

文章编号: 1000-6524(2004)03-0227-09

西秦岭天水地区新生代酸性火山岩地球化学特征及其构造意义

裴先治¹, 丁仁平^{1,2}, 胡波¹, 李勇¹, 郭俊锋¹, 李佐臣¹

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西西安 710054; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 西秦岭天水地区分布有新生代陆相酸性火山岩, 主要由流纹岩、流纹质角砾凝灰熔岩、流纹质熔结(角砾)凝灰岩及少量角砾凝灰岩、火山角砾岩等组成, 具有富硅、富碱、低铝、低钙特征, 属于非造山偏碱性岩石, 类似于大陆裂谷碱性流纹岩。研究表明, 新生代陆相酸性火山岩为地壳岩石部分熔融作用的产物, 形成于陆内拉张构造环境, 与新生代早期渭河断裂带的左行走滑剪切构造作用有关。

关键词: 酸性火山岩; 地球化学; 新生代; 天水地区; 西秦岭

中图分类号: P588.14; P54; P59

文献标识码: A

Geochemical characteristics and tectonic significance of Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area, West Qinling Mountains

PEI Xian_zhi¹, DING Sa_ping^{1,2}, HU Bo¹, LI Yong¹, GUO Jun_feng¹ and LI Zuo_chen¹

(1. Faculty of Earth Sciences and Land Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Gansu Institute of Geological Survey, Lanzhou 730050, China)

Abstract: There occur Cenozoic continental acid volcanic rocks in Tianshui area, West Qinling Mountains. They are composed mainly of rhyolite and partly of rhyolitic breccia tuffaceous lava as well as rhyolitic ignimbrite (breccia) tuff, together with a small amount of breccia tuff and volcanic breccia. These volcanic rocks are geochemically characterized by Si₂O₅ enrichment and Al₂O₃, Ca depletion and belong to nonorogenic alkaline rocks, similar to continental rift type alkaline rhyolite. New evidence shows that Cenozoic acid volcanic rocks were formed by partial melting of crustal rocks in a continental extension setting, related to sinistral strike-slip shearing of Weihe faulted zone in early Cenozoic.

Key words: acid volcanic rocks; geochemistry; Cenozoic; Tianshui area; West Qinling Mountains

西秦岭地区分布有新生代火山岩, 包括礼县-宕昌地区的碱性超镁铁质火山岩和天水北道伯阳-葡萄园地区的陆相酸性火山岩。前者已有较多的研究(喻学惠等, 1998, 2001; 王建等, 2003), 后者尚缺乏研究工作。这些火山岩的特征、成因与大地构造背

景反映了青藏高原东北缘的新生代地壳、岩石圈结构状态与演化特点。本文对分布于天水地区、横跨西秦岭与祁连造山带的新生代陆相酸性火山岩进行了初步的岩石学和地球化学研究, 并以此探讨新生代火山岩的大地构造背景、成因和岩浆作用过程。

收稿日期: 2004-02-05; 修订日期: 2004-04-05

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(40234041); 教育部科学技术研究重点资助项目(104175); 中国地质调查局地质调查资助项目(200013000154); 国土资源部“十五”科技资助项目(20010201)

作者简介: 裴先治(1963-), 男, 博士, 教授, 从事构造地质学和区域地质学研究, E-mail: peixzh@sina.com。

1 区域地质概况

天水地区新生代陆相酸性火山岩(可称为古近纪小河子火山岩)^①分布于天水市北道区以东、渭河断裂北侧的社棠北—伯阳小河子—元龙北—葡萄园一线,出露面积约37 km²,呈近东西向展布,受东西向渭河断裂控制,呈不整合或断层关系覆盖于南侧的古元古代秦岭岩群、北侧的早古生代葫芦河群变质碎屑岩系和印支期坪道花岗岩体之上,火山岩系本身被新近纪甘肃群陆相红色砾岩、砂岩和泥岩不整合覆盖,且岩石新鲜无任何变质和变形(除脆性断层和节理外),因此推测其形成时代为新生代古近纪(图1、图2)。

新生代火山岩为一套陆相酸性火山岩组合,根据其岩石组合特征可划分为两个岩性段。

(1) 第一岩性段:岩石为灰绿—浅灰色流纹岩、流纹质火山角砾凝灰熔岩、流纹质晶屑岩屑熔结角砾凝灰岩、流纹质角砾凝灰熔岩及含斑流纹岩等,分布

稳定,在元龙腰崖沟该岩段底部出现火山角砾岩。

(2) 第二岩性段:岩石为紫红色、暗红色流纹岩、流纹质晶屑岩屑熔结角砾凝灰岩及少量流纹质角砾凝灰熔岩等。

火山岩总体具有喷发相特点,从爆发亚相→喷溢亚相,即火山活动的强度从爆发→比较平静喷溢,具周期性变化,剖面上具有5个喷发韵律,每个韵律从酸性火山碎屑岩→酸性角砾熔岩→酸性熔岩,成层性不明显,未见沉凝灰岩及正常沉积岩夹层。

在火山岩南侧还分布有大致同时代的浅成相侵入体,呈岩脉状侵入于小河子火山岩与南侧变质地层之间(图1)以及北侧其他印支期坪道花岗岩体中。岩性主要为砖红色石英正长斑岩,具明显斑状结构,斑晶主要为红色正长石,少量斜长石,呈长柱状及板状,长0.6~1.0 cm,半自形—自形晶,含量15%~30%,最高达35%~40%。基质为细晶—隐晶质,主要由斜长石、石英和少量钾长石、黑云母组成,属于碱性系列岩石。岩石十分新鲜,块度大,节理不发育。

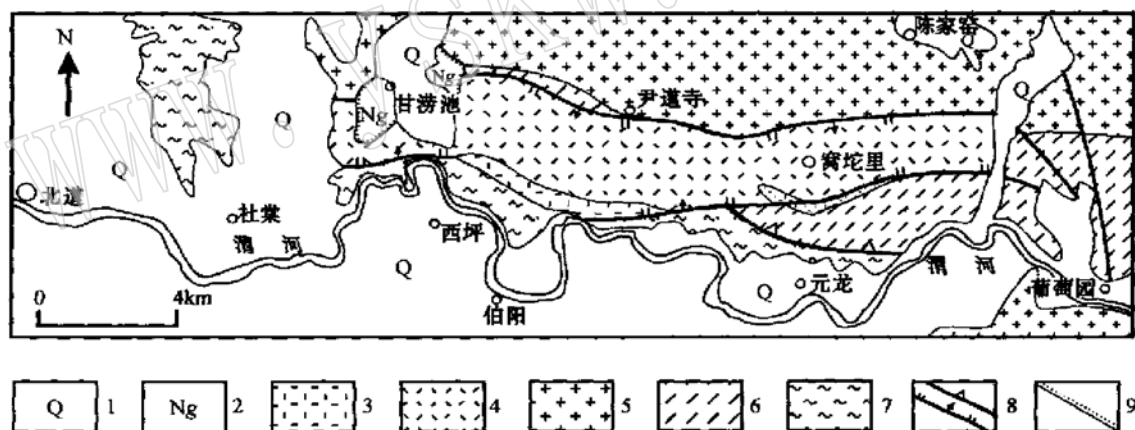


图1 西秦岭天水地区伯阳—元龙一带地质略图

Fig. 1 Geological sketch map of Boyang_Yuanlong area in Tianshui, West Qinling Mountains

- 1—第四系; 2—新近纪甘肃群; 3—石英正长斑岩; 4—古近纪酸性火山岩; 5—印支期黑云母二长花岗岩; 6—早古生代葫芦河群;
7—元古宙秦岭岩群片麻岩; 8—断裂; 9—不整合界线
1—Quaternary; 2—Neogene Gansu Group; 3—quartz syenite; 4—Eogene acid volcanic rocks; 5—Indosinian biotite monzogranite;
6—Early Paleozoic Huluhe Group; 7—gneiss of Proterozoic Qinling Group; 8—fault; 9—unconformity

2 岩石学特征

古近纪小河子火山岩属于酸性火山岩,主要由

火山熔岩、部分角砾凝灰熔岩、熔结(角砾)凝灰岩及少量角砾凝灰岩、火山角砾岩等组成,块状构造,流动构造不明显,故层状特点不清楚,不易分层。

(1) 火山熔岩:主要为流纹岩,呈紫红色、深灰

① 甘肃省地质矿产勘查开发局第一地质队, 1997. 1: 50 000 148E009017(元龙幅)地质图及区域地质调查报告, 1~23.

色,斑状结构,流纹构造,斑晶为肉红色自形-半自形钾长石、灰白色斜长石和浑圆状石英颗粒,粒径为0.2~1.2 mm,个别达0.5~2.0 mm,含量<20%;基质由长英质组成,具流纹构造,霏细、球粒、粒状镶嵌结构。岩石结构、构造清楚,基质脱玻化彻底。

(2) 火山碎屑熔岩: 主要为流纹质角砾凝灰熔岩,出露较多,呈紫红色、深灰色,岩石具有火山碎屑熔岩结构,霏细、球粒结构,流纹构造。由火山碎屑(含围岩碎屑)和熔岩胶结物两部分组成。火山碎屑由岩屑、晶屑、玻屑组成,含量30%~45%,其中晶屑含量<10%,成分有石英、斜长石和钾长石,呈棱角状,有些边缘具弧面,呈港湾状,粒径0.05~1.0 mm;岩屑有流纹质和黑云母石英片岩、花岗质岩屑,含量>20%,粒径0.5~15 mm,多呈棱角状、透镜状;玻屑少量,为流纹质,呈纺锤状、条带状、枝杈状等,有的绕过晶屑。熔岩胶结物主要为流纹质,含量>55%,其脱玻化形成微粒长英质,构成显微镶嵌结构。

(3) 火山碎屑岩: 包括熔结(角砾)凝灰岩、角砾凝灰岩和火山集块岩等。①熔结(角砾)凝灰岩: 主要为流纹质熔结(角砾)凝灰岩,分布局限,岩石具有熔结碎屑结构和霏细、球粒结构,假流纹构造不明显,由火山碎屑(含围岩碎屑)和熔岩胶结物两部分组成。火山碎屑由岩屑、晶屑组成,含量>90%,碎屑成分及结构特点与前述火山碎屑熔岩基本相同。熔岩胶结物主要为流纹质熔岩,含量<10%,脱玻化明显,其中长石、石英微粒构成显微镶嵌结构。②角砾凝灰岩: 主要为流纹质角砾凝灰岩,具火山碎屑(角砾凝灰)结构,层状构造不明显。岩石主要由岩屑、晶屑和火山角砾3部分组成: 晶屑有石英、长石等,含量>30%,粒径0.05~0.8 mm,多具尖棱角和弧面状边缘;岩屑为35%~40%,多为流纹质,粒径0.1~2 mm,呈棱角状、透镜状;角砾成分主要为花岗质,次为长英质片岩,含量为25%~30%,粒径2~15 mm,多呈棱角状和透镜状。岩屑和角砾与长英质晶屑为同一来源。③火山角砾岩分布较少,仅见于元龙北腰崖沟一带。岩石为灰色-暗灰色流纹质火山角砾岩,角砾占50%~60%,大小为5 cm×7 cm×10 cm~30 cm×20 cm×10 cm,不规则状或棱角状,胶结物为同成分的火山凝灰岩。

火山岩中的角砾分选较差,其形状多为半棱角状和半浑圆状,部分为棱角状。大小不一,且变化较大,一般为0.5 cm×0.5 cm~5 cm×5 cm,部分粒径

为10~15 cm,个别可达20~90 cm。角砾成分主要是下伏地层和岩体,包括与元古宙秦岭岩群有关的长英质片岩、片麻岩、糜棱岩/糜棱片麻岩、花岗质片麻岩,与早古生代葫芦河群有关的长英质片岩、变质砂岩、变质粉砂岩和火山岩以及灰白色花岗闪长岩、肉红色二长花岗岩、脉石英和流纹斑岩等。

小河子火山岩由各种不同粒径的火山碎屑岩、火山碎屑熔岩及火山熔岩组成,结合剖面结构及其分布特征综合分析,属于典型的爆发-溢流相火山岩。从火山岩的展布特征看,属于裂隙式喷发,严格受渭河断裂控制。该火山岩总的特点是喷发时间短,属于多期韵律性的裂隙式爆发-溢流相的陆内断陷盆地中火山活动产物。

3 地球化学特征

选择小河子火山岩中的新鲜酸性熔岩样品进行分析测试,分析结果列于表1。

3.1 常量元素特征

火山岩具有高的SiO₂(70.40%~75.56%)酸性单峰分布特点,TiO₂含量较低(0.09%~0.27%),K₂O(4.04%~5.59%)和全碱(K₂O+N₂O)(7.75%~9.73%)含量较高,且K₂O>N₂O。铝饱和和指数A/CNK[Al₂O₃/(CaO+N₂O+K₂O)(摩尔比)]为0.97~1.02(平均为0.99),明显<1.15,为准铝质-过铝质岩石。在TAS岩石分类图解(Le Maitre *et al.*, 1989)(图2a)上,火山岩均为亚碱性流纹质火山岩,在AFM图解上为钙碱性系列火山岩(图略)。在Zr/TiO₂-Nb/Y火山岩分类图解上具有粗面安山岩-钠长碱流岩特点(Winchester and Floyd, 1977)(图2b),在Al₂O₃-FeO_T图解上为钠闪碱流质流纹岩(图2c)(Le Maitre *et al.*, 1989),在K₂O-SiO₂钾质分类图解上属于高钾流纹质火山岩(图2d)(Le Maitre *et al.*, 1989)。上述特征表明小河子酸性火山岩具有碱性/钾质火山岩特征。

小河子流纹岩的岩石化学特征具有富硅、富碱、低铝、低钙特征,与王德滋等(2002)提出的中国东南沿海晚中生代的S型酸性火山岩和A型/碱性流纹岩以及澳大利亚东部第三纪碱性流纹岩、巴布亚新几内亚新生代碱性流纹岩岩石化学成分相当一致。

3.2 稀土元素特征

火山岩稀土元素总量较高(180.39×10⁻⁶~301.85×10⁻⁶),轻重稀土元素分馏较强,LREE/HREE

表1 西秦岭天水地区新生代酸性火山岩的常量元素($w_B/\%$)、稀土元素和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 1 Major element ($w_B/\%$), REE and trace element ($w_B/10^{-6}$) compositions of acid volcanic rocks in Tianshui area

样品号	5777/1	5777/2	5777/4	5777/5	5777/6	5777/8	5777/9
SiO ₂	75.56	74.78	74.82	74.62	74.92	70.40	72.37
TiO ₂	0.12	0.12	0.14	0.09	0.13	0.27	0.20
Al ₂ O ₃	12.11	12.10	12.55	12.66	12.39	13.03	12.98
Fe ₂ O ₃	0.43	0.33	0.14	0.23	0.29	0.44	0.00
FeO	1.87	3.00	2.10	2.17	2.08	2.85	2.67
CaO	0.55	0.68	0.99	0.84	0.83	1.61	1.12
MgO	0.28	0.16	0.32	0.19	0.24	1.13	0.50
MnO	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09	0.07
K ₂ O	4.17	4.21	4.12	4.24	4.08	4.03	5.59
Na ₂ O	3.83	3.83	3.96	3.98	3.97	3.72	3.14
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.02	0.05	0.06	0.10	0.05
LOI	0.37	0.00	0.34	0.26	0.02	1.56	0.88
总量	99.41	99.33	99.58	99.41	99.09	99.23	99.57
A/CNK	1.02	1.00	0.98	1.00	0.99	0.97	0.98
Cr	20.0	7.3	18.7	8.3	11.7	42.5	15.8
Ni	1.00	4.85	6.80	1.00	4.55	14.5	3.75
Co	1.00	4.10	1.26	1.00	5.60	6.40	3.70
Rb	242	248	257	268	239	192	271
Cs	4.45	4.70	4.95	4.65	3.75	3.75	5.25
Sr	30.1	31.6	54.2	24.0	32.4	139.0	146.0
Ba	54.0	56.9	94.4	64.5	84.4	317.0	301.0
V	5.97	4.83	9.63	5.62	7.42	34.70	18.40
Sc	6.41	6.07	6.65	6.53	6.90	10.20	8.08
Nb	37.8	27.6	25.3	44.9	33.9	21.4	25.0
Ta	3.70	1.29	2.00	2.68	3.18	1.80	1.44
Zr	109.0	60.1	56.5	170.0	140.0	73.4	158.0
Hf	4.91	2.11	1.99	7.10	4.94	2.85	5.65
U	9.67	11.20	8.00	13.00	11.30	7.00	7.40
Th	31.8	34.6	33.4	35.4	33.1	25.7	29.5
Y	29.1	28.2	28.2	31.5	27.8	22.8	23.1
La	37.9	37.5	41.9	37.0	46.7	64.6	80.4
Ce	69.5	69.0	75.6	67.9	80.6	105.0	128.0
Pr	9.04	8.61	9.14	7.96	9.25	11.30	12.90
Nd	32.8	33.2	34.8	31.9	36.2	42.1	48.2
Sm	8.38	7.78	8.62	8.58	8.95	9.14	9.85
Eu	0.18	0.31	0.25	0.22	0.25	0.50	0.44
Gd	6.65	6.92	6.82	7.23	6.88	6.29	6.77
Tb	1.20	1.19	1.08	1.23	1.17	0.96	1.19
Dy	7.23	7.39	7.17	7.83	7.06	6.11	6.33
Ho	1.33	1.39	1.29	1.49	1.25	1.05	1.16
Er	3.74	3.67	3.63	4.07	3.51	3.08	3.06
Tm	0.55	0.58	0.56	0.62	0.54	0.50	0.43
Yb	3.48	3.57	3.22	3.84	3.36	2.79	2.74
Lu	0.46	0.52	0.45	0.52	0.46	0.40	0.38
LREE/HREE	6.40	6.20	7.03	5.72	7.51	10.98	12.68
REE	182.44	181.63	194.53	180.39	206.18	253.82	301.85
(La/Yb) _N	7.17	6.92	8.57	6.35	9.16	15.25	19.33
(Ce/Yb) _N	5.10	4.93	5.99	4.51	6.12	9.60	11.92
Eu*	0.07	0.13	0.10	0.08	0.09	0.19	0.16
Rb/Ba	4.48	4.36	2.72	4.16	2.83	0.61	0.90
Rb/Sr	8.04	7.85	4.74	11.17	7.38	1.38	1.86
Ba/Sr	1.79	1.80	1.74	2.69	2.60	2.28	2.06
Zr/Ba	0.70	0.66	0.44	0.57	0.55	0.20	0.27
Nb/Ta	10.22	21.40	12.65	16.75	10.66	11.89	17.36

由宜昌地质矿产研究所岩矿测试分析研究室测试, 常量元素采用常规湿法分析, 稀土和微量元素用 ICP-AES 法分析。

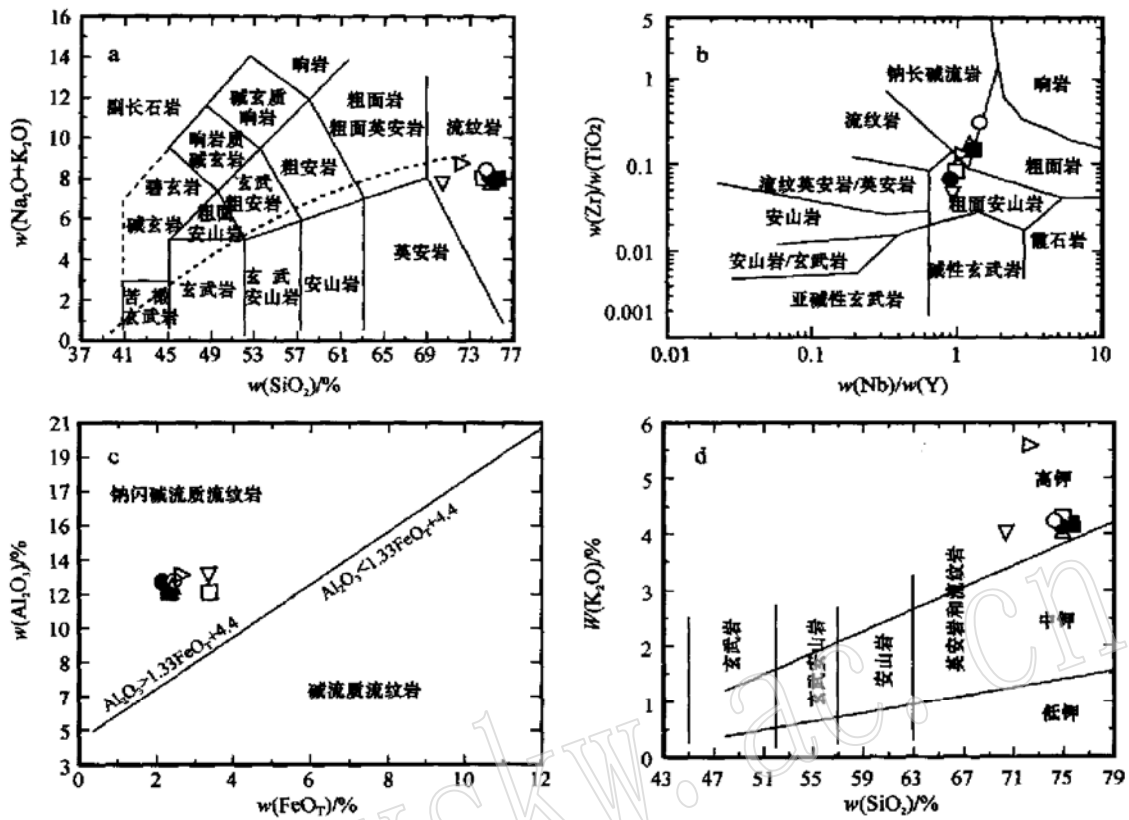


图 2 天水地区新生代火山岩的 TAS(a) - Zr/TiO₂- Nb/Y(b) - Al₂O₃- FeO_T(c) 和 K₂O- SiO₂(d) 分类图解
 Fig. 2 TAS (a), Zr/TiO₂- Nb/Y(b), Al₂O₃- FeO_T(c) and K₂O- SiO₂(d) diagram of Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area

a c d 据 Le Maitre 等(1989); b 据 Winchester and Floyd(1977)

a c and d after Le Maitre *et al.* (1989); b after Winchester and Floyd (1977)

= 5.72~ 10.98, (La/Yb)_N = 6.35~ 19.33。稀土元素分布曲线呈明显的 LREE 富集的右倾型, 并具有显著的负铕异常, δEu = 0.08~ 0.19 (图 3), 与大陆裂谷型流纹岩的稀土元素分布曲线基本一致 (Wilson, 1989; Macdonald *et al.*, 1987)。La/Sm-La 图 (图 4a) 上则显示出相关性较好的部分熔融演化趋势。这些特征表明, 天水地区新生代酸性火山岩稀土元素丰度以及特征值的较大变化, 与岩浆分离结晶作用无关, 而可能是部分熔融程度不同和源区成分差异造成的: SiO₂ 与重要氧化物相关性差的原因是源区的成分差异起了重要作用, 反映了源区成分不均一的特点。

3.3 微量元素特征

在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 5a) 上, 火山岩富集 Rb、Th、Nd, 亏损 Ba、Sr、P、Ti、Nb, 具有

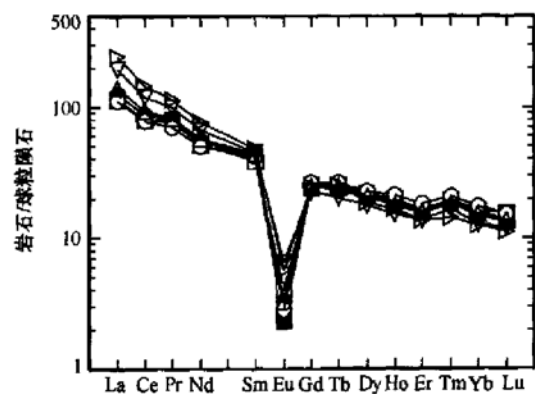


图 3 天水地区新生代火山岩稀土元素球粒隕石标准化配分型式

Fig. 3 Chondrite-normalized REE patterns of Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area

标准化数据据 Boynton(1984), 转引自 Rollison(1993)
 data of chondrite from Boynton(1984), after Rollison(1993)

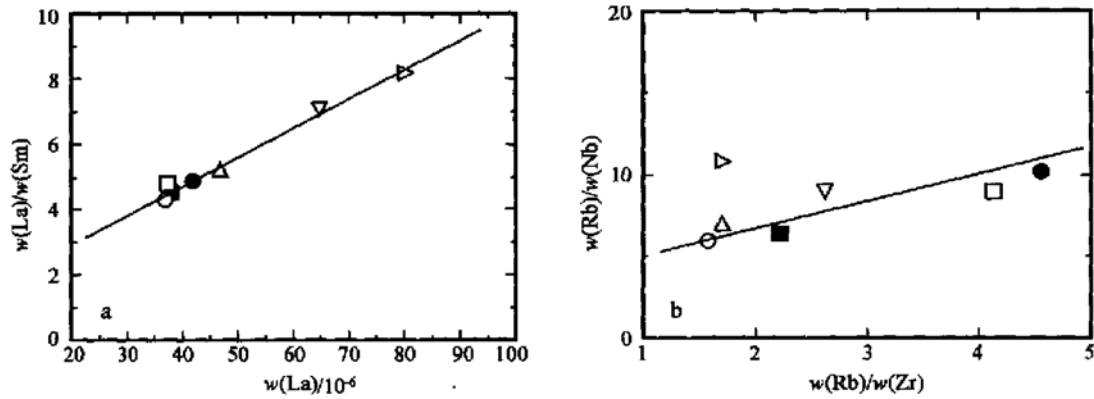


图4 天水地区新生代火山岩的 La/Sm- La(a) 和 Rb/Nb- Rb/Zr(b) 关系图解

Fig. 4 La/Sm- La(a) and Rb/Nb- Rb/Zr(b) diagram of Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area

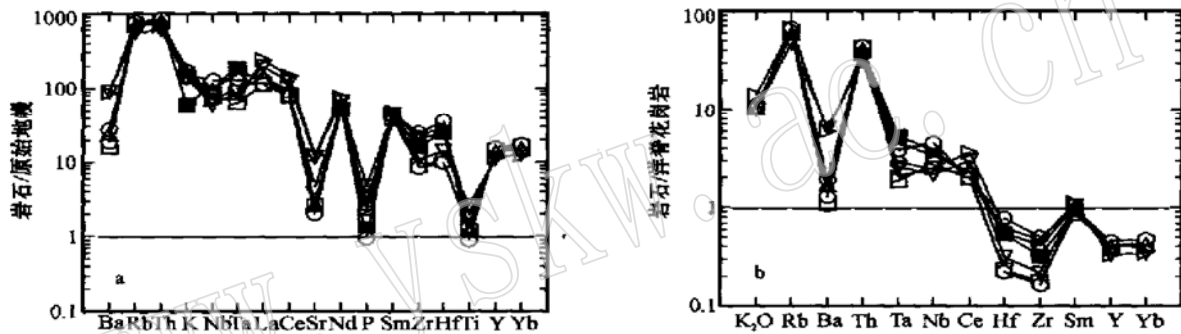


图5 天水地区新生代火山岩微量元素原始地幔标准化(a)和洋脊花岗岩标准化(b)蛛网图

Fig. 5 Spider diagram of primitive mantle-normalized and ORG-normalized trace elements in Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area

原始地幔标准化数据据 McDonough 等(1992), 转引自 Rollison(1993); 洋脊花岗岩标准化数据据 Pearce(1984)
data of primitive mantle from McDonough *et al.* (1992), after Rollison (1993); data of ORG after Pearce *et al.* (1984)

高 Rb/Sr (4.74~ 11.17, 其中 2 个样品为 1.38~ 1.86) Rb/Ba (2.72~ 4.48, 其中 2 个样品为 0.61~ 0.90) Nb/Ta (10.22~ 21.40) 值和低 Zr/Ba (0.44~ 0.70, 其中 2 个样品为 0.20~ 0.27) Ba/Sr (1.74~ 2.69) 值。其 Rb/Sr 值除 2 个样品外明显高于 A 型花岗岩 (3.52) (Whalen *et al.*, 1987), Nb/Y 值 (0.90~ 1.43) 也基本高于碱性岩 (Nb/Y > 1)。上述特征显示天水地区酸性火山岩具有非造山偏碱性岩石的地球化学特征。在图 5 中, 所有流纹岩均具有一致的分布曲线, 类似于大陆裂谷碱流岩 (Wilson, 1989; Macdonald *et al.*, 1987)。在微量元素洋脊花岗岩 (ORG) 标准化图 (图 5b) 上, 与 Pearce (1984) 划分的板内型花岗岩非常类似, 以明显亏损 Ba 和富集 K、Rb、Th、Ta 为特征 (Pearce *et al.*, 1984)。在微量元素分子比值 Rb/Nb- Rb/Zr 图 (图 4b) 中, 数据点表现

为直线型的批式部分熔融演化趋势 (马昌前等, 1994), 显示本区火山岩的形成与地壳物质的部分熔融作用有关。

3.4 Pb 同位素特征

小河子酸性火山岩的铅同位素组成如表 3。2 个样品的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 18.948~ 18.989, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值为 15.606~ 15.658, $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 值为 38.864~ 39.010, 比值均较高。 μ 值介于 9.42~ 9.52 之间, 低于陆壳演化线的 9.74。在 Zartman 和 Haines 的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素构造演化模式图 (Zartman and Haines, 1988) 中, 火山岩铅同位素组成均位于造山带-上地壳铅演化曲线上 (图 6), 表明火山岩浆铅的来源主要以造山带上地壳物质为主。

表3 天水地区新生代酸性火山岩的铅同位素组成

Table 3 Pb isotopic compositions of Cenozoic acid volcanic rocks from Tianshui area, Western Qinling Mountains

样品编号	岩性	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	μ 值
5777/2	流纹岩	18.989	0.003	15.658	0.004	39.010	0.012	9.52
5777/6	流纹岩	18.948	0.002	15.604	0.001	38.864	0.004	9.42

由国土资源部宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放研究实验室分析测试。

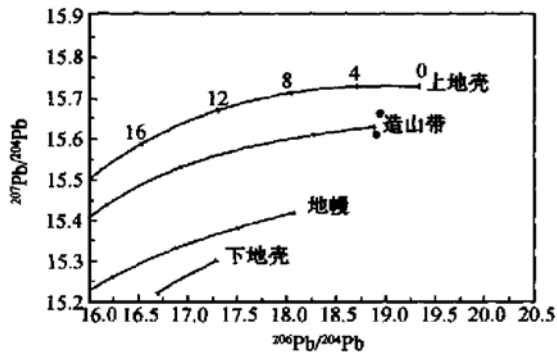


图6 天水地区新生代火山岩铅同位素演化模式图

Fig. 6 Pb isotopic evolutionary diagram of Cenozoic acid volcanic rocks in Tianshui area

据 Zarman and Haines (1988), 曲线上的数据为距今的时间(100 Ma)

after Zarman and Haines (1988), the data indicates time

4 讨论与结论

4.1 岩石成因

有关流纹岩的成因目前主要有4种认识: ①由玄武质岩浆或其他岩浆经分离结晶作用形成; ②由地壳岩石经深熔作用形成; ③岩浆混合与分离结晶共同作用形成; ④岩浆房内的热重力扩散分异作用形成(Henderson, 1984; 周文戈等, 1998; 钱青等, 1999; 王焰等, 2000; 路凤香等, 2002)。显然, 研究区主要以酸性火山岩喷发为主, 缺乏相应的同时代、同环境的玄武质火山岩, 没有构成双峰式火山岩组合, 因此该流纹岩不可能是由玄武质岩浆经分离结晶作用形成的。由于该流纹岩具有高硅、富碱、低铝、低钙的地球化学特征, 因此它也不大可能是由较基性的岩浆同化长英质围岩或与酸性岩浆混合形成的。对于这种高硅酸性火山岩来说, 通过简单的分离结晶作用使其富集到这种程度也是不大可能的。由于流纹岩富集 Rb、Th 和 LREE, 亏损 Ba、Sr、P、Ti、Nb, 具有高 Rb/Sr、Rb/Ba 和 Nb/Ta 值, 强烈的 Eu 负异常, 较高的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ 值, 较低的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(0.512289~0.512326)(另文

报道), 因此很可能是陆壳物质经部分熔融作用形成的。从野外地质观察来看, 研究区酸性火山岩中特别是流纹质火山角砾凝灰熔岩中常常包含有众多大小不等、形态各异的陆壳岩石角砾或包体, 说明了火山岩与地壳物质或研究区造山带基底变质岩系具有明显的亲缘关系。火山岩亏损地幔模式年龄 t_{DM} 为 1471~1668 Ma, 而这些基底变质岩系大部分是富含云母类和长石的片麻岩、片岩等副变质的沉积岩(即元古宙秦岭岩群和早古生代葫芦河群), 少量的早期变质基性火山岩和变形变质的闪长岩及花岗岩类等, 构成了酸性火山岩的源岩。而形成这种类型的酸性火山岩要求源岩中含有丰富的残余长石, 长石和云母类的完全熔尽提供了酸性火山岩中的高钾含量(Henderson, 1984)。在 La/Sm-La 图上, 火山岩显示出相关性较好的部分熔融演化趋势(图 4a), 在 Rb/Nb-Rb/Zr 中(图 4b)表现为直线型的批次部分熔融演化趋势(马昌前等, 1994), 也表明本区流纹质火山岩是部分熔融作用形成的。酸性火山岩的铅同位素组成均位于造山带、上地壳铅演化曲线上(图 6), 表明火山岩浆中铅的来源主要是以造山带上地壳物质为主, 进一步证实酸性火山岩岩浆来源于组成造山带上地壳的基底变质岩系。

4.2 构造环境

根据以下证据, 可以认为本区陆相酸性火山岩主要形成于碰撞后陆内拉张构造环境:

已有研究表明, 至少在印支期华北板块与扬子板块沿中央造山系就已经发生碰撞造山作用, 完成中国大陆的主体拼合过程(周文戈等, 1998; 张国伟等, 2001)。三叠纪之后的中生代中国大陆主体进入陆内构造演化阶段。但研究区西秦岭北部在中生代阶段处于青藏高原东北缘, 明显受到新特提斯阶段喜马拉雅碰撞造山的远程效应影响。西秦岭地区在晚燕山期曾发生广泛的板内伸展构造作用, 形成广布分散的白垩纪-一新近纪伸展断陷红色陆相盆地, 并且常常是沿走滑断裂呈斜列式分布的剪切-拉分盆地(张国伟等, 2001)。因此, 本区火山岩形成的

构造环境应是伸展为主的构造体制。

周民都等(2000)根据人工地震测深剖面资料,研究了青藏高原东北缘的地壳结构和莫霍面形态。研究区上地壳厚 11.4~14.0 km,层速度 5.94~6.08 km/s;中地壳厚 12.2~14.0 km,层速度 6.12~6.30 km/s;下地壳厚 17.0~21.0 km,层速度 6.59~6.90 km/s;莫霍面埋深为 43~49 km,以 NW 向西秦岭北缘断裂带(即武山—天水之间的渭河断裂)为界的北侧地壳较厚,并在中地壳顶部出现有一低速体,层内速度为 5.85 km/s,断裂带南北两侧莫霍面有 1.5 km 左右的断距(周民都等,2000)。这些均显示该断裂带南北两侧地壳结构有差异,且断裂切割深度大,可达莫霍面。另外,地表构造显示该断裂带在新生代具有强烈的左行走滑活动特征。因此,推测研究区沿渭河断裂带分布的陆相酸性火山岩的形成与断裂带的陆内左行走滑活动密切相关,而火山岩的岩浆来源深度根据周民都等(2000)的人工地震测深剖面资料推测大致在 11~14 km 范围内,岩浆物质来源于组成造山带上地壳的基底变质岩系。

根据本区火山岩分布的局限性(仅在天水北道以东的渭河断裂北侧的社棠北—伯阳小河子—元龙

北—葡萄园一线)和裂隙式喷发特征,结合火山盆地展布方向呈近东西向,与 NW 向渭河断裂带有 25°~30°左右的夹角的地质事实分析(图 1),火山岩的喷发活动应该是与渭河断裂带大规模左性走滑剪切活动所诱导的局部近 EW-NEE 向左行剪切-拉张/拉张应力场有关。因此,造成渭河断裂带的活动及其局部构造应力场作用对陆相火山岩的分布具有明显的控制作用,是陆内断裂带剪切活动造成局部地壳加热并从周围地壳中萃取挥发组分,引起挥发分诱发地壳岩石的部分熔融作用,形成高硅的酸性火山岩岩浆,并沿局部剪切-拉张活动形成的次级断裂上升并喷出地表。

研究区火山岩的常量元素、微量元素和稀土元素地球化学特征与大陆裂谷碱性流纹岩类似,显示的构造环境也应为陆内拉张构造环境(周文戈等,1998;钱青等,1999;王焰等,2000;王德滋等,2002),在 Pearce 等(1984)提出的花岗岩类构造环境 Rb-Y+ Nb 和 Nb-Y 判别图上(Pearce *et al.*, 1984)(图 7),本区酸性火山岩均落在板内型花岗岩区,但较靠近同碰撞型花岗岩区和火山弧型花岗岩区,一方面显示火山岩与造山带物质的亲缘性,另一方面显示火山岩形成于板内拉张构造环境。

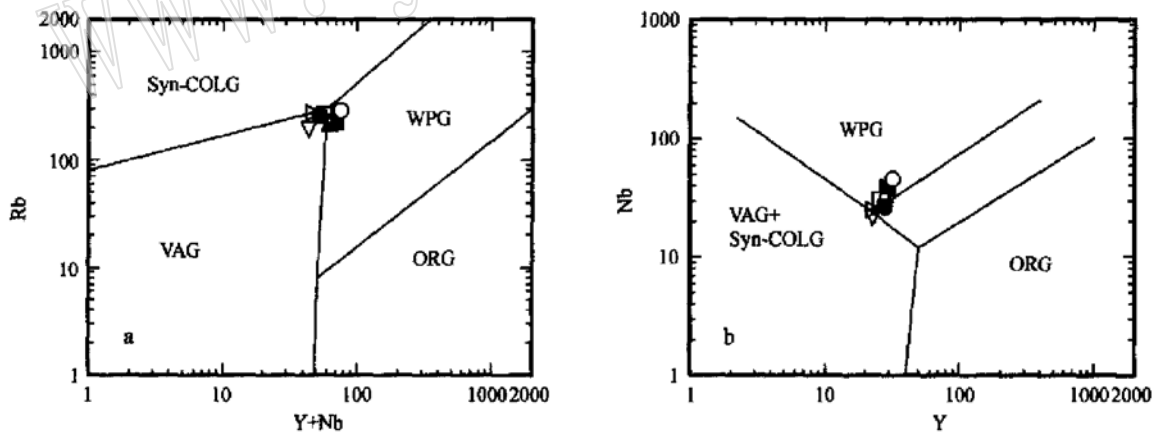


图 7 天水地区新生代火山岩 Rb- Y+ Nb(a) 和 Nb- Y(b) 图解(据 Pearce 等, 1984)

Fig. 7 Rb- Y+ Nb (a) and Nb- Y (b) diagram of Cenozoic acid volcanic rocks from Tianshui area (after Pearce *et al.*, 1984)

Syn_COLG—同碰撞型花岗岩; VAG—火山弧型花岗岩; WPG—板内型花岗岩; ORG—洋脊型花岗岩

Syn_COLG—syn collision granite; VAG—volcanic arc granite; WPG—within plate granite; ORG—ocean ridge granite

综上所述,天水地区新生代小河子陆相酸性火山岩具有大陆裂谷碱性流纹岩的地球化学特征,火山岩的形成与地壳岩石的部分熔融作用密切相关,形成于与渭河断裂带左行走滑活动相关的陆内拉张构造环境。

Reference

- Henderson P. 1984. Rare Earth Element Geochemistry [M]. New York: Elsevier Science Publications B. V.
Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of

- Terms, Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks [M]. Blackwell Scientific Publications.
- Lu Fengxiang and Sang Longkang. 2002. Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 96~ 104 (in Chinese).
- Macdonald R, Davies G R, Bliss C M, *et al.* 1987. Geochemistry of high-silica peralkaline rhyolites, Naivasha, Kenya Rift Valley [J]. *Journal of Petrology*, 29(6): 979~ 1008.
- Ma Changqian, Yang Kunguang, Tang Zhonghua, *et al.* 1994. Magma Dynamics of Granitoids: Theory, Method and a Case Study of the Eastern Hubei Granitoids [M]. Wuhan: Press of China University of Geosciences, 1~ 260 (in Chinese).
- Pearce J A, Harris N B M 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 and Wang Yan. 1999. Geochemical characteristics of bimodal volcanic suites from different tectonic settings [J]. *Geology - Geochemistry*, 27(4): 29~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Date: Evaluation, Presentation, Interpretation [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1~ 352.
- Wang Dezi and Zhou Xinmin. 2002. The Origin of Late Mesozoic Granitic Volcanic-Intrusive Complexes and Crustal Evolution in East-southern China [M]. Beijing: Sciences Press, 1~ 295 (in Chinese).
- Wang Jian and Li Jianping. 2003. Geochemical characteristics and geological implications of the Cenozoic kamafugites from Lixian County, West Qinling [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 11~ 19 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Qian Qing, Liu Liang, *et al.* 2000. Major geochemical characteristics of bimodal volcanic rocks in different geochemical environments [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 169~ 173 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 95: 407~ 419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis: A Global Tectonic Approach* [M]. London: Unwin Hyman, 1~ 466.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 20: 325~ 343.
- Yu Xuehui and Zhang Chunfu. 1998. Sr, Nd isotope and trace elements geochemical features of the Cenozoic volcanic rocks from west Qinling, Gansu Province [J]. *Earth Science Frontiers*, 5(4): 319~ 328 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xuehui, Mo Xuanxue, Flower M, *et al.* 2001. Cenozoic kamafugite volcanism and tectonic meaning in west Qinling area, Gansu Province [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 366~ 377 (in Chinese with English abstract).
- Zartman R E and Haines S M. 1988. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—a case for bidirectional transport [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 52(5): 1327~ 1339.
- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, *et al.* 2001. Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 1~ 855 (in Chinese).
- Zhou Mindu, Lu Taiyi, Zhang Yuansheng, *et al.* 2000. The geological structure background and the crustal structure in the Northeastern margin of the Qinhai-Tibetan plateau [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 22(6): 645~ 653 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Wenge, Zhang Benren, Yang Weiran, *et al.* 1998. Geochemical characteristics and tectonic implications of post-collisional intermediate and acid volcanic rocks from Qinling-Dabie Orogen [J]. *Geochimica*, 27(6): 537~ 548 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 路凤香, 桑隆康. 2002. 岩石学 [M]. 北京: 地质出版社, 96~ 104.
- 马昌前, 杨坤光, 唐仲华, 等. 1994. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~ 260.
- 钱青, 王焰. 1999. 不同构造环境中双峰式火山岩的地球化学特征 [J]. *地质地球化学*, 27(4): 29~ 32.
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗岩质火山-侵入杂岩成因与地壳演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1~ 295.
- 王建, 李建平. 2003. 西秦岭礼县地区新生代钾霞橄黄长岩系地球化学特征及地质意义 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 11~ 19.
- 王焰, 钱青, 刘良, 等. 2000. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征 [J]. *岩石学报*, 16(2): 169~ 173.
- 喻学惠, 张春福. 1998. 甘肃西秦岭新生代碱性火山岩的 Sr, Nd 同位素及微量元素地球化学特征 [J]. *地学前缘*, 5(4): 319~ 328.
- 喻学惠, 莫宣学, Martin Flower, 等. 2001. 甘肃西秦岭新生代钾霞橄黄长岩火山作用及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 17(3): 366~ 377.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1~ 855.
- 周民都, 吕太乙, 张元生, 等. 2000. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究 [J]. *地震学报*, 22(6): 645~ 653.
- 周文戈, 张本仁, 杨巍然, 等. 1998. 秦岭-大别造山带碰撞后中酸性火山岩地球化学特征及构造意义 [J]. *地球化学*, 27(6): 537~ 548.