

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

胡 波¹, 裴先治¹, 丁仁平^{1,2}, 杨 吉¹, 赵小明¹, 李佐臣¹

HU Bo¹, PEI Xianzhi¹, DING Saping^{1,2}, YANG Ji¹, ZHAO Xiaoming¹, LI Zuo Chen¹

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

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

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

摘要:红土堡变基性岩以灰绿色变质玄武岩为主,有少量同时代同成分的辉绿岩墙顺层侵入其中。变基性岩属于拉斑玄武岩系列。稀土元素分布型式呈LREE弱富集型,具有较高的 Σ REE,无明显的Eu异常或弱的正异常,有明显的Ce负异常。弱富集大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Ba),富集Th,贫Cr、Ni,具有Nb、Ta负异常,La/Nb比值大于1,无明显的Ti负异常。这些微量元素特征及其构造环境判别显示该基性岩可能形成于汇聚板块边缘的弧后裂陷—小洋盆构造环境。

关键词:甘肃天水地区;红土堡;变基性岩;地球化学;弧后盆地

中图分类号: P588.12⁺4; P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-2552(2005)03-0258-06

Hu B, Pei X Z, Ding S P, Yang J, Zhao X M, Li Z C. **Geochemical characteristics of the Hongtubao metabasic rocks in the Tianshui area, Gansu, and their tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(3): 258-263**

Abstract: The Hongtubao metabasic rocks are mainly composed of grayish green metabasalt, intruded along the bedding by some contemporaneous diabase dikes of the same composition. The metabasic rocks are of tholeiitic series. Their chondrite-normalized REE patterns are of weakly LREE-enriched type, with relatively high Σ REE. There is no pronounced Eu anomaly or there are only weak positive anomalies; there is a pronounced negative Ce anomaly. Their MORB-normalized trace element spidergram shows that the rocks are slightly enriched in large-ion lithophile elements (K, Rb, Sr, Ba), enriched in Th and depleted in Cr and Ni. Nb and Ta show negative anomaly, La/Nb > 1, and Ti anomaly is not pronounced. The characteristics of these trace elements and their discrimination of tectonic environments show that the metabasic rocks formed in a back-arc rift-small ocean basin tectonic environment at convergent plate margins.

Key words: Tianshui area, Gansu; Hongtubao; metabasic rocks; geochemistry; back-arc basin

天水地区位于甘肃省东部陇南山地与黄土高原的过渡地带,地处青藏高原东北缘,其大地构造位置处于中央造山系中段祁连造山带与北秦岭造山带的接合部位(图1)。红土堡变基性岩位于天水地区东北部的秦安县北杨家寺—清水县红土堡—南头河一带,因其在清水红土堡一带出露面积较

多,在近年进行的1:25万天水市幅区域地质调查中将其称为红土堡变基性岩。20世纪90年代以来,已有一些学者对其地球化学特征和产出的大地构造背景进行过探讨,并称之为葫芦河群早古生代浅变质岩系中的基性枕状熔岩带^[1]或浅变质玄武岩^[2,3]。宋志高等^[4]认为它是产于大陆边缘后弧盆地火山

收稿日期:2004-07-02;修订日期:2004-10-15

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:40234041)、教育部科学技术研究重点项目(编号:104175)和中国地质调查局《1:25万天水市幅区域地质调查》项目(编号:200013000154)资助成果。

作者简介:胡波(1976-),女,硕士,构造地质学专业。E-mail:coolhubo@sohu.com

通讯作者:裴先治(1963-),男,博士,教授,从事构造地质和区域地质研究。E-mail:peixzh@sina.com

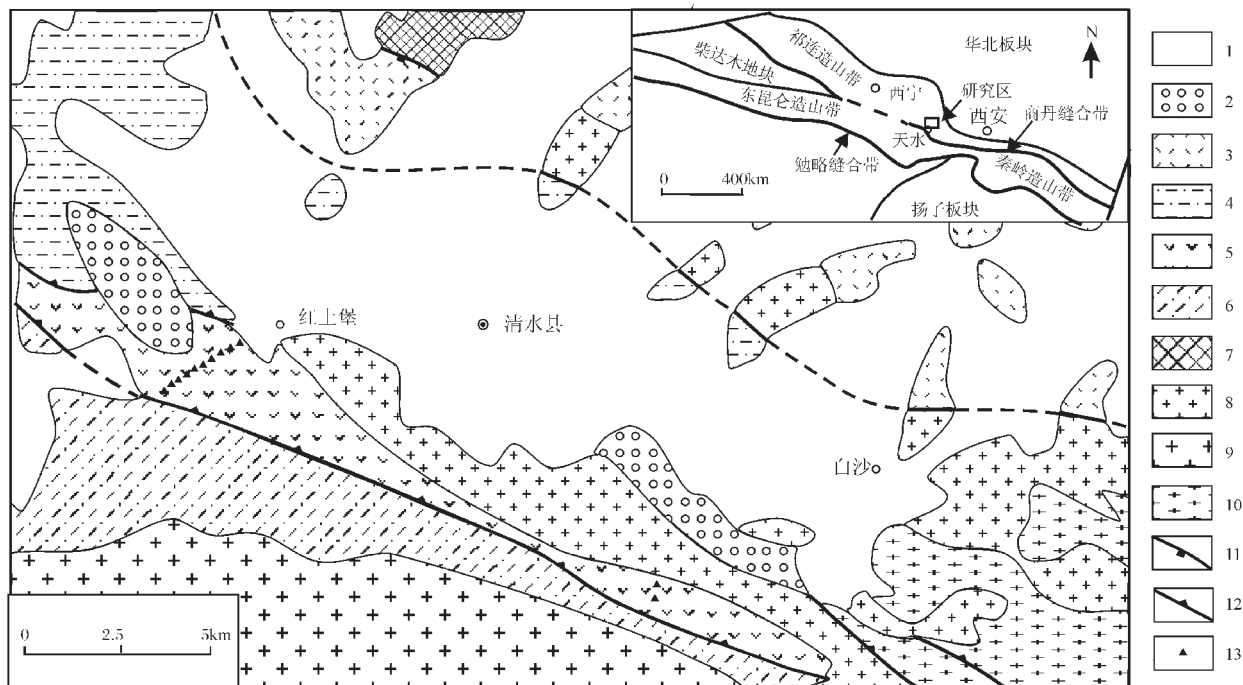


图1 天水地区清水县红土堡一带地质略图

Fig.1 Geological sketch map of Hongtubao, Qingshui County in the Tianshui area

- 1—新近系+第四系;2—白垩系;3—陈家河群中酸性火山岩;4—陈家河群变质碎屑岩;5—红土堡变基性火山岩;6—葫芦河群变质碎屑岩;7—古元古代陇山岩群;8—印支期花岗岩;9—加里东期花岗岩;10—元古宙变形花岗岩体;11—韧性正断层;12—逆冲断层;13—取样位置

作用环境中的大洋拉斑玄武岩,但缺乏详细的地球化学研究。樊双虎等^[2]认为该火山岩无洋壳特点,主要表现为陆内裂陷海盆特征。张维吉等^[3]认为它属于钙碱性—拉斑系列火山岩的过渡类型,属于陆内裂谷—陆间裂谷的产物。红土堡变基性岩究竟形成于何种构造环境,目前看法还不统一。本文根据新获得的地球化学数据,对其形成的大地构造背景进行探讨,为进一步了解该区的构造演化提供新的信息。

1 区域地质概况

红土堡变基性岩为一套低绿片岩相变质岩系,原岩为基性火山岩和辉绿岩。主要分布于天水地区东北部的秦安县北杨家寺—清水县红土堡—南头河一线,呈带状断续展布,向北西进入静宁一带,向东南被侵入岩体吞没而断续延伸至宝鸡凤阁岭一带。其南侧以区域韧性断层与新元古界葫芦河群变质碎屑岩相邻,北与早古生代(奥陶纪)陈家河群变质碎屑岩系和岛弧型变质中酸性火山岩系毗邻;其北侧分布有印支期酸性侵入体。该基性岩系在清水红土堡—南头河一线最为发育,出露较好,其他地段多被新生代黄土层覆盖或被侵入岩体吞没,仅在葫芦河和牛头河两大水系支流切割的沟壑中出露(图1)。根据最新获得的变质玄武岩Rb—Sr全岩等时线年龄 $484\text{ Ma} \pm 38\text{ Ma}$,将其时代定为早古生代奥陶纪。

2 岩石学特征

红土堡变基性岩以灰绿色变质玄武岩为主,夹少量灰白色—浅灰色硅质岩,硅质岩呈1~3 m厚的夹层出现,有少量同时代同成分的辉绿岩墙顺层侵入其中。岩石多呈块状构造,局部发育杏仁构造和枕状构造,且变形较强,普遍具有糜棱岩化特点,矿物颗粒受到挤压变形、破碎,片状矿物(如绿泥石)呈定向排列及扭曲变形,辉石、长石等粒状矿物破碎成小颗粒,但很集中(薄片观察)。岩石片理也很发育,普遍发生低绿片岩相区域变质作用,在薄片可见绿泥石、绿帘石、阳起石等绿片岩相变质矿物组合。变玄武岩为斑状结构(有斑晶)或微粒结构(无斑晶)。具斑状结构者,斑晶含量少,一般小于10%,主要是半自形—他形斜长石(拉长石—培长石),粒径为0.25~0.85 mm;基质组成主要为斜长石(40%~50%)、绿泥石(10%~20%)、绿帘石(10%~15%)、阳起石(10%~20%)、铁质(5%~10%),斜长石多有钠黝帘石化;基质呈微粒结构,矿物粒径为0.01~0.05 mm。具微粒结构者,除无斑晶外,矿物成分与斑状玄武岩相同。变辉绿岩具辉绿结构,主要矿物成分是斜长石(拉长石—培长石)和辉石。斜长石粒径约0.3~1.3 mm,含量40%~50%,呈半自形—他形板条状,周边围绕一圈微粒绿帘石和黝帘石,长石颗粒内部发生绢云母化;辉石含量约

40%~50%,部分辉石有绿泥石化;另外还有少量绿帘石和榍石。

3 变基性岩的地球化学特征

对红土堡变玄武岩和变辉绿岩进行了常量、稀土和微量元素分析,表1列出了12件代表性样品的分析结果。其中HT-01和HT-06为辉绿岩。

由表1可以看出,变玄武岩和变辉绿岩化学成分相似,因此一般情况下将二者放在一起讨论。

3.1 常量元素

红土堡变基性岩SiO₂含量为45.96%~52.16%,在TAS图解^[4,5]上除1个样品外全部落于玄武岩区(图2-a)。在Irvine分界线所划分的区域中,玄武岩样品一部分投影在亚碱性系列,一部分投影在碱性系列,辉绿岩样品全部投影在碱性系列;而在AFM图解^[6](图2-b)上,几乎所有的样品都投在拉斑系列区域,呈FeO_t富集趋势。样品的Al₂O₃含量较高(13.40%~15.70%),这与岩相学观察到斜长石含量高的现象相符。TiO₂

含量为1.61%~2.17%,平均为1.92%,比MORB的TiO₂含量(平均1.5%)^[6]略偏高,而稍低于板内拉斑玄武岩(平均2.23%)^[6]。MgO含量中等,为3.88%~5.96%,相应的Mg[#]变化范围为48.81~56.24,表明岩浆经历了一定程度的分离结晶作用。

3.2 稀土元素

红土堡变基性岩的稀土分配模式^[7]为LREE略富集型(图3-a),具有较高的 Σ REE,变玄武岩的稀土含量变化范围为80.07×10⁻⁶~124.97×10⁻⁶,变辉绿岩的 Σ REE(为69.06×10⁻⁶和74.45×10⁻⁶)略小于变玄武岩。LREE/HREE为2.61~3.49,(La/Yb)_N为1.89~4.52,(La/Sm)_N为1.28~2.72,轻重稀土元素分异作用不十分明显,类似于拉斑玄武岩的稀土元素特征^[8]。无明显的Eu异常或弱的正异常(δ Eu=0.92~1.13),类似于MORB和WPB,且说明无斜长石的分离结晶作用。有明显的Ce负异常(δ Ce=0.58~0.85),表明岩浆中有陆壳物质的混入^[9]。

3.3 微量元素

一般认为高场强元素(如Ti、Zr、Y、Nb、Th、Hf等)在轻微

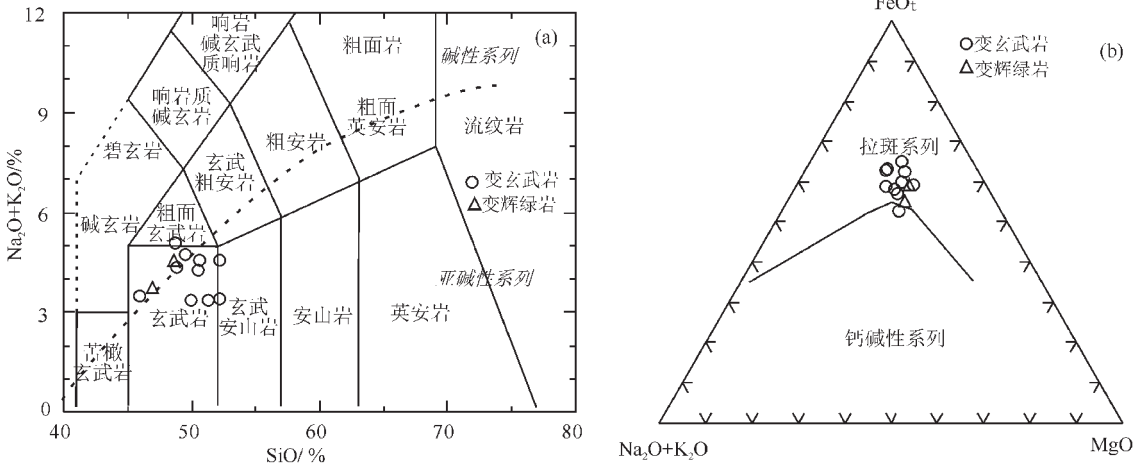


图2 天水红土堡变基性岩的TAS分类图解(a)和AFM图解(b)^[4,5]

Fig.2 TAS (a) and AFM (b) diagrams of the Hongtubao metabasic rocks in the Tianshui area

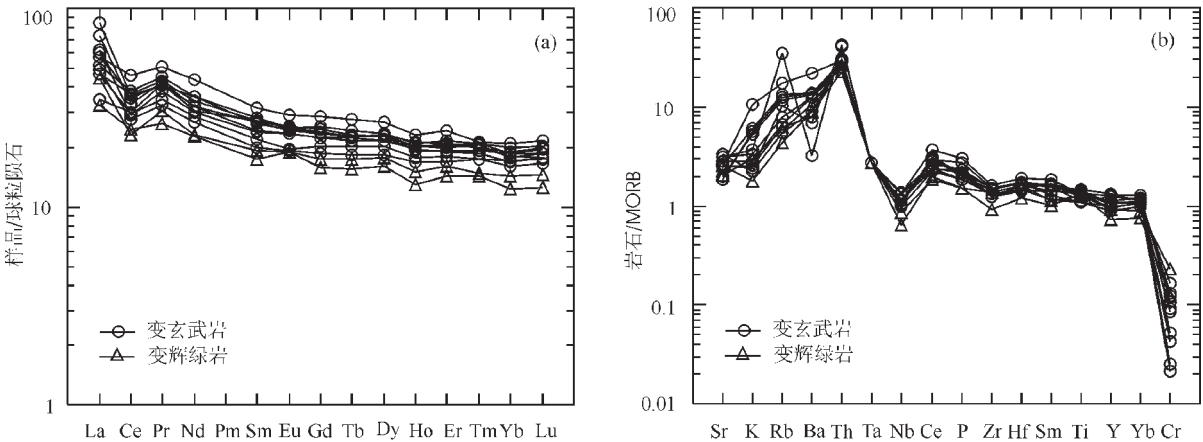


图3 天水地区红土堡变基性岩球粒陨石标准化REE型式(a)^[7]和MORB标准化微量元素蛛网图(b)^[6]

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns (a) and MORB-normalized trace element spidergram (b) of the Hongtubao metabasic rocks in the Tianshui area

表1 天水地区红土堡变基性岩的常量元素、微量元素和稀土元素组成

Table 1 Major element,trace element and REE compositions

of the Hongtubao metabasic rocks in the Tianshui area

样品号	HT-01	HT-02	HT-03	HT-04	HT-05	HT-06	HT-07	HT-08	HT-09	HT-10	NT-01	NT-02
岩石名称	变辉绿岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变辉绿岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩	变玄武岩
产地	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	红土堡	南头河	南头河
SiO ₂	46.88	50.56	48.76	50.48	51.28	48.58	48.72	49.46	52.16	52.15	45.96	49.94
TiO ₂	2.00	2.14	2.02	1.66	2.03	1.91	2.17	1.99	1.61	1.61	1.96	1.88
Al ₂ O ₃	15.7	13.4	14.98	13.94	13.62	14.26	14.57	14.52	14.05	14.05	13.81	13.64
Fe ₂ O ₃	4.41	6.72	4.09	6.35	5.66	3.80	4.77	4.54	2.97	5.00	4.68	6.85
FeO	8.28	7.14	7.82	6.95	6.82	8.80	8.65	8.62	7.69	5.92	8.12	6.71
MnO	0.15	0.16	0.18	0.15	0.19	0.18	0.17	0.16	0.18	0.15	0.16	0.18
MgO	5.41	4.02	4.99	3.88	4.56	5.96	4.63	5.05	5.27	4.27	5.73	4.37
CaO	10.13	8.49	9.18	9.06	9.86	8.16	7.64	7.64	8.43	10.44	8.71	7.97
Na ₂ O	3.46	3.76	3.83	3.36	3.01	4.12	4.24	4.30	3.00	3.02	2.92	3.02
K ₂ O	0.27	0.80	0.50	0.91	0.34	0.45	0.85	0.43	1.57	0.38	0.56	0.36
P ₂ O ₅	0.18	0.25	0.36	0.33	0.26	0.18	0.28	0.28	0.22	0.22	0.26	0.24
灼失	2.27	1.48	1.98	2.13	1.96	2.12	1.76	2.02	1.99	1.90	5.31	3.42
TOTAL	99.14	98.92	98.69	99.2	99.59	98.52	98.45	99.01	99.14	99.11	98.18	98.58
Ba	181	269	251	274	180	211	273	252	435	158	65.1	137
Rb	8.75	23.4	15.5	26.5	11	11.8	24.6	13.3	35	12.6	68.5	20.7
Sr	309	237	372	310	394	242	223	343	319	295	372	306
Y	21.7	32.7	38.0	37.3	32.6	27.3	39.3	28.6	29.9	26.8	32.0	33.6
Zr	82.8	111	144	135	112	125	136	111	132	121	135	132
Nb	2.26	3.52	4.63	3.74	3.65	3.02	4.76	4.03	3.94	3.44	4.66	4
Th	4.49	5.87	5.03	4.91	6	5.27	5.67	5.79	5.93	5.9	8.32	8.15
Ni	30	1	17.2	10.9	12.3	28.1	15.8	13.9	22.8	22.7	21.2	6.71
V	523	444	326	328	384	399	425	408	333	343	437	442
Cr	30.6	5.46	26.6	32.5	21.4	57.5	13	10.7	41.4	22.9	31.1	6.24
Hf	2.88	3.6	4.51	4.01	3.38	3.86	4.21	3.82	4.09	3.5	4	4.17
Cs	3	3	2.6	2.9	2.5	2.7	3.3	2.8	2.7	2.35	6.7	1.7
Ta	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Co	29.2	31	28.3	18.1	29.7	34.7	33	32.9	31.5	32.6	34	34.3
U	1	1	1.16	0.67	1	1.33	1	1.16	1.33	1.33	1	1
La	10.1	16.1	17.6	26.3	18.5	13.8	22.5	19.1	14.6	15.2	10.8	14.6
Ce	20.0	31.2	37.0	29.4	28.5	18.5	26.9	23.5	24.0	22.2	24.2	30.2
Pr	3.22	5.54	6.21	5.04	5.12	3.70	5.17	4.67	4.22	3.95	5.11	5.29
Nd	13.6	21.5	26.2	21.4	19.1	13.9	19.1	17.9	17.2	15.9	18.4	20.5
Sm	3.39	5.44	6.14	5.15	4.71	3.75	5.21	4.60	4.30	3.88	5.30	5.29
Eu	1.38	1.84	2.14	1.81	1.71	1.38	1.79	1.71	1.43	1.40	1.86	1.84
Gd	4.10	6.11	7.35	6.15	5.73	4.54	6.02	5.8	5.21	4.79	6.32	6.55
Tb	0.74	1.08	1.31	1.07	1.05	0.82	1.08	1.02	0.95	0.87	1.09	1.14
Dy	5.16	7.35	8.57	7.35	6.98	5.66	7.33	6.94	6.46	5.93	7.26	7.54
Ho	0.93	1.53	1.66	1.46	1.41	1.08	1.46	1.45	1.26	1.20	1.37	1.50
Er	3.02	4.41	5.06	4.32	3.95	3.38	4.31	4.15	3.80	3.55	4.06	4.52
Tm	0.46	0.64	0.69	0.64	0.60	0.48	0.67	0.66	0.56	0.56	0.62	0.67
Yb	2.56	3.73	4.35	3.92	3.52	2.99	3.86	3.68	3.60	3.34	3.85	4.15
Lu	0.40	0.57	0.69	0.64	0.57	0.47	0.60	0.60	0.56	0.53	0.63	0.65
(La/Sm) _N	1.87	1.86	1.80	3.21	2.47	2.31	2.72	2.61	2.14	2.46	1.28	1.74
(La/Yb) _N	2.66	2.91	2.73	4.52	3.54	3.11	3.93	3.50	2.73	3.07	1.89	2.37

注:岩石样品测试由中国地质调查局宜昌地质矿产研究所岩矿测试分析室完成。常量元素用常规湿法、容量法分析,其中灼失用重量法分析,微量和稀土元素用电感耦合等离子发射光谱法(ICP-AES)分析(2003)。常量元素的分析精度(相对标准差)一般小于1%,微量和稀土元素分析精度优于5%。氧化物含量%,微量和稀土元素含量10⁻⁶

蚀变和低级变质作用条件下是稳定的^[10],因此这里主要用高场强元素进行讨论。MORB标准化的微量元素蛛网图^[6](图3-b)呈现出大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Ba)略富集、Th强烈富集、具Nb、Ta负异常、亏损高场强元素的特征。贫Cr(为 $5.46\times 10^{-6}\sim 57.5\times 10^{-6}$)、Ni(为 $6.71\times 10^{-6}\sim 30.0\times 10^{-6}$),说明岩浆有一定程度的分离结晶。样品具有Nb负异常,负的Nb异常是大陆地壳的特征,可能指示地壳物质参与了岩浆过程^[10]。样品的Zr/Nb为27.5~36.6、Y/Nb为6.87~9.97、Th/La为0.25~0.77,类似于N-MORB的特征(Zr/Nb=31.8,Y/Nb=11.2,Th/La=0.93)^[11];Ce/Zr为0.15~0.28、Zr/Y为3.39~4.58、Ti/Y为267~553,与E-MORB的特征(Ce/Zr=0.21,Zr/Y=3.32,Ti/Y=273)^[11]相似;Th/Yb为1.16~2.16、Th/Nb为1.09~2.04、Nb/La为0.14~0.43、Hf/Th为0.48~0.90,与碰撞型的弧区玄武岩(Th/Yb>0.1,Th/Nb>0.07,Nb/La≤0.8,Hf/Th<8)^[12]相类似。岩石的微量元素构造判别图解见图4。在Zr/Y-Zr图解^[13]中,样品投在板内玄武岩和洋脊玄武岩区;在V-Ti图解^[14]中,样品的V/(Ti/1000)值为26.92~43.62,全落在MORB区;在La/Nb-

La图解^[15]中,样品全部落于岛弧玄武岩区;在Th/Zr-Nb/Zr图解^[16]中,样品投影在板块汇聚边缘的陆缘火山弧玄武岩区。

4 讨论及结论

上述岩石学和地球化学特征表明,红土堡变基性火山岩及同时代的辉绿岩属于绿片岩相变质的拉斑玄武岩系列。稀土元素分配型式为轻稀土略富集型,轻重稀土分异不明显,有Ce负异常;微量元素蛛网图显示富集K、Rb、Sr、Ba、Th等大离子亲石元素,亏损Nb、Ta等高场强元素,与CFB和俯冲带岩浆岩系列的特征相似。然而,岩石的Nb/Zr(0.024~0.036)与板块汇聚边缘Nb/Zr(<0.04)相近,与大陆板内玄武岩(Nb/Zr>0.04)有所区别(图4-d)^[16];在La/10-Y/15-Nb/8图解(图略)^[17]中,岩石也表现出岛弧玄武岩的特征,而与典型大陆玄武岩有明显差异;另外,玄武岩的枕状构造和硅质岩夹层表明它处于海相环境。因此,变基性岩的这些特征更趋向于俯冲带玄武岩的特征。蛛网图型式从Ce到Yb相对平坦,MORB标准化值接近1,说明变基性岩也具有MORB的特征。总地来

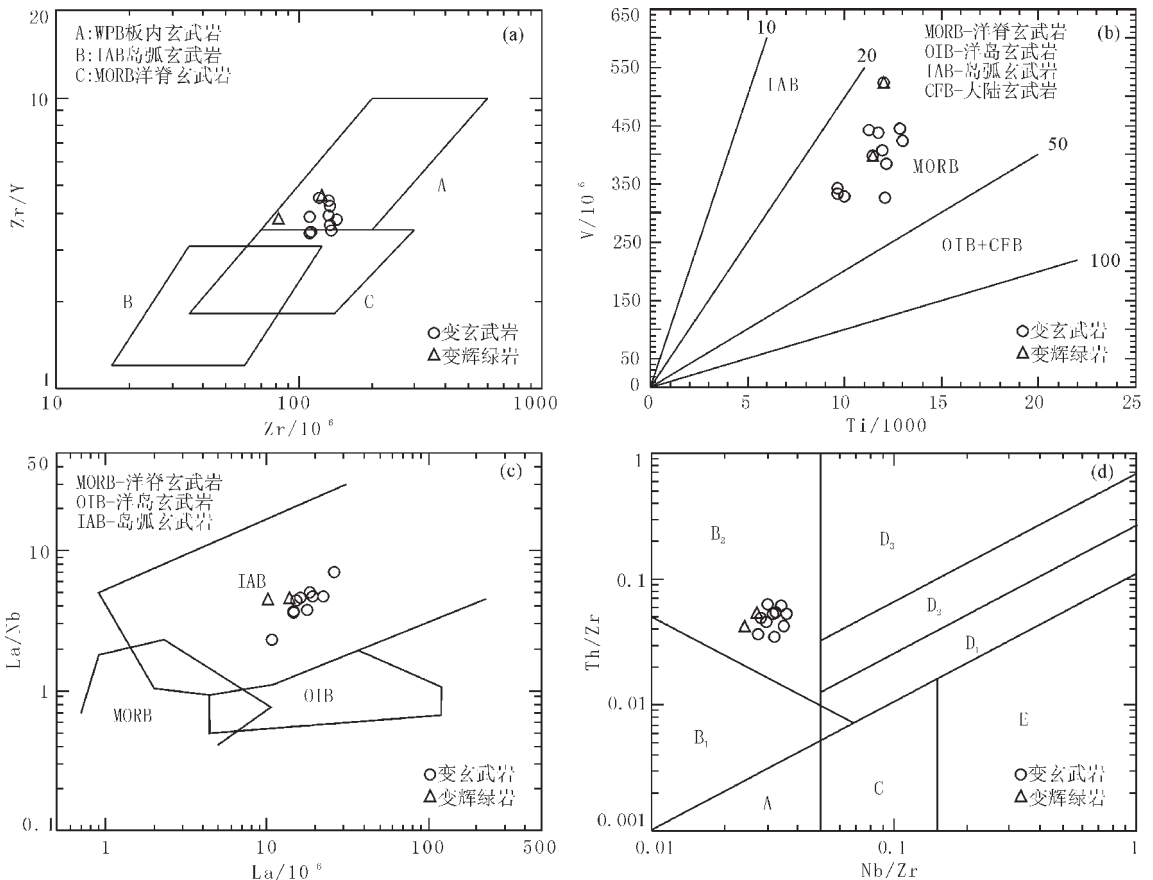


图4 天水地区红土堡变基性岩的Zr/Y-Zr(a)^[13]、V-Ti(b)^[14]、La/Nb-La(c)^[15]和Th/Zr-Nb/Zr(d)^[16]图解

Fig.4 Zr/Y-Zr(a), V-Ti(b), La/Nb-La(c) and Th/Zr-Nb/Zr(d) diagrams of the Hongtubao metabasic volcanic rocks in the Tianshui area

图(d)中:A—大洋板块发散边缘N-MORB区;B—板块汇聚边缘(B₁—大洋岛弧玄武岩区;B₂—陆缘火山弧玄武岩区);C—大洋板内玄武岩区;D—大陆板内玄武岩区(D₁—陆内初始裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区;D₂—大陆拉张带玄武岩区;D₃—陆-陆碰撞带玄武岩区);E—地幔柱玄武岩区

说,蛛网图的趋势类似于Pearce等^[9]根据玄武岩类型与构造环境之间的关系所划分的微量元素蛛网图解型式(洋中脊玄武岩、板内玄武岩、火山弧型玄武岩、过渡型玄武岩)中的过渡类型的玄武岩,说明变基性岩形成环境是一种过渡类型的构造环境。此外,岩石具明显的Nb负异常,La/Nb比值(3.71~4.74)大于1,无明显的Ti负异常,这些特征与弧后盆地玄武岩的特征相似^[18]。弧后盆地玄武岩与其他大洋玄武岩比较,高场强元素丰度低,大离子亲石元素丰度高,(Rb/Yb)_N比值大于1,高场强元素自身的分馏不明显,从Nb到Yb近平行排列,而且(Rb/Yb)_N比值大小与俯冲带的成熟度、弧后盆地的宽度和消减板块的影响程度有关^[19]。而红土堡变基性岩正符合这些特征,其(Rb/Yb)_N比值为5.31~30.25,说明弧后盆地的发展没有达到很大的规模。

微量和稀土元素比值计算结果和样品在微量元素构造判别图解中的投影表明,红土堡变基性岩的微量元素具IAB、MORB和WPB的性质。具IAB的性质表明岩浆源区受到俯冲消减带的影响,岩浆来源于受俯冲流体交代的富集地幔楔;具MORB和WPB的性质表明它们处于一种洋底拉张的构造环境,而且辉绿岩墙是代表拉张裂解环境的岩石,它们的形成与岩石圈减薄和地壳拉张作用有直接的关系。

红土堡变基性岩的上述特征可与北秦岭二郎坪群新元古代—早古生代弧后盆地型变质火山岩系相对比^[20],它们是东秦岭地区扬子板块沿商丹缝合带向北秦岭陆块之下俯冲的产物,是商丹带的西延部分^[21,22],产于该俯冲体系的弧后地区。此外,红土堡变基性岩与其北侧出露的奥陶纪岛弧型中酸性火山岩,二者时代相近,空间上相毗邻,可能是同一俯冲作用的产物。

以上地质、地球化学特征和微量元素的构造环境判别表明,红土堡变基性岩属于拉斑系列,其岩浆可能来源于受俯冲流体交代的富集地幔楔,并经历一定程度的分离结晶作用,形成于汇聚板块边缘的弧后裂陷—小洋盆构造环境。

参考文献:

- [1]宋志高,贾群子,张治洪,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刊,1991,34:1-82.
- [2]樊双虎,张维吉,金符实,等.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].西安地质学院学报,1993,15(4):80-84.
- [3]张维吉,孟宪陶,胡健民,等.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,1994.1-283.
- [4]Le Maitre R W. A Classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford:Blackwell Scientific Publications,1989.1-193.
- [5]Irvine T N,Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canad. J. Earth Sci., 1971, 8:523-548.
- [6]Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. In:Thorpe R S ed. Andesites [M]. New York:John Wiley and Sons,1982.525-548.
- [7]Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements;meteorite studies[A]. In:Henderson P ed. Rare earth element geochemistry [M]. New York:Elsevier Science Publications B V,1984. 62-114.
- [8]王中刚,于学元,赵振华,等.稀土元素地球化学[M].北京:科学出版社,1989.133-190.
- [9]赵振华.微量元素地球化学原理[M].北京:科学出版社,1997.112-177.
- [10]Rollinson H R. Using geochemical data:Evaluation,presentation, interpretation[M]. Longman Group UK Ltd,1993. 1-275.
- [11]Sun S S,McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts:implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders A D, Norry M J eds. Magmatism in the ocean basins[C]. Geological Society Special Publication,1989,42: 313-345.
- [12]Condie K C. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archaean-Proterozoic boundary:identification and significance [J]. Lithos,1989,23:1-18.
- [13]Pearce J A,Norry M J. Petrogenetic implications of Ti,Zr,Y and Nb variations in volcanic rocks[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1979,69:33-47.
- [14]Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. Earth Planet. Sci. Lett.,1982,59:101-118.
- [15]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.
- [16]孙书琴,汪云亮,张成江.玄武岩类岩石大地构造环境的Th,Nb、Zr判别[J].地质论评,2003,49(1):40-47.
- [17]Cabanis B, Lecomte M. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8;un outil pour la discrimination de series volcaniques et la mise en evidence processus de mélange et/ou de contamination crustale [J]. C. R. Acad. Sci. Ser. II,1989,309:2023-2029.
- [18]Wilson M. Igneous petrogenesis:Global tectonic approach [M]. London:Unwin Hyman,1989.1-164.
- [19]李昌年.火成岩微量元素岩石学[M].武汉:中国地质大学出版社,1992.1-195.
- [20]张本仁,高山,张宏飞,等.秦岭造山带地球化学[M].北京:科学出版社,2002.89-94.
- [21]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.
- [22]裴先治,李勇,陆松年,等.西秦岭天水地区关子镇中基性岩杂岩体锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地质通报,2005,24(1):23-29.