1000-0569/2001/017(04)-0514-22 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

西天山阿吾拉勒埃达克质岩石成因：Nd 和 Sr 同位素组成的限制*

熊小林[1,2] 赵振华[1] 白正华[1] 梅厚钧[1] 许继峰[1] 王强[1]

XIONG XiaoLin[1,2], ZHAO ZhenHua[1], BAI ZhengHua[1], MEI HouJun[1], XU JiFeng[1] and WANG Qiang[1]

1. 中国科学院广州地球化学研究所，广州 510640
2. 南京大学成矿作用国家重点实验室，南京 210093
1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou* 510640, *China*
2. *State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing* 210093, *China*

2001-06-05 收稿，2001-09-10 改回。

Xiong XL, Zhao ZH, Bai ZH, Mei HJ, Xu JF and Wang Q. 2001. Origin of Awulale adakitic sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4):514－522

Abstract The Permian sodium-rich dacites and albite porphyries in Awulale Mountain of western Tianshan were generated at a post-collisional setting. They have unique major and trace element signatures similar to those bor subduction-related adakites. These adakitic rocks are characterized by high Na_2O, Al_2O_3 and Sr contents and high Sr/Y and La/Y ratios (>40 and >20, respectively), low Y and Yb contents, strong depletion in HREE, and positive Eu anomaly. The ratio ($^{143}Nd/^{144}Nd$)$_i$ ranges from 0.512384 to 0.512470 and the $\varepsilon_{Nd}(t=260\ Ma)$ value is positive with a range of +1.57 ~ +3.26; the ratio ($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$ ranges from 0.7051 to 0.7054. These Nd and Sr isotopic compositions are similar to those of the coeval basalts in this area, but obviously different from those of subduction-related adakites. The aforesaid Nd and Sr isotopic compositions indicate that the source rocks of these adakitic rocks come probably from a weakly depleted mantle, or a depleted mantle, but was contaminated by the crustal materials. These adakitic rocks were most likely derived from the partial melting of newly underplated basaltic rocks under the conditions of amphibolite to eclogite transition in the postcollisional setting during the Permian Period. They are probably an important indication of the underplating of mantle-derived basaltic magmas and the vertical growth of continental crust in western Tianshan region during the post-collisional setting of late Paleozoic.

Key words Awulale, Adakitic rocks, Underplating and vertical growth of continental crust

摘 要 西天山阿吾拉勒二叠纪钠质英安岩和钠长斑岩具有与埃达克岩一致的高 Sr，低 Y、Yb 和 Eu 正异常等独特岩石地球化学特征。系统的 Nd 和 Sr 同位素组成研究表明，其 ($^{143}Nd/^{144}Nd$)$_i$ 为 0.512384～0.512470，$\varepsilon_{Nd}(t)$ 为正值(+1.57 ～ +3.26)；($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$ 为 0.7051～0.7054，与本区同时代幔源玄武岩的 Nd 和 Sr 同位素组成特征相似，但与俯冲洋壳部分熔融成因埃达克岩的 Nd 和 Sr 同位素组成有显著区别。结合这些埃达克质岩石形成于二叠纪后碰撞阶段构造背景，认为本区埃达克质岩浆最有可能由新底侵的玄武质下地壳在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相的条件下部分熔融形成，是西天山晚古生代后碰撞阶段地幔玄武岩浆底侵作用和地壳垂向增生的重要岩石标志。

关键词 阿吾拉勒；埃达克质岩石；底侵作用和地壳生长

中图法分类号 P588.121；P597

---

* 国家重点基础研究项目(G1999043200)、国家 305 攻关项目(96-915-03-02)、国家自然科学基金和南京大学成矿作用国家重点实验室国家教委访问学者项目。

第一作者简介：熊小林，男，1963 年生，博士，研究员，岩石地球化学和实验地球化学专业，E-mail：xiongxl@gig.ac.cn

1 引言

埃达克岩(adakite)具有独特的地球化学特征和重要的地球动力学意义，近 10 年来已引起地球科学工作者的高度重视。它以高 Sr，低 Yb、Y 含量及高 Sr/Y 和 La/Yb 比值等为主要特征，是年轻的、热的玄武质俯冲洋壳在能够稳定石榴石±角闪石的压力条件下部分熔融形成的安山质-英安质岩石(Defant *et al.*，1990；1993；Xu *et al.*，2000)。太古代高铝 TTG 岩套(奥长花岗岩-英云闪长岩-花岗闪长岩)具有与埃达克岩相似的岩石地球化学特征，因而被认为是太古代俯冲有关的埃达克岩(Drummond *et al.*，1990；Martin，1999)。然而，Atherton *et al.* (1993)通过研究秘鲁 Cordillera 厚地壳区 Blanca 岩基的构造背景，认为具有埃达克岩特征的中酸性岩的源区并不仅仅限于俯冲的洋壳，他们提出底侵的玄武质下地壳部分熔融模式来解释具有与埃达克岩相似地球化学特征的 Blanca 岩基的成因。

尽管埃达克质熔体可以由俯冲的洋壳底侵的玄武质下地壳部分熔融形成，但大部分关于埃达克质岩石的成因研究都集中于俯冲有关的埃达克岩，其原因是俯冲有关的埃达克岩在环太平洋岛弧区有相对较多的产地(Defant *et al.*，1990；Martin，1999)。有关底侵玄武质下地壳部分熔融形成的埃达克质岩石的典型例子包括秘鲁 Cordillera 的 Blanca 岩基和美国南加利福尼亚 Peninsular Ranges 岩基(Atherton *et al.*，1993；Petford *et al.*，1996；Gromet *et al.*，1987)。近年来，中国东部埃达克质岩石的研究取得了重要进展，发现了许多与俯冲事件无关的埃达克质岩石(张旗等，2001a，b；王强等，2001)，对阐明中国东部中生代厚地壳(或高原)的存在有重要意义。本文报道我们在西天山阿吾拉勒发现的埃达克质岩石，阿吾拉勒埃达克质钠质英安岩和钠长斑岩形成于二叠纪后碰撞构造背景，与俯冲作用无关。我们使用这些岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成并结合构造背景来限定它们的岩石成因，并讨论它们对于研究天山造山带显生宙地壳生长的重要意义。

2 地质背景、野外产状和岩相学简述

天山山脉是中亚造山带最主要的古生代造山带之一。它在我国境内延伸超过 1500km，由塔里木板块、伊犁-中天山板块和准噶尔板块在晚古生代碰撞形成(肖序常等，1992；何国琦等，1994)，古板块碰撞最晚发生在早石炭世末(Gao *et al.*，1998)。自中石炭到二叠纪末，天山及邻区属后碰撞阶段。根据肖序常等(1992)和 Gao *et al.* (1998)，海相环境在早石炭世末结束，中石炭世开始沉积广泛的陆相建造。早二叠世开始发生后碰撞抬升，并伴随强烈的火山活动和花岗质岩浆作用；晚二叠世抬升加速，发育广泛的磨拉石沉积建造。

阿吾拉勒山位于西天山伊犁地块的东北部，呈近东西向延伸。钠质英安岩和钠长斑岩次火山侵入体分布于阿吾拉勒山西段尼勒克至黑山头一带(图 1)。钠质英安岩属上二叠统哈密斯特组，该组上部为玄武岩和钠质英安岩，下部为杂色凝灰岩。钠质英安岩主要分布于群吉萨伊东叉沟，^{38}Ar 稀释法年龄为 260Ma(赵振华等，2000)，呈灰黑色，斑状结构，斑晶为钠更长石和普通辉石，基质主要为钠长石，含少量碱性长石和玻璃质，微晶钠长石呈定向排列构成玻晶交织结构。钠长斑岩包括黑山头、莫斯早特和特铁达坂三个次火山侵入体。黑山头次火山侵入体位于阿吾拉勒山西南端，出露面积小于 10km^2，侵入于上二叠统晓山萨依组火山岩沉积岩系中，全岩^{39}Ar－^{40}Ar 坪年龄为 260.8Ma(赵振华等，2000)，岩性为钠长斑岩，斑晶为角闪石和钠长石，基质主要为钠长石，具定向排列的交织结构；莫斯早特次火山侵入体位于尼勒克县城南约 1 km，出露面积约 1.5 km^2，Rb-Sr 等时线年龄为 247.8 Ma(李华芹等，1998)。岩性为石英钠长斑岩，斑晶为钠长石和角闪石，基质为钠长石和少量石英和碱性长石，具交织结构；特铁达坂次火山侵入体位于特铁达坂之西，出露面积约 5 km^2，侵入于下二叠统火山沉积岩系之中，岩性为石英钠长斑岩，斑晶为钠长石，含少量黑云母，基质具微粒花岗结构，由钠长石、碱性长石和石英组成。上述英安岩和钠长斑岩、石英钠长斑岩没有显示熔液交代结构，它们的基质表现的玻晶交织结构和交织结构等是典型的火山-次火山条件下岩浆结晶作用的产物。

3 岩石化学和微量元素特征

我们已在科学通报中初步报道了阿吾拉勒埃达克质岩石的岩石地球化学特征(熊小林等，2001)，本文补测了一些样品，将钠质英安岩及黑山头、莫斯早特和特铁达坂钠长斑岩的平均岩石化学和微量元素组成列于表 1。从表 1 可知，本区钠质英安岩和钠长斑岩 SiO_2 范围 62.63%～71.10%，具有中酸性火成岩(安山质-英安质)成分特征，高 Na_2O (5.37%～6.69%)、Al_2O_3(15.44%～16.02%)，富碱(Na_2O+K_2O = 7.85%～9.04%)，$Na_2O/K_2O>1$(1.35～3.72)。其 NK/A(0.74～0.86)和 A/NKC(0.86～1.08)显示准铝-弱过铝的化学组成特征。微量元素表现为独特的高 Sr(330～1279μg/g)，低 Y(4～6.7 μg/g)、Yb(0.33～0.62μg/g)和强烈亏损 HREE 等特征，并且 Sr/Y>40(59～264)、La/Yb>20(22～44)、Eu 具有正异常(Eu/Eu^*=1.06～1.27)。

根据 Defant *et al.* (1990；1993)，埃达克岩的岩石化学和微量元素特征(表 1)包括：SiO_2> 56%，高 Sr(>300 μg/g)、Al_2O_3(>15%)和 Na_2O(>3.5%)，低 Y(<18 μg/g)和 HREE(Yb < 1.9 μg/g)；高 Sr/Y(>20～40) 和 La/Yb(>20)，并具有正 Sr 和 Eu 异常等。阿吾拉勒二叠纪英安岩和钠长斑岩具有与埃达克岩一致的岩石地球化学特征。

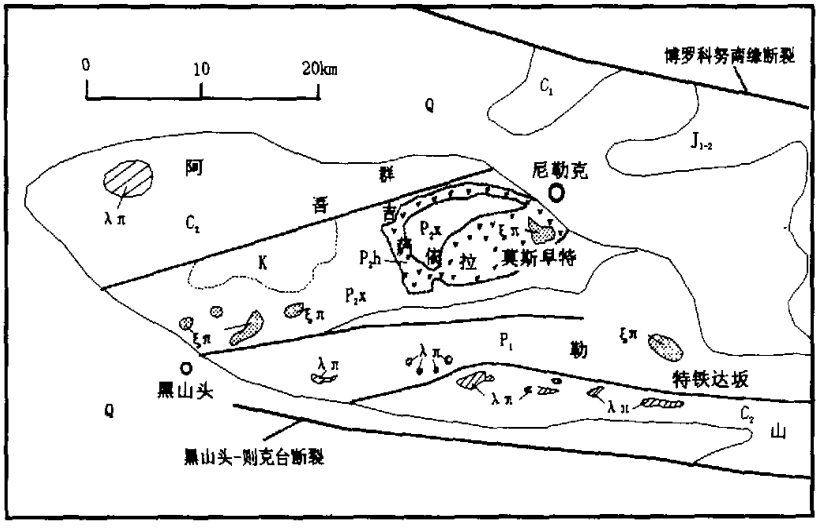


图 1 阿吾拉勒西段埃达克质英安岩和钠长斑岩分布图

(据新疆区调队 1∶20 万巩留幅修编)

Q-第四系; K-白垩系砂砾岩; J_{1-2}-下中侏罗统砂砾岩; C_2-中石炭统火山沉积岩系; P_1-下二叠统火山沉积岩系; P_2x-下二叠统晓山萨依组砂砾岩; P_2h-下二叠统哈密斯特组凝灰岩、钠质英安岩、玄武岩; P_2t-下二叠统铁木里克组泥质粉砂岩和砾岩; $\zeta\pi$-钠长斑岩; $\lambda\pi$-石英斑岩或花岗斑岩

Fig. 1 Simplified geological map of westrn Awulale Mountain showing the localities of the sodium-rich adakitic rocks

4 Nd 和 Sr 同位素组成特征和岩石成因

4.1 Nd 和 Sr 同位素组成特征

Nd 和 Sr 同位素组成及 Sm、Nd、Rb 和 Sr 含量由中科院地学中心 MAT-262 同位素质谱计测定。分析流程类似黄萱等(1990)。样品测定期间标样的测量结果和误差为: $^{87}Sr/^{86}Sr$ (Sr 标样 BNS-987) 为 0.71025±20 (2σ); $^{143}Nd/^{144}Nd$ (Nd 标样 JMC) 为 0.511973±21 (2σ)。用 $^{86}Sr/^{88}Sr$ = 0.1194 和 $^{146}Nd/^{144}Nd$ = 0.7129 进行 Sr 和 Nd 同位素质量歧视校正。Sm 和 Nd 的实验室全流程本底大约是 10^{-11}g。

7 个英安岩和钠长斑岩样品的 Nd 和 Sr 同位素组成及参数见表 2。它们的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为正值(+1.57 ~ +3.26), Nd 模式年龄为 688 ~ 782Ma; $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 较低, 为 0.7051 ~ 0.7054。这些埃达克质岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成非常接近,表明他们来源于相同的源区; 源区岩石可能起源于弱亏损地幔,或起源于亏损地幔,但受到地壳物质的混染。图 2 是阿吾拉勒埃达克质岩石的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ — $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图,该图同时显示了西天山元古代基底角闪岩和角闪片麻岩(Chen *et al.*, 2000)、阿吾拉勒石炭-二叠纪玄武质岩石(赵振华等, 2000)、Aleutian (Kay *et al.*, 1978), Cook (Stern *et al.*, 1996) 和 Cerro Pampa (Kay *et al.*, 1993)俯冲洋壳部分熔融成因埃达克岩及秘鲁科迪勒拉埃达克质 Blanca 岩基 (Petford *et al.*, 1996)的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 对 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 位置,它表明阿吾拉勒埃达克质岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成特征与俯冲洋壳部分熔融成因埃达克岩和西天山元古代基底岩石有重要差别,而与底侵玄武质下地壳部分熔融成因的埃达克质 Blanca 岩基和阿吾拉勒石炭-二叠纪地幔来源玄武质岩石非常接近。

4.2 岩石成因讨论

4.2.1 Nd 和 Sr 同位素组成和构造背景限制

阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩的正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 和相对低的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 值指示其地幔源区岩浆特征,它们不可能由与它们有重要 Nd 和 Sr 同位素组成差别的西天山元古代基底岩石熔融形成(图 2)。直接来源于地幔也是不可能的,地幔橄榄岩的直接熔融不可能产生酸性程度达英安质的岩浆 (Green *et al.*, 1980; Defant *et al.*, 1990)。尽管阿吾拉勒存在与英安岩和钠长斑岩同时代的玄武岩,但我们认为这些英安岩和钠长斑岩不可能是玄武岩浆结晶分异的产物。阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩独特的高 Sr、低 HREE 和 Eu 正异常等特征很难用玄武岩浆的分离结晶成因来解释。Defant *et al.*, (1990)、Atherton *et al.*, (1993) 和 Martin (1999)认为,具有埃达克岩岩石化学和微量元素特征的岩浆可能由年轻的俯冲洋壳或底侵的玄武质下地壳部分熔融形成。众所周知,整个北疆板块俯冲碰撞在早石炭世末已经结束(肖序常等,1992; Gao *et al.*, 1998),阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩形成于晚二叠世,显然不可能是俯冲洋壳

表 1 阿吾拉勒埃达克质岩石的主量(%)和微量元素(μg/g)组成

Table 1 Major (%) and trace element (μg/g) compositions of Awulale adakitic rocks

地点	群吉萨依	莫斯早特	黑山头	铁特达坂	埃达克岩*
岩性	英安岩	石英钠长斑岩	钠长斑岩	石英钠长斑岩	
样品数	4	3	3	3	
SiO_2	66.02	66.88	62.63	71.10	≥56%
TiO_2	0.44	0.37	0.38	0.19	
Al_2O_3	15.44	15.88	16.02	15.48	≥15%
Fe_2O_3	1.99	1.42	3.62	0.98	
FeO	1.07	1.06	0.74	0.91	
MnO	0.06	0.04	0.06	0.05	
MgO	1.76	1.19	1.80	1.06	<3%
CaO	2.89	1.58	2.85	0.76	
Na_2O	5.37	5.63	6.55	6.69	
K_2O	2.48	4.21	2.49	1.80	
P_2O_5	0.21	0.14	0.22	0.10	
H_2O	1.69	1.34	2.02	0.90	
Total	99.42	99.73	99.38	100.03	
Na_2O+K_2O	7.85	9.83	9.04	8.49	
Na_2O/K_2O	2.17	1.35	2.63	3.72	
NK/A	0.74	0.86	0.84	0.83	
A/NKC	0.92	0.96	0.86	1.08	
Rb	33.54	69.28	26.67	22.92	
Cs	1.77	1.33	0.79	0.57	
Ba	712.92	656.33	605.33	364.31	
Sr	1278.81	529.33	610.67	329.82	正异常
Ta	0.17	0.14	0.17	0.40	
Nb	2.98	1.90	2.47	5.27	
Hf	2.75	2.20	2.34	2.56	
Zr	111.26	68.67	81.00	81.02	
Y	4.85	4.00	6.67	5.64	≤18
Th	1.36	2.13	2.57	1.82	
U	0.22	0.91	0.98	0.23	
Sr/Y	264	132	91.35	58.83	>20~40
La	16.87	14.67	20.16	12.48	
Ce	33.86	30.40	42.06	23.09	
Pr	4.04	3.75	5.32	2.87	
Nd	14.67	14.20	20.62	10.07	
Sm	2.22	2.18	3.16	1.67	
Eu	0.69	0.71	0.99	0.50	
Gd	1.41	1.36	2.08	1.22	
Tb	0.19	0.18	0.29	0.19	
Dy	0.89	0.83	1.39	0.98	
Ho	0.16	0.14	0.25	0.19	
Er	0.43	0.41	0.74	0.53	
Tm	0.06	0.05	0.09	0.08	
Yb	0.38	0.33	0.62	0.56	≤1.9
Lu	0.06	0.05	0.09	0.09	
TREE	75.93	69.28	97.87	54.51	
La/Yb	43.88	44.06	32.59	22.39	>20
Eu/Eu*	1.19	1.27	1.18	1.06	正异常

岩石化学由湿分析法测定；微量元素由中科院广州地化所 ICP-MS 测定。 *：引自 Defant *et al.*，1990，1993。

表 2 阿吾拉勒埃达克质岩石的 Nd 和 Sr 同位素组成

Table 2 Nd and Sr isotopic compositions of Awulale adakitic rocks

位置	群吉萨依		莫斯早特	黑山头		特铁达坂	
岩性	钠质英安岩		石英钠长斑岩	钠长斑岩		石英钠长斑岩	
样品	XT90	XT91	XT104	XT161	XT162	XT195	XT196
Sm(μg/g)	2.46	2.44	2.25	3.23	3.23	1.90	1.73
Nd(μg/g)	15.82	16.24	14.19	20.36	20.25	11.14	10.38
$^{147}Sm/^{144}Nd$	0.0940	0.0909	0.0959	0.0961	0.0953	0.1032	0.1009
$^{143}Sm/^{144}Nd$	0.512570	0.512560	0.512547	0.512578	0.512567	0.512589	0.512642
(±2σ)	(13)	(11)	(8)	(10)	(13)	(11)	(10)
$(^{143}Sm/^{144}Nd)_i$	0.512410	0.512405	0.512384	0.212414	0.512405	0.512413	0.512470
$\varepsilon_{Nd}(t)$	2.09	1.99	1.57	2.17	1.98	2.15	3.26
$f_{Sm/Nd}$	−0.52	−0.54	−0.51	−0.51	−0.52	−0.48	−0.49
T_{DM}(Ma)	740	734	782	743	752	776	688
Rb(μg/g)	50.49	29.80	57.08	28.23	30.56	29.40	46.81
Sr(μg/g)	1648.10	1118.01	843.80	788.68	645.62	367.27	298.80
$^{87}Rb/^{86}Sr$	0.08868	0.07715	0.19820	0.10360	0.13700	0.23170	0.45340
$^{87}Sr/^{86}Sr$	0.705695	0.705467	0.706129	0.705522	0.705583	0.706204	0.706920
(±2σ)	(12)	(13)	(16)	(8)	(6)	(11)	(20)
$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$	0.7054	0.7052	0.7054	0.7051	0.7051	0.7053	0.7052

中科院地学中心 MAT−262 质谱计测定。Nd 和 Sr 同位素参数计算方法如下：

$(^{143}Nd/^{144}Nd)_i = (^{143}Nd/^{144}Nd)_s - (^{147}Sm/^{144}Nd)_s(e^{\lambda t} - 1)$；

$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i = (^{87}Sr/^{86}Sr)_s - (^{87}Rb/^{86}Sr)_s(e^{\lambda t} - 1)$；

$\varepsilon_{Nd}(t) = ((^{143}Nd/^{144}Nd)_s/(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} - 1) \times 10000$；

$f_{Sm/Nd} = (^{147}Sm/^{144}Nd)_s/(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} - 1$；

$T_{DM} = 1/\lambda \times \ln(1 + (((^{143}Nd/^{144}Nd)_s - 0.51315)/((^{147}Sm/^{144}Nd)_s - 0.2137))$。

上式中 s = 样品，t = 260 Ma(岩石结晶年龄)，球粒陨石(CHUR)现代值：

$(^{143}Nd/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.512638$，$(^{147}Sm/^{144}Nd)_{CHUR} = 0.1967$；

Rb 衰变常数 $\lambda = 1.42 \times 10^{-11}a^{-1}$；Sm 衰变常数 $\lambda = 6.54 \times 10^{-12}a^{-1}$。

部分熔融的产物。它们的相对低的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$(0.512384 ~ 0.512470)和相对高的 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$(0.7051 ~ 0.7056) 与俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩($(^{143}Nd/^{144}Nd)_i > 0.5129$，$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i < 0.704$，图 2)有显著区别。我们认为用底侵玄武质下地壳部分熔融来解释阿吾拉勒富钠英安岩和钠长斑岩的成因更为合理。阿吾拉勒二叠纪埃达克质英安岩和钠长斑岩的 Nd 和 Sr 同位素组成与同时代的玄武岩相似(图 2)，可能表明底侵的玄武质岩浆与这些喷发的玄武岩具有相同的源区，这些玄武质岩石是底侵作用在地表的显示，因此，阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩可能是石炭-二叠纪幔源岩浆底侵作用的重要指示。

4.2.2 玄武质岩石部分熔融形成埃达克质熔体的条件

阿吾拉勒埃达克质英安岩和钠长斑岩的高 Sr 和低 HREE 及高 Sr/Y 比值表明其源区残留相富于含 HREE 的石榴石±角闪石，不含富 Sr 的斜长石，是玄武质岩石在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相条件下部分熔融的产物。我们根据拉斑玄武岩-H_2O(5%)体系压力-温度相图(Green, 1982)来阐明埃达克质熔体的形成条件。如图 3 所示，石榴石(Ga)和角闪石(Am)稳定，但斜长石(Pl)不稳定的区域包括 Am+Cpx+Ga+L 和 Ga+Cpx+L 两个温压域，分别对应于角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相条件，它们的最小压力和温度条件应大于 10 kbar 和 650℃。在正常的地温梯度条件下，地温梯度线不与含 H_2O 的玄武岩固相线相交，玄武质岩石不能产生部分熔融；在高地温梯度条件下(如俯冲带和陆内地幔隆升区)，地温梯度线能与含 H_2O 的玄武岩固相线相交，在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相温压域，含 H_2O 玄武质岩石产生部分熔融产生埃达克质熔体。Rapp *et al.*，(1995)和 Sen *et al.*，(1994)也已证实，玄武质岩石在压力大于 12 kbar(相当于地壳厚度大于 40km)的条件下能够部分熔融出具有埃达克岩成分特征的熔体。

天山造山带为晚古生代造山带，在石炭至二叠纪后碰撞伸展阶段发生了广泛的底侵作用和地幔隆升事件(后段详

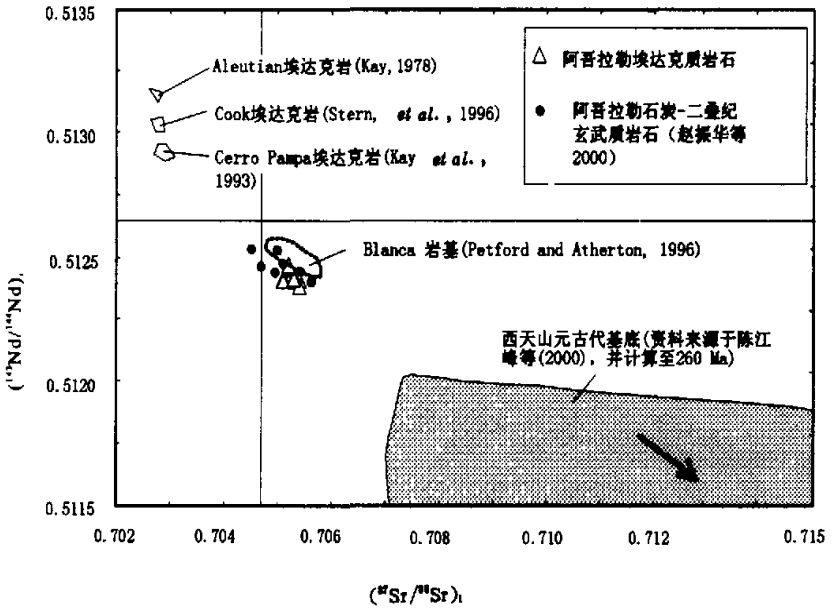


图 2 西天山阿吾拉勒埃达克质岩石的 $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ 对 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图

图中同时显示了西天山基底、阿吾拉勒石炭-二叠纪玄武质岩石以及秘鲁科迪勒拉 Blanca 岩基、Aleutian 埃达克岩、Cook 埃达克岩和 Cerro Pampa 埃达克岩的 Nd 和 Sr 同位素组成

Fig. 2 Plot of $(^{143}Nd/^{144}Nd)_i$ vs $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ of Awulale adkitic rocks

述)。底侵作用导致天山地壳厚度增大和地温梯度增加，特别是岩石圈伸展引起的地幔隆升将导致地温梯度大大增加，同时地幔产生以 H_2O 为主的挥发分去气作用将导致下地壳玄武岩固相线温度大大降低。当地温到达玄武岩固相线相温度之上，在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相温压域，底侵在地壳底部的玄武质岩石发生部分熔融形成埃达克质熔体。根据地球上绝大部分地区地壳厚度为 30～70km(相当于 9～21 kbar 的静岩压力)和地温梯度的限制，作者认为角闪岩相向榴辉岩相过渡的压力-温度域(图 3 阴影区)可能是底侵玄武质下地壳部分熔融产生埃达克质熔体的最佳条件。天山地区由地震 P 波解释的现今地壳厚度为 46～48km(彭聪等，2000)，如果这一地壳厚度在古生代形成，并且在中新生代没有发生明显的变化，那么晚古生代的底侵玄武岩处于含石榴石的稳定域是不成问题的，本区中新生代微弱的岩浆活动可以为地壳厚度不发生明显变化提供一些佐证。

5 对底侵作用和地壳生长的指示意义

除了直接的下地壳包体观察之外，基性火成岩及壳幔型花岗岩(花岗岩中有重要地幔组分的加入)的广泛发育也是底侵作用的重要标志。天山及准噶尔周边地区在晚古生代发育许多后碰撞幔源铁镁质火成岩，如天山(研究区西南部)菁布拉克基性超基性岩带(陈江峰等，1995)和黄山基性超基性杂岩(李华芹等，1998)，西准噶尔辉绿玢岩(贺伯初等，1994)，东准噶尔喀拉通克基性超基性杂岩(李华芹等，1998)等；后碰撞幔源分异型或壳幔型花岗岩类在天山(李华芹等，1998；Hu *et al.*，2000)、东西准噶尔(Han *et al.*，1997；韩宝福等，1998；Hopson *et al.*，1989；赵振华等，1996；Kwon *et al.*，1989)、阿拉套山(周泰禧等，1996；Chen *et al.*，2000)、阿尔泰山(赵振华等，1993)更是广泛发育。这些后碰撞幔源铁镁质岩石及幔源分异型或壳幔型花岗岩类形成年龄在 330～250Ma(韩宝福等，1999)，普遍具有正的 $\varepsilon_{Nd}(t)$，其中铁镁质岩石为 +3.68 ～ +7.88，花岗岩类为 −5.34 ～ +9.00(洪大卫等，2000；Wu *et al.*，2000)，表明亏损地幔成分在这些后碰撞岩浆岩中占有非常重要的地位，亦表明天山和准噶尔周边地区在后碰撞阶段广泛底侵作用的存在。幔源岩浆的底侵作用将导致天山地壳增厚，并改变地壳的热状态，使地热梯度增大。特别是后碰撞岩石圈伸展和地幔隆升将导致地温梯度进一步增大，同时地幔去气作用将导致武岩固相线温度降低。当地温到达玄武岩固相线相温度之上，在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相温压域，底侵在地壳底部的玄武质岩石发生部分熔融形成埃达克质熔体，它们侵入到地壳浅部或喷出地表形成阿吾拉勒钠长斑岩和钠质英安岩。因此，阿吾拉勒二叠纪埃达克质英安岩和钠

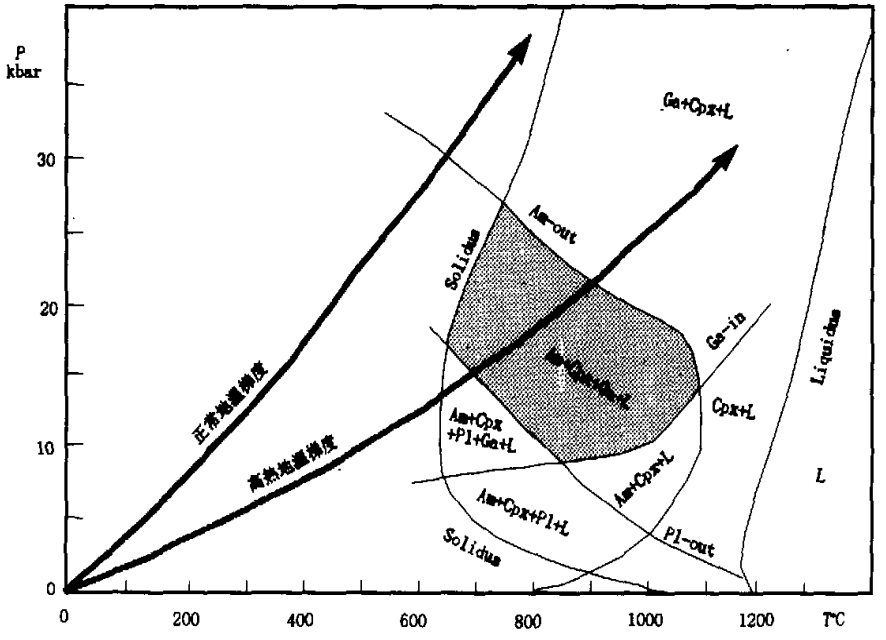


图 3 拉斑玄武岩-H_2O(5%)体系压力 (P)-温度 (T)相图(据 Green, 1982)

(1)Am:角闪石; Cpx:单斜辉石; Pl:斜长石; Ga:石榴石; L:熔体; (2)在固相线(Solidus)温度之上,角闪石、斜长石和石榴石的稳定域由 Am-out、Pl-out、Ga-in 三条线限定;(3)阴影域为角闪岩相向榴辉岩相过渡域,含残留相石榴石和角闪石,不含斜长石,可能是高热地温梯度条件下地壳底侵玄武质岩石熔融产生埃达克质熔体的最佳温压域

Fig. 3 P-T diagram ofr tholeiitic compositions with 5% added H_2O (from Green, 1982)

长斑岩不仅是底侵玄武质岩石熔融形成的新生陆壳物质,而且可能是西天山晚古生代后碰撞阶段幔源岩浆底侵作用和地壳垂向生长的重要岩石标志。

6 结论

(1) 西天山阿吾拉勒二叠纪钠质英安岩和钠长斑岩具有与埃达克岩一致的高 Sr,低 Y、Yb 和 Eu 正异常等独特岩石地球化学特征,是玄武质岩石在角闪岩相向榴辉岩相过渡或榴辉岩相条件下部分熔融的产物。

(2) 系统的 Nd 和 Sr 同位素组成研究表明,阿吾拉勒钠质英安岩和钠长斑岩的($^{143}Nd/^{144}Nd$)$_i$ 和($^{87}Sr/^{86}Sr$)$_i$ 值与俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩有明显的差别,指示其不是俯冲洋壳部分熔融的产物;结合其形成于后碰撞构造背景及与同时代的玄武质岩石 Nd 和 Sr 同位素组成的相似性,用厚地壳条件下新底侵的玄武质下地壳部分熔融来解释这些岩石的成因更为合理。阿吾拉勒埃达克质岩石可能是天山造山带晚古生代后碰撞阶段地幔玄武岩浆底侵作用和地壳垂向生长的重要岩石标志。

致谢: 本文工作获国家攻关项目(96-915-03-02)、国家重点基础研究项目(G1999043200)、国家自然科学基金和南京大学国家教委重点实验室访问学者项目资助;张旗教授鼓励作者从事埃达克岩研究,并指导本文的写作;特此致谢!

References

Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature. 362: 144－146

Chen J F, Man F X, Ni S B. 1995. Nd and Sr isotopic geochemistry of mafic-supramafic rocks at Jinbulake of west Tianshan. Geochimica, 24: 121－127 (in Chinese with English abstract)

Chen J F, Zhou T X, Xie Z, Zhang X, Guo X S. 2000. Formation of positive $\epsilon_{Nd}(t)$ granitoids from the Alataw Mountains, Xinjiang, China, by mixing and fractional crystallization: implication for Phanerozoic crustal growth. Tectonophysics, 328: 53－67

Defant M J, and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted Lithosphere. Nature, 347: 662－665

Defant M J, and Drummond M S. 1993. Potential example of the

partial melting of the subducted Lithosphere in a volcanic arc. Geology, 21: 547−550

Drummond M S, Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. J. Geophys. Res., 95: 21503−21521

Gao J, Li M S, Xiao X H, Tang Y, He G Q. 1998. Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan Orogen, northwestern China. Tectonophysics, 287:213−231

Green T H. 1980. Island arc and continent-building magmatism—A review of petrogenetic models based on experimental petrology and geochemistry. Tectonophysics, 63: 367−385

Green T H. 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesite, in: Andesite-Orogenic Andesite and Related Rocks, edited by R. S. Thorpe, pp. 465−487, John Wiley, New York.

Gromet L P, Silver L T. 1987. REE variations across the peninsular ranges batholith: Implications for batholithic petrogenesis and crustal growth in magmatic arcs. J. Petrology, 28: 75−125

Han B F, Wang S G, Hong D W. 1998. Metaalumineous-alumineous granite with positive $\varepsilon_{Nd}(t)$: Yebushan Pluton of Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 43(12): 1323−1328

Han B F, Wang S G, Jahn B M. 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. Chemical Geology, 138:135−159

Han B F, He G Q, Wang S-G. 1999. Mantle-derived magmatism, underplating and the nature of basement of Junggar Basin. Sciences in China (Series D), 29(1): 16−21

He B C, Tan K R. 1994. Age and Nd, Sr isotopic compositions of mantle-derived magmas at Jimunaibu gold deposit, Xinjiang. Geotectonica et Metallogenia, 18: 219−228 (in Chinese with English abstract)

He G Q, Li M S, Wang S G. 1994. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang, China. Ulumqi, Xinjiang People's Publishing House. p1−256 (in Chinese with English abstract)

Hong D W, Wang S G, Xie X L. 2000. Genesis of positive $\varepsilon_{Nd}(t)$ granitoids in the Da Hinggan Mts-Mongolia Orogenic Belt and growth of continental crust. Earth Science Frontiers, 7(2):441−456 (in Chinese)

Hopson C, Wen J, Tilton G. 1989. Paleozoic plutonism in East Junggar, Bogdashan, and east Tianshan, NW China. EOS Trans. Am. Geophys. Union, 70: 1403−1404

Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, Chen Y B, Zhang Q F. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. Tectonophysics, 328: 15−51

Huang X, Wu L R. 1990. Nd and Sr isotopes of granitoids from Shanxi Province and their significance for tectonic evolution. Acta Petrol. Sin., 6: 1−11 (in Chinese with English abstract)

Kay R W. 1978. Aleutian magnesian andesites: Melts from subducted Pacific ocean crust. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 4: 117−132

Kay S M, Ramos V A, and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America. Journal of Geology, 101: 703−714

Kwon S T, Tilton G R, Coleman R G *et al*. 1989. Isotope studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. Tectonics, 8: 719−727

Li H Q, Xie F C, Chang H L. 1998. Dating of metallogenis of metal ore deposits in North Xinjiang. Beijing: Geological Publication House, p195−201 (in Chinese with English abstract)

Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archean granitoids. Lithos, 46:411−429

Peng C, Gao R. 2000. Lithosphere structure and vertical variation of Chinese continent and near oceanic area. Beijing: Seismic Publishing House, pp83−85 (in Chinese with English abstract)

Petford N, Atherton M P. 1996. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru. J. Petrology, 37: 1491−1521

Rapp R P, and Watson E B. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8−32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. J. Petrology, 36: 891−931

Sen C, Dunn T. 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 Gpa: implications for the origin of adakites. Contrib. Mineral. Petrol., 117: 394−409

Stern C R, and Killian R. 1996. Role of the subducted slab, mantle wedge and continental crust in the generation of adakites from the Andean Austral Volcanic Zone. Contrib. Mineral. Petrol., 123: 263−281

Wang Q, Zhao Z H, Xiong X L, Xu J F. 2001. Melting of the underplated basaltic lower crust: Evidence from the Shaxi sodic quartz diorite-porphyrites, Anhui Province, China. Geochimica, 30(4): 353−362 (in Chinese with English abstract)

Wu F Y, Jahn B M, Simon W, Sun D Y. 2000. Phanerozoic crustal growth: U-Pb and Sr-Nd isotopic evidence from the granites in northeastern China. Tectonophysics, 328: 89−113

Xiao X, Tang Y C, Feng Y, Zhu B, Li J, Zhao M. 1992. The tectonic evolution of North Xinjiang and its adjacent regions. Geol. Publ. House, Beijing, 199pp (in Chinese with English abstract)

Xiong X L, Zhao Z H, Bai Z H. 2001. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust. Chinese Science Bulletin, 46(10):810−817

Xu J F, Wang Q, Yu X Y. 2000. Geochemistry of high-Mg andesites and adakitic andesite from the Sanchazi block of the Mian-Lue ophiolitic mélange in the Qinling Mountains, central China: Evidence of partial melting of the subducted Paleo-Tethyan crust. Geochim. J., 34:359−377

Zhang Q, Wang Y, Qian Q. 2001a. The chatacteristics and tectonic-metallogenic signifances of the Mesozoic adakitic rocks in eastern China. Acta Petrologica Sinica, 17(2):236－244 (in Chinese with English abstract)

Zhang Q, Wang Y, Wang E C. 2001b. Existence of east China Plateau in mid-late Yanshan period: implication from adakites. Scientia Geologica Sinica, 36(2): 248－255 (in Chinese with English abstract)

Zhao Z H, Bai Z H, Xiong X L. 2000. The volcanic-plutonic magmatism of late Paleozoic in the north part of western Tianshan and their relationships with Cu and Au mineralization (unpublished study report, in Chinese)

Zhao Z H, Wang Z G, Zou T L. 1993. The REE and O, Pb, Sr and Nd compositions and the genesis types of granitoids in Altai Mountain. In: Tu G C (ed.). The new progress of solid earth science in North Xinjiang. Beijing, Sciences Publication House, 239－266 (in Chinese)

Zhao Z H, Wang Z G, Zou T L. 1996. A discussion on the origin of Wulungur alkalic granites in Xinjiang. Geochimica, 25, 205－220 (in Chinese with English abstract)

Zhou T. X, Chen J F, Li X M. 1996. The Genesis of granitiods with high $\varepsilon_{Nd}(t)$ in Alatao Mountain of Xinjiang. Scientia Geologica Sinica, 31: 71－79 (in Chinese)

附中文参考文献

陈江峰,满发胜,倪守斌. 1995. 西天山菁布拉克岩带基性-超基性岩的 Nd,Sr 同位素地球化学. 地球化学,24:121－127

韩宝福,何国琦,王式洸. 1999. 后碰撞幔源岩浆活动、底垫作用及准噶尔盆地基底的性质. 中国科学(D 辑),29(1):16－21

韩宝福,王式洸,洪大卫等. 1998. 正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值的准铝-过铝花岗岩——新疆也布山花岗岩体,科学通报,43(12):1323－1328

何国琦,李茂松,刘德权等. 1994. 中国新疆古生代地壳演化和成矿. 乌鲁木齐:新疆人民出版社;香港:香港文化教育出版社, 1－256

贺伯初,谭克(.. 1994. 北疆吉木乃布氏金矿幔源岩浆岩时代及 Sr, Nd 同位素证据. 大地构造与成矿学,18:219－228

洪大卫,王式洸,谢锡林等. 2000. 兴蒙造山带正 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长. 地学前缘,7(2):441－456

黄萱. 1990. 山西省花岗岩类的 Nd 和 Sr 同位素组成及构造演化意义,岩石学报,6:1－11

李华芹,谢才富,常海量等. 1998. 新疆北部有色贵金属矿床成矿作用年代学,地质出版社,195－201

彭聪,高锐. 2000. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究。北京,地震出版社,83－85

王强,赵振华,熊小林,许继峰. 2001. 底侵玄武质下地壳的熔融:来自安徽沙溪 Adakite 质富钠石英闪长玢岩的证据. 地球化学,30(4):353－362

肖序常,汤耀庆,冯益民等. 1992. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京:地质出版社

熊小林,赵振华,白正华. 2001. 西天山阿吾拉勒 Adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生. 科学通报,2001,46(4):281－287

张旗,钱青,王焰. 2001a. 中国东部晚中生代埃达克岩的特征及其构造-成矿意义。岩石学报,17(2):236－244

张旗,钱青,王二七. 2001b. 燕山中晚期的中国东部高原—埃达克岩的启示。地质科学,36(2):248－255

赵振华,白正华,梅厚钧,熊小林,王一先. 2000. 西天山北部晚古生代火山-浅侵位岩浆活动与金、铜、多金属矿床成矿关系的研究,国家 95 攻关项目 96-915-03-02 专题报告,123－130

赵振华,王中刚,邹天伦等. 1993. 阿尔泰花岗岩类 REE 及 O,Pb, Sr,Nd 同位素组成及成岩类型. 见:涂光炽主编.新疆北部固体地球科学新进展. 北京:科学出版社,239－266

赵振华,王中刚,邹天伦等. 1996. 新疆乌伦古富碱花岗岩成因探讨. 地球化学,25: 205－220

周泰禧,陈江峰,李学明. 1996. 新疆阿拉套山花岗岩类高 εNd 值的成因. 地质科学,31:71－79