

新疆西准噶尔北部赛尔山地区早志留世流纹斑岩成因及其大地构造意义

杨亚琦, 赵磊, 郑荣国, 徐芹芹

(中国地质科学院地质研究所, 自然资源部深地动力学重点实验室, 北京 100037)

摘要: 在新疆西准噶尔北部的赛尔山地区识别出早志留世喷发的流纹斑岩底垫侵入到布克赛尔蛇绿混杂带内。流纹斑岩具有高 SiO_2 (70.88% ~ 73.36%)、 Al_2O_3 (14.30% ~ 15.31%) 和极低的 MgO (0.36% ~ 1.09%) 含量, 同时, 还具有中-高的 Sr 含量 (130×10^{-6} ~ 527×10^{-6})、高的 Sr/Y (22.26 ~ 78.42) 和 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (20.27 ~ 24.24) 值及低的重稀土元素含量。此外, 流纹斑岩与谢米斯台山北缘早志留世-早泥盆世埃达克质岩都具有正高的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和年轻的 Hf 模式年龄, 同时它们还具有较高的 K_2O 含量、较低的 $\text{Mg}^\#$ 值和低的 Cr、Ni 等相容元素含量, 认为它们均形成于年轻下地壳的部分熔融。在早奥陶世-早泥盆世, 西准噶尔北部可能经历过洋内俯冲、弧-弧碰撞、洋盆闭合和碰撞后伸展阶段的构造演化过程, 其中, 早志留世之前洋盆已经闭合, 随后西准噶尔北部逐渐进入碰撞后松弛期, 幔源物质向下地壳渗透, 与新生不久的下地壳发生混合形成岩浆池, 岩浆通过多通道、多层次的复杂渠道到达中上部地壳, 从而形成大量 435 ~ 400 Ma 的 A_2 型和 I 型花岗岩以及少量埃达克质的中酸性岩浆岩, 完成了大规模的地壳垂向增生过程。

关键词: 流纹斑岩; 下地壳熔融; 后碰撞; 西准噶尔; 早志留世

中图分类号: P588.14; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)06-0901-16

The petrogenesis and implications of Early Silurian rhyolite porphyry in Saier Mountain region of the northern part of West Junggar

YANG Ya-qi, ZHAO Lei, ZHENG Rong-guo and XU Qin-qin

(Key Laboratory of Deep Geodynamics, Ministry of Natural Resources, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Hebukesai ophiolite was intruded by Early Silurian rhyolite porphyry in the Saier Mountain region of northern West Junggar. The rhyolite porphyries exhibit obviously high SiO_2 (70.88% ~ 73.36%), Al_2O_3 (14.30% ~ 15.31%) and extremely low MgO (0.36% ~ 1.09%) values, and display relatively high Sr and low Y values with high Sr/Y (22.26 ~ 78.42) and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (20.27 ~ 24.24) ratios. Moreover, both rhyolite porphyries in the Saier Mountain and Early Silurian-Early Devonian adakitic rocks in the north of Xiemisitai Mountain show high positive $\epsilon\text{Hf}(t)$ values and young Hf model ages, and have low K_2O values, $\text{Mg}^\#$ values as well as compatible elements (Cr, Co, Ni). All these features prove that in Early Silurian-Early Devonian period these rocks in Saier Mountain and the north of Xiemisitai Mountain were formed by partial melting of lower juvenile crust rather than by subducted oceanic crust. From Early Ordovician to Early Devonian, the north of West Junggar underwent intra-oceanic

收稿日期: 2018-04-14; 接受日期: 2018-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572206); 中国地质调查项目(121201102000150009)

作者简介: 杨亚琦(1991-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业, E-mail: yangyaqi18@163.com; 通讯作者: 赵磊(1979-), 男, 副研究员, 从事区域大地构造研究, E-mail: jleiz@163.com。

subduction, arc-arc collision, the closure of the ocean and post-collisional extension processes. The ocean in the north of West Junggar might have been closed before Early Silurian, followed subsequently by post-collisional extension. In the post-collisional extension stage, the mantle-derived materials migrated upward and were mixed with juvenile crust-derived materials, forming a mixed magma chamber. Lots of 435 ~ 400 Ma A_2 -type granites, I-type granites and a small amount of adakitic rocks were derived from this mixed magma chamber, and then the massive vertical crustal accretion was completed in this period.

Key words: rhyolite porphyry; partial melting of lower crust; post-collision; West Junggar; Early Silurian

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41572206); Project of China Geological Survey (121201102000150009)

流纹岩的成因一直是岩石学研究的热点,其物质来源也相当复杂,既可以来源于镁铁质下地壳、长英质上地壳(李伍平等,2000)和古俯冲洋壳板块(王建国等,2013)的部分熔融,也可以通过结晶分异作用或同化结晶分异作用派生自镁铁质至过渡性岩浆(Shinjo and Kato, 2000; 高晓峰等, 2007),还可以由幔源玄武岩岩浆的结晶分离作用和部分陆壳组分混合而形成(Riley *et al.*, 2001; Briand *et al.*, 2002)。作为长英质火成岩,流纹岩记录了地壳演化过程,为厘定地壳的组分、结构、再造和增生提供了重要的研究载体(Zhang *et al.*, 2018),也为制约造山带的演化起到至关重要的作用(Jahn *et al.*, 2000; 韩宝福等, 2010)。

近年来,学者们对新疆西准噶尔北部谢米斯台山和赛尔山地区志留纪—早泥盆世的岩浆岩进行了大量的年代学和地球化学工作(Han *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2010, 2015; Yin *et al.*, 2013, 2017; 杨钢等, 2015),但对其成因和构造背景仍存争议。Chen 等(2015)认为晚志留世—早泥盆世谢米斯台山和赛尔山发育的大量 A_2 型和 I 型花岗岩及相关的基性—长英质岩石形成于后碰撞环境;另一种观点则认为志留纪—早泥盆世该地区仍处于洋内俯冲阶段,大洋板片的熔融和俯冲流体的加入而形成大量与岛弧相关的岩浆岩(Shen *et al.*, 2012; 王金荣等, 2013);同时, Yin 等(2017)提出俯冲板片回撤使得软流圈物质上涌的模型来解释这套岩浆岩组合的成因。此外,在谢米斯台山北坡及西缘还发现了多处志留纪—早泥盆世的埃达克质岩(王金荣等, 2013; 孙勇等, 2015; Yin *et al.*, 2017),被认为是俯冲洋壳熔融的产物。

杨亚琦等(2018)在赛尔山西缘和布克赛尔蛇绿混杂带内识别出一套早志留世喷发的流纹斑岩,锆石 U-Pb 定年结果为 435 ± 2 Ma,其中部分样品具有

典型埃达克质岩的地球化学特征,其底垫贯穿或底垫侵入于蛇绿岩不同的单元组分中,推测在早志留世之前和布克赛尔蛇绿岩所代表的洋盆可能已经闭合。本文对赛尔山早志留世流纹斑岩的地球化学和 Hf 同位素特征进行了详细的研究,并与谢米斯台山北坡的埃达克质岩进行了对比,结合区域上同时代岩浆岩特征,探讨了赛尔山早志留世流纹斑岩的成因,为西准噶尔北部古生代的大地构造演化提供制约。

1 区域地质概况

新疆西准噶尔位于中亚造山带的西南缘(图 1a),构造背景复杂,岩浆活动频繁、强烈(韩宝福等, 2006; Xiao *et al.*, 2008),是中亚古生代增生造山带的重要组成部分。

西准噶尔地区以白杨河—和什托洛盖东西向谷地一线为界,南部和北部的沉积、岩浆活动以及构造属性等方面均表现出明显差异(李行等, 1987; 赵磊等, 2013)。其中,西准噶尔北部地区以近东西向展布的构造带为特征区别于西准噶尔中南部,主要由晚古生代的扎尔玛—萨吾尔岩浆弧、早古生代的博什库尔—成吉思岩浆弧构成(图 1b)。同时,受近 EW 向断裂控制,在西准噶尔北部自西向东还出露有库吉拜、查干陶勒盖、和布克赛尔以及洪古勒楞等多条蛇绿混杂岩带(朱永峰等, 2006; 张元元等, 2010; 赵磊等, 2013)。南部地区,达拉布特、玛依勒一带地层序列复杂,化石稀少,受 NE-SW 向断裂控制,由西向东主要出露巴尔雷克、玛依勒、唐巴勒、达拉布特、克拉玛依等多条蛇绿混杂岩带(Jian *et al.*, 2005; 辜平阳等, 2009; Yang *et al.*, 2015)(图 1b)。位于西准噶尔北部的研究区下古生界志留系和泥盆系广泛发育:志留系总体上以滨浅海相火山—沉积地层为主,为一套中酸性火山岩、火山碎屑岩及少量碳

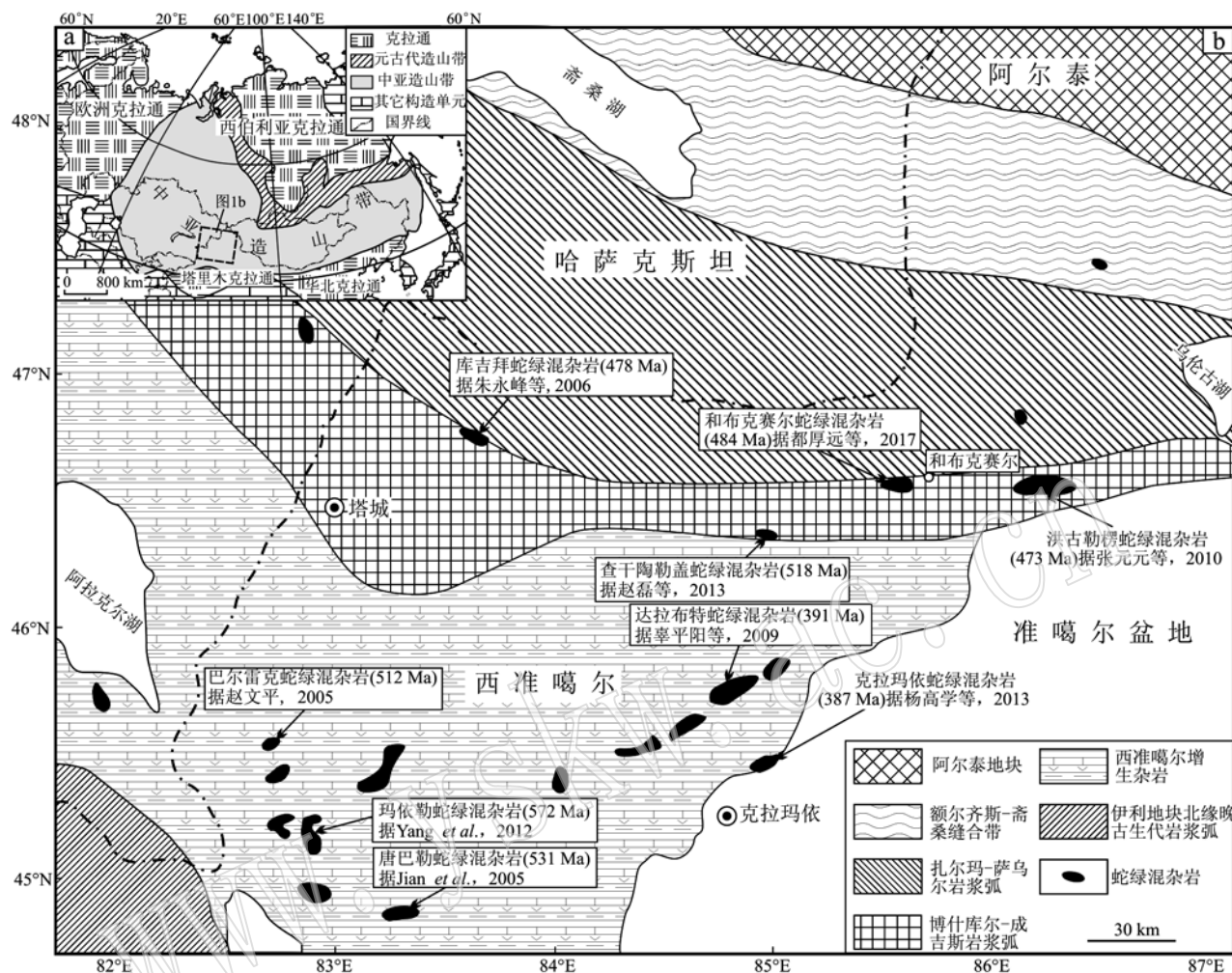


图1 中亚造山带构造简图(a, 据 Liu *et al.*, 2017)和西准噶尔地区构造分区简图(b, 据 Chen *et al.*, 2015)

Fig.1 Simplified tectonic map of the Central Asian Orogenic Belt(a, modified after Liu *et al.*, 2017) and West Junggar (b, modified after Chen *et al.*, 2015)

酸盐岩组合;泥盆系则开始发育以陆相磨拉石建造为主的砾岩和砂岩沉积^①。

2 野外和岩相学特征

赛尔山早志留世流纹斑岩沿着蛇绿混杂岩带走向近东西断续展布(图2),并贯穿整个蛇绿混杂岩带(图3a)。同时,流纹斑岩底垫侵入或者底垫贯穿蛇绿岩不同的组分(图3a),包括橄榄岩(图3b)和辉长岩(图3c)等。

流纹斑岩风化面呈黄红色,肉眼可见粒径1~2 mm的石英斑晶,发育走向80°~100°的密集劈理

(图3d)。显微镜下,流纹斑岩呈斑状结构,斑晶主要为石英和钠长石。石英斑晶具溶蚀结构,它形,粒径0.5~3 mm,约占10%;钠长石斑晶多呈柱状,部分呈碎屑状,半自形-自形,粒径0.1~2 mm,约占15%;基质呈霏细结构(图3e),主要为石英和长石微晶。

3 分析测试方法

流纹斑岩样品(E 85°34'42", N 46°48'46")全岩地球化学测试在中核集团核工业北京地质研究院分析测试研究所完成。选取新鲜的样品经切割去表皮、蒸馏水洗净、自然干燥后粉碎至200目待检。

① 中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 2015. 新疆1:25万铁厂沟幅(L45C002001)区域地质调查报告.

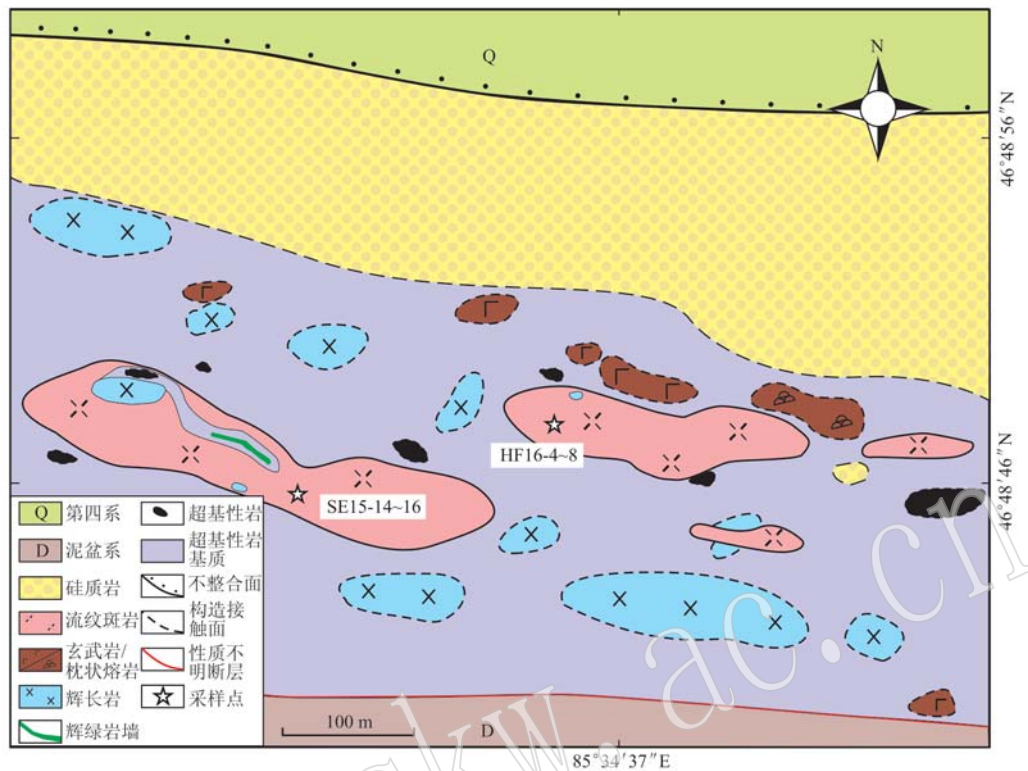


图2 和布克赛尔蛇绿混杂岩地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Hebukesai ophiolitic mélange

主量元素组分测定中, FeO 含量依据重铬酸钾滴定法测定, 其余组分分析在飞利浦 PW2404-X 型 XRF 上完成, 分析精度优于 3%, 具体实验流程参考 Norrish 和 Hutton (1969); 微量元素组成分析在 Finnigan MAT 的 HR-ICP-MS (Element 1) 型 ICP-MS 上进行, 分析精度优于 6%, 分析方法详见文献 (闫欣等, 2001)。

锆石 Hf 同位素分析在天津地质矿产研究所实验测试室激光剥蚀多接收器等离子体质谱仪 (LA-MC-ICP-MS) 上进行, 激光束斑直径为 50 μm , 激光剥蚀时间 26 s, 采用锆石 GJ-1 标准, 分析流程和校正参见文献 (耿建珍等, 2011)。为了使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应, 此次锆石 Hf 同位素的分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点位于同一颗锆石晶体, 锆石的年代学工作见杨亚琦等 (2018)。在计算 ^{176}Lu 的衰变常数时采用 $1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Söderlund *et al.*, 2004; 吴福元等, 2007)。球粒陨石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.033 2 和 0.282 772 (Blichert and Albarède, 1997), 亏损地幔的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.038 4 和 0.283 25 (Griffin *et al.*, 2002), ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$) 平均地

壳为 0.015。

4 测试结果

4.1 岩石地球化学特征

赛尔山早志留世流纹斑岩详细的主、微量元素的测试结果见表 1。由表 1 可见, 流纹斑岩样品 SiO_2 含量为 70.88% ~ 73.36%, Al_2O_3 含量为 14.30% ~ 15.31%, 明显高硅富铝; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 含量介于 6.31% ~ 7.47% 之间, 且 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 为 0.81 ~ 3.34, 平均值为 1.63, 具有富钠贫钾的特征。同时, 样品具有较低的 TiO_2 (0.09% ~ 0.11%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (1.26% ~ 1.69%) 和 P_2O_5 (0.07%) 含量, 极低的 MgO (0.36% ~ 1.09%)、 CaO (0.38% ~ 1.81%) 和 MnO (0.024% ~ 0.122%) 含量。TAS 和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ 图解投点显示流纹斑岩具有亚碱性的特征, 主体为钙碱性岩石系列 (图 4)。同时, 样品具有较低的碱度 ($\text{AR} = 2.27 \sim 2.75$), 铝饱和指数 (A/CNK) > 1.1 (大部分在 1.12 ~ 1.66 之间, 表 1), 属于过铝质岩石系列。

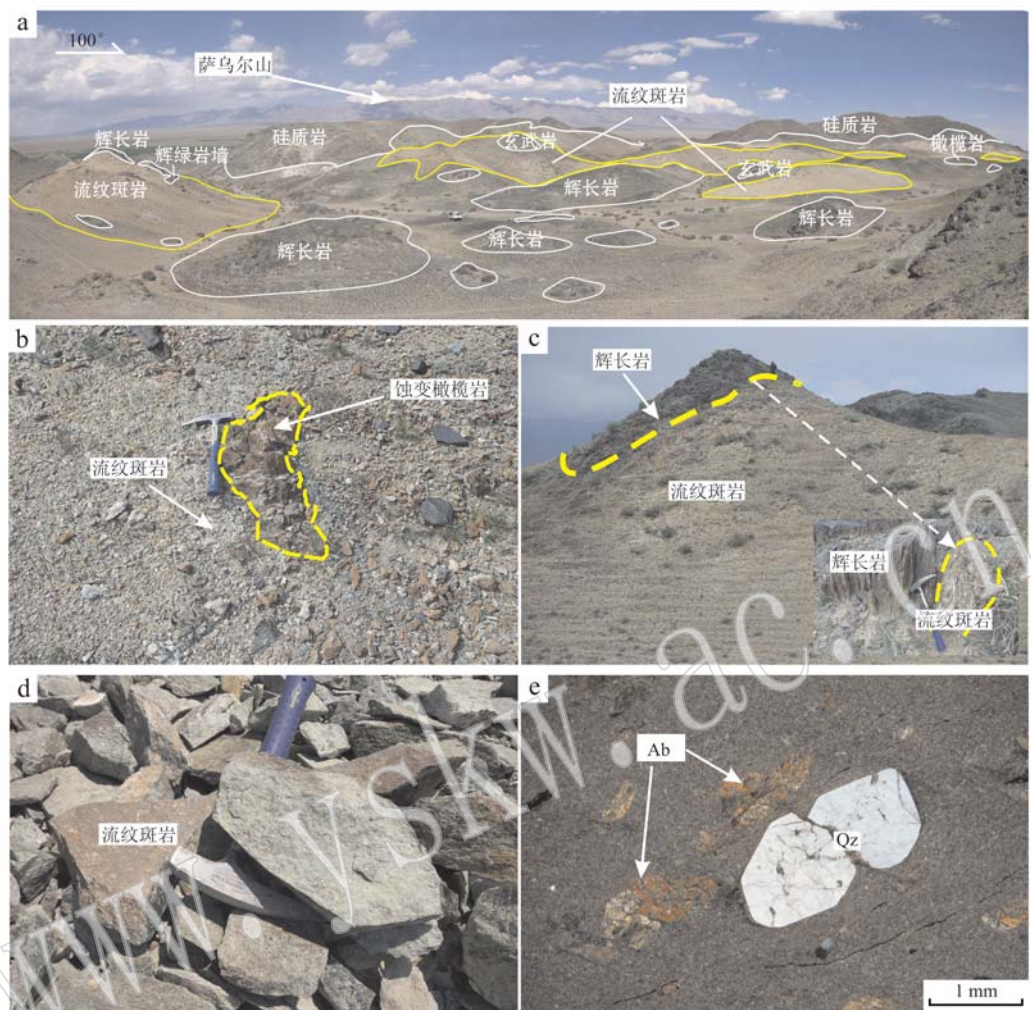


图3 赛尔山地区流纹斑岩野外和显微照片

Fig. 3 Field photographs and microphotograph of rhyolite porphyries in the Saier Mountain

a—和布克赛尔蛇绿混杂岩野外全景图; b—流纹斑岩底垫贯穿变质橄榄岩; c—流纹斑岩底垫侵入辉长岩中; d—流纹斑岩;
e—流纹斑岩镜下特征(正交偏光); Ab—钠长石; Qz—石英

a—the panorama of Hebukesaier ophiolitic mélange; b—rhyolite porphyry cutting metaperidotite; c—rhyolite porphyry that intruded into gabbro; d—rhyolite porphyry; e—rhyolite porphyry (crossed nicols); Ab—albite; Qz—quartz

流纹斑岩的稀土元素总量较低, ΣREE 介于 $56.85 \times 10^{-6} \sim 64.63 \times 10^{-6}$ 之间, δEu 介于 $0.71 \sim 1$ 之间(平均值 0.88), 显示较弱的负铕异常, 表明流纹斑岩可能经历了微弱的斜长石分离结晶作用 (Rollison, 1993)。轻稀土元素明显富集, 重稀土元素显著亏损, 稀土元素配分图解呈右倾型(图 5a), 在原始地幔标准化的蛛网图中(图 5b), 样品的大离子亲石元素(K、Rb、Sr、Pb)强烈富集, 高场强元素(Nb、Ta、Ti)显著亏损, 具有典型的岛弧火山岩的特征。样品可能受海水蚀变的原因, Sr 含量变化较大, 大部分集中在 $130 \times 10^{-6} \sim 281 \times 10^{-6}$ 之间, 还有部

分样品 Sr 含量较高($429 \times 10^{-6} \sim 527 \times 10^{-6}$), 此外, 样品还具有低 Y($5.77 \times 10^{-6} \sim 6.46 \times 10^{-6}$) 和 Yb($0.43 \times 10^{-6} \sim 0.52 \times 10^{-6}$) 含量, 且 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ ($20.28 \sim 24.24$) > 10 , Sr/Y ($22.26 \sim 78.42$) > 20 , 部分样品与埃达克质岩的微量元素特征(王强等, 2008)相近。

4.2 锆石 Hf 同位素特征

样品 Hf 同位素分析测试结果列于表 2。由表 2 可见, 在流纹斑岩 U-Pb 测年的 18 颗锆石微区原位 Hf 同位素分析数据中, 有 5 个点模式年龄小于形成年龄, 本文就剩余 13 个点的锆石 Hf 同位素进行了

表 1 赛尔山地区流纹斑岩的主量元素($w_B/\%$)和微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果Table 1 Major elements($w_B/\%$)and trace elements($w_B/10^{-6}$)of rhyolite porphyries in the Saier Mountain

样品编号	SE15-14	SE15-15	SE15-16	HF16-04	HF16-05	HF16-06	HF16-07	HF16-08
SiO ₂	73.05	73.07	73.10	72.19	73.36	72.72	70.88	72.68
TiO ₂	0.10	0.10	0.11	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11
Al ₂ O ₃	14.91	15.31	15.23	14.53	14.88	14.92	14.30	15.37
Fe ₂ O _{3T}	1.51	1.33	1.47	1.37	1.69	1.33	1.26	1.39
FeO	0.76	0.60	0.78	0.84	0.97	0.63	0.75	0.65
MnO	0.03	0.03	0.02	0.07	0.05	0.07	0.12	0.04
MgO	0.39	0.37	0.42	0.48	1.09	0.36	0.35	0.38
CaO	0.85	0.69	0.68	1.81	0.38	1.11	2.75	0.73
K ₂ O	2.90	2.95	3.04	3.19	3.42	1.72	2.05	2.40
Na ₂ O	3.41	3.68	3.39	3.16	2.77	5.75	4.72	4.99
P ₂ O ₅	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
烧失量	2.69	2.39	2.37	3.00	2.16	1.79	3.32	1.77
total	99.76	99.85	99.74	99.96	99.97	99.94	99.92	99.93
Mg [#]	34	35.71	35.91	40.71	56.09	34.65	35.62	35.13
AR	2.34	2.42	2.36	2.27	2.37	2.75	2.32	2.70
A/NK	1.70	1.66	1.72	1.68	1.80	1.32	1.43	1.42
A/CNK	1.45	1.46	1.51	1.22	1.66	1.12	0.95	1.27
Cr	3.00	1.84	1.89	2.54	1.98	13.50	1.70	2.07
Co	1.17	0.93	1.27	1.02	1.42	1.17	1.03	1.07
Ni	2.07	0.76	0.92	3.20	3.00	2.24	0.92	0.96
Rb	77	75	79	80	88	47	54	59
Sr	194	203	197	207	130	527	429	281
Y	5.93	5.93	5.83	6.46	5.84	6.72	6.57	5.77
Zr	69.50	70.70	76.70	68.80	61.10	69.10	62.40	69.20
Nb	7.30	7.66	7.71	6.83	6.82	7.31	6.28	6.88
Ba	708	700	756	618	708	573	478	761
La	15.30	14.60	15.20	16.00	14.90	14.50	13.60	14.10
Ce	28.10	28.40	28.40	26.90	26.30	25.60	24.20	23.80
Pr	2.73	2.96	3.01	3.18	2.81	2.97	2.76	2.72
Nd	11.00	11.50	11.20	11.30	10.30	10.50	9.91	10.10
Sm	1.72	1.86	2.10	1.89	1.71	1.83	1.71	1.75
Eu	0.43	0.40	0.52	0.54	0.50	0.52	0.52	0.48
Gd	1.56	1.52	1.62	1.56	1.41	1.51	1.40	1.41
Tb	0.23	0.23	0.23	0.26	0.24	0.26	0.25	0.26
Dy	1.11	0.99	1.04	1.17	1.08	1.16	1.17	1.12
Ho	0.19	0.17	0.18	0.21	0.19	0.20	0.20	0.19
Er	0.52	0.46	0.50	0.49	0.49	0.53	0.50	0.51
Tm	0.06	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07
Yb	0.47	0.43	0.50	0.50	0.52	0.51	0.47	0.50
Lu	0.07	0.06	0.07	0.07	0.08	0.07	0.07	0.07
Hf	2.53	2.34	2.50	2.11	2.03	2.12	1.97	2.17
Ta	0.70	0.95	0.75	0.60	0.62	0.71	0.64	0.68
Th	4.68	4.58	4.88	4.57	4.67	4.85	4.52	4.37
U	1.16	1.03	1.15	1.21	0.90	1.54	1.36	1.06
Sr/Y	32.72	34.23	33.79	32.04	22.26	78.42	65.30	48.70
ΣREE	63.49	63.65	64.63	64.15	60.59	60.25	56.85	57.06
(La/Yb) _N	23.30	24.24	21.85	23.05	20.47	20.27	20.67	20.43
(La/Sm) _N	1.98	1.75	1.61	1.89	1.94	1.76	1.77	1.79
(Gd/Yb) _N	2.74	2.91	2.69	2.59	2.23	2.43	2.45	2.36
δEu	0.79	0.71	0.83	0.94	0.96	0.93	1.00	0.90

$Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$; $\delta Eu = 2 \text{ Eu}_N / (Sm_N + Gd_N)$; 标 N 表示球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Sun 和 McDonough(1989)。

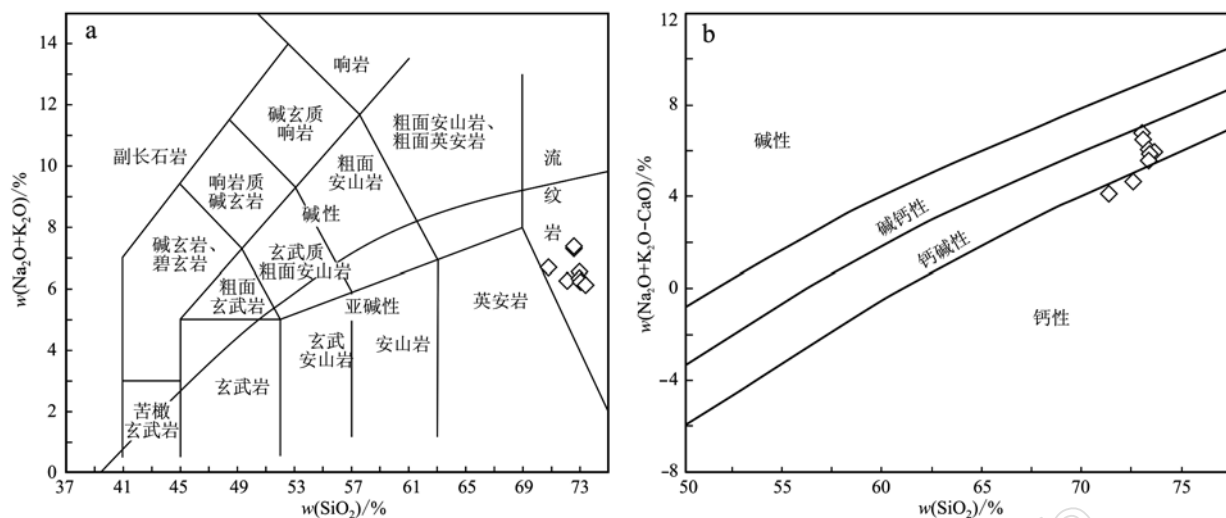


图4 流纹斑岩 TAS 图解(a, 据 Le Maitre *et al.*, 1989)和 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ 图解(b, 据 Frost *et al.*, 2001)
Fig. 4 TAS (a, after Le Maitre *et al.*, 1989) and $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{CaO}) - \text{SiO}_2$ (b, after Frost *et al.*, 2001) diagrams of rhyolite porphyries

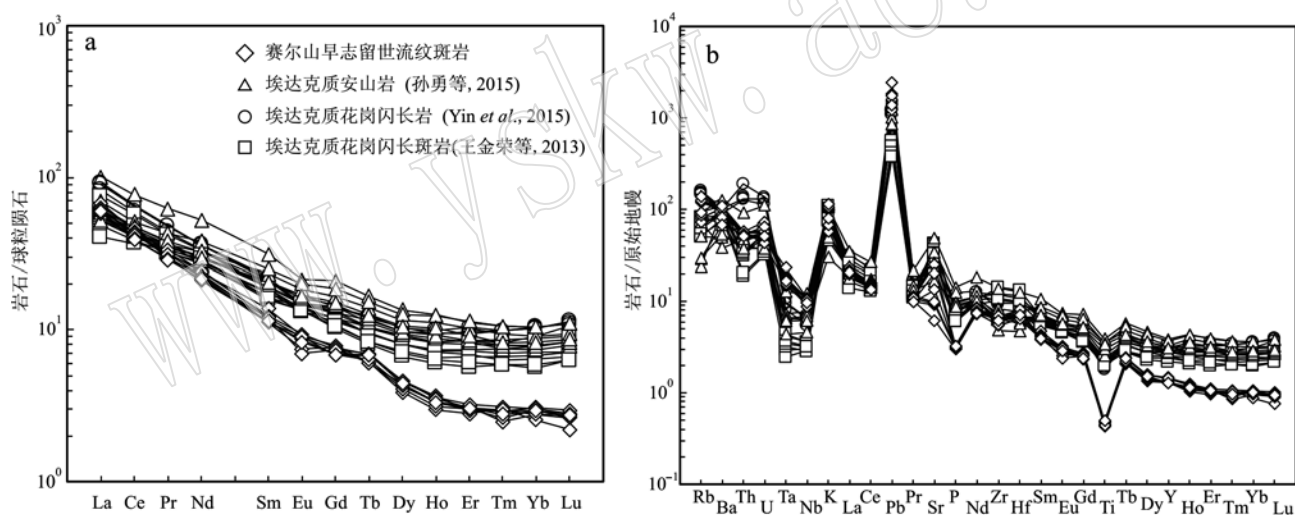


图5 流纹斑岩稀土元素配分图和微量元素蛛网图(球粒陨石和原始地幔标准化值据 Sun and McDonough, 1989)
Fig. 5 Chondrite-normalized rare earth element patterns and primitive mantle-normalized trace element spider diagram of rhyolite porphyries (chondrite and primitive mantle values after Sun and McDonough, 1989)

相关参数的计算和分析(表2)。锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值变化在0.001 0~0.001 8之间,平均值为0.001 2,比值均小于0.002,表明锆石形成后具有很低的放射性成因 Hf 积累,所测的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值基本可以代表锆石结晶时岩浆体系的 Hf 同位素组成。

样品的锆石初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值较一致,分布在0.282 831~0.282 934之间,平均值为0.282 893。 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值在+11.3~+15.0之间,变化范围较窄显示源区物质组成相对均一,正的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值表明其源区为亏损地幔或由亏损地幔而来的年轻地壳(吴福元等,2007)。同时,流纹斑岩的锆石单阶段模式年

龄(t_{DM1})主要集中在574~457 Ma之间,两阶段模式年龄(t_{DM2})集中在646~478 Ma之间,与流纹斑岩锆石结晶年龄(435 ± 2 Ma)相近,表明流纹斑岩的源区为新元古代-早古生代的新生地壳。

5 讨论

5.1 流纹斑岩成因

赛尔山早志留世流纹斑岩 SiO_2 (70.88%~73.36%)和 Al_2O_3 (14.30%~15.31%)含量高,且具有中高含量的Sr(130×10^{-6} ~ 527×10^{-6})、较低

表 2 赛尔山地区流纹斑岩样品锆石 Lu-Hf 同位素分析结果
Table 2 Zircon Lu-Hf isotopic analytical results of rhyolite porphyries in the Saier Mountain

样品号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM1}/Ma	t_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
SE15-15-1	449	0.047 3	0.001 8	0.282 922	0.000 033	0.282 908	5.3	14.7	477	512	-0.95
SE15-15-2	440	0.036 8	0.001 4	0.282 934	0.000 050	0.282 922	5.7	15.0	457	478	-0.96
SE15-15-4	441	0.030 6	0.001 2	0.282 882	0.000 040	0.282 872	3.9	13.2	528	637	-0.96
SE15-15-6	439	0.031 4	0.001 1	0.282 849	0.000 024	0.282 840	2.7	12.1	574	743	-0.97
SE15-15-7	432	0.026 5	0.001 1	0.282 901	0.000 026	0.282 893	4.6	13.8	499	582	-0.97
SE15-15-8	436	0.034 6	0.001 4	0.282 831	0.000 033	0.282 820	2.1	11.3	604	811	-0.96
SE15-15-9	436	0.029 4	0.001 1	0.282 879	0.000 036	0.282 870	3.8	13.1	530	647	-0.97
SE15-15-14	431	0.033 5	0.001 2	0.282 883	0.000 022	0.282 873	3.9	13.1	527	646	-0.96
SE15-15-15	431	0.027 6	0.001 0	0.282 903	0.000 024	0.282 895	4.6	13.8	495	575	-0.97
SE15-15-17	437	0.029 9	0.001 1	0.282 901	0.000 024	0.282 892	4.6	13.9	499	577	-0.97
SE15-15-19	438	0.034 9	0.001 2	0.282 904	0.000 022	0.282 895	4.7	14.0	496	568	-0.96
SE15-15-24	436	0.038 1	0.001 5	0.282 905	0.000 030	0.282 893	4.7	13.9	499	578	-0.96
SE15-15-32	437	0.034 2	0.001 1	0.282 914	0.000 029	0.282 905	5.0	14.3	481	537	-0.97

的 $Y(5.77 \times 10^{-6} \sim 6.46 \times 10^{-6})$ 和低的轻稀土元素 ($Yb = 0.43 \times 10^{-6} \sim 0.52 \times 10^{-6}$), 同时, $Sr/Y > 20$ ($22.26 \sim 78.42$), $(La/Yb)_N > 10$ ($20.27 \sim 24.24$), 显示具有类似埃达克质岩石的地球化学特征 (Defant and Drummond, 1990; 王强等, 2008; Castillo, 2012), 与东准噶尔早志留世埃达克质石英闪长岩特征 (黄岗等, 2016) 相近。在 $Sr/Y - Y$ 图解中, 赛尔山早志留世流纹斑岩大部分投到埃达克岩的区域内 (图 6a)。

根据野外地质和镜下特征推断, 赛尔山早志留世流纹斑岩形成于和布克赛尔蛇绿岩所代表的洋盆闭合之后, 并且形成时海水还未退尽, 长石受到了富

钠海水交代蚀变为钠长石 (杨亚琦等, 2018)。而出露在谢米斯台山北坡 429 Ma 的埃达克质安山岩 (孙勇等, 2015)、420 Ma 的埃达克质花岗闪长岩 (Yin *et al.*, 2017) 以及 411 Ma 的埃达克质花岗闪长斑岩 (王金荣等, 2013) 与赛尔山流纹斑岩稀土和微量元素特征相似 (图 5、图 6), 时空特征相近 (图 7), 据此推断, 赛尔山流纹斑岩与谢米斯台山早志留世-早泥盆世埃达克质岩应为同一成因。

最初认为, 埃达克岩是年轻的 (≤ 25 Ma) 与俯冲弧有关的洋壳 (榴辉岩相) 重熔形成的火山岩或侵入岩 (Defant and Drummond, 1990)。经过近 20 多年的研究发现, 增厚/拆沉下地壳部分熔融 (Atherton and

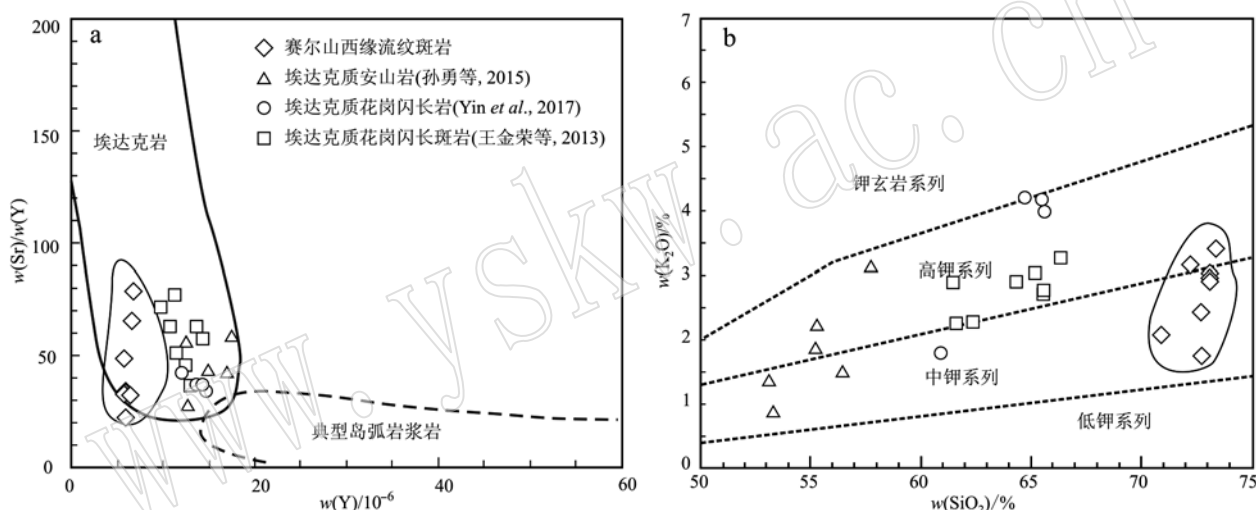


图 6 赛尔山流纹斑岩 $Sr/Y - Y$ (a, 据 Defant *et al.*, 1992) 和 $K_2O - SiO_2$ (b, 据 Peccerillo and Taylor, 1976) 图解
Fig. 6 $Sr/Y - Y$ (a, after Defant *et al.*, 1992) and $K_2O - SiO_2$ (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) diagrams of rhyolite porphyries in the Saier Mountain

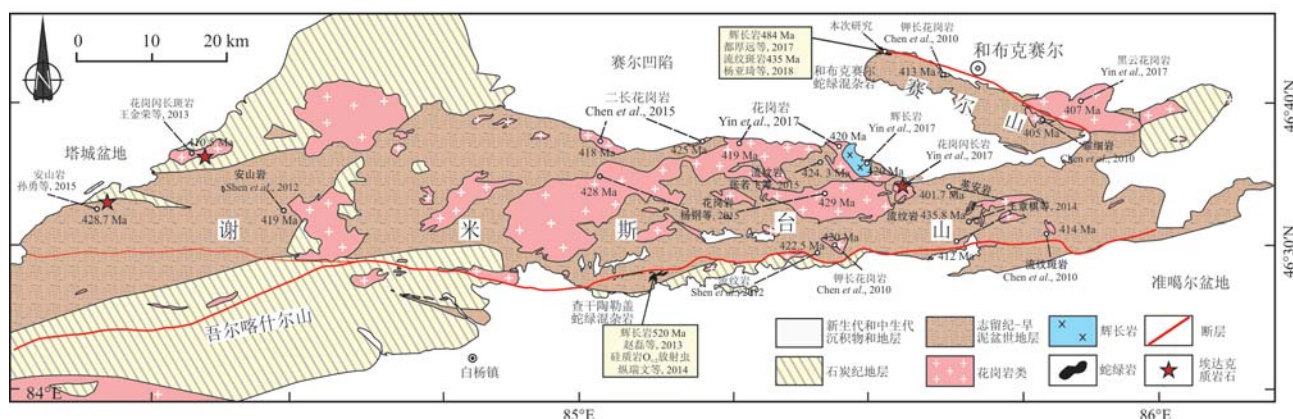


图 7 赛尔山和谢米斯台山火山岩和侵入岩的时空分布图

Fig. 7 The temporal-spatial distribution diagram of extrusive and intrusive rocks in Saier and Xiemisitai Mountains

Petford, 1993; Kay and Marquez, 1993; Xu *et al.*, 2002; Chung *et al.*, 2003; Hou *et al.*, 2004; Gao *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2005, 2006), 基性岩浆高压分异 (Castillo *et al.*, 1999; Macpherson *et al.*, 2006)、俯冲的大陆地壳的部分熔融 (Wang *et al.*, 2008; Lai and Qin, 2013) 及残余洋壳的部分熔融 (Qu *et al.*, 2004; Gao, 2007) 等均可以形成具有上述典型地球化学特征的岩石。因此, 地球化学特征类似俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩被统称为埃达克质岩 (王强等, 2008; 许继峰等, 2014), 同时, Paterno (2006) 提出埃达克质岩中由俯冲板块重熔形成的埃达克岩所占比例很小。由此可见, 埃达克质岩石的成因和形成环境需要结合区域构造背景、同位素特征等多方面证据进行综合分析判断。

Wang 等 (2008) 认为陆壳俯冲部分熔融形成的埃达克岩应具有低或负 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值, 这与本文流纹斑岩 [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +11.3 \sim +15.0$] 和谢米斯台山埃达克质闪长岩 [$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = +13 \sim +15.2$, Yin *et al.*, 2017] 差别较大。同时, 赛尔山西缘流纹斑岩与谢米斯台山埃达克质安山岩、埃达克质花岗闪长岩和埃达克质花岗闪长斑岩均具有低的 MgO (平均值分别为 0.48%、3.88%、2.24%、2.07%) 和 $\text{Mg}^\#$ (平均值分别为 38.47、39.36、46.38、46.03) (王金荣等, 2013; 孙勇等, 2015; Yin *et al.*, 2017), 远小于洋壳的成分 ($\text{MgO} = 7.7\%$, $\text{Mg}^\# = 57$, Taylor and Mclennan, 1985), 因此这些埃达克质岩也不可能为洋壳部分熔融的产物。此外, 幔源基性岩浆的分离结晶作用形成埃达克质岩需要有同时代大规模基性岩浆的存在 (Kay and Marquez, 1993; Barr *et al.*, 2007), 但在研究区域内未发现同时代大规模基性岩的出露。本文流纹斑岩与谢米斯台山埃达克质安山岩、埃达克质花岗闪长岩和埃达克质花岗闪长斑岩还具低含量的 Cr ($1.70 \sim 38.29 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($0.76 \sim 20.97 \times 10^{-6}$) 等相容元素 (王金荣等, 2013; 孙勇等, 2015; Yin *et al.*, 2017), 指示其形成过程中地幔源区物质加入有限 (Atherton and Petford, 1993)。值得注意的是, 这些埃达克质岩的 K_2O ($1.38\% \sim 4.22\%$) 含量远高于 MORB ($\text{K}_2\text{O} = 0.18\%$, Martin, 1999) 和下地壳 ($\text{K}_2\text{O} = 0.6\%$), 属于中-高钾系列 (图 6b), 与中国燕山期东部埃达克岩类似 (张旗等, 2001; 张旗, 2011), 可能为下地壳熔融的产物。同时, 下地壳熔融模式也可以更好地解释本文流纹斑岩高 SiO_2 , 极低的 MgO 、 MnO 和 CaO , 低的相容元素

(Cr、Co、Ni), 大离子亲石元素 (K、Rb、Th、Pb) 强烈富集, 高场强元素 (Nb、Ta、Ti) 相对弱亏损等这些类似于地壳熔融产生的流纹斑岩 (葛文春等, 2000; 赵军等, 2013) 的特点, 因此, 赛尔山早志留世流纹斑岩与谢米斯台山志留纪-早泥盆世埃达克质岩可能均形成于年轻下地壳的部分熔融, 而并非是前人认为的俯冲洋壳熔融的产物 (王金荣等, 2013; 孙勇等, 2015)。

5.2 早志留世-早泥盆世岩浆岩特征

在谢米斯台-赛尔山地区出露大量早古生代岩浆岩, 据本文统计, 该时段岩浆岩主要形成于 435 ~ 400 Ma, 岩浆峰期为 420 Ma (图 8), 岩性以花岗岩和中酸性火山岩为主 (图 7、表 3), 其中花岗岩类型包括 A_2 型花岗岩和 I 型花岗岩。

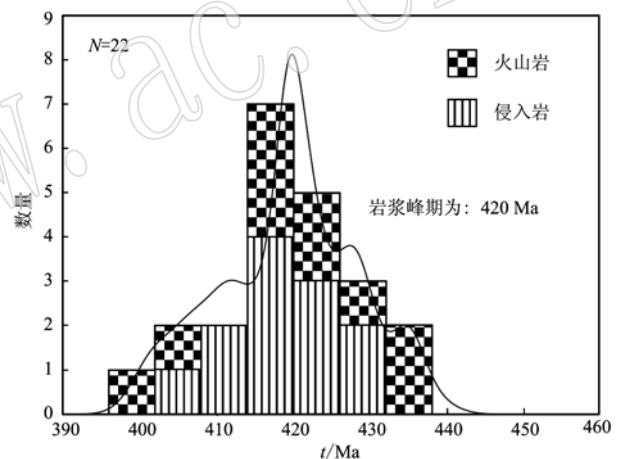


图 8 赛尔山和谢米斯台山火山岩和侵入岩的形成年龄统计直方图

Fig. 8 Formation age statistical histogram of extrusive and intrusive rocks in Saier and Xiemisitai Mountains

谢米斯台山中发育大量的志留纪中晚期 A_2 型花岗岩 (Chen *et al.*, 2015; 杨钢等, 2015; Yin *et al.*, 2017), 主要为石英正长岩、碱长花岗岩、钾长花岗岩和流纹斑岩等, 具有过碱质-弱过铝质的特征, 显示高 SiO_2 ($> 70\%$)、低 Al_2O_3 ($11.57\% \sim 13.10\%$) 含量和负 Eu 异常, 具有典型 A 型花岗岩特征 (Whalen *et al.*, 1987; Bonin, 2007; 张旗等, 2012)。同时, 谢米斯台山中志留纪中晚期花岗岩微量元素特征与岛弧岩浆岩特征类似, LREE 富集和 HFSE (Nb、Ta、Ti) 亏损, 结合 Nb-Y-Ce 等地球化学图解 (杨钢等, 2015; Yin *et al.*, 2017), 认为这些 A 型花岗岩均为 A_2 型花岗岩。此外, 它们还具有高的锆石饱和温度 ($845 \sim 945^\circ\text{C}$) 和低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3 +$

MgO + TiO₂) 和 CaO/(MgO + TiO₂ + FeO) 值, 指示这些 A₂ 型花岗岩形成于高温低压环境 (Douce, 1999), 结合其均具有正的 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+4.9 ~

+6.7) 和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+10.9 ~ +15.1), 认为谢米斯台山出露的 A₂ 型花岗岩很可能形成于伸展构造背景下的软流圈上涌。

表 3 西准噶尔北部谢米斯台山和赛尔山志留纪-泥盆纪岩浆岩时空表

Table 3 Spatial-temporal table of S-D magmatic rocks in Saier and Xiemisitai Mountains, northern West Junggar

岩性	时代/Ma	岩石类型	地区(具体位置见图 7)	来源文献
钾长花岗岩	420±4		谢米斯台山东坡	Chen <i>et al.</i> , 2010
流纹斑岩	414±5		谢米斯台山东坡	
钾长花岗岩	417±5		赛尔山西缘	
霏细岩	405±4		赛尔山中部	
流纹斑岩	422.5±1.9		谢米斯台山东坡	Shen <i>et al.</i> , 2012
安山岩	419.2±3.9		谢米斯台山西缘	
花岗闪长岩	410.5±2.9		谢米斯台山西缘	王金荣等, 2013
流纹岩	435.8±3.4		谢米斯台山东缘	王章棋等, 2014
英安岩	401.7±2.6		谢米斯台山东缘	
流纹岩	412±2.5		谢米斯台山东南缘	
二长花岗岩	418±5	I 型花岗岩	谢米斯台山东坡	Chen <i>et al.</i> , 2015
闪长岩	424±5		谢米斯台山东坡	
花岗岩	428.6±2.5	I 型花岗岩	谢米斯台山东部	杨刚等, 2015
花岗岩	427.6±2.3	A ₂ 型花岗岩	谢米斯台山东部	
流纹岩	424.3±4.3		谢米斯台山东坡	张若飞等, 2015
辉石安山岩	428.7±2.7		谢米斯台山西缘	孙勇等, 2015
钾长花岗岩	419.4±1.8	A ₂ 型花岗岩	谢米斯台山东坡	Yin <i>et al.</i> , 2017
钾长花岗岩	419.6±1.5	A ₂ 型花岗岩	谢米斯台山东坡	
花岗闪长岩	420.4±2.2		谢米斯台山东北部	
黑云母花岗岩	406.6±2.5	I 型花岗岩	赛尔山中北部	
辉长岩	419.8±2.5		谢米斯台山东坡	
流纹斑岩	435±2		赛尔山西缘	本次研究

谢米斯台山出露的中志留世-早泥盆世 I 型花岗岩主要由二长花岗岩、钾长花岗岩、黑云母花岗岩等组成 (Chen *et al.*, 2015; 杨钢等, 2015; Yin *et al.*, 2017), 弱过铝质, 具有高 SiO₂ (>70%)、MgO (0.07% ~ 0.4%) 和 CaO (0.01% ~ 0.89%) 含量, LREE 富集和 HFSE (Nb、Ta、Ti) 亏损。其中, 黑云母花岗岩具有高的锆石饱和温度 (810 ~ 874℃)。此外, 中志留世-早泥盆世 I 型花岗岩也具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (+9.8 ~ +15.3)。谢米斯台山中志留世-早泥盆世 I 型花岗岩与中晚志留世的 A₂ 型花岗岩紧密伴生, 地球化学特征及锆石饱和温度相似, 指示其可能形成于同一个岩浆源区。

综上, 西准噶尔北部早志留世-早泥盆世花岗岩应该产出于板内伸展的构造背景下。但值得注意的是, 这些花岗岩和其他火山岩的微量元素均表现出富集大离子亲石元素 (K、Rb、Pb) 及亏损高场强元素 (Nb、Ta) 的特征, 与岛弧岩浆岩的特征相似。近年来, 学者们对谢米斯台山岩浆岩的研究取得了一定突破, 不仅发现了奥陶纪的岛弧岩浆岩 (Wang *et al.*, 2017), 同时也在早志留世-早泥盆世 I 型钾长花岗岩和 A₂ 型碱长花岗岩内发现了闪长岩和基性岩捕虏体 (Chen *et al.*, 2015; 杨钢等, 2015)。基于前人研究的成果, 推断早志留世-早泥盆世岩浆岩的岩浆源区受到奥陶纪洋壳俯冲消减作用的影响, 而

早志留世-早泥盆世岩浆岩很可能是碰撞后的幔源岩浆上涌、新生地壳发生部分熔融的产物。

5.3 陆壳的增生

西准北部塔尔巴哈台(库吉拜)蛇绿混杂岩带的辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 478 ± 3 Ma(朱永峰等, 2006), 赛尔山西缘和布克赛尔蛇绿混杂岩带的辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 484 ± 3 Ma(都厚远等, 2017), 沙尔布尔提山西缘洪古勒楞蛇绿岩堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 472 ± 8 Ma(张元元等, 2010), 谢米斯台山南坡蛇绿岩辉长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 517 ± 3 Ma 和 519 ± 3 Ma(赵磊等, 2013), 这些都指示东哈萨克斯坦寒武纪-奥陶纪洋盆延伸至中国西准噶尔北部(赵磊等, 2013; Zhao and He, 2013, 2014)。赛尔山流纹斑岩底垫贯穿或底垫侵入于和布克赛尔蛇绿岩不同的单元组分中, 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 435 ± 2 Ma(杨亚琦等, 2018), 说明和布克赛尔蛇绿岩代表的古洋盆在早志留世之前已经消失。然而, 早志留世流纹斑岩高硅富铝的地球化学特征($\text{SiO}_2 = 70.88\% \sim 73.36\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 14.30\% \sim 15.31\%$)指示其可能为下地壳榴辉岩或角闪岩高压下的部分熔融产物(Castillo, 2006), 同时还可能与上地壳发生了混染, 而在晚志留世(420 Ma), 西准北部逐渐进入碰撞后松弛期(何国琦等, 2002), 幔源物质向下地壳渗透, 与新生不久的下地壳发生混合形成岩浆池。在此背景下, 岩浆通过多通道、多层次的复杂渠道到达中上部地壳(邵济安等, 1999), 从而发育大量 435 ~ 400 Ma 的 A_2 型和 I 型花岗岩(Chen *et al.*, 2015)以及少量下地壳熔融的埃达克质岩, 完成大规模的地壳垂向增生过程。因此, 本阶段的岩浆岩均具有高的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 值(图9)和年轻的 Hf 模式年龄。

6 结论

(1) 赛尔山地区早志留世流纹斑岩的地球化学和同位素特征表明, 其可能形成于造山后初期阶段幔源岩浆底侵作用下的新生地壳部分熔融。

(2) 早志留世—早泥盆世是西准噶尔北部陆壳增生的一个重要时期, 研究区内的岩浆岩均具有正高的 $\varepsilon\text{Hf}(t)$ 和年轻的 Hf 模式年龄。

致谢 锆石 Hf 同位素测试分析工作得到了天津地质调查中心张健老师的支持和帮助, 同时评审

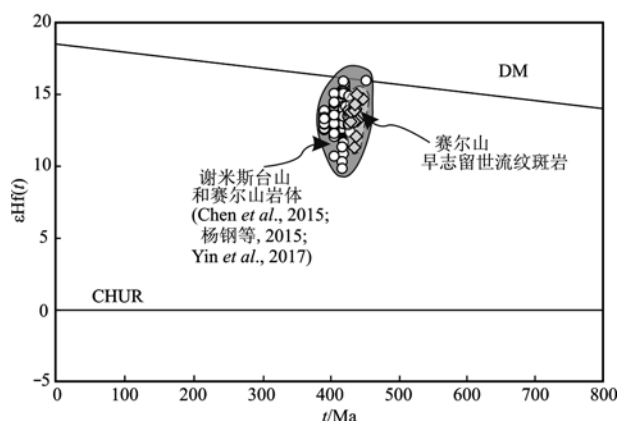


图9 赛尔山地区流纹斑岩和谢米斯台山、赛尔山岩体 Hf 同位素特征

Fig. 9 Zircon Hf isotopic features for the rhyolite porphyries and the magmatic rocks in Saier and Xiemisitai Mountains

专家对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示衷心的感谢。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362(6416): 144 ~ 146.
- Barr J, Grove T L and Elkinstanton L. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive melt: comment and reply[J]. *Geology*, 35(1): 351 ~ 354.
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1 ~ 2): 243 ~ 258.
- Bonin B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. *Lithos*, 97(1 ~ 2): 1 ~ 29.
- Briand B, Bouchardon J, Capiez P, *et al.* 2002. Felsic (A-type) -basic (plume-induced) Early Palaeozoic bimodal magmatism in the Maures massif[J]. *Geological Magazine*, 139 (3): 291 ~ 311.
- Castillo P R. 2006. An overview of adakite petrogenesis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(6): 617 ~ 627 (in Chinese).
- Castillo P R. 2012. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 134 ~ 135(3): 304 ~ 316.
- Castillo P R, Janney P E and Solidum R U. 1999. Petrology and geochemistry of Camiguin Island, southern Philippines: Insights to the source of adakites and other lavas in a complex arc setting[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1): 33 ~ 51.
- Chen Jiafu, Han Baofu, Ji Jianqing, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China[J]. *Lithos*, 115(1 ~ 4): 137 ~ 152.

- Chen Jiafu, Han Baofu, Zhang Lei, *et al.* 2015. Middle paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the west junggar (NW China): constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemisitai-Saier Mountains[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 90 ~ 109.
- Chung Sunlin, Liu Dunyi, Ji Jianqing, *et al.* 2003. Adakites from continental collision zones: Melting of thickened lower crust beneath southern Tibet[J]. *Geology*, 31: 1 021 ~ 1 024.
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. *Nature*, 347 (6294): 662 ~ 665.
- Defant M J, Jackson T E, Drummond M S, *et al.* 1992. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: An overview[J]. *Journal of the Geological Society*, 149 (4): 569 ~ 579.
- Douce P A E. 1999. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas[J]? *Geological Society London Special Publications*, 168(1): 55 ~ 75.
- Du Houyuan and Chen Jiafu. 2017. The determination of Hoboksar ancient oceanic basin in West Junggar: Evidence from zircon U-Pb age and geochemistry of the Hoboksar ophiolitic mélange[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2 638 ~ 2 650(in Chinese with English abstract).
- Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* 2001. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 42(11): 2 033 ~ 2 048.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hong Ling, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton [J]. *Nature*, 432 (7 019): 892 ~ 897.
- Gao Xiaofeng, Guo Feng, Li Chaowen, *et al.* 2007. The genesis of two types of Late Mesozoic intermediate-felsic volcanic rocks in Lishui Basin, Lower Yangtze valley[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 26 (1): 1 ~ 12(in Chinese with English abstract).
- Gao Yongfeng. 2007. Lamproitic Rocks from a Continental Collision Zone: Evidence for Recycling of Subducted Tethyan Oceanic Sediments in the Mantle Beneath Southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 48(4): 729 ~ 752.
- Ge Wenchun, Lin Qiang, Sun Deyou, *et al.* 2000. Geochemical research into origins of two types of mesozoics in Daxing'anling[J]. *Earth Science(Journal of China University of Geosciences)*, 25(2): 172 ~ 179(in Chinese with English abstract).
- Geng Jianzhen, Li Huaikun, Zhang Jian, *et al.* 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1 508 ~ 1 513(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, *et al.* 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237 ~ 269.
- Gu Pingyang, Li Yongjun, Zhangbing, *et al.* 2009. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(6): 1 364 ~ 1 372(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie and He Guoqi. 2010. Timing of major suture zones in North Xinjiang, China: Constraints from stitching plutons [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(8): 2 233 ~ 2 246(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Ji Jianqing, Song Biao, *et al.* 2006. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 077 ~ 1 086(in Chinese with English abstract).
- Han Baofu, Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, *et al.* 2010. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late Paleozoic stitching pluton in the North Tian Shan suture zone, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3): 627 ~ 640.
- He Guoqi, Li Maosong and Zhou Hui. 2002. The stage of cratonization in the formation of continental lithosphere[J]. *Earth Science Frontiers*, 9(4): 217 ~ 224(in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Gao Yongfeng, Qu Xiaoming, *et al.* 2004. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220(1 ~ 2): 139 ~ 155.
- Huang Gang, Niu Guangzhi, Wang Xinlu, *et al.* 2016. Early Silurian adakitic rocks of East Junggar, Xinjiang: Evidence from zircon U-Pb age, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope of the quartz diorite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 35(5): 751 ~ 767(in Chinese with English abstract).
- Jahn Borming, Wu Fuyuan and Hong Dawei. 2000. Important crustal growth in the Phanerozoic: Isotopic evidence of granitoids from east-central Asia[J]. *Journal of Earth System Science*, 109(1): 5 ~ 20.
- Jian Ping, Liu Duiyi, Shi Yuruo, *et al.* 2005. SHRIMP dating of SSZ ophiolites from northern Xinjiang Province, China: Implications for generation of oceanic crust in the Central Asian orogenic belt[A]. Sklyarov E V. *Structural and Tectonic Correlation across the Central Asia Orogenic Collage: North-Eastern Segment: Guidebook and Abstract Volume of the Siberian Workshop IGCP-480*[C]. Irkutsk: Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 246.
- Kay S M and Marquez M. 1993. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. *Journal of Geology*, 101(6): 703 ~ 714.
- Lai Shaocong and Qin Jiangfeng. 2013. Adakitic rocks derived from the partial melting of subducted continental crust: Evidence from the eo-

- cene volcanic rocks in the northern qiangtang block[J]. *Gondwana Research*, 23(2): 812 ~ 824.
- Le Maitre R W, Bateman P and Dudek A. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms: Recommendations of the IUGS, Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks[M]. Oxford: Blackwell.
- Li Hang, Gong Zhichao, Dong Xianyang, *et al.* 1987. On the geological setting of basic and ultrabasic rocks and the characteristics of regional metallization (mainly chromite) in the west Junggar of Xinjiang, China[J]. *Bulletin of the Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources, CAGS*, 18: 3 ~ 122 (in Chinese with English abstract).
- Li Wuping, Lu Fengxiang, Sun Shanping, *et al.* 2000. Discussion on the origin of volcanic rocks of Donglingtai Formation in Beijing Xishan Mountain and its geological setting[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (3): 345 ~ 352 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Han Baofu, Ren Rong, *et al.* 2017. Petrogenesis and tectonic implications of the early carboniferous to the late permian Barleik plutons in the west junggar (NW China)[J]. *Lithos*, 272 ~ 273: 232 ~ 248.
- Macpherson C G, Dreher S T and Thirlwall M F. 2006. Adakites without slab melting: high pressure differentiation of island arc magma, mindanao, the philippines[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243 (3 ~ 4): 581 ~ 593.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids[J]. *Lithos*, 46(3): 411 ~ 429.
- Norrish K and Hutton J T. 1969. An accurate X-ray spectrographic method for the analysis of a wide range of geological samples[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 33(4): 431 ~ 453.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1): 63 ~ 81.
- Qu Xiaoming, Hou Zengqian and Li Youguo. 2004. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore-bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 74 (3): 131 ~ 148.
- Riley T R, Leat P T, Pankhurst R J, *et al.* 2001. Origins of large volume Rhyolitic volcanism in the Antarctic peninsula and patagonia by crustal melting[J]. *Journal of Petrology*, 42(6): 1 043 ~ 1 065.
- Rollison H R. 1993. Using Geochemical Data: Evaluation Presentation, Interpretation[M]. Singapore: Longman Singapore Publishers, 160 ~ 170.
- Shao Ji'an, Han Qingjun, Zhang Luqiao, *et al.* 1999. Two kinds of vertical accretion of the continental crust: An example of the Da Hinggan Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 15(4): 600 ~ 606 (in Chinese with English abstract).
- Shen Ping, Shen Yuanchao, Li Xianhua, *et al.* 2012. Northwestern Junggar Basin, Xiemisitai Mountains, China: A geochemical and geochronological approach[J]. *Lithos*, 140 ~ 141: 103 ~ 118.
- Shinjo R and Kato Y. 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. *Lithos*, 54: 117 ~ 137.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219(3): 311 ~ 324.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and process [A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins* [C]. Geological Society Special Publications, 42: 313 ~ 345.
- Sun Yong, Li Yongjun, Yang Gaoxue, *et al.* 2015. Geochemical and geological significance of the volcanic rocks in the west of the Xiemisitai Mountain, West Junggar[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34 (2): 387 ~ 394 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks[J]. *Journal of Geology*, 94(4): 632 ~ 633.
- Wang Jianguo, He Zhonghua and Xu Wenliang. 2013. Petrogenesis of riebeckite rhyolites in the southern Da Hinggan Mts: Geochronological and geochemical evidence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 853 ~ 863 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jinrong, Jia Zhilei, Li Taide, *et al.* 2013. Discovery of Early Devonian adakite in West Junggar, Xinjiang: Implications for geotectonics and Cu mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (3): 840 ~ 852 (in Chinese with English abstract).
- Wang Juli, Hu Yang, Wang Jianqi, *et al.* 2017. The discovery of Late Ordovician granodiorite in the Xiemisitai area, Xinjiang and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 91 (6): 2 327 ~ 2 329.
- Wang Qiang, McDermott F, Xu Jifeng, *et al.* 2005. Cenozoic K-rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower-crustal melting in an intracontinental setting[J]. *Geology*, 33(6): 465 ~ 468.
- Wang Qiang, Wyman D A, Xu Jifeng, *et al.* 2008. Eocene melting of subducting continental crust and early uplifting of central Tibet: Evidence from central-western Qiangtang high-K calc-alkaline andesites, dacites and rhyolites[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 272 (1): 158 ~ 171.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Jian Ping, *et al.* 2006. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China:

- implications for the genesis of porphyry copper mineralization[J]. *Journal of Petrology*, 47(1): 119 ~ 144.
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, *et al.* 2008. Tectonic setting and associated rock suites of adakitic rocks[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(4): 343 ~ 350 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhangqi, Jiang Xiumin, Guo Jing, *et al.* 2014. Discovery of the Early Paleozoic volcanic rocks in the Xiemisitai area of the West Junggar, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(3): 670 ~ 685 (in Chinese with English abstract).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407 ~ 419.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, *et al.* 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185 ~ 220 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Sun Min, *et al.* 2008. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 102 ~ 117.
- Xu Jifeng, Shinjo R, Defant M J, *et al.* 2002. Origin of Mesozoic adakitic intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust? [J]. *Geology*, 30(12): 1111 ~ 1114.
- Xu Jifeng, Wu Jianbin, Wang Qiang, *et al.* 2014. Research advances of adakites and adakitic rocks in China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 6 ~ 13 (in Chinese with English abstract).
- Yan Xin and Xu Ronghua. 2001. Determination of Zr, Hf, Nb, Ta in rocks by ICP-MS[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 458 ~ 460 (in Chinese with English abstract).
- Yang Gang, Xiao Long, Wang Guocan, *et al.* 2015. Geochronology, geochemistry and zircon Lu-Hf study of granites in western section of Xiemisitai area, Western Junggar[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, (3): 548 ~ 562 (in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Xiao Wenjiao, *et al.* 2015. OIB-type rocks within West Junggar ophiolitic mélanges: Evidence for the accretion of seamounts[J]. *Earth-Science Reviews*, 150(c): 477 ~ 496.
- Yang Yaqi, Zhao Lei, Xu Qinqin, *et al.* 2018. Defining components of the Hebukesai ophiolitic mélange in the northern West Junggar and its tectonic implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(2): 298 ~ 312 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyuan, Chen Wen, Xiao Wenjiao, *et al.* 2017. Late Silurian-Early Devonian adakitic granodiorite, A-type and I-type granites in NW Junggar, NW China: Partial melting of mafic lower crust and implications for slab roll-back[J]. *Gondwana Research*, 43: 55 ~ 73.
- Yin Jiyuan, Long Xiaoping, Yuan Chao, *et al.* 2013. A late Carboniferous-Early Permian slab window in the West Junggar of NW China: Geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dikes[J]. *Lithos*, 175 ~ 176(5): 146 ~ 162.
- Zhang Jiheng, Yang Jinhui, Chen Jingyuan, *et al.* 2018. Genesis of late Early Cretaceous high-silica rhyolites in eastern Zhejiang Province-southeast China: A crystal mush origin with mantle input[J]. *Lithos*, 296 ~ 299: 482 ~ 495.
- Zhang Qi. 2011. Reappraisal of the origin of C-type adakitic rocks from East China[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(4): 739 ~ 747 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Ran Hao and Li Chengdong. 2012. A-type granite: what is the essence? [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(4): 621 ~ 626 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001. The characteristics and tectonic-metallogenic significances of the adakites in Yanshan period from eastern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 236 ~ 244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuanyuan and Guo Zhaojie. 2010. New constraints on formation ages of ophiolites in northern Junggar and comparative study on their connection[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(2): 421 ~ 430 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ruofei, Yuan Feng, Zhou Taofa, *et al.* 2015. Geological characteristics, geochronology and geochemical characteristics of volcanic hydrothermal type copper deposits (points) in Taerbahatai-xiemisitai region West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(8): 2259 ~ 2276 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jun, Zhang Zuoheng, Zhang He, *et al.* 2013. Geochemistry petrogenesis and tectonic Settings of the Lower Permian series volcanic rocks from western Awulale Mountain, Xinjiang[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(4): 525 ~ 541 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Lei and He Guoqi. 2013. Tectonic entities connection between West Junggar (NW China) and East Kazakhstan[J]. *Asian Earth Science*, 72(4): 25 ~ 32.
- Zhao Lei and He Guoqi. 2014. Geochronology and geochemistry of the Cambrian (~ 518 Ma) Chagantaolegai ophiolite in northern West Junggar (NW China): Constraints on spatiotemporal characteristics of the Chingiz-Tarbagatai megazone[J]. *International Geology Review*, 56(10): 1181 ~ 1196.
- Zhao Lei, He Guoqi and Zhu Yabing. 2013. Discovery and its tectonic significance of the ophiolite in the south of Xiemisitai Mountain West Junggar, Xinjiang[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 196 ~ 202 (in Chinese with English abstract).

- Zhu Yongfeng and Xu Xin. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite mélangé in Taerbahatai Mts, Xinjiang, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2 835 ~ 2 842 (in Chinese with English abstract).
- Zong Ruiwen, Wang Zizhang, Gong Yiming, *et al.* 2015. Ordovician radiolarians from the Yinisala ophiolitic melange and their significance in western Junggar, NW China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 58(5): 776 ~ 783.
- ### 附中文参考文献
- Castillo P R. 2006. 埃达克岩成因回顾[J]. *科学通报*, 51(6): 617 ~ 627.
- 都厚远, 陈家富. 2017. 西准噶尔和布克赛尔古洋盆的厘定——来自和布克赛尔蛇绿混杂岩的锆石 U-Pb 年代学及地球化学证据[J]. *地质学报*, 91(12): 2 638 ~ 2 650.
- 高晓峰, 郭峰, 李超文, 等. 2007. 溧水盆地两类晚中生代酸性火山岩的岩石成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 1 ~ 12.
- 葛文春, 林强, 孙德有, 等. 2000. 大兴安岭中生代两类流纹岩成因的地球化学研究[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 25(2): 172 ~ 179.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. *地质通报*, 30(10): 1 508 ~ 1 513.
- 辜平阳, 李永军, 张兵, 等. 2009. 西准达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年[J]. *岩石学报*, 25(6): 1 364 ~ 1 372.
- 韩宝福, 郭召杰, 何国琦. 2010. “钨合岩体”与新疆北部主要缝合带的形成时限[J]. *岩石学报*, 26(8): 2 233 ~ 2 246.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 077 ~ 1 086.
- 何国琦, 李茂松, 周辉. 2002. 论大陆岩石圈形成过程中的克拉通化阶段[J]. *地学前缘*, 9(4): 217 ~ 224.
- 黄岗, 牛广智, 王新录, 等. 2016. 新疆东准噶尔早志留世埃达克岩——来自锆石 U-Pb 年龄、地球化学及 Sr-Nd-Hf 同位素的证据[J]. *岩石矿物学杂志*, 35(5): 751 ~ 767.
- 李伍平, 路凤香, 孙善平, 等. 2000. 北京西山东岭台组(J_3)火山岩的成因及其构造环境探讨[J]. *岩石学报*, 16(3): 345 ~ 352.
- 李行, 巩志超, 董显扬, 等. 1987. 新疆西准噶尔地区基性超基性岩生成地质背景及区域成矿特征[J]. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, 18: 3 ~ 122.
- 邵济安, 韩庆军, 张履桥. 1999. 陆壳垂向增生的两种方式: 以大兴安岭为例[J]. *岩石学报*, 15(4): 600 ~ 606.
- 孙勇, 李永军, 杨高学, 等. 2015. 西准噶尔谢米斯台山西缘火山岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(2): 387 ~ 394.
- 王建国, 和钟铨, 许文良. 2013. 大兴安岭南部钠闪石流纹岩的岩石成因: 年代学和地球化学证据[J]. *岩石学报*, 29(3): 853 ~ 863.
- 王金荣, 贾志磊, 李泰德, 等. 2013. 新疆西准噶尔发现早泥盆世埃达克岩: 大地构造及成矿意义[J]. *岩石学报*, (3): 840 ~ 852.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 2008. 埃达克质岩的构造背景与岩石组合[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 27(4): 343 ~ 350.
- 王章棋, 江秀敏, 郭晶, 等. 2014. 新疆西准噶尔谢米斯台地区发现早古生代火山岩地层: 野外地质学和年代学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 38(3): 670 ~ 685.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23(2): 185 ~ 220.
- 许继峰, 郭建斌, 王强, 等. 2014. 埃达克岩与埃达克质岩在中国的研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(1): 6 ~ 13.
- 闫欣, 许荣华. 2001. 等离子体质谱法测定岩石中的锆、钪、铈、钽[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 458 ~ 460.
- 杨钢, 肖龙, 王国灿, 等. 2015. 西准噶尔谢米斯台西段花岗岩岩年代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, (3): 548 ~ 562.
- 杨亚琦, 赵磊, 徐芹芹, 等. 2018. 新疆新准噶尔北部和布克赛尔蛇绿混杂岩的厘定及其洋盆闭合时代限定[J]. *地质学报*, 92(2): 298 ~ 312.
- 张旗. 2011. 关于 C 型埃达克岩成因的再探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(4): 739 ~ 747.
- 张旗, 冉峰, 李承东. 2012. A 型花岗岩的实质是什么? [J]. *岩石矿物学杂志*, 31(4): 621 ~ 626.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 17(2): 236 ~ 244.
- 张若飞, 袁峰, 周涛发, 等. 2015. 西准噶尔塔尔巴哈台-谢米斯台地区火山热液型铜矿床(点)地质及含矿火山岩年代学、地球化学特征[J]. *岩石学报*, 31(8): 2 259 ~ 2 276.
- 张元元, 郭召杰. 2010. 准噶尔北部蛇绿岩形成时限新证据及其东、西准噶尔蛇绿岩的对比研究[J]. *岩石学报*, 26(2): 421 ~ 430.
- 赵军, 张作衡, 张贺, 等. 2013. 新疆阿吾拉勒山西段下二叠统陆相火山岩岩石地球化学特征、成因及构造背景[J]. *地质学报*, 87(4): 525 ~ 541.
- 赵磊, 何国琦, 朱亚兵. 2013. 新疆西准噶尔北部谢米斯台山南坡蛇绿岩带的发现及其意义[J]. *地质通报*, 32(1): 196 ~ 202.
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩[J]. *岩石学报*, 22(12): 2 835 ~ 2 842.
- 纵瑞文, 王仔章, 龚一鸣, 等. 2014. 西准噶尔伊尼萨拉蛇绿混杂岩中奥陶纪放射虫的发现及意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 44(10): 2 238 ~ 2 246.