

新疆巴楚辉绿岩岩脉的岩石成因和大地构造意义*

孙林华^{1,2} 王岳军¹ 范蔚茗¹ 彭头平¹

SUN LinHua^{1,2}, WANG YueJun¹, FAN WeiMing¹ and PENG TouPing¹

1. 中国科学院广州地球化学研究所 同位素地球化学与年代学重点实验室, 广州 510640

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039

1. Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

2007-02-10 收稿, 2007-05-24 改回.

Sun LH, Wang YJ, Fan WM and Peng TP. 2007. Petrogenesis and tectonic significances of the diabase dikes in the Bachu area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6):1369–1380

Abstract The Permian mafic dikes in the NW Tarim Basin provide important constrains on the late-Paleozoic tectonic evolution of the Tarim Basin and its adjacent area. The mafic dikes in the Bachu area are mainly diabases and exhibit enrichment in LILE, LREE and HFSE. These samples exhibit 0.84 ~ 1.23 of La/Nb, 5.80 ~ 7.81 of Zr/Nb, 2.6 ~ 15.4 of Ce/Pb and 27.0 ~ 37.3 of Nb/U. The initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios range from 0.70495 to 0.70560 and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values are from -1.7 to +2.0, different from those of the subduction-related magmatism and the oceanic island basalts (OIB). Such geochemical features suggest that these samples might be product of the low degree partial melting of the garnet-bearing peridotite. These samples are derived from the interaction of the asthenosphere with lithosphere in response to uplifting asthenosphere in the extensional setting. Taking account into available data, an irregular variation for mantle source is shown from the Tarim interior to the southwestern Tianshan belt.

Key words Diabase, Permian, Asthenosphere-Lithosphere interaction, Extensional setting, Bachu

摘要 塔里木盆地西北部巴楚地区出露的二叠纪基性岩脉为研究塔里木盆地及其邻区晚古生代区域大地构造演化提供了重要信息。巴楚地区基性岩脉中辉绿岩脉富集大离子亲石元素、轻稀土元素以及高场强元素, $\text{La}/\text{Nb} = 0.84 \sim 1.23$, $\text{Zr}/\text{Nb} = 5.80 \sim 7.81$, $\text{Ce}/\text{Pb} = 2.6 \sim 15.4$ 和 $\text{Nb}/\text{U} = 27.0 \sim 37.3$, 初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70495 \sim 0.70560$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -1.7 \sim +2.0$, 明显不同于受俯冲交代地幔源区的产物, 也区别于典型洋岛玄武岩(OIB), 相反具有OIB型+富集岩石圈地幔的元素-同位素地球化学特征, 能被理解为与二叠纪软流圈和岩石圈相互作用产物, 其起源与软流圈地幔上涌有关, 表明二叠纪时巴楚地区应处于软流圈上隆的岩石圈伸展构造背景。结合区域地质资料, 可认为二叠纪时地幔源区属性自塔里木盆地内部向北至西南天山边缘呈规律性变化

关键词 辉绿岩; 二叠纪; 软流圈和岩石圈相互作用; 伸展构造背景; 巴楚

中图法分类号 P588.124; P595; P597.1

* 国家自然科学基金(40421303, 40304039)和中国科学院创新项目(kzcx2-yw-128)资助。

第一作者简介: 孙林华, 男, 1981年生, 博士研究生, 岩石地球化学专业, E-mail: sunlinhua@gig.ac.cn

1 引言

基性岩脉是由源于地幔的玄武质岩浆及其受分异作用或受地壳混染作用影响的岩浆充填张性空间而成,常被作为大洋和大陆伸展构造的标志(Walker and Eyre, 1995; Windley, 1995; 李献华等, 1997; 侯贵廷等, 2003; 董传万等, 2006)。研究表明,在伸展构造背景下,上涌软流圈物质抵达岩石圈底部时,由于受刚性岩石圈的阻挡,软流圈和岩石圈因地幔温度和物质成分的差异而发生相互作用,所产生的岩浆组分或以岩石圈组分为主、或以软流圈组分为主或具两者相互反应的特征(Perry *et al.* 1987; DePaolo and Daley, 2000; Xu *et al.*, 2005; 徐学义等, 2005; 张辉煌等, 2006)。因此,对基性岩脉对于理解地幔源区性质及其所揭示的构造背景,特别是理解伸展背景下的地幔源区属性及岩石圈-软流圈物质贡献有重要意义,基性岩脉地球化学研究是获取特定地质时期深部地幔性质及其演变的重要途径(Thompon *et al.*, 2001; Chen and Zhai, 2003)。

中亚造山带(CAOB,包括阿尔泰造山带、准噶尔盆地、天山造山带以及塔里木盆地等)内、特别是新疆北部晚古生代发育大规模基性至酸性岩浆活动,且已有的研究表明该岩浆活动主体形成于晚石炭世—早二叠纪(320 ~ 270Ma)、以亏损Nd同位素组成和具年轻 t_{DM} 模式年龄为特征,该时期岩浆活动常被认为是北疆后碰撞伸展阶段的岩浆作用产物,其陆壳垂向生长方式代表了北疆乃至整个中亚造山带显生宙最为重要的地壳生长方式(Han *et al.*, 1997; 韩宝福等, 1999; Jahn *et al.*, 2000; 王涛等, 2005)。但与阿尔泰造山带、准噶尔盆地和天山造山带同期岩浆作用相比,塔里木盆地由于其特殊的地理地质条件,已被发现的同期岩浆活动相对较少,其研究程度也相对薄弱。目前的资料显示,该期岩浆活动主要以塔里木盆地西北部巴楚隆起区所出露的超基性-基性-酸性岩石组合为其典型代表。该超基性-基性-酸性岩石组合记录了塔里木盆地晚石炭—早二叠世一次重要的伸展事件,为理解该区晚古生代地幔属性及深部构造背景提供了重要窗口,也能有助于加深对塔里木盆地、乃至北疆晚古生代大地构造演化的理解。以往部分研究者针对上述岩石组合也开展过不同程度的年代学和元素地球化学研究,也针对其岩石成因提出过不同观点(杨树锋等, 1996, 2005, 2006; 陈汉林等, 1997; 姜常义等, 2004a)。如姜常义等(2004a)依据岩脉中橄榄辉长岩的同位素组成推断该基性岩脉可能是地幔柱作用下的产物,而杨树锋等(1996, 2005, 2006)则认为辉绿岩脉-正长岩体-正长斑岩构成了“双峰式”岩石组合,其起源于富集地幔源区,是非造山作用产物。另外,陈汉林等(1997)则认为该区岩浆活动可能是塔里木北部中天山岛弧向南A型俯冲和南部特提斯洋壳向北B型俯冲共同作用的结果。基于上述争议,我们选择了位于区内基性岩脉典型分布区之一的巴楚县东部小海子水库附近的辉绿

岩脉开展了较为系统的元素和同位素地球化学研究,以期阐明其岩石成因和大地构造背景,也为理解塔里木盆地西北缘晚古生代岩浆活动特征及其构造意义提供新的约束。

2 区域地质背景和样品岩石学特征

塔里木盆地位于北部天山造山带和南部昆仑造山带和阿尔金造山带之间,尽管其南北造山带在古特提斯构造演化中构造叠加强烈,但其内部变形相对轻微,总体表现为三隆五坳的构造格局(图1a)。塔里木盆地的热构造演化依目前资料可划分为四个阶段:新元古代—寒武纪、奥陶纪、二叠纪及中—新生代,其中二叠纪是最为重要的阶段。

研究区位于塔里木盆地中部隆起西侧的巴楚隆起区,区内地层大部分为第四纪所覆盖,仅在小海子水库附近出露志留系、泥盆系、石炭系以及下二叠统地层(新疆区域地质志, 1993;图1b)。岩浆活动以晚古生代侵入岩为主,并以超基性-基性-酸性岩石组合为特征(新疆区域地质志, 1993; 杨树锋等, 1996; 姜常义等, 2004a),包括麻扎山正长岩体、正长斑岩岩脉及相关的基性岩脉等。前人研究表明,该岩石组合中正长岩体、酸性岩脉及辉绿岩脉是同一岩浆旋回活动的产物,具板内岩浆活动特征,形成时代上基性岩相对酸性岩石略早,其中基性岩石常被认为形成于292 ~ 260Ma间,而酸性岩形成于282 ~ 264Ma间(陈汉林等, 1997; 杨树锋等, 2006),均属二叠纪陆内伸展作用产物(杨树锋等, 1996, 2005; 陈汉林等, 1997; 姜常义等, 2004a)。

区内基性岩石常呈岩脉广泛侵入于志留系、泥盆系、石炭系及下二叠统中,很少侵入相邻的正长岩体(SHRIMP锆石U-Pb年龄277Ma, 杨树锋等, 2006; $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄278Ma, 杨树锋等, 1996, 2006)中,其全岩Sm-Nd等时线年龄为259 ~ 257Ma,贾承造等, 1997)。基性岩脉以NNW-SSE走向为主,产状陡立(倾角可达70度),宽度几十厘米到几米不等,延伸达几十米至几百米。上述基性岩脉类型众多,以辉绿岩脉为主,其次为辉绿玢岩脉、暗色橄榄辉长岩脉和煌斑岩脉等。本次研究对象选取的主要是辉绿岩脉。所采样品所采样品具块状构造、辉绿结构为块状构造、辉绿结构,斑晶含量10% ~ 20%,以斜长石和辉石为主,斜长石斑晶占斑晶总量的50%,单斜辉石为30%。基质成分与斑晶相同,有时可见少量石英、钾长石、黑云母等,基质中斜长石和辉石、磁铁矿等组成明显辉绿结构,其他副矿物包括磷灰石、榍石、锆石和铁钛矿物等。

3 分析测试方法

全岩主量元素组成在国土资源部湖北地质实验研究所XRF法测试,FeO和Fe₂O₃用湿法单独分析。微量元素测试在中国科学院广州地化所Perkili-Elmer ELAN 6000 ICILMS测试,标样为BCR-1, > 10 × 10⁻⁶的元素分析精度优于5%,

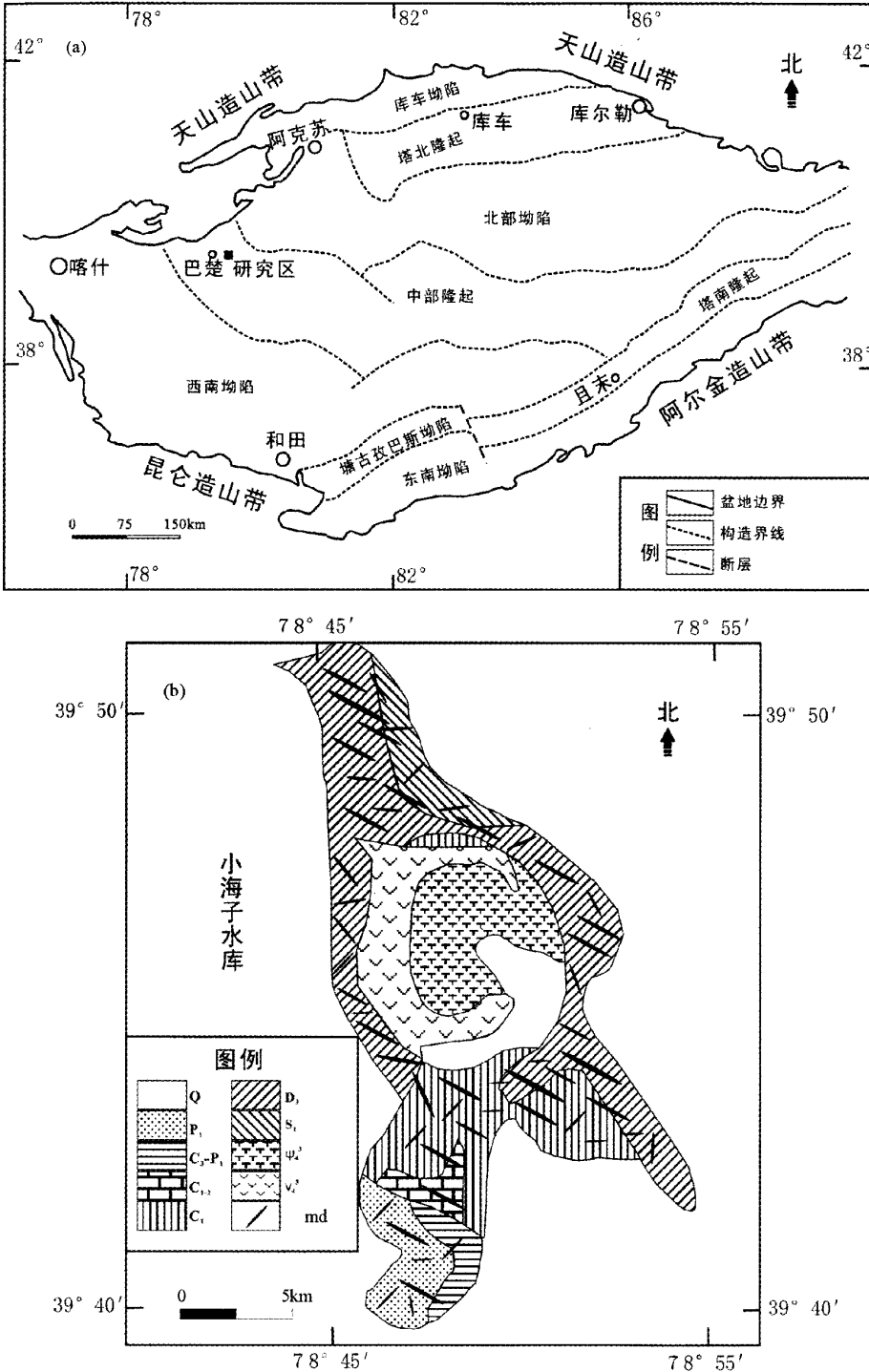


图1 塔里木盆地构造简图(a)和研究区简要地质图(b) (据杨树锋等,2006)

S₁-克孜尔塔格组粉砂岩和粉砂质泥岩; D₃-东河塘组石英砂岩; C₁₋₂-卡拉沙依组灰岩、泥灰岩及泥岩; C₁-巴楚组泥质和钙质粉砂岩; C₂-P₁-小海子组灰岩夹细砂岩、粉砂质泥岩; P₁-南闸组灰岩夹钙质粉砂岩、泥灰岩和泥岩; Q-第四纪盖层; ψ_4^3 -海西晚期正长岩体; ν_4^3 -海西晚期辉长岩; md-镁铁质岩脉

Fig. 1 (a) Simplified tectonic map of the Tarim basin and (b) Geological map of the study area (after Yang *et al.* , 2006)

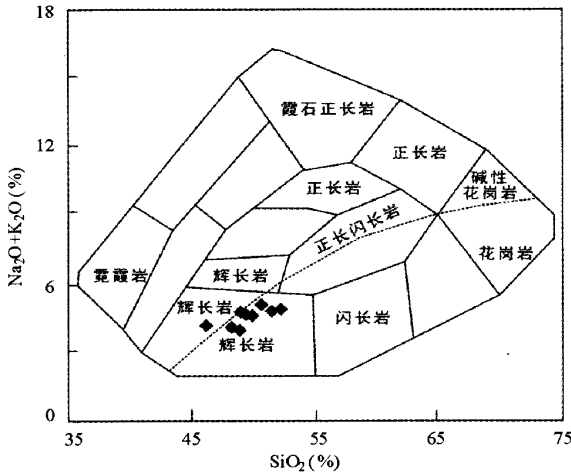


图2 巴楚辉绿岩岩脉 TAS 分类图解 (据 Wilson, 1989)

Fig. 2 TAS diagrams for the Bachu diabase dikes

表 2. 样品 $SiO_2 = 47.12\% \sim 53.23\%$ (去除灼失量经 100% 处理,下同), $Na_2O = 1.99\% \sim 3.37\%$, $K_2O = 1.34\% \sim 2.22\%$, $Na_2O + K_2O = 4.00\% \sim 5.08\%$, 除样品 04XJ-100 外, $Na_2O > K_2O$, $Na_2O/K_2O = 1.20 \sim 2.36$. 相较于研究区正长岩体和正长斑岩 ($Na_2O + K_2O$ 9% ~ 11%, 杨树锋等, 2006), 上述辉绿岩脉样品的全碱含量要低得多. 在 Wilson (1989) 侵入岩 TAS 分类图解中 (图 2), 样品投点于辉长岩范畴, 鉴于其野外地质产状和其辉绿结构等岩相学特征, 岩性鉴定为辉绿岩. 同样在 TAS 图解中, 样品投点落于亚碱性和碱性分界线附近, 结合样品中主要造岩矿物为橄榄石、单斜辉石和较低牌的斜长石 (基质中 $An = 40 \sim 50$, 斑晶中 $An = 60 \sim 65$; 陈汉林等, 1997), 巴楚辉绿岩应属于亚碱性 - 碱性的过渡岩石系列. 样品具有较低的 MgO 含量 (3.30% ~ 4.84%) 和 $mg^{\#}$ 值 (0.29 ~ 0.34). 其 P_2O_5 变化于 0.49% ~ 0.79%, FeO^I 变化于 11.67% ~ 14.90%, $TiO_2 = 3.10\% \sim 3.72\%$, $CaO = 7.34\% \sim 10.35\%$ 和 $Al_2O_3 = 13.74\% \sim 15.81\%$, 里特曼指数 $\sigma = 2.29 \sim 428$, 其化学成分变化特征类似于区内二叠纪玄武岩. 在其他主量元素 MgO 散点图中 (图 3a, b, c, d, e, f, g) 可以发现: 在 $MgO > 4\%$ 时, SiO_2 和 MgO 呈负相关, CaO , CaO/Al_2O_3 , TiO_2 与 MgO 呈正相关, 而在 $MgO < 4\%$ 时, 以 FeO^I ($FeO + 0.9 \cdot Fe_2O_3$)、 TiO_2 与 MgO 的正相关最明显, CaO , CaO/Al_2O_3 和 MgO 的相关性则不明显. 样品具有较低的相容元素丰度, 如 $Sc = 15.3 \times 10^{-6} \sim 23.9 \times 10^{-6}$, $V = 145 \times 10^{-6} \sim 308 \times 10^{-6}$, $Ni = 0.21 \times 10^{-6} \sim 57.47 \times 10^{-6}$, $Co = 21.1 \times 10^{-6} \sim 43.3 \times 10^{-6}$, 且在 $MgO > 4\%$ 时和 MgO 呈正相关关系 (如图 3h).

样品稀土含量较高, ΣREE 变化于 $191.5 \times 10^{-6} \sim 287.8 \times 10^{-6}$, 在球粒陨石标准化图解上 (图 4a), 样品表现出一致的 LREE 富集的右倾型配分型式, 轻重稀土分异较为明显, $LREE/HREE = 7.8 \sim 8.6$, $(La/Yb)_{cn} = 10.8 \sim 12.8$, $(Gd/Yb)_{cn} = 2.7 \sim 3.0$, Eu 异常不明显, $\delta Eu = 0.96 \sim 1.09$. 在原

$< 10 \times 10^{-6}$ 的元素分析精度优于 8%, 具体的测试流程参见刘颖等 (1996). Sr 、 Nd 同位素组成测试在中国科学院地质与地球物理研究所 VG354 质谱仪上完成, 实验流程见 Qiao (1998), Sr 同位素比值测定采用 $^{86}Sr/^{88}Sr = 0.1194$ 进行质量分馏校正, Rb - Sr 全流程空白本底约 $2 \times 10^{-10} \sim 5 \times 10^{-10} g$, Nd 同位素分馏用 $^{146}Nd/^{144}Nd = 0.7219$ 校正, Sm - Nd 分析流程空白本底约为 $5 \times 10^{-12} g$, 在相关参数计算中, 采用了 277Ma 进行回归计算, 其中 $^{87}Rb/^{86}Sr$ 和 $^{147}Sm/^{144}Nd$ 比值用 ICP-MS 测试结果计算得到.

4 分析结果

4.1 元化学组成

巴楚辉绿岩脉代表性样品的主微量分析结果见表 1 和

表 1 巴楚辉绿岩岩脉主量元素组成 (wt%)

Table 1 Major oxides composition (wt%) of the Bachu diabase dikes

样品号	04XJ-98	04XJ-100	04XJ-102	04XJ-106	04XJ-108	04XJ-110	04XJ-112	04XJ-120	04XJ-121
SiO_2	51.03	48.92	52.98	50.95	51.92	47.16	49.99	50.70	53.23
TiO_2	3.27	3.54	3.19	3.47	3.34	3.72	3.19	3.23	3.10
Al_2O_3	14.46	13.91	13.97	13.74	13.80	13.82	15.49	15.81	14.06
Fe_2O_3	6.06	6.46	5.28	6.09	4.35	5.92	4.45	4.24	5.35
FeO	8.31	9.09	7.79	7.93	8.86	8.80	8.10	7.85	7.11
MnO	0.31	0.32	0.19	0.36	0.23	0.26	0.22	0.19	0.22
MgO	3.75	4.19	3.41	3.67	3.49	4.84	3.70	3.30	3.40
CaO	7.34	8.70	7.42	8.02	7.98	10.35	10.15	8.97	7.82
Na_2O	2.93	1.99	2.67	3.02	3.16	2.84	2.66	3.37	3.07
K_2O	1.73	2.11	2.22	1.72	1.91	1.38	1.34	1.43	1.79
P_2O_5	0.52	0.50	0.63	0.79	0.70	0.64	0.49	0.63	0.62
灼失量	2.48	1.53	1.76	3.54	2.31	2.30	2.45	3.16	2.88
总量	99.72	99.75	99.75	99.76	99.74	99.72	99.77	99.72	99.75
$Mg^{\#}$	0.30	0.30	0.29	0.30	0.29	0.34	0.32	0.30	0.30
$Na_2O + K_2O$	4.67	4.10	4.89	4.74	5.08	4.22	4.00	4.79	4.86
CaO/Al_2O_3	0.51	0.63	0.53	0.58	0.58	0.75	0.66	0.57	0.56

注: 由国土资源部湖北地质实验研究所采用 XRF 方法分析, $FeO^I = FeO + 0.9 \cdot Fe_2O_3$, $Mg^{\#} = Mg / (Mg + Fe^{2+} + Fe^{3+})$

表2 巴楚辉绿岩岩脉微量元素组成 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace elemental composition ($\times 10^{-6}$) of the Bachu diabase dikes

样品号	04XJ-98	04XJ-100	04XJ-102	04XJ-106	04XJ-108	04XJ-110	04XJ-112	04XJ-120	04XJ-121
$\mu\text{g/g}$									
La	40.0	35.1	47.3	54.0	47.9	37.7	34.5	42.8	50.0
Ce	87.3	77.6	96.1	111.4	98.5	81.2	76.3	96.5	102.4
Pr	10.8	10.1	12.7	14.4	13.2	10.9	9.6	12.0	13.4
Nd	44.5	41.4	52.0	62.5	53.1	45.3	40.0	51.0	53.9
Sm	8.86	8.46	10.05	11.81	10.67	9.37	7.71	9.68	10.56
Eu	2.71	2.75	3.21	3.84	3.35	3.08	2.61	3.31	3.32
Gd	8.51	8.07	9.41	11.13	9.78	8.50	7.36	8.94	9.95
Tb	1.24	1.17	1.39	1.64	1.41	1.23	1.13	1.37	1.44
Dy	6.61	6.27	7.28	8.04	7.46	6.58	5.69	6.94	7.74
Ho	1.19	1.10	1.38	1.50	1.34	1.15	1.06	1.32	1.39
Er	3.07	2.83	3.34	3.59	3.32	2.87	2.56	3.30	3.55
Tm	0.43	0.39	0.49	0.51	0.49	0.41	0.36	0.44	0.52
Yb	2.55	2.33	2.91	3.02	2.79	2.41	2.19	2.73	2.97
Lu	0.40	0.34	0.47	0.44	0.41	0.36	0.33	0.43	0.44
Sc	22.2	23.9	19.3	15.3	20.1	23.6	19.7	19.3	18.3
V	221	308	212	145	164	301	243	196	166
Mn	2033	2206	1177	2246	1417	1640	1513	1306	1348
Co	21.1	43.3	30.1	18.6	28.3	32.5	34.6	29.3	26.1
Ni	3.88	26.84	0.21	0.72	0.51	57.47	10.71	4.82	0.79
Cu	43.2	132.5	33.0	21.9	50.1	151.3	37.5	26.7	13.9
Zn	110	125	118	163	208	154	185	129	156
Ga	22.9	24.1	22.3	24.6	22.4	22.2	23.2	23.6	23.1
Ge	1.62	1.61	1.89	1.94	1.93	1.75	1.72	1.85	1.83
Rb	44.4	75.9	72.2	43.3	51.5	47.3	40.2	24.8	43.9
Sr	524	552	510	589	486	598	574	608	585
Y	31.8	29.9	35.5	39.9	36.0	31.1	27.6	34.3	36.2
Zr	265	270	301	371	323	263	240	285	327
Nb	36.3	35.8	38.6	64.0	46.8	38.5	34.6	39.5	45.1
Cs	0.94	3.35	3.45	0.33	1.72	2.96	0.89	0.44	1.24
Ba	722	351	559	445	477	452	401	825	660
Hf	6.46	6.35	7.30	8.75	7.69	6.01	5.79	6.84	8.26
Ta	2.48	2.43	2.66	4.28	3.03	2.57	2.39	2.61	3.14
Pb	8.77	11.24	36.79	27.82	14.30	44.83	22.88	9.28	6.65
Th	4.92	4.39	6.09	6.63	5.61	3.91	4.37	4.77	7.64
U	1.11	1.06	1.29	1.72	1.33	1.12	1.05	1.22	1.67
Σ REE	218.06	197.90	248.01	287.76	253.68	211.04	191.50	240.77	261.52
(La/Yb) _n	11.3	10.8	11.7	12.8	12.4	11.2	11.3	11.3	12.1
LREE/HREE	8.1	7.8	8.3	8.6	8.4	8.0	8.3	8.5	8.3
δ Eu	0.96	1.02	1.01	1.03	1.00	1.06	1.06	1.09	0.99
La/Nb	1.10	0.98	1.23	0.84	1.02	0.98	1.00	1.08	1.11
Zr/Nb	7.31	7.53	7.81	5.80	6.91	6.82	6.93	7.22	7.24
Ba/Nb	19.9	9.8	14.5	7.0	10.2	11.7	11.6	20.9	14.6
Nb/U	32.6	33.7	29.8	37.3	35.1	34.3	33.0	32.5	27.0
Ce/Pb	9.9	6.9	2.6	4.0	6.9	1.8	3.3	10.4	15.4

注：由中国科学院广州地球化学研究所 Perkili-Elmer ELAN 6000 ICILMS 分析, 标准化数据引自 Sun and McDonough (1989)

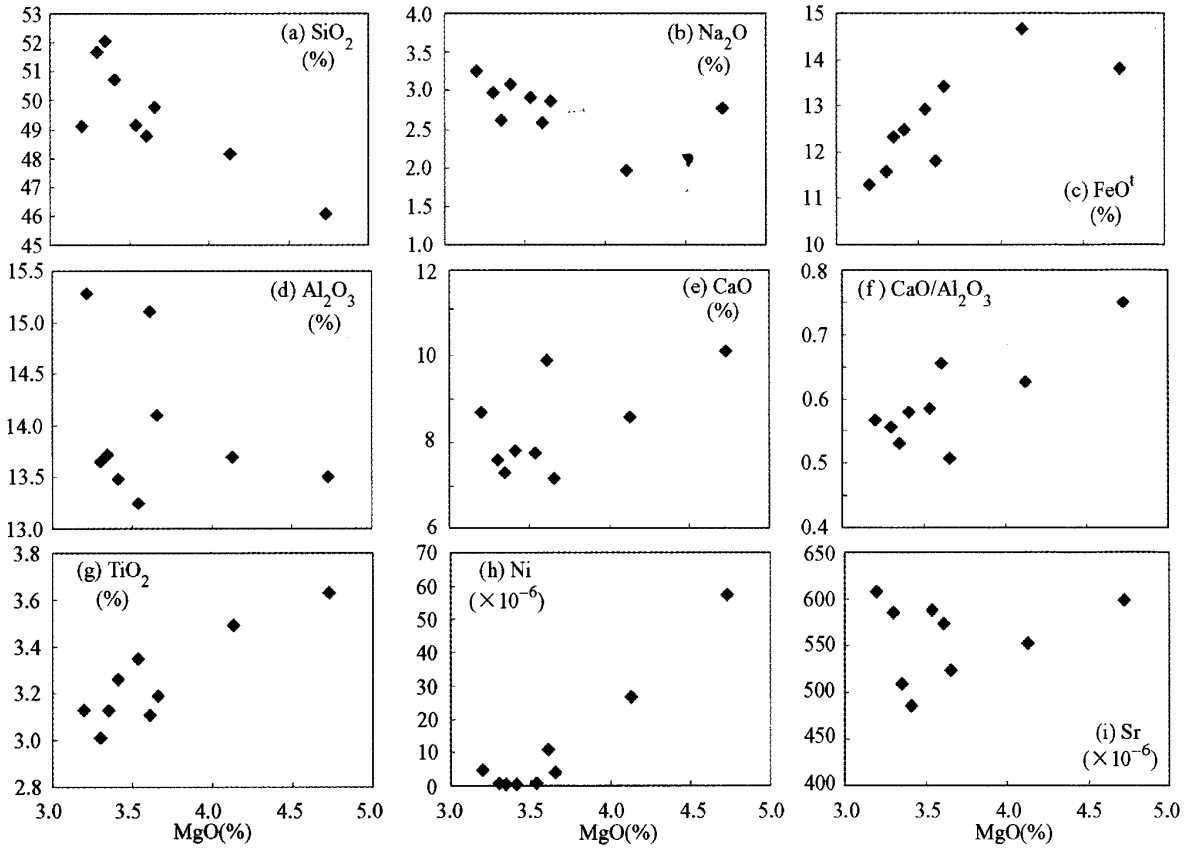


图3 巴楚辉绿岩岩脉主量元素 Sr, Ni 与 MgO 相关图解

Fig. 3 Scatter diagram Plot of major oxides (wt%) and trace elements (plots of $\times 10^{-6}$) vs. MgO (%) for the for the Bachu diabase dikes

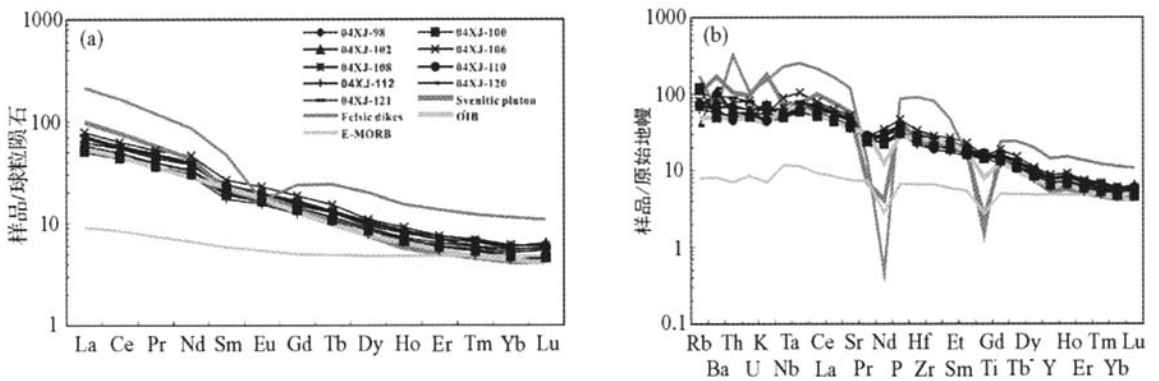


图4 巴楚辉绿岩岩脉、正长岩体及酸性岩脉球粒陨石标准化图解(a)和原始地幔标准化蛛网图解(b)

(球粒陨石和原始地幔标准化数据来自 Sun and McDonough, 1989; 正长岩体和酸性岩脉数据来自杨树峰等, 2006)

Fig. 4 Chondrite normalized REE (a) and Primitive mantle normalized trace (b) diagrams for the Bachu diabase dikes, syenite pluton and felsic dikes

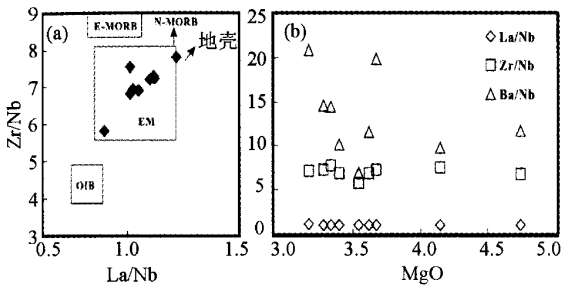


图5 La/Nb-Zr/Nb (a) 以及 MgO-La/Nb、Zr/Nb 和 Ba/Nb(b) 散点图

图 a 中 E-MORB、N-MORB、地壳、OIB 和 EM 范围引自 Weaver (1991)

Fig. 5 Plots scatter diagrams for La/Nbvs. Zr/Nb (a) and La/Nb, Zr/Nb, Ba/Nb vs. MgO(b)

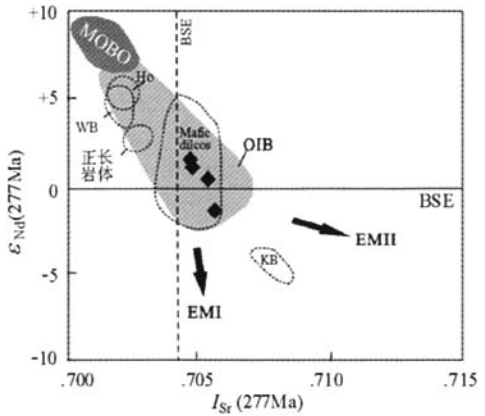


图7 巴楚辉绿岩岩脉 $I_{Sr}(277Ma)$ - $\epsilon_{Nd}(227Ma)$ 图解

HO-夏威夷-洋岛玄武岩(引自 Hawkesworth *et al.*, 1984); WB-瓦吉里塔格超镁铁岩(姜常义等,2004b); KB-柯坪玄武岩(姜常义等,2004c); 正长岩体数据来自作者未发表数据,MORB、OIB、EMI 和 EMII 来自 Weaver, 1991)

Fig.7 $I_{Sr}(277Ma)$ vs. $\epsilon_{Nd}(t)$ diagrams for the Bachu diabase dikes

绿岩样品 $Zr/Nb = 5.80 \sim 7.81$, $Ce/Y = 2.60 \sim 2.83$, 落入石榴石橄榄岩和亏损石榴石橄榄岩熔融线之间(图6),表明上述岩石更可能是含石榴石相橄榄岩源区低程度部分熔融的产物,这与 Foley(1992)关于富 Na 碱性玄武岩常源于地幔岩石低程度部分熔融的观点是一致的。

4.2 Sr-Nd 同位素组成

样品的 Sr、Nd 同位素测试结果列于表 3。 $^{87}Rb/^{86}Sr = 0.2034 \sim 0.4107$, $^{87}Sr/^{86}Sr = 0.705754 \sim 0.707219$, $^{147}Sm/^{144}Nd = 0.1166 \sim 0.1215$, $^{143}Nd/^{144}Nd = 0.512404 \sim 0.512602$, 经 277Ma 年龄校正后,样品 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值变化于 -1.7 与 +2.0 之间,初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 变化于 0.70495 ~ 0.70560 之间。样品的 $f_{Sm/Nd}$ 值变化于 -0.38 与 -0.41 间, t_{DM} 模式年龄 0.9 ~ 1.1 Ga, 高于同时代正长岩的 Nd 模式年龄(0.6 ~ 0.8 Ga, 作者未发表数据)而低于柯坪玄武岩的 Nd 模式年龄(1.4 ~ 1.5Ga, 姜常义等, 2004c)。

在 $^{87}Sr/^{86}Sr(t)$ - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解(图7)中,巴楚辉绿岩具有类似于中国东南沿海新生代起源于软流圈-岩石圈交互作用的板内玄武岩(Chung *et al.*, 1994)的 Sr-Nd 同位素组成,较夏威夷 OIB(Hawkesworth *et al.*, 1984)和中国南海新生代海山玄武岩(Tu *et al.*, 1992)富集,亦比巴楚正长岩体(作者未发表数据)和巴楚南部瓦吉里塔格超镁铁岩(姜常义等, 2004b)富集,而较巴楚东北的柯坪玄武岩(姜常义等,2004c)亏损。

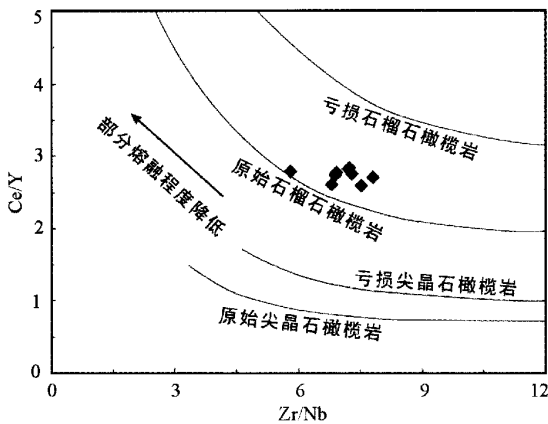


图6 巴楚辉绿岩岩脉 Zr/Nb-Ce/Y 图解(Deniél, 1998)
Fig. 6 Zr/Nb vs. Ce/Y diagrams for the Bachu diabase dikes

始地幔标准化图解中(图4b),除部分样品有着弱的 Sr、P 和 Ti 负异常以外,样品具有比较平滑的配分型式,大离子亲石元素(LILE)相对富集,而高场强元素(HFSE)没有显示出明显的亏损特征,个别样品显示出了 Nb、Ta 的轻微正异常,其配分型式与未经历地壳物质污染的大陆裂谷或洋岛玄武岩类似(李献华等, 1997; 王岳军等, 2004)。Nb、Ta 的弱富集和弱的 Sr 负异常特征表明岩浆演化过程中可能没有遭受到明显的地壳混染作用或源区没有遭受俯冲组分的强烈改造。研究区辉绿岩脉样品 $La/Nb = 0.84 \sim 1.23$, $Zr/Nb = 5.80 \sim 7.81$, $Ba/Nb = 7.0 \sim 20.9$, 在 La/Nb-Zr/Nb 图解中落入富集地幔区域(图5),其 $Ce/Pb = 2.6 \sim 15.4$, $Nb/U = 27.0 \sim 37.3$,也远低于典型 OIB 的 $Ce/Pb(25 \pm 5)$ 和 $Nb/U(47 \pm 7)$ 比值(Hofmann *et al.*, 1986)。Zr/Nb-Ce/Y 图解常被用来判断玄武岩浆的源区矿物相组成(Deniél *et al.*, 1998),巴楚辉

表3 巴楚辉绿岩脉 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Bachu diabase dikes

样号	年龄 (Ma)	Rb ($\times 10^{-6}$)	Sr ($\times 10^{-6}$)	Sm ($\times 10^{-6}$)	Nd ($\times 10^{-6}$)	$\frac{87}{86}\text{Sr}$	$\frac{87}{86}\text{Sr}$	$\frac{147}{144}\text{Sm}$	$\frac{143}{144}\text{Nd}$	$\left(\frac{87}{86}\text{Sr}\right)_i$	ε_{Nd} (t)	$f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$	t_{DM} (Ma)	$t_{2\text{DM}}$ (Ma)
04XJ-98	277	44.4	524	8.86	44.5	0.2456	0.706355	0.1205	0.512525	0.70539	0.5	-0.39	1025	1005
04XJ-102	277	72.2	510	10.05	52.0	0.4107	0.707219	0.1170	0.512404	0.70560	-1.7	-0.41	1177	1187
04XJ-108	277	51.5	486	10.67	53.1	0.3077	0.706166	0.1215	0.512602	0.70495	2.0	-0.38	909	886
04XJ-112	277	40.2	574	7.71	40.0	0.2034	0.705754	0.1166	0.512559	0.70495	1.3	-0.41	930	940

注: 由中国科学院地质与地球物理研究所 VG354 质谱仪分析, 校正年龄(277Ma)引自杨树锋等(2006)

5 讨论

5.1 岩石成因

巴楚辉绿岩样品灼失量变化于 1.53% ~ 3.54%, 反映上述样品可能经历了一定程度的后期蚀变作用, 这种后期蚀变作用可能影响样品部分元素地球化学行为的改变。如 K、Rb、Ba 等在低温蚀变中可发生迁移。上述样品的 K、Rb、Ba 等活性元素含量随灼失量的增加而减少, 表明上述元素在后期蚀变过程中发生了丢失, 但样品中强不相容元素(如 La、Zr、Nb、Ce、Pb、U 等)含量比较稳定, 在不相容元素与灼失量之间未呈现出相关关系。强不相容比值(如 La/Nb、Zr/Nb、Nb/U)等变化较小, 同样与灼失量之间未显示出负相关关系。在微量元素蛛网图和稀土元素标准化图解中, 不形元素表现出相似的配分型式, 这些地球化学变化特征表明上述样品中活性元素可能在低温蚀变过程中发生了一定的迁移, 但后期蚀变对强不相容元素(如 La、Zr、Nb、Ce、Pb、U 等)含量及其比值的影响相对较小。其微量元素比值及其同位素组成能被用来追踪其源区属性与岩石成因。

如前所述, 尽管样品具有较低的 Ce/Pb 和 Nb/U 比值, 可能与岩浆上升过程中受地壳混染有关。但样品没有明显的 Nb、Ta 亏损, 样品有着相对均一的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 且初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值并未随 MgO 的增加而降低, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值也没有显示出随 MgO 含量增加而增加的规律性变化, 表明巴楚辉绿岩脉在岩浆演化过程中没有遭受明显的地壳混染作用影响。

结晶分异作用是岩浆演化过程中另一个重要的影响因素, 所测试的巴楚辉绿岩样品具有变化较大的 La 含量 ($34.5 \times 10^{-6} \sim 54.0 \times 10^{-6}$), 但变化较小的 La/Sm 比值(4.02 ~ 4.73), 显示岩浆演化主要受分离结晶作用控制。样品低 Ni、Co、Sc 和 V, Mg# 变化于 0.29 ~ 0.34, 在 MgO > 4% 时, MgO 和相容元素如 Sc、V、Ni、Co 呈正相关关系, CaO 和 Ca/Al₂O₃ 随 MgO 含量的降低而降低(图 3), 表明岩浆演化早期经历了

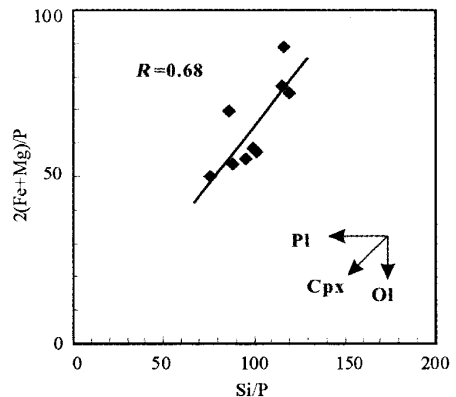


图8 巴楚辉绿岩脉 Si/P-2(Fe+Mg)/P 图解(据 Condie, 1997)

Fig. 8 Si/P vs. 2(Fe+Mg)/P plots for the Bachu diabase dikes

一定的橄榄石和/或单斜辉石的分离结晶作用。在 Si/P-2(Fe+Mg)/P 判别图上(图 8), 样品亦显示出以橄榄石和单斜辉石分离结晶为主的岩浆演化趋势, 这与岩相学观察结果相一致。样品没有明显的 Eu 异常和 Sr、Ba 异常, SiO₂ 与 Eu、Sr 等没有显示出明显的相关关系, 表明岩浆演化过程中斜长石的分异结晶是有限的。而 FeO¹、TiO₂ 和 MgO (< 4% 时) 的明显负相关性以及蛛网图上弱的 P 和 Ti 负异常则可能暗示岩浆演化过程中还存在一定程度的铁-钛氧化物和磷灰石矿物等的分离结晶作用。但分异结晶作用一般对相似分配系数的不相容元素比值和同位素组成是很少改变的, 样品中比值较低的 Ce/Pb 和 Nb/U 比值、变化的不相容比值和 Sr-Nd 同位素组成更有可能是其源区属性的反映。

对源区交代而言, 主要的途径可以分为两类: (1) 与俯冲有关的源区交代作用, 该交代作用以富集大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE), 而亏损高场强元素(HFSE); (2) 软流圈流体/熔体对地幔源区的交代, 该交代作用将导致源区派生岩石富集 LILE、LREE 及 HFSE (Li *et al.*, 2003)。巴楚辉绿岩样品具有弱的 Nb、Ta 正异常, La/Nb 比值(0.84

~1.23) 远低于与俯冲有关的源区派生岩石的相应比值 ($La/Nb > 3$), 因此, 巴楚辉绿岩不可能源于受俯冲改造的富集地幔, 而更有可能派生于受亏损软流圈物质改造的地幔源区, 这种观点也可由下述证据得到证明: 与 CAOB 广泛存在的年轻幔源岩石相比, 巴楚辉绿岩样品 t_{DM} 为 0.9 ~ 1.1 Ga, 高于同时代正长岩的 Nd 模式年龄 (0.6 ~ 0.8 Ga, 作者未发表数据), 而低于柯坪玄武岩的 Nd 模式年龄 (1.4 ~ 1.5 Ga, 姜常义等, 2004c); 除 Nb、Ta 的正异常外, 样品的强不相容元素比值 (如 La/Nb 、 Zr/Nb)、 Ce/Pb 、 Nb/U 比值以及 Sr、Nd 同位素组成均不同于典型源于软流圈地幔的夏威夷 OIB 型和南海新生代海山玄武岩 (Tu *et al.*, 1992; Hawkesworth *et al.*, 1984)。此外, 根据经验公式温度 $T(^{\circ}C) = 2000 \cdot MgO / (MgO + SiO_2) + 969$ (Albarède, 1992), 推断的温度为 1089 ~ 1155 $^{\circ}C$, 略低于软流圈和陆下岩石圈界面的温度 (约 1200 $^{\circ}C$; Wilson, 1989), 而远低于典型 OIB 的形成温度 (约 1500 $^{\circ}C$, Xu, 2001)。

巴楚辉绿岩 Sr、Nd 同位素组成较该地区被认为主要源于软流圈的同时代正长岩体同位素组成 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i = 0.70303 ~ 0.70338, $\epsilon_{Nd}(t) = +3.5 \sim +4.4$ 富集 (作者未发表数据), 而较被认为起源于岩石圈地幔的柯坪玄武岩 Sr-Nd 同位素组成 (姜常义等, 2004c) 要亏损, 在 ($^{87}Sr/^{86}Sr$)_i - $\epsilon_{Nd}(t)$ 图解 (图 7) 中巴楚辉绿岩样品落在巴楚正长岩和柯坪玄武岩 Sr-Nd 同位素组成混合线上, 表明巴楚辉绿岩源区可能与软流圈和岩石圈交互作用有关。在 La/Yb -Th/Ta 判别图解上 (图 9), 巴楚辉绿岩样品位于亏损地幔和富集地幔混合线附近, 亦证实了前述观点。综上所述, 我们更倾向于认为巴楚辉绿岩是软流圈-岩石圈交互作用下地幔岩源区低程度部分熔融的产物。

5.2 构造意义

由于塔里木盆地和西南天山地区存在大规模与二叠纪构造热事件相关的岩浆活动 (杨树锋等, 1996, 2005, 2006; 陈汉林等, 1997; 姜常义等, 2004a, b, c, 2005; 徐学义等, 2005; 夏祖春等, 2005; 夏林圻等, 2006), 因此, 对比区域内同时代岩浆活动的地球化学特征研究能为理解塔里木和西南天山地区二叠纪大地构造演化提供重要信息。

如前所述, 巴楚地区辉绿岩具 OIB 型和富集岩石圈地幔属性的元素-同位素地球化学特征, 能被理解为软流圈-岩石圈相互作用产物, 其起源与软流圈地幔上涌有关, 表明二叠纪时巴楚地区应处于软流圈上隆的岩石圈伸展构造背景。已有的资料显示巴楚地区正长岩体和酸性岩脉具有 A₁ 型花岗岩 (Eby, 1992) 的地球化学特征, Sr-Nd 同位素组成研究表明其具有亏损软流圈组分加入的特点 (见前文, 作者未发表数据), 被认为是非造山作用的产物 (杨树锋等, 1996,

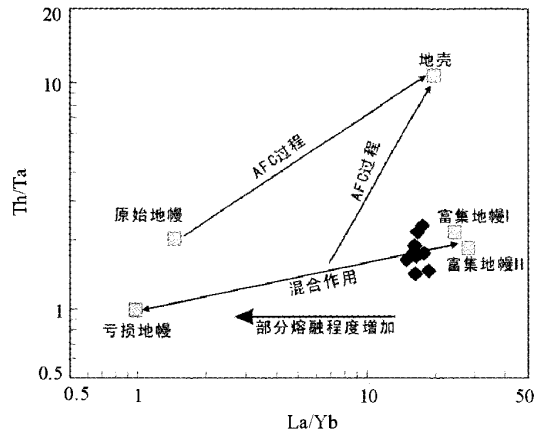


图 9 巴楚辉绿岩岩脉 La/Yb -Th/Ta 图解 (据 Ernst *et al.*, 1988)

Fig. 9 Plots of La/Yb vs. Th/Ta for the Bachu diabase dikes

2005, 2006; 陈汉林等, 1997)。上述资料表明塔里木盆地形成于二叠纪 (约 277 Ma) 的超基性-基性-酸性岩浆组合, 具有板内拉张背景下岩浆作用地球化学特征, 在这种拉张过程中由于软流圈的上涌和岩石圈减薄而导致软流圈-岩石圈界面上升, 岩石圈的拉张减薄导致软流圈地幔地温线与固相线相交而导致软流圈减压部分熔融 (DePaolo and Daley, 2000; Xu, 2001)。

研究表明, 位于塔里木盆地和伊犁地块之间的南天山古洋盆最终关闭于维宪世中期 (姜常义等, 1999)。地球物理研究也显示二叠纪南天山造山带和塔里木盆地有着近一致的区域重力场和磁场 (滕吉文等, 1991), 二叠纪时的南天山造山带和塔里木盆地已处于统一构造背景之下。然而, 与巴楚辉绿岩相比, 其东南侧的瓦吉里塔格地区玄武岩具有更为亏损的 Sr-Nd 同位素组成 (姜常义等, 2004b), 而向北东进入西南天山边缘的柯坪玄武岩则有着较巴楚辉绿岩更为富集的 Sr-Nd 同位素组成 (姜常义等, 2004c); 同样, 巴楚辉绿岩较北缘的库鲁克塔格二叠纪辉绿岩脉 (姜常义等, 2005) 具有更为亏损的 Sr-Nd 同位素组成, 这表明二叠纪时由塔里木盆地内部向西南天山地区地幔源区属性自南而北规律性变化 (图 7), 同样的, 塔里木二叠纪中酸性岩石也同样表现出自北而南的规律性变化, 塔里木盆地的巴楚地区正长岩和酸性岩石具 A₁ 型花岗岩的地球化学特征, 而在西南天山造山带地区, 同期 (年龄为 298 ~ 260 Ma) 花岗质岩石具有 A₂ 花岗岩类岩石地球化学特征, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 -6.51 到 -4.06, 被认为是南天山后造山垮塌作用下被改造源区熔融的结果 (姜常义等, 1999)。对天山石炭-二叠纪后碰撞花岗岩的研究证

实,天山造山带内石炭-二叠纪花岗岩的 Nd 同位素具有明显的时空变化规律,产于裂谷带中的花岗岩普遍具有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和年轻的 Nd 模式年龄,而产于南天山古生代构造岩浆带内的花岗岩普遍具有负的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值和古老的 Nd 模式年龄(夏祖春等,2005;徐学义等,2005;夏林圻等,2006)。塔里木盆地内部及南天山造山带二叠纪岩浆作用地球化学特征的差异可能与岩浆活动所处的不同构造位置以及由此引起的壳幔结构的差异性有关。

6 结论

(1) 巴楚辉绿岩具 OIB 型和富集岩石圈地幔的元素-同位素地球化学特征,能被理解为与二叠纪软流圈和岩石圈相互作用产物,其起源与软流圈地幔上涌有关,表明二叠纪时巴楚地区应处于软流圈上隆的岩石圈伸展构造背景。

(2) 巴楚辉绿岩较东南侧瓦吉里塔格玄武岩具有更为亏损的 Sr-Nd 同位素组成,较北东柯坪玄武岩 Sr-Nd 同位素组成更为富集,二叠纪时地幔源区属性自南而北规律性变化,其地球化学特征差异可能与岩浆活动所处的不同构造位置以及由此引起的壳幔结构的差异性有关。

致谢 衷心感谢两位审稿人对本文提出的宝贵意见!在成文过程中,得到了胡霁琴研究员、朱炳泉研究员、李献华和袁超研究员的指导与帮助,陈新跃博士参与了样品的前期处理工作,在此表示衷心的感谢!

References

- Albarède F. 1992. How deep do common basaltic magmas form and differentiate? *J. Geophys. Res.*, 97: 10997–11009
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Province. 1993. *Regional Geology of Xinjiang Province*. Beijing: Geological Publishing House, 464–468 (in Chinese)
- Chen B and Zhai MG. 2003. Geochemistry of late Mesozoic lamprophyre dykes from the Taihang Mountains, north China, and implications for the sub-continental lithospheric mantle. *Geol. Mag.*, 140(1): 87–93
- Chen HL, Yang SF, Dong CW, Jia CZ, Wei GQ and Wang ZG. 1997. Confirmation of Permian basite zone in Tarim basin and its tectonic significance. *Geochimica*, 26(6): 77–87 (in Chinese with English abstract)
- Chung SL, Sun SS, Tu K, Chen CH and Lee CY. 1994. Late Cenozoic basaltic volcanism around the Taiwan Strait, SE China: Product of lithosphere-asthenosphere interaction during continental extension. *Chem. Geol.*, 1994, 112(1–2): 1–20
- Condie KC. 1997. Sources of Proterozoic mafic dikes: Constrains from Th/Ta and La/Yb ratios. *Precambrian Research*, 81: 3–14
- Deniel C. 1998. Geochemical and isotopic (Sr, Nd Pb) evidence for plume-lithosphere interactions in the genesis of Grande Comore magmas (Indian Ocean). *Chem. Geol.*, 144: 281–303
- DePaolo DJ and Daley EE. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. *Chem. Geol.*, 169: 157–185
- Dong CW, Zhang DR, Xu XS, Yan Q and Zhu GQ. 2006. SHRIMP U-Pb dating and lithochemistry of basic-intermediate dike swarm from Jinjiang, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1696–1702 (in Chinese with English abstract)
- Eby GN. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenesis and tectonic implications. *Geology*, 20: 641–644
- Ernst RE, Fowler AD and Pearce TH. 1988. Modeling of igneous fraction and other processes using Pearce diagrams. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 100: 12–18
- Foley SF. 1992. Petrological characterization of the source components of potassic magmas: Geochemical and experimental constraints. *Lithos*, 28: 187–204
- Han BF, He GQ and Wang SG. 1999. Postcollisional mantle-derived magmatism, underplating and implications for basement of the Junggar Basin. *Science in China (D)*, 29(1): 16–21 (in Chinese)
- Han BF, Wang SG, John BM, Hong DW, Kagami H and Sun YL. 1997. Depleted-mantle source for the Ulungur river A-type granites from North Xinjiang, China: Geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth. *Chem. Geol.*, 138: 135–159
- Hawkesworth CJ, Rogers NW and Calsteren PWC. 1984. Mantle enrichment processes. *Nature*, 311(5984): 331–335
- Hofmann AW, Jochum KP, Seufert M and White WM. 1986. Nb and Pb in oceanic basalts: New constrains on mantle evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 79: 33–45
- Hou GT, Li JH, Halls HC and Qian XL. 2003. The flow structures and mechanics of late Precambrian mafic dyke swarms in north China craton. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 210–215 (in Chinese with English abstract)
- Jahn BM, Wu FY and Hong DW. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia. *Proc. Indian. Acad. Sci. (Earth Planet. Sci.)*, 109(1): 5–20
- Jia CZ. 1997. Tectonic characteristics and oil gas of the Talimu Basin, China. Beijing: Petroleum Industry Press, 46–60 (in Chinese)
- Jiang CY, Mu YM, Bai KY, Zhao XN, Zhang HB and Hei AZ. 1999. Chronology, petrology, geochemistry and tectonic environment of granitoids in the southern Tianshan Mountain, western China. *Acta Petrologica Sinica*, 15(2): 298–308 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Jia CZ, Li LC, Zhang PB, Lu DR and Bai KY. 2004a. Source of the Fe-riched-type high-Mg magma in Mazhartag region, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 78(6): 770–780 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR and Bai KY. 2004b. Petrogenesis and magma source of the ultramafic rocks at Wajilitag region, western Tarim Plate in Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 20(6): 1433–1444 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Zhang PB, Lu DR, Bai KY, Wang YP, Tang SH, Wang JH and Yang C. 2004c. Petrology, geochemistry and petrogenesis of the Kalpin basalts and their Nd, Sr and Pb isotopic compositions. *Geological Review*, 50(5): 492–500 (in Chinese with English abstract)
- Jiang CY, Jiang HB, Ye SF, Xia MZ and Lu DX. 2005. Petrochemical characteristics, Nd, Sr, Pb isotopic compositions and petrogenesis of Permian dike swarm, Kuruktag region, Xinjiang. *Acta Geologica Sinica*, 70(6): 823–833 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Chen ZG, Liu DY and Li WX. 2003. Jurassic gabbro-granite-syenite suites from southern Jiangxi province, SE China: Age, origin, and tectonic significance. *International Geology Review*, 45: 898–921

- Li XH, Hu RZ and Rao B. 1997. Geochronology and Geochemistry of Cretaceous mafic dikes from northern Guangdong, SE China. *Geochimica*, 26(2): 14-31 (in Chinese with English abstract)
- Liu Y, Liu HC and Li XH. 1996. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements using ICP-MS. *Geochimica*, 25(6): 552-558 (in Chinese with English abstract)
- Perry FV, Baldrige WS and DePaolo DJ. 1987. Role of asthenosphere and lithosphere in the genesis of Late Cenozoic basaltic rocks from the Rio Grande rift and adjacent regions of the south western United States. *J. Geophys. Res.*, 92: 9193-9213
- Qiao GS. 1998. Normalization of isotopic dilution analyses: A new program for isotope mass spectrometric analysis. *Scientia Sinica (A)*, 31: 1263-1268
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basins*. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Geological Society Special Publication*, 42: 313-345
- Teng JW. 1991. Geophysical field and oil-gas of Talimu. Beijing: Science Press, 5-10 (in Chinese)
- Thompson RN, Gibson SA, Dickin AP and Smith PM. 2001. Early Cretaceous basalt and picrite dykes of the Southern Etendeka region, NW Namibia: Windows into the role of the Tristan mantle plume in Parana-Etendeka magmatism. *J. Petrol.*, 42(11): 2049-2081
- Tu K, Martin JFF, Richard WC, Xie GH, Chen CY and Zhang M. 1992. Magmatism in the South China Basin: 1. Isotopic and trace-element evidence for an endogenous Dupal mantle component. *Chem. Geol.*, 97(1-2): 47-63
- Walker GPL and Eyre PR. 1995. Dike complexes in American Samoa. *J. Volc. Geother. Res.*, 69: 241-254
- Wang T, Hong DW, Tong Y, Han BF and Shi YR. 2005. Zircon U-Pb SHRIMP age and origin of post-orogenic Lamazhao granitic pluton from Altai orogen: Its implication for vertical continental growth. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 640-650 (in Chinese with English abstract)
- Wang YJ, Liao CL, Fan WM and Peng TP. 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi province and its tectonic implications. *Geochimica*, 33(2): 109-117 (in Chinese with English abstract)
- Weaver BL. 1991. The origin of oceanic basalt end-member compositions: Trace element and isotopic constraints. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 104: 381-397
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis (Global tectonic approach)*. London: Oxford University Press, 1-466
- Windley BF. 1995. *The evolving continents*. 3rd ed. New York: John Wiley, 526
- Xia LQ, Li XM, Xia ZC, Xu XY, Ma ZP and Wang LS. 2006. Carboniferous-Permian rift-related volcanism and mantle plume in the Tianshan, northwestern China. *Northwestern Geology*, 39(1): 1-49 (in Chinese with English abstract)
- Xia ZC, Xu XY, Xia LQ, Li XM, Ma ZP and Wang LS. 2005. Geochemistry of the Carboniferous-Permian post-collisional granitic rocks from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(1): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Xu XY, Ma ZP, Xia ZC, Xia LQ, Li XM and Wang LS. 2005b. Discussion of the sources and characteristics on Sr, Nd, Pb isotopes of the Carboniferous to Permian post-collision granites from Tianshan. *Northwestern Geology*, 38(2): 1-18 (in Chinese with English abstract)
- Xu YG. 2001. Thermo-tectonic destruction of the Archean lithospheric keel beneath the Sino-Korean Craton in China: Evidence, timing and mechanism. *Phys. Chem. Earth*, 26(9-10): 747-757
- Xu YG, Ma JL, Frederick AF, Mark DF and Liu JF. 2005a. Role of lithosphere-asthenosphere interaction in the genesis of Quaternary alkali and tholeiitic basalts from Datong, western North China Craton. *Chem. Geol.*, 224: 247-271
- Yang SF, Chen HL, Dong CW, Jia CZ and Wang ZG. 1996. The discovery of Permian syenite inside Tarim basin and its geodynamic significance. *Geochimica*, 25(2): 121-128 (in Chinese with English abstract)
- Yang SF, Chen HL, Ji DW, Li ZL, Dong CW, Jia CZ and Wei GQ. 2005. Geological process of early to middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance. *Geological Journal of China Universities*, 11(4): 504-511 (in Chinese with English abstract)
- Yang SF, Li ZL, Chen HL, Xiao WJ, Yu X, Lin XB and Shi XG. 2006. Discovery of a Permian quartz syenitic porphyritic dyke from Tarim basin and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1405-1412 (in Chinese with English abstract)
- Zhang HH, Xu YG, Ge WC and Ma JL. 2006. Geochemistry of late Mesozoic-Cenozoic basalts in Yitong-Datun area, Jilin Province and its implication. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1579-1596 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈汉林, 杨树锋, 董传万, 贾承造, 魏国齐, 汪振国. 1997. 塔里木盆地二叠纪基性岩带的确定及大地构造意义. *地球化学*, 26(6): 77-87.
- 董传万, 张登荣, 徐夕生, 闫强, 竺国强. 2006. 福建晋江中-基性岩脉的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学. *岩石学报*, 22(6): 1696-1702
- 韩宝福, 何国琦, 王式光. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地地底的性质. *中国科学(D辑)*, 29(1): 16-21
- 侯贵廷, 李江海, Halls HC, 钱祥麟. 2003. 华北晚前寒武纪镁铁质岩脉的流动构造和侵位机制. *地质学报*, 77(2): 210-215
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 46-60
- 姜常义, 穆艳梅, 白开寅, 赵晓宁, 张虹波, 黑爱芝. 1999. 南天山花岗岩类的年代学. *岩石学、地球化学及其构造环境*. *岩石学报*, 15(2): 298-308
- 姜常义, 贾承造, 李良晨, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅. 2004a. 新疆麻扎尔塔格地区铁富集型高镁岩浆的源区. *地质学报*, 78(6): 770-780
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅. 2004b. 新疆塔里木板块西部瓦吉里塔格地区二叠纪超镁铁岩的岩石成因与岩浆源区. *岩石学报*, 20(6): 1433-1444
- 姜常义, 张蓬勃, 卢登蓉, 白开寅, 王瑶培, 唐索寒, 王进辉, 杨淳. 2004c. 柯坪玄武岩的岩石学、地球化学、Nd、Sr、Pb 同位素组成和岩石成因. *地质评论*, 50(5): 492-500
- 姜常义, 姜寒冰, 叶书锋, 夏明哲, 逯东霞. 2005. 新疆库鲁克塔格地区二叠纪脉岩群岩石地球化学特征, Nd、Sr、Pb 同位素组成与岩石成因. *地质学报*, 70(6): 823-833
- 李献华, 胡瑞忠, 饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. *地球化学*, 26(2): 14-31
- 刘颖, 刘海臣, 李献华. 1996. ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. *地球化学*, 5(6): 552-558
- 路远发. 2004. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459-464
- 滕吉文. 1991. 塔里木地球物理场与油气. 北京: 科学出版社, 5-10

- 王涛,洪大卫,童英,韩宝福,石玉若. 2005. 中国阿尔泰造山带后造山喇嘛昭花岗岩体锆石 SHRIMP 年龄、成因及陆壳垂向生长意义. 岩石学报, 21(3): 640-650
- 王岳军,廖超林,范蔚茗,彭头平. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 型碱性玄武岩的厘定及构造意义. 地球化学, 33(2): 109-117
- 新疆维吾尔自治区地矿局. 1993. 新疆区域地质志. 北京:地质出版社, 464-468
- 夏林圻,李向民,夏祖春,徐学义,马中平,王立社. 2006. 天山石炭—二叠纪大火成岩省裂谷火山作用与地幔柱. 西北地质, 39(1): 1-49
- 夏祖春,徐学义,夏林圻,李向民,马中平,王立社. 2005. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩质岩石地球化学研究. 西北地质, 38(1): 1-14
- 徐学义,马中平,夏祖春,夏林圻,李向民,王立社. 2005. 天山石炭—二叠纪后碰撞花岗岩的 Sr、Nd、Pb 同位素源区示踪. 西北地质, 38(2): 1-18
- 杨树锋,陈汉林,董传万,贾承造,汪振国. 1996. 塔里木盆地二叠纪正长岩的发现及其地球动力学意义. 地球化学, 25(2): 121-128
- 杨树锋,陈汉林,冀登武,厉子龙,董传万,贾承造,魏国齐. 2005. 塔里木盆地早—中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. 高校地质学报, 11(4): 504-511
- 杨树锋,厉子龙,陈汉林,肖文交,余星,林秀斌,施锡桂. 2006. 塔里木二叠纪石英正长斑岩岩脉的发现及其构造意义. 岩石学报, 22(5): 1405-1412.
- 张辉煌,徐义刚,葛文春,马金龙. 2006. 吉林伊通-大屯地区晚中生代—新生代玄武岩的地球化学特征及其意义. 岩石学报, 22(6): 1579-1596