西天山玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的微量元素地球化学及同位素年代学研究*

牛贺才[1] 单强[1] 罗勇[1,2] 杨武斌[1,2] 周昌平[3] 廖思平[4] 于学元[1]

NIU HeCai[1], SHAN Qiang[1], LUO Yong[1,2], YANG WuBin[1,2], ZHOU ChangPing[3], LIAO SiPing[4] and YU XueYuan[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所,广州 510640
2. 中国科学院研究生院,北京 100049
3. 新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队,乌苏 833000
4. 江西省地质调查研究院,南昌 330030

1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *No. 7 Geological Survey Team, Xinjiang Bureau of Geology and Mineral Resource Exploration, Wusu* 833000, *China*
4. *Jiangxi Provincial Institute of Geological Survey, Nanchang* 330030, *China*

2010-03-17 收稿, 2010-05-27 改回.

Niu HC, Shan Q, Luo Y, Yang WB, Zhou CP, Liao SP and Yu XY. 2010. Geochronological and geochemical studies on quartz diorite in Yuximolegai Daban, West Tianshan and its tectonic implication. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10): 2935-2945

Abstract The relatively less variable major element contents of the quartz diorite from Yuximolegai Daban and their CA/TH index about 1.2 indicated that they should belong to the calc-alkaline series rocks. The quartz diorite might be the co-magmatic rocks with the associated calc-alkaline basaltic andesite of the Dahalajunshan Formation. Both of them are the products of partial melting of the enriched spinel-lherzolite, and their formation was controlled by the fluid derived from the dehydration of the subducting plate. This process of enrichment and metasomatism in primary mantle wedge illustrated the significant characteristics of continental contamination in the quartz diorite of Yuximolegai Daban. The obvious depletion of HFSE, including Nb, Ta, Zr, Hf, Ti and the Pb enrichment demonstrate that the characteristics of igneous rocks in orogenic belt related to the plate subduction, which formed in the island arc of the active continental margin. So, this quartz diorite occurred in a compressive tectonic setting while the high-K series of volcanic lava in the Dahalajunshan Formation was formed in an extensional tectonic setting induced by the plate-slit. The concordia age of 309.9 ± 2.7Ma obtained from zircon grains in the quartz diorite, implicated that the igneous rocks of the Dahalajunshan Formation in eastern Awulale Mountains was formed in Late Carboniferous.

Key words Yuximolegai Daban; Quartz diorite; Calc-alkaline basaltic andesite; U-Pb dating; Tectonic setting

摘 要 玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的主量元素组成相对稳定,SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、$Fe_2O_3^T$、MgO、CaO、Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 57.08% ~59.95%、0.70% ~0.85%、16.34% ~16.81%、6.73% ~8.51%、2.82% ~3.55%、5.72% ~6.91%、3.22% ~3.90%和 1.44% ~1.96%。该类岩的 CA/TH 指数在 1.2 左右变化,应属钙碱性系列岩石。主量元素和微量元素地球化学特征显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与区域内的大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩为同源岩浆岩,它们是富集的尖晶石二辉橄榄岩部分熔融的产物,原始地幔楔的富集受俯冲板块脱水形成流体控制,这种源区富集交代过程导致玉希莫勒盖石英闪长岩具有明显的陆壳混染特征。玉希莫勒盖石英闪长岩明显亏损 Nb-Ta、Zr-Hf、Ti 等高场强元素,同时富集 Pb,显示出与板块俯冲作用有关造山带岩浆岩的特征,形成于活动陆缘岛弧。与大哈拉军山组高钾系列火山熔岩形成于板片撕裂诱发的伸展构造

* 本文受中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-107)和"十一五"国家科技支撑计划(2006BAB02-03)联合资助.
第一作者简介: 牛贺才,男,1963 年生,研究员,地球化学专业, E-mail: niuhc@gig.ac.cn

环境不同,石英闪长岩形成于挤压的构造环境。单颗粒锆石 U-Pb 定年结果显示,石英闪长岩的形成年龄为 309.9 ±2.7Ma,暗示阿吾拉勒东段大哈拉军山组火山岩的形成时代为晚石炭世。

关键词 玉希莫勒盖达坂;石英闪长岩;钙碱性玄武安山岩;U-Pb 定年;构造环境

中图法分类号 P588.122; P597.3

1 引言

玉希莫勒盖达坂矿床是一个新发现的金铜矿床,目前在矿区范围内已圈定了 4 个工业矿体,它与松树沟铜矿、阿拉斯坦铜矿等构成了一条重要的金铜矿化带,是阿吾拉勒地区铜金成矿预测和找矿的重要靶区。矿区出露的地层由老到新依次是石炭系的大哈拉军山组、阿克沙克组和伊什基里克组、上二叠统铁木里克组、下侏罗统八道湾组及第四系。已圈定的 4 个工业矿体其中 3 个产在大哈拉军山组地层中,大哈拉军山组是主要的含矿地层。研究显示,在大哈拉军山组地层内不但存在着钙碱性火山熔岩,还存在着少量由高钾钙碱性玄武安山岩和粗安岩组成的高钾系列火山熔岩(罗勇等,2009),显示了聚合板块边缘构造体制由挤压向伸展转变时火山活动的特征(Blatter *et al.*, 2003; Bonin, 2004; Callegari *et al.*, 2004; Cortesogno *et al.*, 1998; Duggen *et al.*, 2005; Gill *et al.*, 2004; Muller *et al.*, 1992)。此外,在该地区还分布着相当数量的侵入岩,包括石英闪长岩、闪长玢岩、英云闪长岩、石英正长岩及少量的煌斑岩脉,其中以石英闪长岩出露面积最大。在玉希莫勒盖矿区侵入岩也是一个重要的含矿岩石,目前已圈定的 3 号矿体就产在闪长玢岩体内,其矿化特征与典型的斑岩型矿床相似(罗勇等,2009)。罗勇等(2009)对石炭系大哈拉军山组火山岩的主量和微量元素地球化学特征进行了系统研究,并探讨其形成的动力学环境和成矿作用。本文旨在通过对玉希莫盖达坂矿区广泛出露的石英闪长岩的主量元素和微量元素地球化学特征及同位素年代学的研究,揭示石英闪长岩类侵入岩的成因,探讨该类岩石与火山熔岩的内在联系及形成的构造背景。

2 玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的岩石学特征

石英闪长岩分布在玉希莫勒达坂中部,出露面积约 21km^2,呈北西向带状展布,宽 230 ~ 600m,北东侧与下石炭统大哈拉军山组一段(C_1d^1)、阿克沙克组(C_1a)和八道湾组(J_1b)均呈断层接触,南西侧与下石炭统大哈拉军山组二段(C_1d^2)呈侵入接触,两端延出区外(图 1),外接触带有角岩化、绿泥石化和褪色化。主要岩性为石英闪长岩,同时出现了英云石英闪长岩。石英闪长岩呈灰色,他形-半自形粒状结构,块状构造。主要矿物成分为长石、角闪石和少量的石英、黑云母。长石含量大约占 70%,其中斜长石约为 50%,钾长石约为 20%。斜长石多为半自形板状,颗粒较大,其长

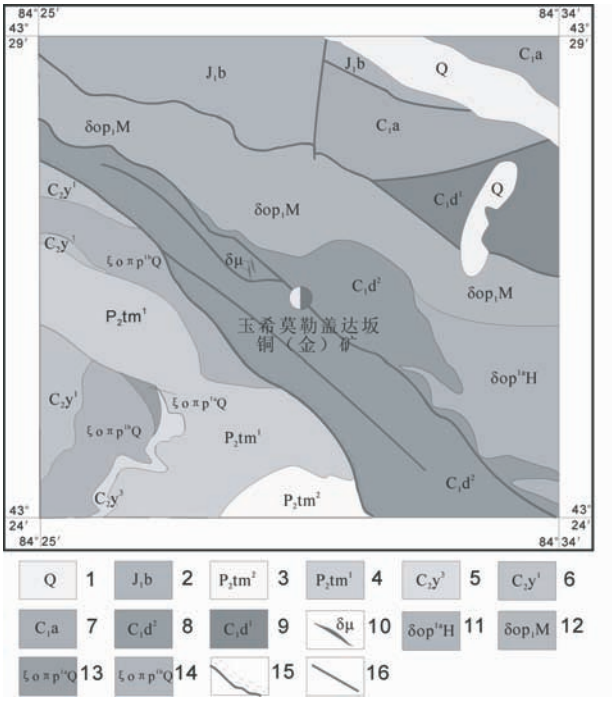


图 1 玉希莫勒盖达坂地质简图

1-第四纪;2-八道湾组;3-铁木里克组二段;4-铁木里克组一段;5-依什基里克组三段;6-依什基里克组一段;7-阿克沙克组;8-大拉哈军山组二段;9-大拉哈军山组一段;10-闪长玢岩;11-细粒石英闪长岩;12-英云石英闪长岩;13-细晶石英正长斑岩;14-粗斑石英正长斑岩;15-韧性断层糜棱岩;16-断层

Fig. 1 Simplified geologic map of Yuximolegai Daban

1-Quaternary; 2-Badaowan Formation; 3-The second section of Tiemulike Formation; 4-The first section of Tiemulike Formation; 5-The third section of Yishijilike Formation; 6-The first section of Yishijilike Formation; 7-Akeshake Formation; 8-The second section of Dahalajunshan Formation; 9-The first section of Dahalajunshan Formation; 10-Diorite-porphyrite; 11-Fine-grained quartz diorite; 12-Tonalite; 13-Fine-grained quartz syenite porphyry; 14-Macrocrystal quartz syenite porphyry; 15-Ductile fault and mylonite; 16-Fault

一般在 2 ~ 3mm 左右,而宽则介于 1 ~ 2mm 之间,双晶较发育;钾长石为他形板状,分布在斜长石与斜长石或斜长石与角闪石之间,结晶明显晚于斜长石和角闪石,矿物颗粒明显小于斜长石,其长一般在 1 ~ 2mm 左右,而宽则介于 0.5 ~ 1mm 之间。在玉希莫勒盖达坂石英闪长岩中角闪石含量在 15% ~20% 之间变化,它多呈半自形-他形颗粒产出,矿物颗粒略小于斜长石,但大于钾长石,常与黑云母共生。石英约占 5% ~7%,呈他形粒状产出;黑云母含量为 5% ~8%,主要分布在角闪石边部,部分产在斜长石矿物的空隙间。副矿

物主要为磁铁矿、磷灰石、榍石和锆石。次生矿物为绢云母和绿泥石。

3 分析方法

本研究的主量元素和微量元素分析是作者在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室分别采用 X 射线荧光法(XRF)和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成的,主量元素分析精度大多数优于 5%,微量元素分析精度大多优于 10%。造岩矿物的电子探针分析也是作者在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学与地球化学重点实验室利用 JEOL-JXA 8100 完成的。实验条件为:加速电压 15kV, 电流 20nA, 电子束直径 1μm。

锆石 U-Pb 定年在中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室的 Cameca IMS-1280 型二次离子质谱仪(SIMS)上进行,详细的分析流程见 Li *et al.* (2009)。用强度为 10nA 一次氧负离子束通过 -13kV 加速电压轰击样品表面,束斑约为 20×30μm。二次离子经过 60eV 能量窗过滤,质量分辨率为 5400。为了在高质量分辨率下获得高的二次离子传输率,采用了二次离子光学系统中的矩形透镜模式。锆石样品的 Pb/U 比值用标准锆石 TEMORA (417Ma)的 ln($^{206}Pb/^{238}U$)与 ln($^{238}U^{16}O_2/^{238}U$)之间的线性关系校正,Th 和 U 含量用标准锆石 91500(Th = 29×10^{-6}, U = 80×10^{-6})校正,计算普通 Pb 用测量的^{204}Pb 进行校正。由于测得的普通 Pb 含量非常低,可以认为普通 Pb 主要来源于制样过程中带入的表面 Pb 污染,用现代地壳的平均 Pb 同位素组成作为普通 Pb 组成进行校正。单点分析的同位素比值及年龄误差为 1σ,U-Pb 平均年龄误差为 95%(即 2σ)置信度。数据结果处理采用 Isoplot 3.0 软件(Ludwig, 2003)。

4 分析结果

4.1 矿物特征

电子探针分析结果显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩斜长石 SiO_2、Al_2O_3、CaO、Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 58.86% ~ 61.40%、24.71% ~ 25.62%、4.17% ~ 7.79%、4.44% ~ 7.62% 和 0.24% ~ 5.10%。与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩和粗安岩所含斜长石斑晶相比(罗勇等,2009),玉希莫勒盖达坂石英闪长岩中斜长石明显贫钙富钠。石英闪长岩中钾长石的 SiO_2、Al_2O_3 和 K_2O 的含量分别为 63.51% ~ 65.31%、17.51% ~ 18.15% 和 16.84% ~ 17.49%,而 CaO 和 Na_2O 的含量则分别小于 0.11% 和 0.86%。角闪石的 SiO_2、TiO_2、Al_2O_3、FeO、MgO、CaO、Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 46.13% ~ 48.97%、0.27% ~ 1.92%、5.17% ~ 7.12%、14.15% ~ 16.29%、10.29% ~ 12.34%、10.89% ~ 12.44%、0.63% ~ 1.14% 和 0.44% ~ 0.88%,其中 FeO、MgO、CaO 的含量明显低于大哈拉军山组钙碱性玄武岩角闪石斑晶。

4.2 主量元素和微量元素地球化学特征

4.2.1 主量元素地球化学特征

玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的主量元素组成相对稳定,SiO_2、Al_2O_3、TiO_2、$Fe_2O_3^T$、MgO、CaO、Na_2O 和 K_2O 的含量分别为 57.08% ~ 59.95%、0.70% ~ 0.85%、16.34% ~ 16.81%、6.73% ~ 8.51%、2.82% ~ 3.55%、5.72% ~ 6.91%、3.22% ~ 3.90% 和 1.44% ~ 1.96%(表 1),$Mg^{\#}$ 也在很窄的(47.3 ~ 50.5)范围内变化。该类岩石的全碱含量($Na_2O + K_2O$)为 4.85% ~ 5.85%,在 Middlemost (1994)的岩石分类图解中,其投影点均落入石英闪长岩区域。玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的 $Al_2O_3/Na_2O + K_2O$(分子数)比值为 1.92 ~ 2.19,$Al_2O_3/CaO + Na_2O + K_2O$(分子数)比值为 0.83 ~ 0.93,属于铝质岩石(Maniar and Piccoli,1989)。该类岩的 CA/TH 指数在 1.2 左右变化,应属钙碱性系列岩石(Hora *et al.*,2009);岩石的 FeO^*/MgO 比值为 2.06 ~ 2.29,在 TiO_2-FeO^*/MgO 图解上其投影点落在大陆岛弧的区域内(Allen, 2000)。

4.2.2 微量元素地球化学特征

玉希莫勒盖达坂石英闪长岩过渡族元素 Sc、Ti、V、Cr、Mn 和 Zn 的含量相对稳定,分别为 21.7×10^{-6} ~ 28.4×10^{-6}、4848×10^{-6} ~ 6525×10^{-6}、165×10^{-6} ~ 220×10^{-6}、14.0×10^{-6} ~ 25.8×10^{-6}、1060×10^{-6} ~ 1468×10^{-6} 和 43.9×10^{-6} ~ 75.9×10^{-6},而 Co、Ni 和 Cu 的含变化较大,分别为 17.7×10^{-6} ~ 43.0×10^{-6}、5.88×10^{-6} ~ 13.9×10^{-6} 和 12.0×10^{-6} ~ 41.5×10^{-6}(表 1)。与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩相比,石英闪长岩的过渡族元素含量均有所降低(罗勇等,2009),这可能与其 SiO_2 含量增加有关。玉希莫勒盖达坂石英闪长岩大离子亲石元素 Rb、Sr 和 Ba 的含量分别为 39.4×10^{-6} ~ 63.4×10^{-6}、287×10^{-6} ~ 393×10^{-6} 和 246×10^{-6} ~ 488×10^{-6},与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩相比,Sr 和 Ba 的含量相当,但 Rb 的含量略有降低(罗勇等,2009)。石英闪长岩的稀土元素总量为 82.3×10^{-6} ~ 121×10^{-6},$(La/Sm)_N$、$(La/Yb)_N$、$(Dy/Yb)_N$、δEu 和 δCe 分别为 1.83 ~ 2.38、2.56 ~ 4.54、1.06 ~ 1.21、0.79 ~ 0.92 和 0.95 ~ 1.21,显示该类岩石的轻稀土与重稀土、轻稀土与轻稀土及重稀土与重稀土之间分馏不明显、没有明显的 Eu 和 Ce 异常,其稀土元素分布模式为平滑缓倾斜的右倾曲线(图 2a)。与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩相比,除总量略有增加外,其它稀土元素地球化学特征十分相似。原始地幔标准化的微量元素蛛网图显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩表现为 Nb-Ta、Zr-Hf、Ti 的亏损 Pb 的富集(图 2b),显示出与板块俯冲作用有关造山带岩浆岩的特征(Altherr *et al.*, 2008; Boari *et al.*, 2009; Foley *et al.*, 1987),暗示石英闪长岩形成于岛弧环境。

玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩一样,其 Ba/Nb 的比值变化较大,而 Ba/Rb 的比值

表 1 玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的主量元素(wt%)与微量元素($\times10^{-6}$)含量

Table 1 Major (wt%) and trace ($\times10^{-6}$) element compositions of quartz diorite in Yuximolegai Daban

样品号	08G-1	08G-2	08G-3	08G-4	08G-5	08G-6	YX8-1	YX8-2	YX8-3	YX8-4	YX8-5
SiO_2	59.64	59.27	59.87	59.84	57.08	59.56	59	59.95	59.63	59.76	59.12
TiO_2	0.75	0.76	0.79	0.77	0.85	0.82	0.76	0.75	0.7	0.74	0.74
Al_2O_3	16.81	16.56	16.53	16.52	16.68	16.77	16.42	16.48	16.43	16.55	16.34
Fe_2O_3	7.05	7.2	7.19	7.17	8.51	7.25	7.14	6.73	6.97	6.95	7.05
MnO	0.12	0.12	0.12	0.12	0.14	0.12	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
MgO	2.86	2.92	2.82	2.92	3.55	2.79	3.11	2.87	3.05	2.85	3.07
CaO	6.17	5.99	5.92	6.07	6.91	5.72	6.57	6.15	6.51	6.35	5.98
Na_2O	3.46	3.5	3.5	3.48	3.22	3.69	3.47	3.58	3.46	3.59	3.9
K_2O	1.86	1.75	1.86	1.84	1.63	1.44	1.78	1.96	1.86	1.7	1.95
P_2O_5	0.13	0.14	0.14	0.14	0.15	0.15	0.14	0.13	0.14	0.12	0.12
LOI	0.83	1.44	0.91	0.79	0.94	1.37	1.37	1.17	1.02	1.16	1.48
Total	99.67	99.67	99.66	99.66	99.67	99.68	99.9	99.91	99.92	99.91	99.9
Sc	22.7	31.6	22.4	22.6	28.4	21.7	22.8	20.7	22.3	20.6	22.2
Ti	5082	6525	5626	5245	6404	5712	5133	4908	4649	4877	4848
V	173	220	173	176	219	165	177	170	176	171	174
Cr	18.4	22	18.7	16.6	24.4	14	23.5	25.8	20.7	20.7	19.7
Mn	1089	1468	1146	1082	1374	1124	1147	1105	1111	1060	1086
Co	32.7	36.4	29.9	32.8	43	37	20.3	17.7	18.1	17.3	18
Ni	8.27	10.9	6.48	7.94	13.9	5.88	11.4	12.1	11.7	8.95	9.94
Cu	34	41.5	25.2	36.4	43.4	36.4	18.9	17.2	22.5	12	22
Zn	49.3	75.9	43.9	55.6	69.6	68.7	53.8	47	51.1	43.9	47
Ga	19	24.1	18.7	18.4	19.7	18.8	17.9	17.7	17.7	17.8	17.2
Ge	1.68	2.08	1.68	1.55	1.74	1.7	1.56	1.5	1.75	1.68	1.725
Rb	57.5	63.4	58.7	56.1	59.3	39.4	55.4	53.2	52.1	44.5	55.9
Sr	311	393	303	306	329	310	298	297	287	298	294
Y	24.1	31.7	22.5	23.9	24.3	23.3	24.3	22.1	24.6	21.6	23.4
Zr	97.7	125	92.3	89.5	73.7	106	118	161	108	154	109
Nb	5.34	6.49	5.66	5.24	5.42	5.29	4.51	4.61	4.34	4.37	4.41
Cs	/	/	/	/	/	/	1.3	1.43	1.21	1.03	0.6
Ba	386	488	407	412	246	400	350	409	365	366	412
La	14.6	18.5	15.2	14.8	14.4	15.8	13.5	13.1	13.9	13.1	12.7
Ce	31.8	41.2	33.3	32.2	31.5	33.3	29.6	28.8	31.1	28.2	28.2
Pr	4.44	5.79	4.59	4.65	4.48	4.71	3.93	3.78	4.14	3.72	3.8
Nd	19.3	25.2	18.9	19.6	19	19.9	17.3	16.2	17.7	16	16.7
Sm	4.34	5.89	4.25	4.37	4.46	4.46	3.91	3.6	4.04	3.56	3.88
Eu	1.16	1.52	1.11	1.17	1.16	1.27	1.14	1.11	1.08	1.12	1.07
Gd	4.21	5.63	4.00	4.27	4.39	4.29	4.28	3.92	4.31	3.85	4.05
Tb	0.75	0.95	0.69	0.75	0.71	0.72	0.79	0.7	0.77	0.7	0.75
Dy	4.56	6.17	4.43	4.68	4.54	4.38	4.74	4.3	4.74	4.18	4.53
Ho	0.95	1.28	0.92	0.99	0.99	0.95	0.96	0.86	0.96	0.86	0.93
Er	2.75	3.71	2.75	2.86	2.72	2.59	2.78	2.51	2.9	2.57	2.66
Tm	0.39	0.56	0.41	0.41	0.4	0.39	0.42	0.4	0.44	0.39	0.41
Yb	2.68	3.63	2.48	2.58	2.57	2.49	2.78	2.63	2.92	2.63	2.75
Lu	0.42	0.57	0.4	0.43	0.42	0.38	0.43	0.42	0.46	0.4	0.44
Hf	2.76	3.43	2.66	2.74	2.11	2.88	3.33	4.49	3.31	4.26	3.23
Ta	0.42	0.46	0.44	0.43	0.39	0.37	0.37	0.39	0.39	0.37	0.39
Pb	4.53	8.14	5.57	4.51	5.64	5.01	7.35	4.07	4.18	4.18	3.42
Th	5.21	6.1	5.44	4.66	6.51	4.76	4.4	4.4	4.61	4.23	5.84
U	1.53	1.51	1.41	1.29	1.13	1.03	1.35	1.15	1.37	1.1	1.4

相对稳定,说明岩石受后期蚀变作用的影响较小(Zhang and O'Reilly, 1997),这与岩相学观察相吻合,在薄片中仅见长石发生了轻微的绢云母化和角闪石发生了轻微的绿泥石化,其主量元素和微量元素分析结果基本上代表了原始岩浆的特征。

4.3 单颗粒锆石的 U-Pb 年龄测定

为了确定石英闪长岩的形成时代,利用 Cameca IMS-1280 型二次离子质谱仪(SIMS)对单颗粒锆石 U-Pb 定年。

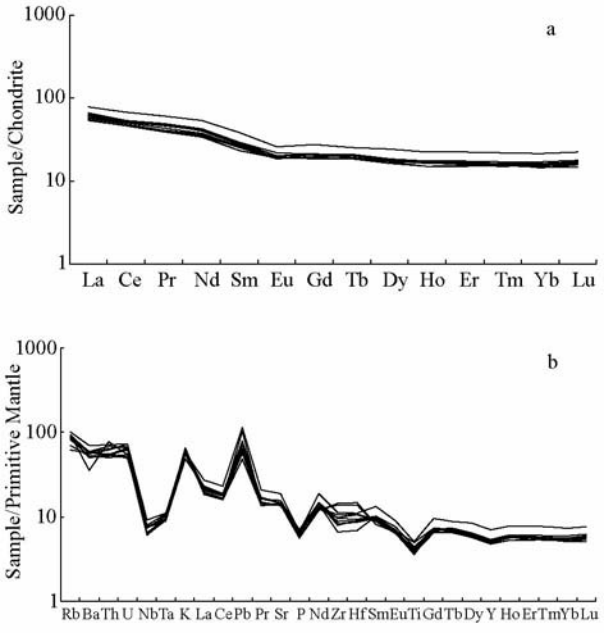


图 2 玉希莫勒盖达坂石英闪长岩稀土元素分布模式(a)和微量元素蛛网图(b)(标准化值分别据 Evensen *et al.*, 1978; Sun and McDonough, 1989)

Fig. 2 REE distribution patterns (a) and trace element spider diagrams (b) of quartz diorite in Yuximolegai Daban (chondrite values from Evensen *et al.*, 1978; primitive mantle values from Sun and McDonough, 1989)

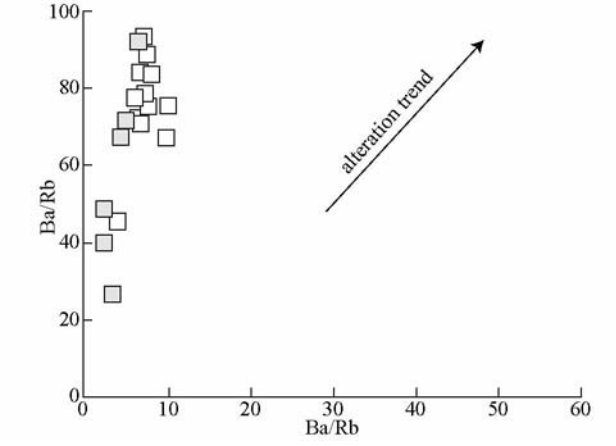


图 3 石英闪长岩和钙碱性玄武安山岩 Ba/Rb-Ba/Nb 图解(据 Zhang and O'Reilly, 1997)

空心方块为石英闪长岩;实心方块为大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩. 图 5 ~ 图 8 图例同此图

Fig. 3 The Ba/Rb-Ba/Nb plot (after Zhang and O'Reilly, 1997)

Open square-the quartz diorite in Yuximolegai Daban; solid square-the calc-alkaline basaltic andesite in Dahalajunshan Formation. The legends in Fig. 5 ~ Fig. 8 are same as those in this figure

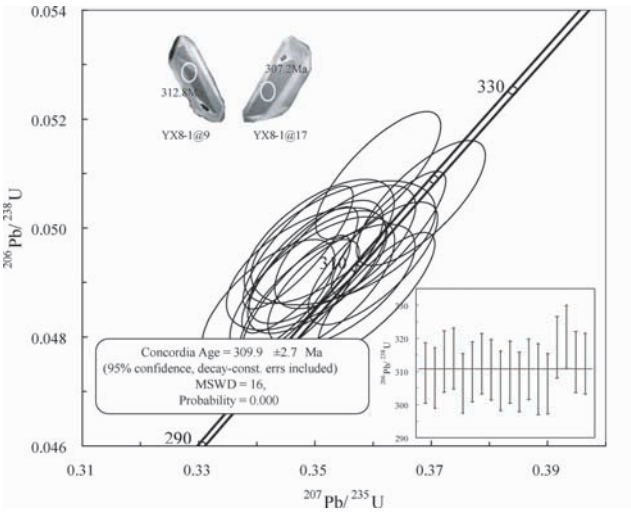


图 4 玉希莫勒盖达坂石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

椭圆为 IMS-1280 分析点,约为 20 × 30μm

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams showing SIMS-1280 analyses of zircon from the quartz diorite in Yuximolegai Daban

The ellipses of analytical spots are 20 × 30μm

石英闪长岩的锆石为透明浅黄褐的长柱状晶体,柱面较发育,锥面相对不发育,其长在 150 ~ 200μm 之间变化,而宽则介于 40 ~ 60μm 之间(图 4)。锆石结构相对简单,具有明显的振荡环带和较高的 Th/U 比值,是典型岩浆成因锆石(Vavra *et al.*, 1996; Vavra *et al.*, 1999; Belosova *et al.*, 2002)。锆石的 U、Th 含量相对稳定,分别为 107.2×10^{-6} ~ 382.8×10^{-6} 和 73.4×10^{-6} ~ 511.5×10^{-6}。除测点 10、11 结果偏大(326.0Ma 和 327.4Ma)和测点 12 结果偏小(294.0Ma)外,其余 15 个测点的结果均比较接近,在 304 ~ 318Ma 之间变化(表 2),18 个测点的 $^{206}Pb/^{238}U$ 加权平均年龄为 310.8Ma,其谐和年龄为 309.9 ± 2.7Ma,二者十分接近(图 4),表明该分析结果具有较高的可信度。

5 讨论

5.1 石英闪长岩与大哈拉军山组火山熔岩的关系及成岩物质来源

大哈拉军山组地层在西天山地区广泛出露,是该区重要的含矿建造。目前关于其形成环境的认识仍存在聚合板块边界和离散板块边界之争(车自成等,1996;姜常义等,1995,1996;夏林圻等,2004;陈衍景等,2004a, b;朱永峰等,2006a, b)。在玉希莫勒盖达坂地区的大哈拉军山组地层中虽然厘定出了高钾火山熔岩(高钾钙碱性玄武安山岩和粗安岩),但仍以钙碱性玄武岩和玄武安山岩为主,它与区内同属钙碱性岩浆岩的石英闪长岩关系如何?尽管石英闪长岩与大哈拉军山组钙碱性火山熔岩在主量元素组成方面存在着

表 2 SIMS 锆石 U-Pb 年龄分析结果

Table 2 Zircon U-Pb data of the quartz diorite determined by CAMECA IMS-1280

Sample Spot	U ($\times10^{-6}$)	Th ($\times10^{-6}$)	Th/U	f_{206} (%)	$^{207}Pb/^{235}U$	±σ (%)	$^{206}Pb/^{238}U$	±σ (%)	$^{207}Pb/^{206}Pb$	±σ (%)	$^{207}Pb/^{235}U$ 年龄 (Ma)	±σ (%)	$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄 (Ma)	±σ (%)
YX8-1@1	107.2	73.4	0.84	0.25	0.34860	2.61	0.04925	1.50346	0.051335	2.14	303.7	6.9	309.9	4.6
YX8-1@2	212.3	227.1	1.18	0.05	0.34736	1.95	0.04868	1.50016	0.051749	1.25	302.7	5.1	306.4	4.5
YX8-1@3	319.9	391.4	1.19	0.05	0.36268	1.79	0.04990	1.50398	0.052712	0.97	314.2	4.8	313.9	4.6
YX8-1@4	141.3	108.2	0.96	0.21	0.35073	2.43	0.04975	1.51019	0.051127	1.90	305.3	6.4	313.0	4.6
YX8-1@5	141.6	114.3	0.81	0.09	0.35457	2.35	0.04894	1.51761	0.052541	1.80	308.2	6.3	308.0	4.6
YX8-1@6	143.7	120.4	0.95	0.16	0.35032	2.24	0.04919	1.50918	0.051650	1.65	305.0	5.9	309.6	4.6
YX8-1@7	365.1	501.9	1.90	0.08	0.34711	1.80	0.04964	1.50001	0.050714	0.99	302.5	4.7	312.3	4.6
YX8-1@8	382.8	511.5	1.47	1.18	0.35521	2.25	0.04965	1.50091	0.051887	1.67	308.6	6.0	312.4	4.6
YX8-1@9	153.0	128.8	0.96	0.14	0.35490	2.95	0.04973	1.50897	0.051764	2.53	308.4	7.9	312.8	4.6
YX8-1@10	241.6	228.6	1.21	0.13	0.36090	1.96	0.05096	1.51884	0.051359	1.25	312.9	5.3	320.4	4.7
YX8-1@11	203.1	182.3	0.90	0.09	0.36823	1.99	0.05046	1.50091	0.052928	1.30	318.3	5.4	317.3	4.6
YX8-1@12	184.7	168.0	1.12	0.30	0.34203	2.20	0.04867	1.52024	0.050971	1.59	298.7	5.7	306.3	4.5
YX8-1@13	130.0	106.7	0.91	0.30	0.34955	2.67	0.04889	1.78304	0.051859	1.99	304.4	7.1	307.7	5.4
YX8-1@14	126.9	103.6	0.98	0.10	0.35020	2.17	0.04938	1.50947	0.051438	1.56	304.9	5.7	310.7	4.6
YX8-1@15	351.8	415.6	1.34	0.10	0.34678	1.77	0.04876	1.50137	0.051585	0.93	302.3	4.6	306.9	4.5
YX8-1@16	262.0	312.2	1.49	0.11	0.34743	1.90	0.04923	1.55095	0.051183	1.09	302.8	5.0	309.8	4.7
YX8-1@17	222.2	213.1	0.85	0.04	0.36059	1.84	0.04881	1.50134	0.053584	1.06	312.7	5.0	307.2	4.5
YX8-1@18	137.1	111.0	0.79	0.07	0.35997	2.04	0.04935	1.50536	0.052902	1.38	312.2	5.5	310.5	4.6

注:普通 Pb 通过^{204}Pb 校正,f_{206}(%)为普通^{206}Pb 占总^{206}Pb 的百分比

显著差别,但在哈克图解上两类岩石却显示出明显的相关性(图略):由钙碱性火山熔岩到石英闪长岩,其基性组份 TiO_2、Fe_2O_3、MnO、MgO 和 CaO 的含量明显降低,而酸性组份 Al_2O_3、Na_2O、K_2O 及稀土元素的含量则相对增加,这种变化规律暗示两类岩石在成因上具有明显的继承与演化的关系,辉石、斜长石、钛铁氧化等矿物的分离结晶作用对两类岩石的形成起到了重要的控制作用,同时在岩浆演化过程中斜长石组成的变化是导致石英闪长岩中钠质含量明显增加的主要原因。石英闪长岩与大哈拉军山组钙碱性火山熔岩具有相近的稀土元素与微量元素地球化学特征(图 2),均显示出较弱的轻重稀土分馏和与板块俯冲作用有关造山带岩浆岩的特征。虽然两类岩石的稀土元素含量不同,但其 La/Sm 比值十分稳定,在 La-La/Sm 图解上其投影点构成一条平行于 La 轴的直线(图略),这也说明两类岩石同源,其成份的变化主要受结晶分离作用控制。两类岩石具有相同的 Nb/Ta 和 Zr/Hf 比值,且与大洋中脊玄武岩的相近(Condie, 2005),这也显示二者具有相同的源区。

石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩相同,均表现为 Ce/Y 与 Zr/Nb 相关(图 5),在 Zr/Nb-Ce/Y 图解中其投影点更靠近富集的尖晶石二辉橄榄岩源区,说明两类岩石的原始岩浆为富集的尖晶石二辉橄榄岩部分熔融的产物(Viccaro and Cristofolini, 2008)。Dy/Yb 也是诊断源区特征的重要地球化学指标,如果部分熔融发生在石榴石稳定区,其熔体的 Dy/Yb > 2.5;如果熔融作用发生在尖晶石稳定区,其熔体的 Dy/Yb < 1.5(Jiang *et al.*, 2009)。石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩具有相近的 Dy/Yb 比值,分别为 1.59 ~ 1.81 和 1.70 ~ 1.82,也说明二者的原始岩浆主要为尖晶石二辉橄榄岩部分熔融的产物。Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素初步研究结果显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩具有较低的($^{86}Sr/^{87}Sr$)$_i$ 值(0.7044 ~ 0.7054)和正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$(2.25 ~ 3.46),也证实其成岩物质主要来源于地幔。

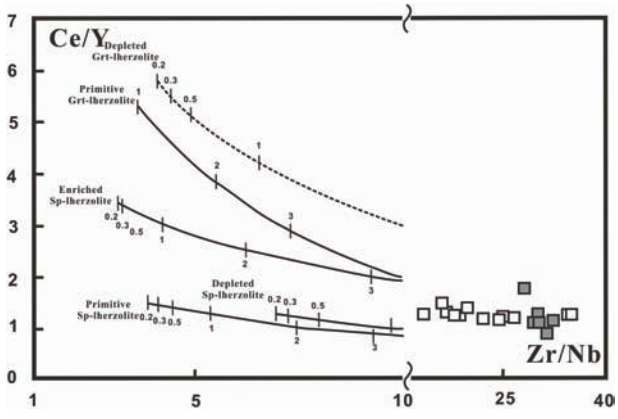


图 5 石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的 Zr/Nb-Ce/Y 图解(据 Viccaro and Cristofolini, 2008)

Fig. 5 The Zr/Nb-Ce/Y plot of the quartz diorite and the calc-alkaline basaltic andesite (after Viccaro and Cristofolini, 2008)

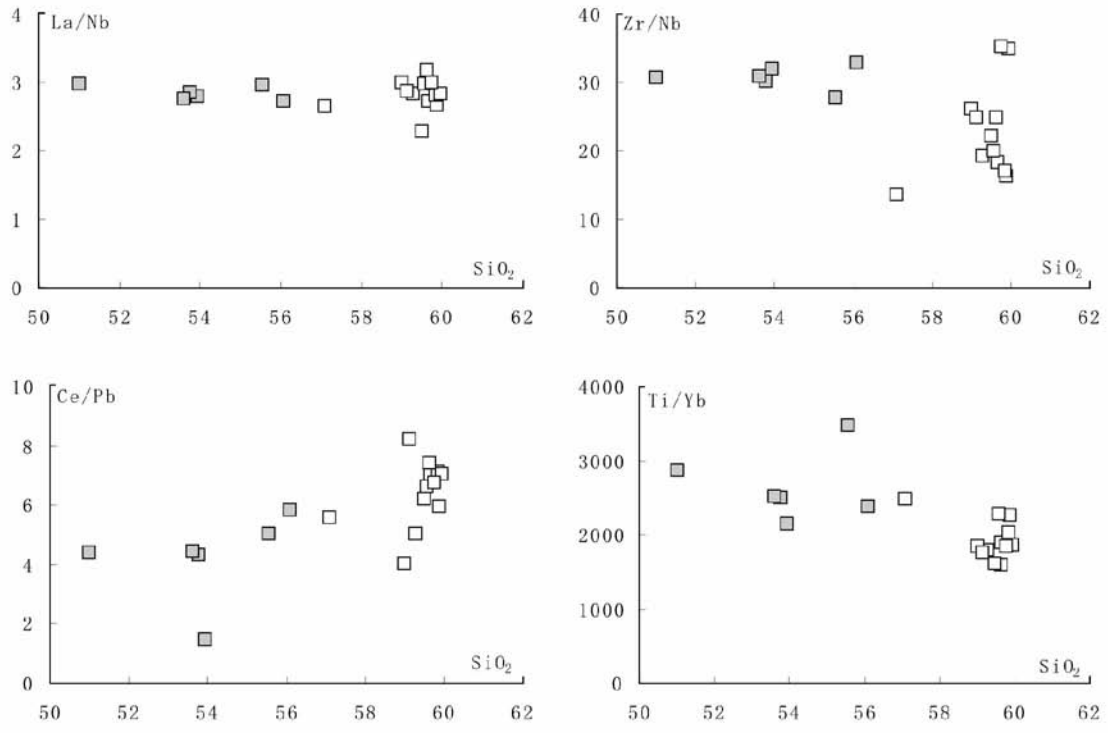


图 6 石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的 SiO_2-La/Nb, SiO_2-Zr/Nb, SiO_2-Ce/Pb 和 SiO_2-Ti/Yb 图解

Fig. 6 The SiO_2-La/Nb, SiO_2-Zr/Nb, SiO_2-Ce/Pb and SiO_2-Ti/Yb plots for the quartz diorite and the calc-alkaline basaltic andesite

原始地幔标准化的$(Th/Nb)_N$和 Nb/La 比值是诊断岩石是否受地壳混染的重要地球化学参数(夏林圻等,2007),玉希莫勒盖达坂石英闪长岩及钙碱性玄武安山岩具有非常高的$(Th/Nb)_N$比值(其值分别高达 7.07 ~ 11.12 和 8.06 ~ 11.39)和较低的 Nb/La 比值(其值分别为 0.31 ~ 0.43 和 0.34 ~ 0.37),显示出陆壳物质混染的特征。基性岩浆受到地壳物质的混染会导致其 SiO_2、K_2O、Zr、Hf 和大离子亲石元素含量增加,并使 La/Nb、Zr/Nb 比值增大及 Ti/Yb、Ce/Pb 比值降低(唐冬梅等,2009)。但玉希莫勒盖达坂石英闪长岩及钙碱性玄武安山岩的 La/Nb、Zr/Nb、Ti/Yb 和 Ce/Pb 比值的变化规律并没有显示出地壳混染的特征(图 6),这说明陆壳物质的混染并不是造成两类岩石具有非常高的$(Th/Nb)_N$和较低的 Nb/La 比值的真正原因,本文认为玉希莫勒盖达坂石英闪长岩及钙碱性玄武安山岩高的$(Th/Nb)_N$比值和较低的 Nb/La 比值受板块俯冲作用影响。

与原始地幔相比,无论是石英闪长岩,还是大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩均富集大离子亲石元素,其中 Rb、Ba、Sr、Th、U、K、La 和 Ce 的富集系数均大于 10(图 2b),说明其源区在部分熔融之前已被交代富集。在 Ce/Pb 与 Ba/La 协变图中,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的投影点均落在沉积岩与俯冲带岩浆岩区域内(图 7a),暗示源区在部分熔融之前经历了沉积来源物质的影响(Rottura *et al.*, 1998)。高的 Th/La 比、低的 Nb/La 比及变化的 Ce/Pb、Ba/Rb 比也说明石英闪长岩和钙碱性玄武安山岩的源区受到了沉积物的混染(图 7b, c),源区的富集主要受流体交代作用的控制(Oyhantcabal *et al.*, 2007)。La/Yb 和 Nb/Y 比值特征更进一步说明玉希莫勒盖达坂的石英闪长岩与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩源区的富集主要受俯冲板块脱水形成的流体交代作用控制(Hoffer *et al.*, 2008)。

综上所述,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩和大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩为同源岩浆结晶分异的产物,上升喷发和侵位过程中二者均未发生明显的陆壳混染,两类岩石所表现出的明显混染特征(如具有较高$(Th/Nb)_N$和较低的 Nb/La、Ce/Pb 比值等)与地幔楔受到俯冲板块脱水形成的流体交代作用有关。

大哈拉军山组地层在西天山地区广泛出露,其形成时代跨度很大(刘友梅等,1994;赵振华等,2004;朱永峰等,2005;翟伟等,2006),其物质组成及沉积厚度也存在着较大的差异(朱永峰等,2006a, b)。玉希莫勒盖达坂石英闪长岩的单颗粒锆石的 U-Pb 谐和年龄为 309.9 ± 2.7Ma,暗示在玉希莫勒盖达坂大哈拉军山组火山岩的形成时代略大于 310Ma,这与朱永峰等(2006a)在拉尔墩达坂测定的大哈拉军山组火山岩的形成年龄十分相近,说明在阿吾拉勒东段大哈拉军山组火山岩的形成时代为晚石炭世。

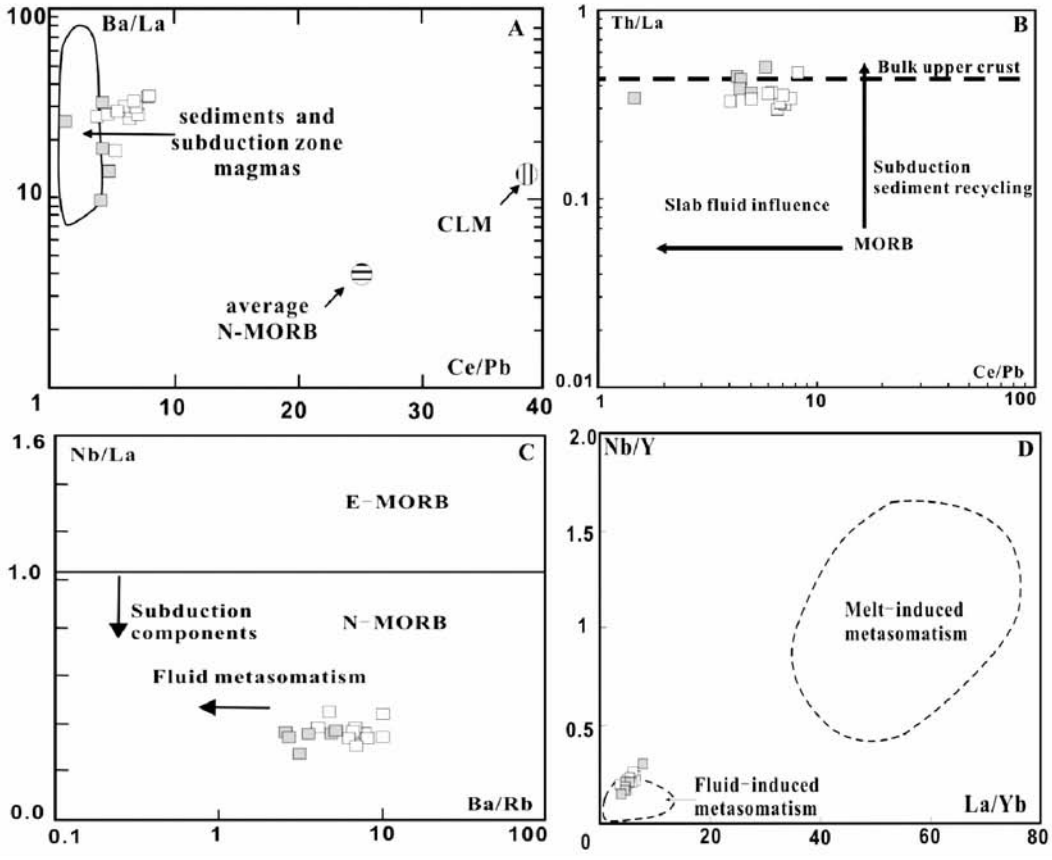


图 7 石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的 Ce/Pb-Ba/La (a)、Ce/Pb-Th/La (b)、Ba/Rb-Nb/La (c)和 La/Yb-Nb/Y (d)图解
(a)据 Rottura *et al.* (1998); (b, c)据 Oyhantcabal *et al.* (2007); (d)据 Hoffer *et al.* (2008)

Fig. 7 The Ce/Pb-Ba/La (a)、Ce/Pb-Th/La (b)、Ba/Rb-Nb/La (c) and La/Yb-Nb/Y (d) plots for the quartz diorite and the calc-alkaline basaltic andesite

5.2 石英闪长岩形成的构造环境

玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩的微量元素地球化学显示出与板块俯冲作用有关造山带岩浆岩的特征(图 2)。Ta/Yb-Th/Yb 图解被广泛用于玄武岩的形成环境判别,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩及同源的大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩的投影点均落在活动陆缘区域附近(图 8a),显示出该类岩石为聚合板块边缘岩浆岩的特征,同时投影点显示出的变化趋势显示岩浆组分的改变主要受俯冲作用的影响(Rottura *et al.*, 1998)。在 Nb/Th-Zr/Nb 图解中(Condie, 2005),石英闪长岩及同源的钙碱性玄武安山岩的投影点均落在岛弧岩浆岩的区域内,说明该类岩浆岩形成于岛弧环境。在 Nb/Th-La/Yb 图解中(Hoffer *et al.*, 2008),石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的投影点相互重叠,均落在主弧的区域内,说明石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩形成于挤压构造环境,与大哈拉军山组高钾系列火山熔岩的形成环境有显著差异。在 K/La-Ba/La 图解中(Schiano *et al.*, 2004),玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩的投影点也落在幔源岛弧岩浆岩区域内(图 8)。

上述一系列微量元素地球化学参数均显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与同源的大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩形成于活动陆缘岛弧的主弧部位。

6 结论

(1)主量元素和微量元素地球化学特征显示,玉希莫勒盖达坂石英闪长岩与区域内的大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩为同源岩浆岩,它们是富集的尖晶石二辉橄榄岩部分熔融的产物,原始地幔楔的富集受俯冲板块脱水形成流体控制。微量元素地球化学特征还显示,石英闪长岩和钙碱性玄武安山岩在上升侵位和喷发过程中未发生明显的陆壳混染,两类岩石所表现出的明显混染特征(如具有较高 $(Th/Nb)_N$ 和较低的 Nb/La、Ce/Pb 比值等)与地幔楔受到俯冲板块脱水形成的流体交代作用有关。单颗粒锆石 U-Pb 定年结果显示,石英闪长岩的形成年龄为 309.9 ± 2.7Ma,暗示阿吾拉勒东段大哈拉军山组火山岩的形成时代为晚石炭世。

(2)主量元素和微量元素地球化学特征还显示,玉希莫

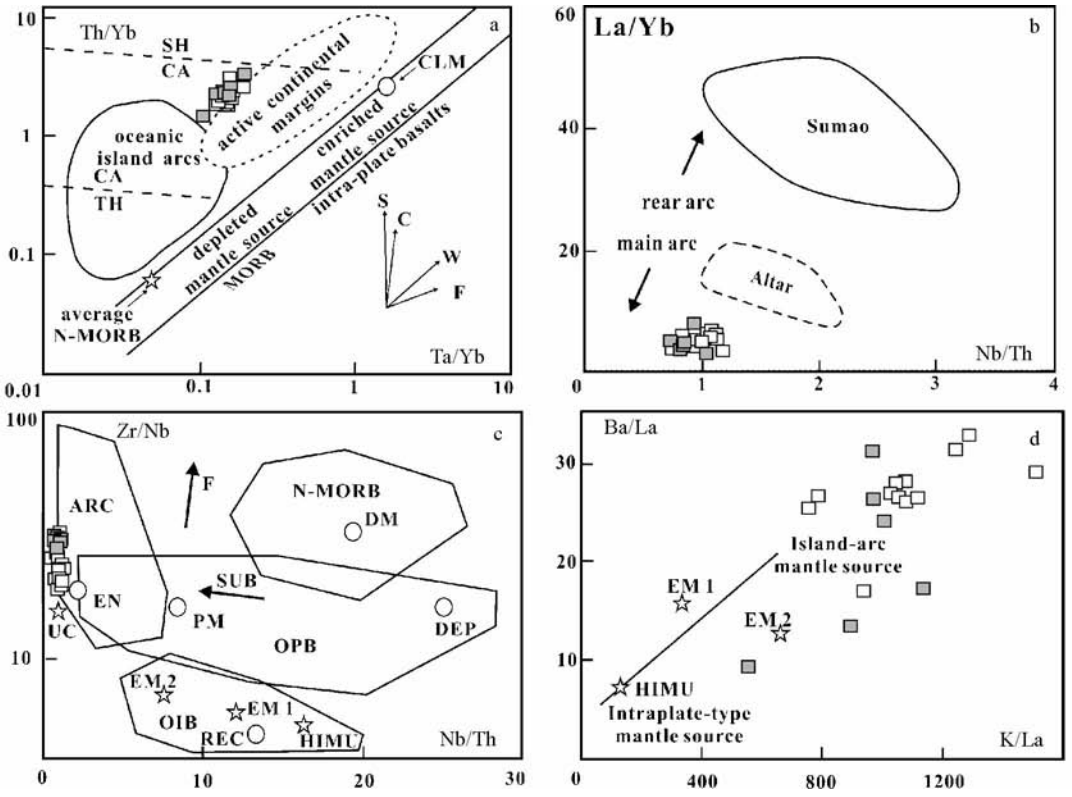


图 8 石英闪长岩与钙碱性玄武安山岩形成构造环境判别图

(a)据 Rottura *et al.*, 1998; (b)据 Hoffer *et al.*, 2008; (c)据 Condie, 2005; (d)据 Schiano *et al.*, 2004. S-俯冲富集作用;C-地壳混染作用;W-板内富集作用;F-分离结晶作用;ARC-岛弧玄武岩;CA-钙碱性;CLM-大陆岩石圈地幔;DEP-深层亏损地幔;DM-浅层亏损地幔;EM1 and EM2-富集地幔 1 和 2;EN-富集组分; HIMU-高 U/Pb 比地幔;N-MORB-正常洋中脊玄武岩;OIB-洋岛玄武岩;OPB-大洋高原玄武岩;PM-原始地幔;REC-再循环组分; SH-橄榄玄粗岩;TH-拉斑玄武岩;UC-上陆壳

Fig. 8 Discriminate diagrams of tectonic setting for the quartz diorite and the calc-alkaline basaltic andesite

(a) after Rottura *et al.*, 1998; (b) after Hoffer *et al.*, 2008; (c) after Condie, 2005; (d) after Schiano *et al.*, 2004. S-subduction components; C-crustal contamination; W-within plate enrichment; F-fractional crystallization; ARC-arc-related basalts; CA-calc-alkaline; CLM-continental lithospheric mantle; DEP-deep depleted mantle; DM-shallow depleted mantle; EM1 and EM2-enriched mantle sources; EN-enriched component; HIMU-high Mu (U/Pb) mantle; N-MORB-normal Middle ocean ridge basalt; OIB-oceanic island basalt; OPB-oceanic plateau basalt; PM-primitive mantle; REC-recycled component; SH-Shoshonite; TH-tholeiite; UC-upper continental crust

勒盖达坂石英闪长岩与区域内的大哈拉军山组钙碱性玄武安山岩形成于活动陆缘岛弧。与大哈拉军山组高钾系列火山熔岩形成于板片撕裂诱发的伸展构造环境不同,石英闪长岩及钙碱性玄武安山岩形成于挤压的构造环境。

致谢 野外考察中得到了新疆维吾尔自治区国家 305 项目办公室、新疆维吾尔自治区地质矿产勘查开发局第七地质大队及吉林省通化地质矿产勘查开发院有关领导和同志的大力支持;室内研究中得到了中国科学院地质与地球物理研究所离子探针实验室李献华研究员、李秋立博士、刘宇先生和中国科学院同位素年代学和地球化学重点实验室刘颖、胡光黔、涂湘林、孙彦敏等同志的大力支持;张连昌和熊小林博士对论文初稿进行了认真审阅,并提出了修改意见,在此一并表示谢忱!

References

Allen CM. 2000. Evolution of a post-batholith dike swarm in central coastal Queensland, Australia: Arc-front to backarc? Lithos, 51(4):331 – 349

Altherr R, Topuz G, Siebel W *et al.* 2008. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic characteristics of Paleocene plagioleucitites from the eastern Pontides (NE Turkey). Lithos, 105(1 – 2):149 – 161

Belousova E, Griffin W, O'Reilly SY *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions to mineralogy and petrology, 143(5):602 – 622

Blatter DL, Carmichael ISE, Deino AL *et al.* 2003. Discussion and reply: Neogene volcanism at the front of the central Mexican Volcanic Belt: Basaltic andesites to dacites, with contemporaneous shoshonites and high-TiO_2 lava-Reply. Geological Society of America Bulletin, 115(8):1020 – 1024

Boari E, Avanzinelli R, Melluso L *et al.* 2009. Isotope geochemistry (Sr-Nd-Pb) and petrogenesis of leucite-bearing volcanic rocks from "Colli Albani" volcano, Roman Magmatic Province, Central Italy:

Inferences on volcano evolution and magma genesis. Bulletin of Volcanology, 71(9):977 – 1005

Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review. Lithos, 78(1 – 2):1 – 24

Callegari E, Cigolini C, Medeot O *et al*. 2004. Petrogenesis of calc-alkaline and shoshonitic post-collisional oligocene volcanics of the cover series of the Sesia Zone, western Italian Alps. Geodinamica Acta, 17(1):1 – 29

Che ZC, Liu L, Liu HF *et al*. 1996. Review on the ancient Yili rift, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 12:478 – 490 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Liu YL, Bao JX *et al*. 2004a. Isotopic dating for the volcanic rocks of the Aikedaban Formation in West Tianshan, China. Journal of Mineralogy and Petrology, 24(1):52 – 55 (in Chinese with English abstract)

Chen YJ, Bao JX, Zhang ZJ *et al*. 2004b. Tectonic setting and element geochemistry of the Aikendaban Formation volcanic rocks in West Tianshan. Journal of Mineralogy and Petrology, 24(3):36 – 45 (in Chinese with English abstract)

Condie KC. 2005. High field strength element ratios in Archean basalts: A window to evolving sources of mantle plumes? Lithos, 79: 491 – 504

Cortesogno L, Cassinis G, Dallagiovanna G *et al*. 1998. The Variscan post-collisional volcanism in Late Carboniferous Permian sequences of Ligurian Alps, Southern Alps and Sardinia (Italy): A synthesis. Lithos, 45(1 – 4): 305 – 328

Duggen S, Hoernle K, Van den Bogaard P *et al*. 2005. Post-collisional transition from subduction- to intraplate-type magmatism in the westernmost Mediterranean: Evidence for continental-edge delamination of subcontinental lithosphere. Journal of Petrology, 46 (6): 1155 – 1201

Evensen NM, Hamilton PJ and O´Nions RK. 1978. Rare-earth abundances in chondritic meteorites. Geochim. Cosmochim. Acta, 42:1199 – 1212

Foley SF, Venturelli G, Green DH *et al*. 1987. The ultrapotassic rocks: Characteristics, classification, and constraints for petrogenetic models. Earth Science Reviews, 24(2): 81 – 134

Gill RCO, Aparicio A, El Azzouzi M *et al*. 2004. Depleted arc volcanism in the Alboran Sea and shoshonitic volcanism in Morocco: Geochemical and isotopic constraints on Neogene tectonic processes. Lithos, 78(4):363 – 388

Hoffer G, Eissen JP, Beate B *et al*. 2008. Geochemical and petrological constraints on rear-arc magma genesis processes in Ecuador: The Puyo cones and Mera lavas volcanic formations. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 176(1): 107 – 118

Hora JM, Singer BS, Worner G *et al*. 2009. Shallow and deep crustal control on differentiation of calc-alkaline and tholeiitic magma. Earth and Planetary Science Letters, 285(1 – 2): 75 – 86

Jiang CY, Wu WK, Zhang XR *et al*. 1995. The change from island arc to rift valley: Evidence from volcanic rocks in Awulale area. Acta Petrologica et Mineralogica, 14:289 – 300 (in Chinese with English abstract)

Jiang CY, Wu WK, Zhang XR *et al*. 1996. Magma action and tectonic evolution in Awulale district, western Tiashan moutain. Journal of Xi´an College of Geology, 18(2):18 – 24 (in Chinese with English abstract)

Jiang YH, Jiang SY, Dai BZ *et al*. 2009. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to riffing. Lithos, 107(3 – 4):185 – 204

Li XH, Liu Y, Li QL *et al*. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization. Geochemistry Geophysics Geosystems, 10: 1525 – 2027

Liu YM, Yang WH and Gao JY. 1994. Study on isotopic age of Dahalajunshan Formation in Tekesi forestry of Xinjiang. Geochimica, 23: 99 – 104 (in Chinese with English abstract)

Ludwig KR. 2003. User's manual for Isoplot 3.0: A geolocronolgical Toolkit for Microsoft Excel: Berkeley Geochronlogical Center Special Publication, 4:1 – 70

Luo Y, Niu HC, Shan Q *et al*. 2009. Discovery of the basaltic andesite – high-K basaltic andesite – trachyandesite association in the Yuximolegai Daban, West Tianshan and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 25(4):934 – 943 (in Chinese with English abstract)

Maniar PD and Piccoli PM. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101(5): 635 – 643

Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews, 37(3 – 4): 215 – 224

Muller D, Stumpfl EF and Taylor WR. 1992. Shoshonitic and alkaline lamprophyres with elevated Au and PGE concentrations from the Kreuzeck Mountains, eastern Alps, Austria. Mineralogy and Petrology, 46(1): 23 – 42

Oyhantcabal P, Siegesmund S, Wemmer K *et al*. 2007. Post-collisional transition from calc-alkaline to alkaline magmatism during transcurrent deformation in the southernmost Dom Feliciano Belt (Braziliano-Pan-African, Uruguay). Lithos, 98(1 – 4):141 – 159

Rottura A, Bargossi GM, Caggianelli A *et al*. 1998. Origin and significance of the Permian high-K calc-alkaline magmatism in the central-eastern Southern Alps, Italy. Lithos, 45(1 – 4):329 – 348

Schiano P, Clocchiatti R, Ottolini L *et al*. 2004. The relationship between potassic, calc-alkaline and Na-alkaline magmatism in South Italy volcanoes: A melt inclusion approach. Earth and Planetary Science Letters, 220(1 – 2):121 – 137

Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society of London, 42: 313 – 345

Tang DM, Qin KZ, Sun H *et al*. 2009. Lithological, chronological and geochemical characteristics of Tianyu Cu-Ni deposit: Constraints on source and genesis of mafic-ultramafic intrusions in eastern Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 25(4):817 – 831 (in Chinese with English abstract)

Vavra G, Gebauer D, Schmid R *et al*. 1996. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. Contributions to Mineralogy and Petrology, 122(4):337 – 358

Vavra G, Schmid R and Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps). Contributions to Mineralogy and Petrology, 134(4):380 – 404

Viccaro M and Cristofolini R. 2008. Nature of mantle heterogeneity and its role in the short-term geochemical and volcanological evolution of Mt. Etna (Italy). Lithos, 105(3 – 4):272 – 288

Xia LQ, Xia ZC, Xu XY *et al*. 2004. Carboniferous Tianshan igneous megaprovince and mantle plume. Geological Bulletin of China, 23: 903 – 910 (in Chinese with English abstract)

Xia LQ, Xia ZC and Xu XY. 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. Acta Petrologica Et Mineralogica, 26(1): 77 – 89 (in Chinese with English abstract)

Zhai W, Gao J, Sun XM *et al*. 2006. The wallrocks of the Axi gold deposit-Dahalajunshan Group: Its zircon SHRIMP dating. Acta Petrologica Sinica, 22: 1399 – 1406 (in Chinese with English abstract)

Zhang M and O'Reilly SY. 1997. Multiple sources for basaltic rocks from Dubbo, eastern Australia: Geochemical evidence for plume-lithospheric mantle interaction. Chemical Geology, 136(1 – 2):33 – 54

Zhao ZH, Bai ZH, Xiong XL *et al*. 2004. $^{40}Ar/^{39}Ar$ chronological study of Late Paleozoic volcanic-hypabyssal igneous rocks in western Taishan, Xinjiang. Geochimica, 32: 317 – 327 (in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Zhang LF, Gu LB *et al*. 2005. The zircon SHRIMP chronology

and trace element geochemistry of Caboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains. Chinese Science Bulletin, 50:2004 – 2014(in Chinese)

Zhu YF, Guo X and Zhou J. 2006a. The petrology and Sr-Nd isotopic geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in the western Tianshan Mountains, NW China. Acta Petrologica Sinica, 22:1341 – 1350(in Chinese with English abstract)

Zhu YF, Zhou J, Song B *et al*. 2006b. Age of the "Dahalajunshan" Formation in Xinjiang and its disintegration. Geology in China, 33: 494 – 497(in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

车自成, 刘良, 刘洪福等. 1996. 论伊犁古裂谷. 岩石学报,12:478 – 490

陈衍景, 刘玉琳, 鲍景新等. 2004a. 西天山艾肯达坂组火山岩系同位素定年及其构造意义. 矿物岩石, 24(1):52 – 55

陈衍景, 鲍景新, 张增杰等. 2004b. 西天山艾肯达坂组火山岩系的元素地球化学特征和构造环境. 矿物岩石, 24(3):36 – 45

姜常义, 吴文奎, 张学仁等. 1995. 从岛弧向裂谷的变迁——来自阿吾拉勒地区火山岩的证据. 岩石矿物学杂志, 14: 289 – 300

姜常义, 吴文奎, 张学仁等. 1996. 西天山阿吾拉勒地区岩浆活动与构造演化. 西安地质学院学报, 18(2):18 – 24

刘友梅, 杨蔚华, 高计元. 1994. 新疆特克斯县林场大哈拉军山组火山岩年代学研究. 地球化学, 23: 99 – 104

罗勇,牛贺才,单强等. 2009. 西天山玉希莫勒盖达坂玄武安山岩-高钾玄武安山岩-粗安岩组合的发现及其地质意义,岩石学报,25(4):934 – 943

唐冬梅,秦克章,孙赫等. 2009. 天宇铜镍矿床的岩相学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征:对东疆镁铁-超镁铁质岩体源区和成因的制约,岩石学报,25(4):817 – 831

夏林圻, 夏祖春, 徐学义等. 2004. 天山石炭纪大火山岩省与地幔柱. 地质通报, 23:903 – 910

夏林圻, 夏祖春, 徐学义等. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩, 岩石矿物学杂志, 26(1):77 – 89

翟伟, 高俊, 孙晓明等. 2006. 新疆阿希金矿赋矿围岩-大哈拉军山组火山岩锆石 SHRIMP 年龄. 岩石学报, 22:1399 – 1406

赵振华, 白正华, 熊小林等. 2004. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆岩$^{40}Ar/^{39}Ar$同位素定年. 地球化学, 32:317 – 327

朱永峰, 张立飞, 古丽冰等. 2005. 西天山石炭纪火山岩 SHRIMP 年代学及其微量元素地球化学研究. 科学通报, 50:2004 – 2014

朱永峰, 郭璇, 周晶. 2006a. 西天山石炭纪火山岩的岩石学及 Sr-Nd 同位素地球化学研究. 岩石学报, 22:1341 – 1350

朱永峰, 周晶, 宋彪等. 2006b. 新疆"大哈拉军山组"火山岩的形成时代问题及其解体方案. 中国地质, 33:494 – 497