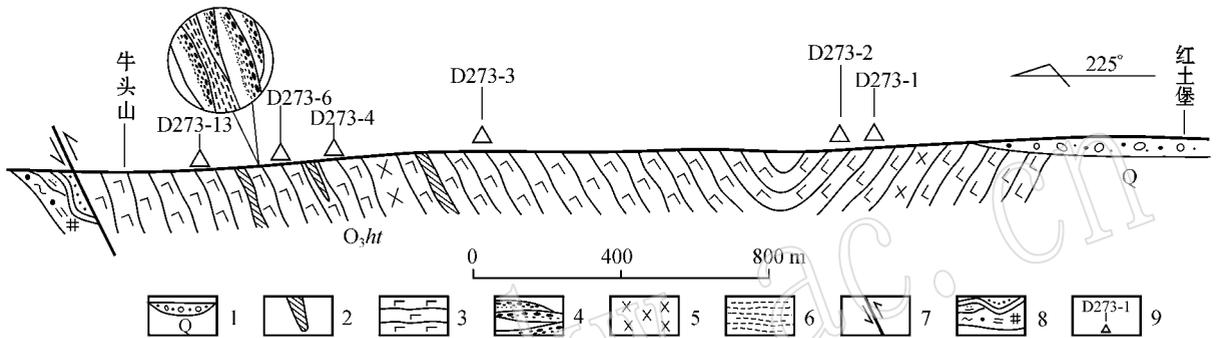


图2 甘肃清水县红土堡基性火山岩地质剖面(I)

Fig. 2 Geological section showing Hongtubu basic volcanic rocks in Qingshui County, Gansu Province (I)

1—第四系 2—硅质岩 3—变玄武岩 4—变杏仁状枕状玄武岩 5—辉长岩 6—凝灰质填隙物 7—逆冲断层 8—断裂破碎带 9—采样位置及编号

1—Quaternary; 2—chert; 3—meta-basalt; 4—meta-amygdaloidal pillow basalt; 5—gabbro; 6—tuff fillings; 7—thrust fault; 8—fault shatter zone; 9—sampling location and its serial number

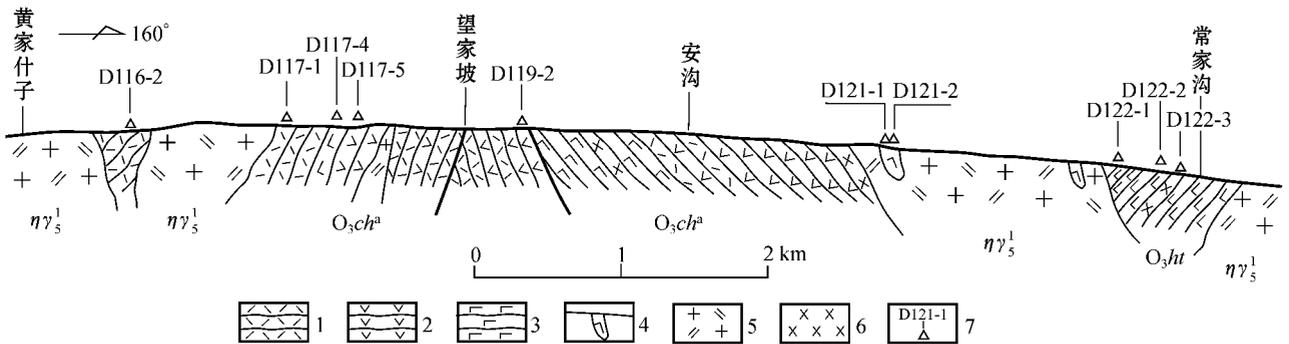


图3 陕西宝鸡望家坡—常家沟地质剖面(III)

Fig. 3 Geological section from Wangjiapo to Changjiagou in Baoji, Shaanxi Province (III)

1—流纹岩 2—安山岩 3—玄武岩 4—玄武岩残留体 5—二长花岗岩 6—辉绿岩 7—采样位置及编号

1—rhyolite; 2—andesite; 3—basalt; 4—relict of basalt; 5—monzogranite; 6—diabase; 7—sampling location and its serial number

陈家河群北以断裂与古元古代陇山岩群( $Pt_1l$ )为邻,南侧与红土堡基性火山岩毗邻,其间为断裂接触,或被后期花岗岩体隔开。陈家河群为一套低绿片岩相变质中酸性火山岩—陆源碎屑岩(图4),根据岩石组合不同进一步划分为两个岩组:碎屑岩组

( $O_3ch^b$ )和中酸性火山岩组( $O_3ch^a$ )。

陈家河群中酸性火山岩主要为:灰—灰褐色变流纹(斑)岩、变英安岩,夹英安质—流纹质熔结角砾岩、集块岩及凝灰岩,局部夹灰绿色变玄武岩及变安山(玢)岩(图3、图4)。火山岩延伸不稳定,且变形较

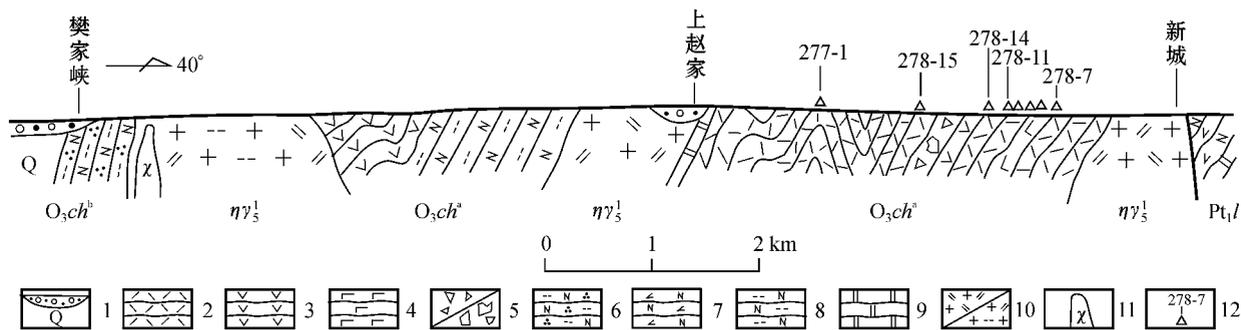


图 4 甘肃清水县樊家峡—新城地质剖面( II )

Fig. 4 Geological section from Fanjiaxia to Xincheng in Qingshui County, Gansu Province( II )

1—第四系 2—变流纹岩 3—变安山岩 4—变玄武岩 5—火山角砾岩/集块岩 6—黑云斜长石英片岩 7—斜长角闪岩 8—黑云斜长变粒岩 9—大理岩 10—二长花岗岩/黑云二长花岗岩 11—云斜煌斑岩脉 12—采样位置及编号

1—Quaternary; 2—meta-rhyolite; 3—meta-andesite; 4—meta-basalt; 5—volcanic breccia/agglomerate; 6—biotite-plagioclase-quartz schist; 7—amphibolite; 8—biotite-plagioclase granulite; 9—marble; 10—monzogranite/biotite monzogranite; 11—biotite-plagioclase lamprophyre dyke; 12—sampling location and its serial number

强,普遍具有糜棱岩化特点,火山角砾变形并拉长具有定向性,显示出拉伸线理特征。此外,局部地带火山岩中长石、石英斑晶发育,尤其是在新城南—上赵家一带;在宝鸡望家坡以南的安沟一带,可见流纹岩与安山岩呈相间韵律状产出;陈隽璐等(2004)<sup>①</sup>于宝鸡望家坡一带发现火山弹,显示出中心式爆发相火山喷发的特点。

## 2 样品处理及分析方法

首先将样品切制薄片,经镜下详细观察,挑选出蚀变弱、较新鲜且具代表性的样品。然后去除样品风化面进行粗碎,剔除样品中的少量杏仁体和碳酸盐脉,再对采自红土堡基性火山岩的 10 件样品和陈家河酸性火山岩的 13 件样品进行系统的全岩主量、微量元素分析。

主元素分析在中国科学院地球化学研究所采用 X 荧光光谱法(XRF)分析(分析者:李荪蓉),稀土元素和微量元素在中国地质大学(北京)采用电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)测定(分析者:黄文辉、苏犁)。分析结果见表 1。

Sr、Nd 及 Pb 同位素在中国科学院地质与地球物理研究所同位素超净实验室采用 VG354 固体同位素质谱计分析(Sr、Nd 同位素分析者:李潮峰、储著银,Pb 同位素分析者:王秀丽)。样品用 HF +

HClO<sub>4</sub> 在 Teflon 容器中低温溶解,采用 AG50W × 8 (H<sup>+</sup>)阳离子交换柱分离出纯净的 Rb 和 Sr,在 VG354 固体同位素质谱计上进行同位素测量。Sr 同位素质量分馏用 <sup>86</sup>Sr/<sup>88</sup>Sr = 0.119 4 校正,国际标样 NBS987 的测试结果为 0.710 254 ± 16 (n = 8, 2σ),参考值为 0.710 240;NBS607 测试结果为 1.200 32 ± 3 (n = 2, 2σ),参考值为 1.200 39 ± 3。Nd 同位素分馏用 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.721 9 校正,国际标样 La Jolla 的测定结果为 0.511 862 ± 7 (n = 6, 2σ),参考值为 0.511 859;BCR-1 测定结果为 0.512 626 ± 9 (n = 2, 2σ),参考值为 0.512 638。Pb 同位素测量时用 HF 酸分解样品,采用 HBr 体系在 AG1 × 8 阴离子交换柱上分离提纯 Pb。Pb 全流程空白值 < 0.2 ng,国际标样 NBS981 (n = 6, 2σ)的 <sup>204</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb、<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb、<sup>208</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 测定结果分别为 0.059 003 ± 84、0.914 49 ± 17、2.166 91 ± 97,分析精度为 0.01% ~ 0.05%。分析结果见表 2、表 3。

## 3 岩浆系列和分类

由于北祁连最东段火山岩均经历了浅变质和蚀变作用的影响,K、Na 和低场强等活泼元素有可能发生了迁移,因此笔者采用不活泼元素进行岩石分类和地球化学特征探讨。

① 陈隽璐,张占武,李海平等,2004. 1:25 万宝鸡市幅区域地质调查成果报告. 陕西省地质调查院.

表 1 北祁连东段红土堡基性火山岩和陈家河酸性火山岩主要元素( $w_B/\%$ )和微量元素( $w_B/10^{-6}$ )含量  
**Table 1 Major( $w_B/\%$ ) and trace elements( $w_B/10^{-6}$ ) composition of Late Cretaceous Hongtubu basalts and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt**

产地	甘肃清水县红土堡南										陕西宝鸡通洞乡望家坡—常家沟										甘肃清水县上赵家—新城										陕西省宝鸡通洞乡黄家什子—望家坡									
	玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩				
岩性	玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩					玄武岩				
样号	D273-1	D273-2	D273-3	D273-4	D273-6	D273-13	D121-1	D121-2	D122-1	D122-2	278-7	278-8	278-9	278-10	278-11	278-14	278-15	277-1	D116-2	D117-1	D117-4	D117-5	D119-2																	
SiO <sub>2</sub>	51.22	49.81	48.16	53.44	50.20	49.81	48.77	45.94	50.44	52.92	71.29	48.67	69.55	51.90	75.54	71.85	71.35	75.59	74.32	77.32	49.76	64.37	56.39																	
TiO <sub>2</sub>	2.40	2.43	2.73	2.13	2.03	1.50	1.70	1.83	2.07	1.60	0.93	2.20	1.00	2.47	0.77	1.20	1.07	0.63	1.10	0.46	1.50	1.63	2.00																	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.65	14.10	15.91	14.65	16.17	13.39	19.39	20.75	16.11	16.38	13.13	15.11	14.14	14.66	12.12	12.38	12.39	9.33	12.29	13.11	18.84	15.56	13.74																	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.01	6.08	5.01	5.10	4.86	4.56	3.25	3.29	2.94	2.75	1.70	7.88	2.00	7.15	0.85	2.05	2.00	1.00	1.57	0.60	5.42	3.00	2.01																	
FeO	6.05	5.82	6.30	6.23	5.95	6.61	3.39	5.10	6.19	5.90	1.06	4.62	1.61	5.05	0.50	1.19	1.13	0.58	0.30	0.19	4.07	2.96	3.52																	
MnO	0.15	0.17	0.11	0.14	0.15	0.15	0.16	0.14	0.25	0.23	0.05	0.28	0.05	0.27	0.03	0.05	0.20	0.01	0.12	0.08	0.42	0.20	0.14																	
MgO	5.10	4.45	4.15	3.70	4.49	5.67	3.13	4.01	4.29	5.37	1.18	5.87	0.95	4.58	0.16	1.41	1.04	0.46	0.66	0.07	5.97	1.91	3.94																	
CaO	8.71	10.09	7.22	5.98	7.69	10.44	13.50	11.10	9.01	7.96	2.08	8.73	2.70	8.05	0.60	1.82	3.32	0.79	0.91	0.39	9.63	2.76	5.49																	
Na <sub>2</sub> O	3.95	3.50	4.75	4.91	4.10	2.82	2.58	3.05	3.22	3.40	6.28	3.51	3.65	2.95	4.21	5.42	4.22	2.74	3.14	3.56	2.49	4.08	2.45																	
K <sub>2</sub> O	0.37	0.25	0.44	0.41	0.45	0.38	0.74	0.76	1.57	0.86	0.12	0.25	2.36	0.59	3.30	1.12	1.67	4.64	4.25	3.02	0.24	1.19	4.11																	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.54	0.70	0.60	0.67	0.68	0.43	0.44	0.57	0.50	0.43	0.50	0.53	0.45	0.90	0.37	0.46	0.39	0.30	0.26	0.30	0.41	0.51	0.83																	
LOI	1.74	2.27	4.21	2.32	2.69	3.91	2.39	2.93	2.97	1.78	1.29	1.90	1.10	1.25	1.01	0.58	0.91	3.30	0.66	0.50	0.60	1.27	4.94																	
Total	99.89	99.67	99.59	99.68	99.46	99.67	99.44	99.47	99.56	99.58	99.61	99.55	99.56	99.82	99.46	99.53	99.69	99.37	99.58	99.60	99.62	99.44	99.56																	
La	9.93	11.10	12.00	14.80	18.40	10.60	10.61	12.75	12.12	10.18	30.60	13.70	25.20	26.60	36.50	33.40	41.20	43.30	29.26	4.88	11.79	36.88	59.58																	
Ce	25.30	27.10	29.20	37.60	42.60	24.50	23.14	26.52	26.90	24.46	63.40	34.00	50.30	63.80	68.50	69.00	84.90	79.20	51.93	12.28	26.52	77.02	111.50																	
Pr	3.57	3.92	4.22	5.51	5.92	3.43	3.23	3.77	3.96	3.60	8.18	4.85	5.98	8.35	7.70	8.61	10.20	8.22	6.13	1.80	3.95	10.77	14.24																	
Nd	16.90	18.50	20.00	26.40	26.50	15.90	14.61	16.54	17.95	16.83	33.30	22.70	22.90	36.40	27.40	33.70	39.50	27.40	21.98	7.71	17.18	46.79	54.73																	
Sm	4.71	5.19	5.55	7.34	7.08	4.40	3.46	3.90	4.39	4.40	7.12	6.03	4.69	8.29	4.93	7.04	8.45	4.62	3.93	3.14	4.08	9.28	10.21																	
Eu	1.64	1.73	1.82	2.38	2.22	1.45	0.92	1.05	1.52	1.11	1.92	2.02	1.16	2.51	0.82	1.53	1.99	0.84	1.43	0.07	1.04	2.48	3.73																	
Gd	5.18	5.97	6.25	8.17	7.70	4.71	2.43	2.84	3.90	3.36	6.73	6.40	4.44	8.62	4.36	6.86	8.17	4.20	3.59	1.98	3.14	6.70	8.40																	
Tb	0.90	1.02	1.10	1.43	1.43	0.86	0.48	0.53	0.68	0.62	1.08	1.10	0.73	1.36	0.69	1.13	1.32	0.62	0.50	0.49	0.60	1.08	1.03																	
Dy	5.84	6.52	6.70	8.88	8.32	5.18	2.78	3.18	4.58	3.99	6.54	6.68	4.70	8.01	4.07	7.02	8.03	3.77	3.11	3.43	3.68	6.71	4.81																	
Ho	1.21	1.37	1.39	1.88	1.80	1.09	0.59	0.65	0.93	0.87	1.39	1.35	1.01	1.63	0.84	1.49	1.66	0.79	0.67	0.67	0.78	1.42	1.00																	
Er	3.56	3.95	4.07	5.49	5.09	3.12	1.54	1.88	2.64	2.53	4.21	3.80	3.14	4.64	2.63	4.42	5.02	2.55	1.96	1.78	2.19	4.04	2.78																	

续表 1  
Continued Table 1

产地	甘肃清水县红土堡南			陕西宝鸡通洞乡望家坡—常家沟			甘肃清水县上赵家—新城			陕西省宝鸡通洞乡黄家什子—望家坡													
	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩	玄武岩											
样号	D273-1	D273-2	D273-3	D273-4	D273-6	D273-13	D121-1	D121-2	D122-1	D122-2	278-7	278-8	278-9	278-10	278-11	278-14	278-15	277-1	D116-2	D117-1	D117-4	D117-5	D119-2
Tm	0.50	0.55	0.57	0.77	0.81	0.46	0.27	0.32	0.45	0.42	0.62	0.53	0.47	0.64	0.42	0.65	0.73	0.40	0.34	0.31	0.38	0.66	0.52
Yb	3.33	3.70	3.76	5.00	4.82	2.80	1.66	1.95	2.95	2.65	4.31	3.41	3.14	4.08	2.97	4.35	5.01	2.79	2.33	1.92	2.36	4.22	2.97
Lu	0.48	0.55	0.56	0.75	0.77	0.44	0.26	0.31	0.45	0.41	0.67	0.52	0.48	0.62	0.47	0.66	0.77	0.45	0.36	0.29	0.37	0.68	0.51
ΣREE	83.05	91.17	97.19	126.40	133.46	78.94	65.97	76.19	83.41	75.44	170.07	107.09	128.34	175.55	162.30	179.86	216.95	179.15	127.51	40.74	78.04	208.73	276.01
(La/Yb) <sub>N</sub>	2.01	2.02	2.15	2.00	2.57	2.55	4.32	4.40	2.77	2.59	4.79	2.71	5.41	4.40	8.29	5.18	5.54	10.46	8.47	1.72	3.37	5.89	13.51
δEu	1.01	0.95	0.94	0.94	0.91	0.97	0.92	0.92	1.10	0.85	0.84	0.99	0.77	0.90	0.53	0.67	0.72	0.57	1.14	0.08	0.85	0.92	1.20
Ba	112.00	85.00	156.00	214.00	141.00	101.00	133.82	151.96	545.35	210.60	390.00	94.00	685.00	87.00	1200.00	506.00	775.00	1200.00	948.72	64.89	63.06	614.41	2566.93
Rb	5.10	7.80	13.90	8.30	13.70	10.40	27.51	26.03	49.64	40.04	3.60	8.00	75.00	15.00	77.00	33.00	42.00	100.00	70.63	214.35	10.00	36.44	147.59
Sr	191.00	291.00	154.00	258.00	172.00	279.00	419.85	524.24	439.66	480.19	226.00	337.00	243.00	400.00	100.00	147.00	216.00	106.00	145.08	27.99	397.02	180.05	469.09
Co	41.00	38.00	41.00	28.00	37.00	46.00	32.93	32.75	37.34	35.65	0.25	42.00	4.00	29.00	2.50	6.00	5.10	3.00	2.98	1.58	41.37	7.16	22.19
Ga	16.40	27.50	19.90	27.60	22.90	15.70	16.25	19.00	18.94	17.83	13.20	29.00	12.70	20.10	14.10	15.60	11.90	10.80	12.31	16.28	18.91	17.72	17.36
V	359.00	400.00	450.00	309.00	397.00	345.00	232.03	261.05	337.59	294.48	26.00	412.00	66.00	346.00	3.58	39.00	36.00	16.00	15.23	0.75	238.32	42.10	129.89
Cr	36.20	29.80	14.50	5.90	47.00	124.00	111.14	101.03	120.11	131.95	8.60	101.00	8.90	20.20	13.50	78.00	4.80	3.50	8.65	11.87	125.49	8.85	228.15
Ni	34.00	48.00	17.00	22.00	27.00	62.00	41.44	40.07	34.68	31.01	8.60	58.00	8.20	23.00	4.70	20.80	3.90	3.40	3.80	4.15	89.37	4.61	29.20
Nb	3.50	4.60	5.10	6.20	6.70	3.00	3.15	3.46	4.05	4.04	8.70	5.40	6.40	5.40	11.40	6.80	8.30	6.30	6.48	35.99	4.04	8.87	36.95
Ta	0.35	0.44	0.17	0.55	0.27	0.14	0.27	0.44	0.39	0.38	0.79	0.65	0.74	0.50	1.09	0.44	0.86	0.81	0.55	3.72	0.38	0.65	2.34
Zr	124.00	121.00	142.00	175.00	184.00	109.00	54.20	68.77	93.54	87.30	236.00	153.00	233.00	156.00	147.00	97.00	262.00	140.00	202.72	108.30	80.84	263.82	256.58
Hf	2.70	2.80	2.10	4.30	3.30	1.60	1.85	2.27	3.01	2.75	6.10	3.40	6.00	3.40	3.40	2.40	6.80	3.30	4.79	3.69	2.57	6.85	7.41
Y	30.00	34.00	39.00	47.00	45.00	26.00	13.73	16.99	23.41	23.74	35.00	33.00	28.00	41.00	28.00	44.00	50.00	24.00	17.16	20.58	18.90	34.79	22.44
Cs	0.16	0.71	0.71	1.27	0.71	0.37	2.24	1.97	1.50	1.86	0.14	0.78	1.40	0.36	0.22	0.82	0.78	2.00	1.04	8.01	1.47	2.31	3.61
Th	1.20	1.20	0.90	2.10	2.30	2.10	1.84	2.36	1.81	1.62	12.00	1.20	10.40	2.60	18.60	10.10	13.70	18.50	11.24	22.60	2.63	6.53	20.65
U	0.31	0.28	0.28	0.38	0.45	0.17	0.57	0.78	0.67	0.53	1.70	0.30	1.00	0.80	1.29	0.77	2.30	1.62	2.53	4.29	0.55	1.61	8.85
Pb	1.70	3.10	0.56	5.00	2.80	2.30	8.39	6.37	7.65	24.99	5.30	4.00	10.30	7.30	25.00	13.00	19.00	13.00	7.50	50.65	14.15	8.18	24.62
Ti	10000	10600	12400	12400	11800	8700	5778	6120	7540	7756	4000	13400	2700	14100	590	3200	3100	1200	2178	405	6034	8092	5286

样品 D273-1、D273-2、D273-3、D273-4、D273-6、D273-13、D121-1、D121-2、D122-1、D122-2 为红土堡基性火山岩系; 样品 278-7、278-8、278-9、278-10、278-11、278-14、278-15、277-1、D116-2、D117-1、D117-4、D117-5、D119-2 为陈家河中酸性火山岩系。

表 2 红土堡和陈家河基性火山岩 Nd、Sr 同位素组成

Table 2 Nd and Sr isotope composition of basalts from Hongtubu and Chenjiahe

样号	Sm	Nd	$\frac{^{147}\text{Sm}}{^{144}\text{Nd}}$	$\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}$	$(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}})_t$	$\epsilon\text{Nd}(0)$	$\epsilon\text{Nd}(t)$	Rb	Sr	$\frac{^{87}\text{Rb}}{^{86}\text{Sr}}$	$\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}}$	$(\frac{^{87}\text{Sr}}{^{86}\text{Sr}})_t$
	$\tau\omega_B/10^{-6}$							$\tau\omega_B/10^{-6}$				
D273-1	4.71	16.90	0.168 5	0.512 670 ± 15	0.512 181	0.62	2.22	5.10	191.00	0.077	0.704 846 ± 14	0.704 358
D273-2	5.19	18.50	0.169 7	0.512 754 ± 13	0.512 261	2.26	3.80	7.80	291.00	0.078	0.704 772 ± 13	0.704 282
D273-3	5.55	20.00	0.167 8	0.512 748 ± 12	0.512 261	2.15	3.79	13.90	154.00	0.261	0.705 272 ± 15	0.703 623
D273-4	7.34	26.40	0.168 1	0.512 764 ± 14	0.512 276	2.46	4.08	8.30	258.00	0.093	0.704 601 ± 14	0.704 013
D273-6	7.08	26.50	0.161 6	0.512 711 ± 12	0.512 242	1.42	3.42	13.70	172.00	0.230	0.705 367 ± 12	0.703 912
D273-13	4.40	15.90	0.167 4	0.512 755 ± 14	0.512 269	2.28	3.95	10.40	279.00	0.108	0.704 876 ± 14	0.704 195
D121-1	3.46	14.61	0.143 2	0.512 625 ± 12	0.512 209	-0.25	2.78	27.51	419.85	0.190	0.706 913 ± 13	0.705 716
D122-1	4.39	17.95	0.147 9	0.512 694 ± 12	0.512 264	1.09	3.86	49.64	439.66	0.327	0.707 653 ± 12	0.705 590
278-8	6.03	22.70	0.160 6	0.512 700 ± 12	0.512 229	1.21	3.27	8.00	337.00	0.069	0.705 278 ± 12	0.704 840
D117-4	4.08	17.18	0.143 6	0.512 636 ± 12	0.512 215	-0.04	3.00	10.00	397.02	0.073	0.705 172 ± 12	0.704 708
D117-5	9.28	46.79	0.119 9	0.512 598 ± 12	0.512 247	-0.78	3.61	36.44	180.05	0.586	0.707 995 ± 13	0.704 263

样品 D273-1~D122-1 的  $t = 443.4$  Ma, 样品 278-8~D117-5 的  $t = 447.4$  Ma, 岩性和产地同表 1。

表 3 红土堡和陈家河基性火山岩 Pb 同位素组成

Table 3 Pb isotope composition of basalts from Hongtubu and Chenjiahe

样号	Pb	Th	U	$(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$	$(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$	$(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$	$\mu$	$(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$	$(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$	$(\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}})_t$
	$\tau\omega_B/10^{-6}$									
D273-1	1.70	1.20	0.31	18.505 5 ± 0.016	15.606 1 ± 0.015	38.575 0 ± 0.016	11.612	17.679	15.560	37.545
D273-2	3.10	1.20	0.28	18.441 5 ± 0.009	15.605 0 ± 0.009	38.510 9 ± 0.009	5.742	18.033	15.582	37.947
D273-3	0.56	0.90	0.28	19.055 6 ± 0.011	15.631 2 ± 0.012	38.934 9 ± 0.012	32.245	16.760	15.503	36.560
D273-4	5.00	2.10	0.38	19.246 4 ± 0.009	15.676 6 ± 0.009	39.482 2 ± 0.011	4.953	18.894	15.657	38.855
D273-6	2.80	2.30	0.45	18.832 2 ± 0.019	15.638 0 ± 0.019	38.908 0 ± 0.018	10.331	18.097	15.597	37.698
D273-13	2.30	2.10	0.17	18.667 5 ± 0.009	15.619 4 ± 0.008	38.870 3 ± 0.008	4.737	18.330	15.601	37.529
D121-1	8.39	1.84	0.57	18.032 7 ± 0.014	15.605 4 ± 0.015	38.371 6 ± 0.016	4.287	17.727	15.588	38.054
D122-1	7.65	1.81	0.67	18.343 6 ± 0.013	15.630 1 ± 0.013	38.443 0 ± 0.013	5.557	17.948	15.608	38.099
278-8	4.00	1.20	0.30	18.527 9 ± 0.009	15.6336 ± 0.008	38.6506 ± 0.009	4.784	18.184	15.614	38.208
D117-4	14.15	2.63	0.55	18.0388 ± 0.011	15.5716 ± 0.010	38.1416 ± 0.010	2.444	17.863	15.562	37.871
D117-5	8.18	6.53	1.61	18.9245 ± 0.038	15.6258 ± 0.036	39.1909 ± 0.038	12.713	18.011	15.575	37.998

样品 D273-1~D122-1 的  $t = 443.4$  Ma, 样品 278-8~D117-5 的  $t = 447.4$  Ma, 岩性和产地同表 1。

在  $\text{SiO}_2 - \text{Nb/Y}$  和  $\text{FeO}/\text{MgO} - \text{SiO}_2$  图解(图 5)中, 红土堡基性火山岩的样品均分布于拉斑系列范围, 岩石类型以玄武岩为主, 陈家河中酸性火山岩样品绝大多数落入钙碱性系列范围, 个别样品落入碱性系列范围, 岩石类型主要为流纹岩和流纹英安岩, 少数为玄武岩、粗面安山岩及碱性流纹岩。

#### 4 主量元素特征

测试结果表明, 红土堡基性火山岩  $\text{SiO}_2$  含量较低, 为 48.16% ~ 53.44%;  $\text{MgO}$  含量为 3.13% ~

5.67%,  $\text{MgO}/\text{FeO}_t$  值为 0.34 ~ 0.64;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量较高, 为 13.39% ~ 20.75%;  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.25% ~ 0.86%;  $\text{Na}_2\text{O}$  含量为 2.82% ~ 4.91%;  $\text{TiO}_2$  含量偏高, 为 1.50% ~ 2.73% (集中于 1.60% ~ 2.13%), 平均为 2.04%, 比 MORB 的  $\text{TiO}_2$  含量(平均 1.5%) 略偏高, 而稍低于板内拉斑玄武岩(平均 2.23%), 类似于 E-MORB 的  $\text{TiO}_2$  含量特征;  $\text{P}_2\text{O}_5$  含量也偏高, 为 0.43% ~ 0.70%。

陈家河火山岩  $\text{SiO}_2$  含量变化较大, 为 48.67% ~ 77.32%, 其中酸性岩为 69.55% ~ 77.32%, 两个中性岩分别为 56.39% 和 64.37%, 玄武岩为 48.67%

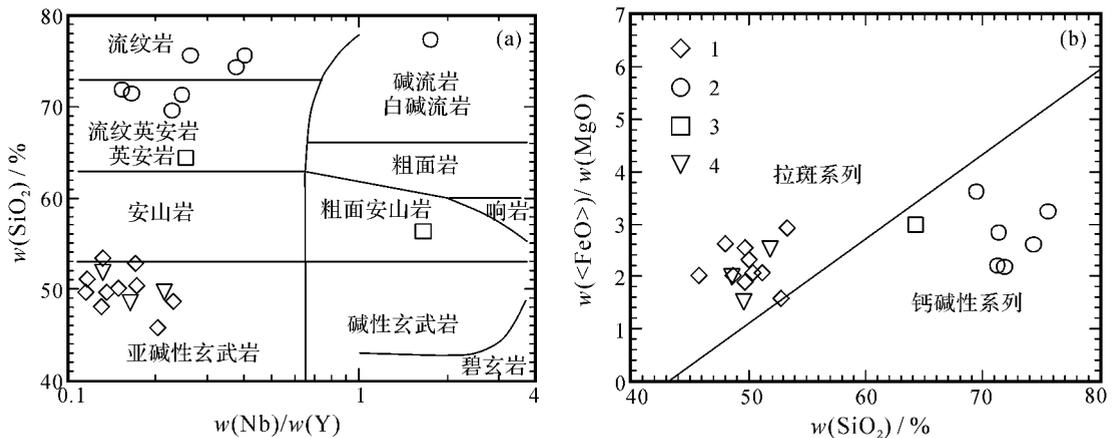


图 5 北祁连东段早古生代火山岩 SiO<sub>2</sub>-Nb/Y (a 据 Winchester 和 Floyd, 1977) 和 FeO/MgO-SiO<sub>2</sub> (b 据 Miyashiro, 1975) 图解

Fig. 5 SiO<sub>2</sub>-Nb/Y (a after Winchester and Floyd, 1977) and FeO/MgO-SiO<sub>2</sub> (b after Miyashiro, 1975) diagrams of Early Paleozoic volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian Mountains

1—红土堡玄武岩 2—陈家河流纹斑岩 3—陈家河安山(玢)岩 4—陈家河玄武岩

1—Hongtubu basalt 2—Chenjahe rhyolite/rhyolitic porphyry 3—Chenjahe andesite/andesitic porphyrite 4—Chenjahe basalt

~ 51.90%。酸性岩的 MgO 含量为 0.07% ~ 1.14%，玄武岩的 MgO 含量为 4.58% ~ 5.97%，MgO/FeO<sub>T</sub> 为 0.40 ~ 0.647。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量变化范围较大，酸性岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 9.33% ~ 14.14%，玄武岩的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 14.66% ~ 18.84%。酸性岩的 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 含量分别为 0.12% ~ 4.64% 和 2.74% ~ 6.28%，玄武岩的 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O 含量分别为 0.24% ~ 0.59% 和 2.49% ~ 3.51%。酸性岩的 TiO<sub>2</sub> 含量为 0.46% ~ 1.20%，而玄武岩的 TiO<sub>2</sub> 含量偏高 (1.50% ~ 2.47%)，高于岛弧玄武岩平均值。酸性岩和玄武岩的 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 含量分别为 0.26% ~ 0.50%、0.41% ~ 0.90%。

### 5 稀土、微量元素特征

红土堡玄武岩和陈家河中酸性火山岩系中所夹玄武岩的稀土元素分配型式彼此相似，稀土元素总量均较高，均为轻稀土元素略微富集的向右缓倾曲线 (图 6)。Eu 异常不明显或略具 Eu 负异常。二者稀土元素总量分别为 65.97 × 10<sup>-6</sup> ~ 133.46 × 10<sup>-6</sup> 和 78.04 × 10<sup>-6</sup> ~ 175.55 × 10<sup>-6</sup> (La/Sm)<sub>N</sub> 分别为 1.27 ~ 2.06 和 1.43 ~ 2.02 (La/Yb)<sub>N</sub> 分别为 2.00 ~ 4.40 和 2.71 ~ 4.40，δEu 分别为 0.85 ~ 1.10 和 0.85 ~ 0.99。

陈家河中酸性火山岩的稀土元素分配型式 (图

6b) 除 1 个样品为向右缓倾曲线 [ΣREE = 40.72 × 10<sup>-6</sup> (La/Yb)<sub>N</sub> = 1.72] 具有明显负 Eu 异常 (δEu = 0.08) 外，其余均为向右陡倾曲线，稀土元素总量高 (ΣREE = 127.51 × 10<sup>-6</sup> ~ 276.01 × 10<sup>-6</sup>)，轻稀土元素富集 [(La/Yb)<sub>N</sub> = 4.79 ~ 13.51]，多数具有弱负 Eu 异常 (δEu = 0.53 ~ 0.92)，暗示岩浆分离结晶程度相对较高，初始岩浆中斜长石分异作用较强。

红土堡玄武岩经原始地幔标准化后不相容元素分配型式为明显向右陡倾的曲线 (图 7a)，表现为强不相容大离子亲石元素 (LILE) 不同程度富集，如 Rb、Ba、Th、U、K 和 Sr 等；其中，红土堡南的样品出现弱的 Sr 负异常，常家沟的样品出现弱的 Sr 正异常。Sr 异常与其 Eu 异常无对应关系，可能暗示它们具有不同于典型岛弧火山岩的重要成因信息，但目前缺乏资料对其进一步约束。相对 N-MORB 较低的高场强元素明显亏损，如 Nb、Ta、Hf、Zr 等，尤其出现明显的 Nb、Ta 低谷，贫 Cr、Ni，整体类似于岛弧火山岩地球化学特征。红土堡玄武岩的 Zr 丰度为 54.2 × 10<sup>-6</sup> ~ 184 × 10<sup>-6</sup>，多数集中于 80 × 10<sup>-6</sup> ~ 142 × 10<sup>-6</sup>，与 E-MORB 近似；Hf 丰度为 1.6 × 10<sup>-6</sup> ~ 3.3 × 10<sup>-6</sup>，与洋中脊玄武岩 (MORB) 近似；Nb 和 Ta 的丰度分别为 3 × 10<sup>-6</sup> ~ 6.7 × 10<sup>-6</sup> 和 0.14 × 10<sup>-6</sup> ~ 0.55 × 10<sup>-6</sup>，多位于 E-MORB 的范围，高于岛弧拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩。红土堡玄武岩的 Zr/Nb 比值为 17.21 ~ 36.33，多集中于

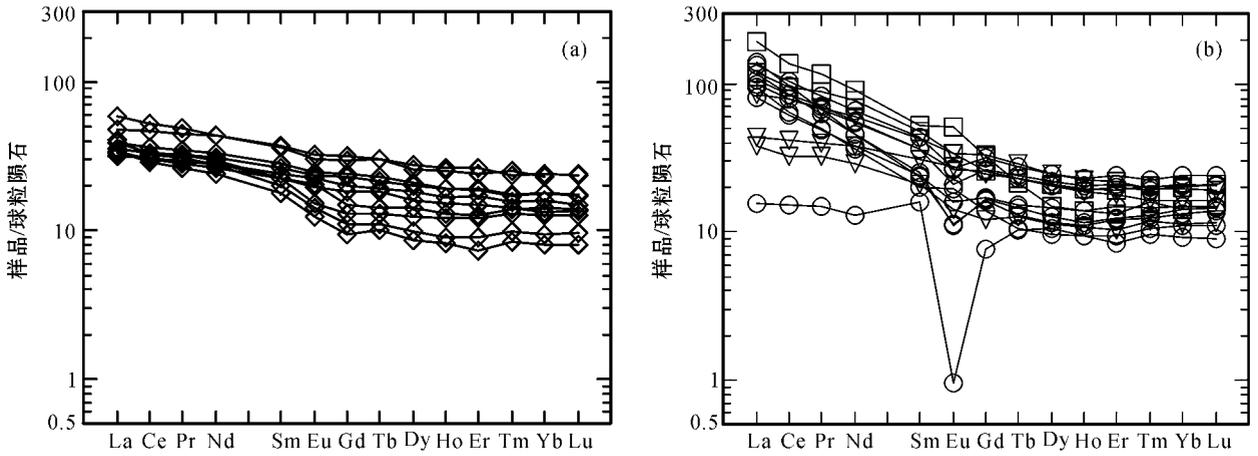


图6 北祁连东段红土堡基性火山岩(a)和陈家河中酸性火山岩(b)稀土元素分配型式(标准化值据 Boynton, 1984; 图例同图5)

Fig. 6 Chondrite-normalized (after Boynton, 1984) REE patterns of Hongtubu basalts (a) and Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks (b) in the eastern segment of North Qilian Mountain (symbols as for Fig. 5)

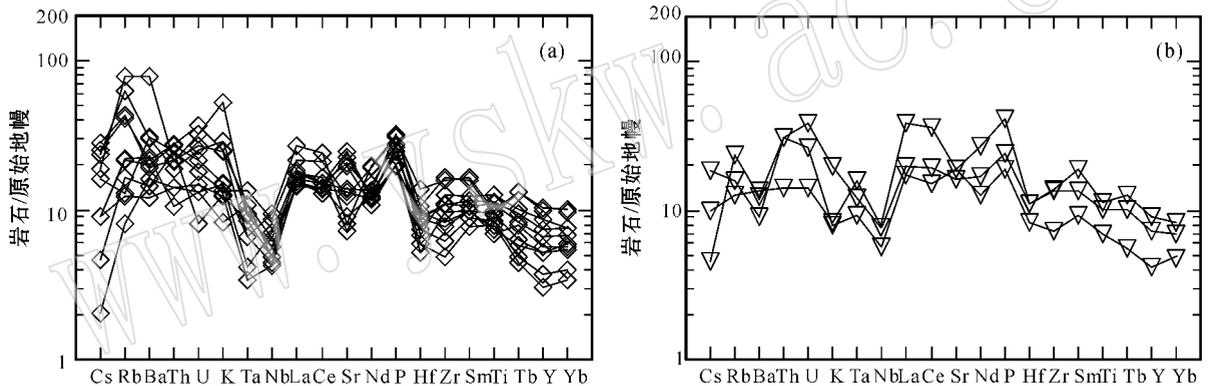


图7 北祁连东段红土堡基性火山岩(a)和陈家河中酸性火山岩系中所夹玄武岩(b)微量元素原始地幔标准化分配型式(标准化值据 Sun 和 McDonough, 1989; 图例同图5)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized (after Sun and McDonough, 1989) trace elements patterns of Hongtubu basalts (a) and Chenjiahe basalts (b) in the eastern segment of North Qilian Mountain (symbols as for Fig. 5)

23~37, 与 N-MORB (N-MORB 的  $Zr/Nb$  略高于 30, E-MORB 和洋岛拉斑玄武岩的  $Zr/Nb$  约为 10, Wilson, 1989) 相近;  $Ce/Nb$  比值为 5.73~8.17, 亦近似于 N-MORB ( $Ce/Nb$  大于 2, Condie, 1989)。  $Nb/La$  比值为 0.28~0.43, 类似岛弧玄武岩 ( $Nb/La < 0.8$ , Condie, 1989) 的特征。

陈家河中酸性火山岩系中所夹玄武岩, 经原始地幔标准化后不相容元素分配型式也为向右倾斜的曲线(图 7b), Rb、Ba、Th、U 和 P 等不相容 LILE 不同程度富集, Ba 富集程度相对于红土堡玄武岩较弱; 明显亏损 Nb、Ta、Hf 和 Zr 等高场强元素, 具有与消减作用有关的弧火山岩地球化学特征。

陈家河中酸性火山岩的不相容元素经原始地幔

标准化后的分配型式为明显向右陡倾曲线, Rb、Ba、Th、U、K 等 LILE 和轻稀土元素明显富集, 而 Nb、Ta、Ti 等高场强元素显著负异常(图 8), 表明这些火山岩具有岛弧火山岩的亲缘性。与典型岛弧火山岩相比, 这些火山岩还显示 Ba 异常不明显和 U 负异常, 可能与后期蚀变作用有关。

## 6 Sr、Nd、Pb 同位素特征

红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩中所夹基性火山岩 Sr、Nd、Pb 同位素组成十分相似(表 2、表 3)。两者  $\epsilon Nd(t)$  值均为正值 (+2.22~+4.08), 显示亏损地幔源区的特征。两者的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  值变

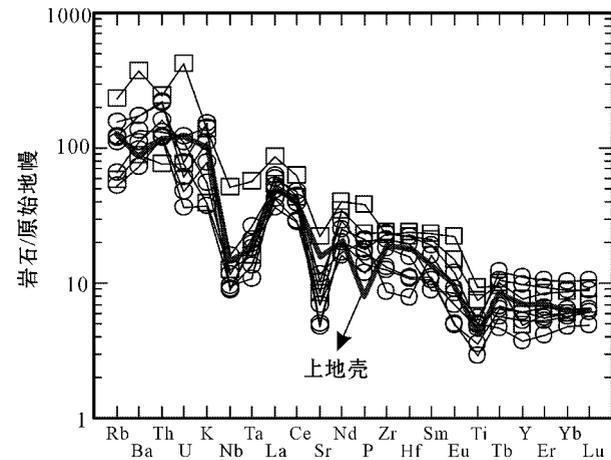


图8 陈家河中酸性火山岩微量元素原始地幔标准化分配型式

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace elements patterns of Chenjiahe intermediate-acid volcanic rocks in the eastern segment of North Qilian orogenic belt  
 标准化值据 Sun 和 McDonough(1989); 上地壳据 Rudnick 和 Gao(2003); 图例同图5  
 primitive mantle data after Sun and McDonough(1989); upper crust after Rudnick and Gao(2003); symbols as for Fig. 5

化较大,介于 0.703 623~0.705 716 之间,可能与少量地壳物质混染或岩石后期蚀变有关。两者的  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$  值相对比较集中,为 0.512 181~0.512 276。在  $\epsilon\text{Nd}(t)$  ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) $_t$  相关图上,红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩中所夹基性火山岩落入 DM 和 EM I 之间(图 9a) ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) $_t$  值介于 0.703 6~0.704 4 之间的样品位于大洋地幔阵列内,随着  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  值的增高向大洋地幔阵列偏离,表现为 DM(亏损地幔)与 EM II 富集端员的混合趋势。此外,基性火山岩  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值还表现出与地幔阵列相似的随  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  值升高而逐渐降低的负相关趋势(图 9a 中局部放大框)。

红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩中所夹基性火山岩的  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$ 、 $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  和  $(^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  值分别为 16.760~18.894、15.503~15.657 和 36.560~38.855。在  $(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  -  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  相关图上,两者均位于北半球参考线之上,落入 MORB 和 LCC(下地壳)的过渡区域(图 9b)。在  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$  -  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  相关图上,两者

基性火山岩呈线性排列,分布于 MORB 和 EM I 区域之间,并略向 EM II 偏移(图 9c)。在  $\epsilon\text{Nd}(t)$  -  $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})_t$  相关图上,两者则集中分布于 EM I、EM II 和 DM 区之间(图 9d),暗示红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩中所夹基性火山岩的岩浆源区为 EM I、EM II 和 DM 混合地幔源区。

Sr、Nd、Pb 同位素组成综合分析表明,红土堡和陈家河基性火山岩的岩浆源区为亏损地幔(DM)和富集地幔端员(EM I 或 EM II)混合源区,可能反映其源区为岩石圈和软流圈相互作用的产物。

## 7 火山岩形成构造环境讨论

张明书等(1974)<sup>①</sup>曾在研究区西部甘肃省秦安县李家河一带陈家河酸性火山岩的薄层灰岩沉积夹层中首次发现 *Favistella aff. calicianiformis* Tcherpina、*Favistella* sp.、*Agetolitella* sp.、*Heliolites*? sp. 和 Billingsseariidae 化石,结合相伴出现的腕足化石 *Agetolitella*, 把该区段含化石层位的酸性火山岩地层厘定为上奥陶统。张维吉等(1994)也在李家河灰岩夹层中采得 *Favistina shifosiensis* Cao.、*Favistina* sp. 和 *Acidalopora* sp. 等化石,据此将陈家河群时代定为晚奥陶世。此外,裴先治等(2004)<sup>②</sup>与李曙光等(未正式刊出)于清水县新城陈家河中酸性火山岩中获得锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为  $447.4 \pm 8.5$  Ma (MSWD=0.35),与本项目测定的红土堡枕状玄武岩年龄  $443.4 \pm 1.7$  Ma (MSWD=1.11) 何世平等,2007)接近。因此,应将红土堡基性火山岩系和陈家河中酸性火山岩系放在一起,探讨二者形成的构造环境。

如上所述,陈家河火山岩为钙碱性系列,主体为中酸性火山岩组合,产出有爆发相火山角砾岩、集块岩和火山弹,并夹少量含化石的碳酸盐岩,反映出海水相对较浅。中酸性火山岩的稀土元素分配模式呈轻稀土元素富集的右倾曲线,微量元素蛛网图呈双隆型曲线,Nb、Ta 和 Ti 出现明显的亏损,在花岗岩构造环境判别图解中,主要落入岛弧花岗岩区(图 10)。前人(宋志高等,1991a,1991b;张维吉等,1994)多认为该火山岩系代表了陆缘火山弧组合,而本文岩石学和地球化学特征表明陈家河中酸性火山

① 张明书,李超群,等. 1974. 甘肃陈家庙铁矿成矿特征的初步研究.

② 裴先治,丁仁平,李勇,等. 2004. 1:25 万天水市幅区域地质调查(修测)成果报告. 长安大学地质调查研究院,甘肃省地质调查院.

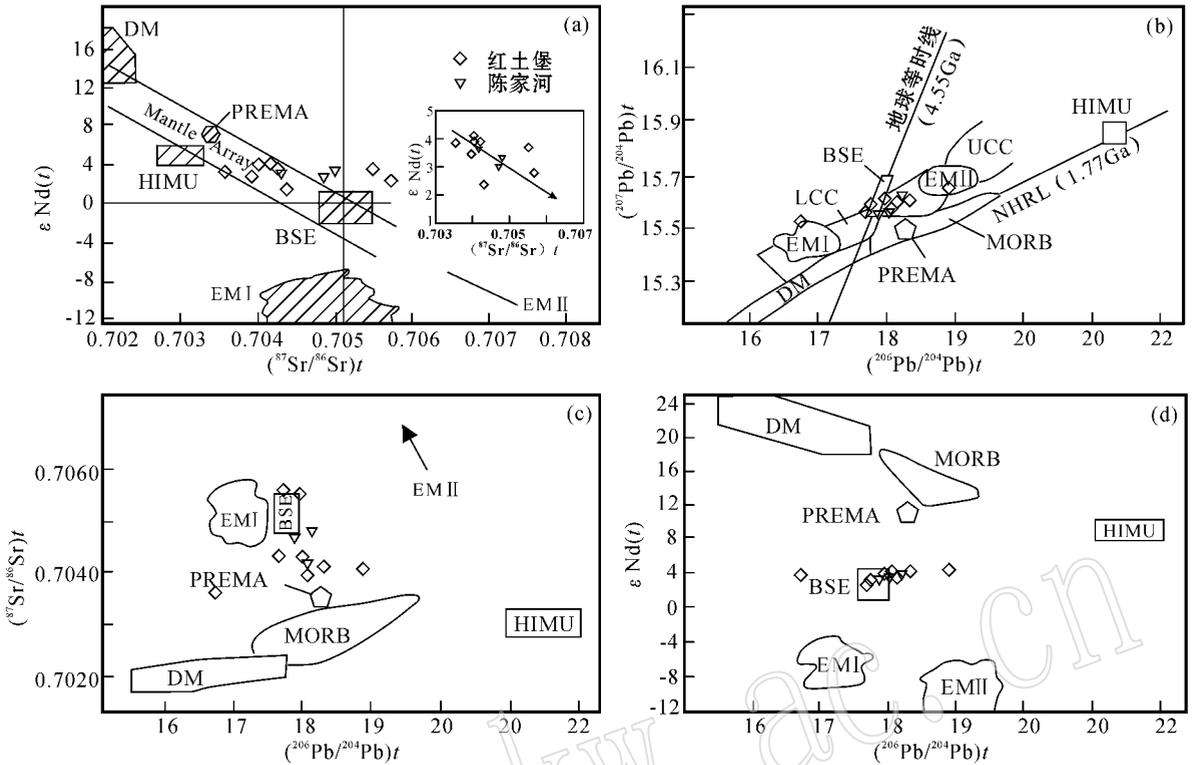


图 9 玄武岩 Sr-Nd-Pb 同位素判别图

Fig. 9 Diagrams of  $\epsilon Nd(t)$  versus  $(^{87}Sr/^{86}Sr)t$  (a),  $(^{207}Pb/^{206}Pb)t$  versus  $(^{206}Pb/^{204}Pb)t$  (b),  $(^{87}Sr/^{86}Sr)t$  versus  $(^{206}Pb/^{204}Pb)t$  (c) and  $\epsilon Nd(t)$  versus  $(^{206}Pb/^{204}Pb)t$  (d) for basalts

a 据 Zindler 和 Har(1986) b 据 Allegre 等(1988) c 和 d 据 Zindler 和 Har(1986) 图例同图 5

Mantle Array—地幔阵列; PREMA—流行地幔; HIMU—高 U-Pb 值地幔源; BSE—主体硅酸盐地球; EM I—I 型富集地幔; EM II—II 型富集地幔; DM—亏损地幔; MORB—洋中脊玄武岩; LCC—下地壳; UCC—上地壳; NHRL—北半球参考线

a after Zindler and Har(1986); b after Allegre *et al.*(1988); c and d after Zindler and Har(1986) symbols as for Fig. 5  
PREMA—prevalent mantle; HIMU—mantle with high U/Pb ratio; BSE—bulk silicate Earth; EM I—enriched mantle I; EM II—enriched mantle II; DM—depleted mantle; MORB—mid-ocean ridge basalt; LCC—lower continental crust; UCC—upper continental crust; NHRL—northern hemisphere reference line

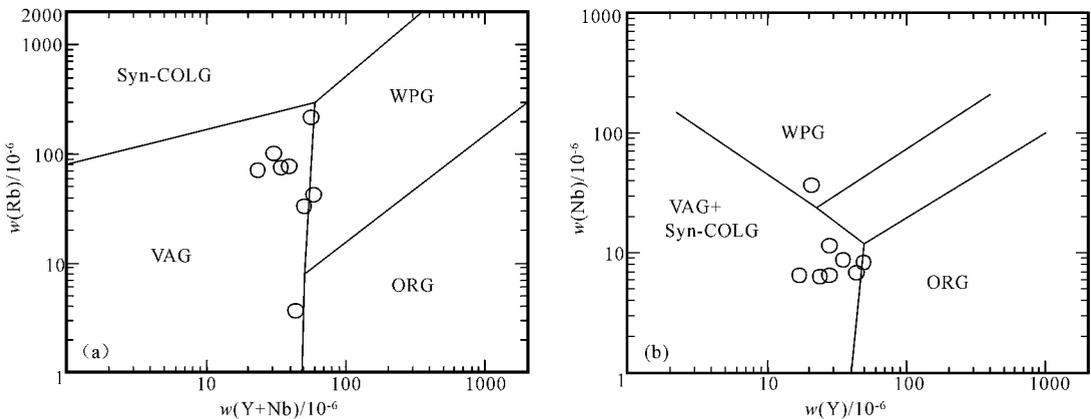


图 10 北祁连东段陈家河酸性火山岩构造环境判别图(据 Pearce 等,1984)

Fig. 10 Tectonic discrimination diagrams for Chenjiahe acid volcanic rocks from the eastern segment of North Qilian orogenic belt (after Pearce *et al.*, 1984)

Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; 图例同图 5

Syn-COLG—syn-collisional granites; VAG—volcanic-arc granites; WPG—intraplate granites; ORG—ocean-ridge granites; symbols as for Fig. 5

岩形成于岛弧环境。

红土堡玄武岩和陈家河中酸性火山岩系中所夹玄武岩,均属于拉斑玄武岩系。红土堡火山岩主体为一套基性熔岩,伴有少量辉长(绿)岩和硅质岩,反映出海水相对较深的局部扩张环境。基性熔岩稀土分配型式为轻稀土略微富集的向右缓倾曲线,  $Eu$  异常不明显或略具  $Eu$  负异常,微量元素分配型式为明显向右陡倾的曲线, LILE 不同程度富集,而 HFSE 相对于 N-MORB 明显亏损,特征的  $Nb$ 、 $Ta$  低谷,  $Nb/La < 0.8$ , 在  $Hf - Th - Ta$  构造环境判别图(图 11a)上主要落入火山弧区(VAB),反映出其具有岛弧玄武岩的地球化学特征。同时,基性熔岩的

$\epsilon Nd(t)$  均为正值(+2.22~+4.08),显示亏损地幔源区的特征; $Zr/Nb$  值略高于 30,  $Ce/Nb > 2$ , 又具有洋中脊玄武岩的地球化学特征;在  $Ti - Zr - Sr$  构造环境判别图上投入 MORB 和岛弧玄武岩二者之间(图 11b),表明其具有洋脊玄武岩和岛弧玄武岩的双重特征。此外,基性熔岩的  $TiO_2$  含量较高(平均为 2.04%)。在  $Zr/Y - Zr$  判别图上投入板内玄武岩区(WPB)的下方,靠近 MORB 区(图 11c),显示出板内裂谷玄武岩的特征。

一般认为弧后盆地的海底扩张本质上不同于正常洋脊区的海底扩张,它起始于岛弧轴下深部软流圈地幔底辟上隆引起的岛弧裂谷化(Karig, 1971;

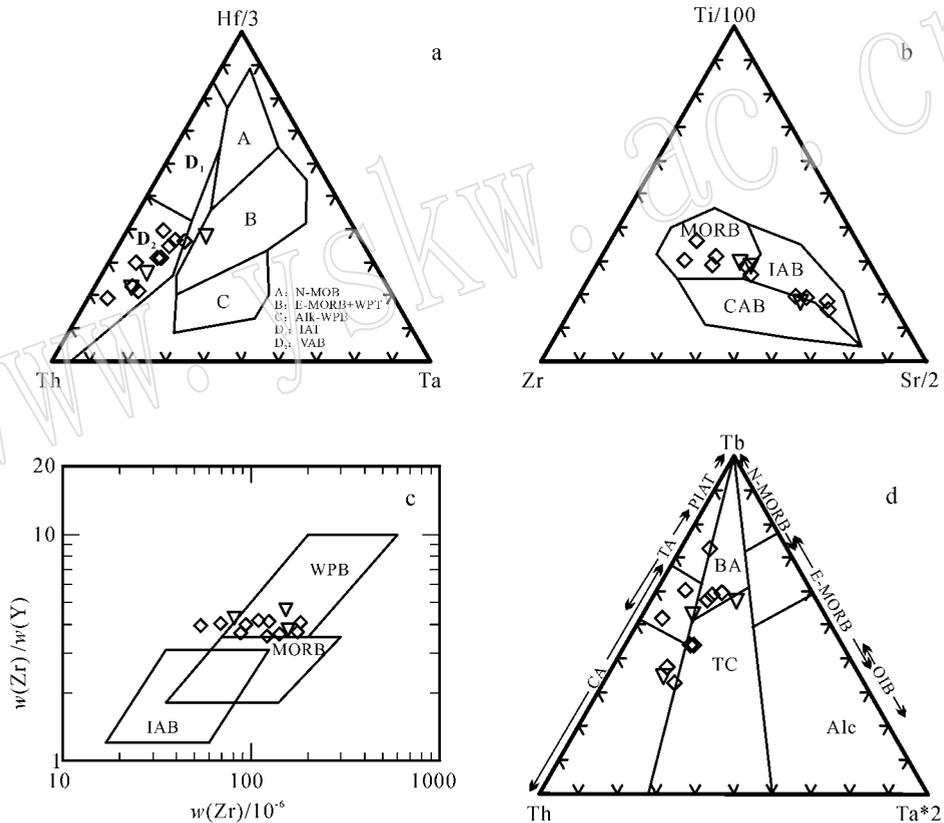


图 11 北祁连东段玄武岩构造环境判别图

Fig. 11 Tectonic discrimination diagrams for basalts from the eastern segment of North Qilian orogenic belt

a 据 Wood(1980) b 和 c 据 Pearce 和 Cann(1973) d 据 Cabanis 和 Thiéblemon(1988) 图例同图 5

N-MORB—正常洋脊玄武岩; E-MORB—富集型洋脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; Alk-WPB—板内碱性玄武岩; VAB—火山弧玄武岩; IAB—岛弧玄武岩; IAT 和 TA—岛弧拉斑玄武岩; CA 和 CAB—岛弧钙碱性玄武岩; BA—弧后盆地玄武岩; TC—大陆拉斑玄武岩; PIAT—初始岛弧拉斑玄武岩; Alc—洋岛和大陆碱性玄武岩

a after Wood(1980); b and c after Pearce & Cann(1973); d after Cabanis & Thiéblemon(1988); symbols as for Fig. 5

N-MORB—N-type mid-ocean ridge basalts; E-MORB—E-type mid-ocean ridge basalts; WPB—intraplate basalts; Alk-WPB—alkaline intraplate basalts; VAB—volcanic-arc basalts; IAB— island-arc basalts; IAT & TA— island-arc tholeiites; CA and CAB— calc-alkaline island-arc basalts; BA— back-arc basin basalts; TC— tholeiitic continental basalts; PIAT— primitive island-arc tholeiites; Alc— ocean island & alkaline continental basalts

Crawford *et al.*, 1981)。这种岛弧裂谷化或劈开了岛弧或发生于岛弧的任意一侧(Taylor *et al.*, 1983)其动力学机制,可能与消减带中俯冲下沉的消减板片对于软流圈产生一种粘性拖曳、引起岛弧后方的地幔楔中发生补充性对流循环有关(Töksöz *et al.*, 1977)。因此,弧后盆地火山岩系往往具有洋脊火山岩系和岛弧火山岩系的双重特点(夏林圻, 2001)。

在 Tb-Th-Ta 环境判别图上(图 11d),多数基性熔岩投入弧后盆地或其附近。因而,一种合理的解释是红土堡玄武岩和陈家河中酸性火山岩系中所夹玄武岩形成于弧间裂谷(或初始弧后盆地),是陈家河岛弧带裂谷化并向弧后盆地演化早期的产物。陈家河变质碎屑岩发育在红土堡变基性火山岩系和陈家河群中酸性火山岩系之间,且成分成熟度较高,可能属于弧间盆地沉积。

综上所述,北祁连最东段陈家河中酸性火山岩形成于晚奥陶世( $447 \pm 8.5$  Ma)的岛弧环境,而其南部的红土堡玄武岩的岩浆源区为亏损地幔和富集地幔混合源区,遭受了少量地壳物质的混染,形成于较陈家河岛弧型中酸性火山岩稍晚的晚奥陶世( $443.4 \pm 1.7$  Ma)弧间裂谷环境(或初始弧后盆地),是早古生代晚期北祁连东段岛弧带扩张向弧后盆地演化早期的产物。

## 8 结论

(1) 陈家河中酸性火山岩以钙碱性系列为主,形成于晚奥陶世的岛弧环境;陈家河变质碎屑岩可能属于弧间盆地沉积。

(2) 红土堡基性火山岩为拉斑玄武岩系列,是在陈家河岛弧带的基础上,在后期局部扩张作用下形成于晚奥陶世末期的弧间裂谷环境(或初始弧后盆地),具有初始弧后盆地的地球化学特征。

(3) Sr、Nd、Pb 同位素特征显示,红土堡变基性火山岩和陈家河群中酸性火山岩所夹基性火山岩的岩浆源区为亏损地幔(DM)和富集地幔端员(EM I 或 EM II)混合源区,可能反映其源区为岩石圈和软流圈相互作用的产物,遭受了少量地壳物质的混染。

(4) 红土堡基性火山岩和陈家河中酸性火山岩地球化学研究表明,加里东中晚期北祁连东段发生了板块俯冲作用,为秦祁结合部位沟弧盆体系的存在提供了佐证。

致谢 在工作和论文撰写过程中得到了冯益民研究员、张二朋研究员、朱宝清研究员和陈隽璐博士的指导与帮助,在此表示诚挚的谢意!

## References

- Allegre C J, Lewin E and Dupre B. 1988. A coherent crust-mantle model for the uranium-thorium-lead isotopic system[J]. *Chem. Geol.*, 70: 211~234.
- Boynnton W V. 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry* [C]. Elsevier, 63~114.
- Condie K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary: identification and significance[J]. *Lithos*, 23: 1~18.
- Crawford A J, Beccalupa L and Serri G. 1981. Tectono-magmatic evolution of the West Philippine-Mariana region and the origin of boninites[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 54: 346~356.
- Fan Shuanghu, Zhang Weiji, Jin Fushi, *et al.* 1993. Meta-basalt of Huluhe Group, Longshan area, Gansu and its tectonic setting[J]. *Journal of Xi'an College of Geology*, 15(4): 80~84 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping and Feng Yimin. 1996. Characteristics and genetic environment of the Laohushan ophiolite, Gansu Province, China[A]. Zhang Qi. *Study on Ophiolites and Geodynamics* [C]. Beijing: Geological Publishing House, 143~145 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Chen Junlu, *et al.* 2006. A LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from meta-acidic volcanics in Baiyin orefield, Gansu Province: New evidence for metallogenic age of Baiyin type massive sulfide deposits[J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 401~411 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al.* 2007. A LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from Hongtubu basic volcanic rocks and its geological significance in the east segment of North Qilian orogenic belt[J]. *Advances in Earth Science*, 22(2): 143~151 (in Chinese with English abstract).
- Hu Bo, Pei Xianzhi, Ding Saping, *et al.* 2005. Geochemical characteristics of the Hongtubao metabasic rocks in the Tianshui area, Gansu, and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 24(3): 258~263 (in Chinese with English abstract).
- Karig D E. 1971. Origin and development of marginal basins in the western Pacific[J]. *J. Geophys. Res.*, 76: 2542~2561.
- Lai Shaocong, Deng Jinfu and Zhao Hailing. 1995. Petrologic restriction on the Ordovician ocean basin scale and spreading rate in Qilian area[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 17(1): 35~39 (in Chinese with English abstract).
- Miyashiro A. 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites[J]. *Journal of Geology*, 83: 249~281.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Qian Qing, Zhang Qi, Sun Xiaomeng, *et al.* 2001. Geochemical features and tectonic setting for basalts and cherts from Laohushan, North Qilian[J]. *Chinese Journal of Geology*, 36(4): 444~453 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract ).
- Rudnick R L and Gao S. 2003. The composition of the continental crust [ A ]. Rudnick R L. The Crust vol. 3, Treatise on Geochemistry [ C ]. Oxford : Elsevier, 1~64.
- Song Zhigao, Zhang Zhitao, Zhang Mei, *et al.* 1991a. The disintegration of " Niutouhe Group " in the Juncture region of Shaanxi-Gansu provinces and its significance in tectonics [ J ]. Bull. Xi 'an Inst. Geol. Min. Res., Chianese Acad. Geol. Sci., (31): 1~13 (in Chinese with English abstract ).
- Song Zhigao, Zhang Zhitao, Zhang Mei, *et al.* 1991b. Study on tectonic relationship between North Qinling Mountains-North Qilian Mountains and Paleozoic volcanic rocks in Tianshui-Baoji area, China [ J ]. Bull. Xi 'an Inst. Geol. Min. Res., Chianese Acad. Geol. Sci., (34): 1~8 (in Chinese with English abstract ).
- Song Zhongbao, Li Zhipei, Ren Youxiang, *et al.* 2005. Chronology and geological significance of Chelugou dacite porphyry in North Qilian Mountain [ J ]. Geological Science and Technology Information, 24 (3): 15~19 (in Chinese with English abstract ).
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implication for mantle composition and processes [ A ]. Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins [ C ]. Geol. Soc. London Spec. Pub., 42: 313~345.
- Taylor B and Karner G D. 1983. On the evolution of marginal basins [ J ]. Rev. Geophys., 21: 1 727~1 741.
- Toksöz M N and Bird P. 1977. Formation and evolution of marginal basins and continental plateaus [ A ]. Talwani M and Pitman III W C. Island Arcs, Deep Sea Trenches and Back-arc Basins [ C ]. Washington D C : Am. Geophys. Union, 379~393.
- Wilson M. 1989. Igneous Petrogenesis [ M ]. London : Unwin Hyman, 1~466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation of products using immobile elements [ J ]. Chemical Geology, 20: 325~343.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, *et al.* 1991. The Marine Volcanic Rocks from Qinling and Qilian Mountains [ M ]. Wuhan China University of Geosciences Press, 1~23 (in Chinese with English abstract ).
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1996. Lithogenesis of Marine Volcanic Rocks from North Qilian Mountain [ M ]. Beijing : Geological Publishing House, 1~153 (in Chinese).
- Xia Linqi, Xia Zuchun and Xu Xueyi. 1998. Early Paleozoic mid-ocean ridge-ocean island and back-arc basin volcanism in the north Qilian mountain [ J ]. Acta Geologica Sinica, 72(4): 301~312 (in Chinese with English abstract ).
- Xia Linqi. 2001. A study of volcanic rocks in orogenic belts [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 20(3): 225~233 (in Chinese with English abstract ).
- Zhang Qi, Sun Xiaomeng and Zhou Dejin. 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, environment of formation and their tectonic significance [ J ]. Advances in Earth Science, 12(4): 366~393 (in Chinese with English abstract ).
- Zhang Weiji, Meng Xianxun, Hu Jianmin, *et al.* 1994. Tectonic Characteristics and Orogenic Process Junction of Qilian and North Qinling orogenic Belt [ M ]. Xi 'an : Northwest University Press, 1~283 (in Chinese).
- Zhang Yanjie, Zhang Hongbin and Liu Bin. 2003. Characteristics and genetics of Huluhu basic rocks in Qin 'an county of Gansu province [ J ]. Acta Geologica Gansu, 12(2): 18~24 (in Chinese with English abstract ).
- Zhang Yanjie, Deng Yaping, Ma Huiping, *et al.* 2004. Geochemistry of Huluhu ophiolite at east Qilian orogenic belt and its tectonic significance [ J ]. Acta Geologica Gansu, 13(2): 14~23 (in Chinese with English abstract ).
- Zindler A and Hart S R. 1986. Chemical geodynamics [ J ]. Ann. Rev. Earth planet. Sci., 14: 493~571.
- Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Yang Jianmin, *et al.* 1997. Tectonic setting of the volcanic rocks of the early Ordovician Yingou Group in North Qilian Mountains [ J ]. Acta Petrologica et Mineralogica, 16(3): 193~201 (in Chinese with English abstract ).

## 附中文参考文献

- 樊双虎, 张维吉, 金符实, 等. 1993. 甘肃陇山地区葫芦河群变质玄武岩及大地构造环境恢复 [ J ]. 西安地质学院院报, 15(4): 80~84.
- 何世平, 冯益民. 1996. 老虎山蛇绿岩的特征及其形成环境 [ A ]. 张旗. 蛇绿岩与地球动力学研究 [ C ]. 北京: 地质出版社, 143~145.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 2006. 甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年——白银式块状硫化物矿床形成时代新证据 [ J ]. 矿床地质, 25(4): 401~411.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 2007. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义 [ J ]. 地球科学进展, 22(2): 143~151.
- 胡波, 裴先治, 丁仁平等. 2005. 甘肃天水地区红土堡变基性岩的地球化学特征及其构造意义 [ J ]. 地质通报, 24(3): 258~263.
- 赖绍聪, 邓晋福, 赵海铃. 1995. 北祁连奥陶纪洋脊扩张速率及古海洋规模的岩石学约束 [ J ]. 矿物岩石, 17(1): 35~39.
- 钱青, 张旗, 孙晓猛, 等. 2001. 北祁连老虎山玄武岩和硅岩的地球化学特征及形成环境 [ J ]. 地质科学, 36(4): 444~453.
- 宋志高, 张治洮, 张蓓, 等. 1991a. 陕、甘边界“牛头河群”的分解及其构造意义 [ J ]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (31): 1~13.
- 宋志高, 贾群之, 张治洮, 等. 1991b. 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, (34): 1~82.
- 宋忠宝, 李智佩, 任有祥, 等. 2005. 北祁连山车路沟英安斑岩的年代学及地质意义 [ J ]. 地质科技情报, 24(3): 15~19.
- 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 1991. 祁连-秦岭山系海相火山岩 [ M ]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~239.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连山海相火山岩岩石成因 [ M ]. 北京: 地质出版社, 1~153.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1998. 北祁连山早古生代洋脊—洋岛和弧后盆地火山作用 [ J ]. 地质科学, 72(4): 301~312.
- 夏林圻. 2001. 造山带火山岩研究 [ J ]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 225~232.
- 张旗, 孙晓猛, 周得进. 1997. 北祁连蛇绿岩特征、形成环境及其构造意义 [ J ]. 地球科学进展, 12(4): 366~393.
- 张维吉, 孟宪恂, 胡建民, 等. 1994. 祁连—北秦岭造山带接合部位构造特征与造山过程 [ M ]. 西安: 西北大学出版社, 1~283.
- 张彦杰, 张宏斌, 刘彬. 2003. 秦安葫芦河基性火山岩特征及其成因 [ J ]. 甘肃地质学报, 12(2): 18~24.
- 张彦杰, 邓亚萍, 马惠萍, 等. 2004. 祁连造山带东段葫芦河蛇绿岩的厘定及其构造意义 [ J ]. 甘肃地质学报, 13(2): 14~23.
- 张招崇, 毛景文, 杨建民, 等. 1997. 北祁连山西段早奥陶世阴沟群火山岩的构造背景 [ J ]. 岩石矿物学杂志, 16(3): 193~201.