

内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪埃达克质 花岗闪长岩类地球化学特征及其地质意义

张玉清

(内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

摘要: 内蒙古苏尼特左旗巴音乌拉二叠纪花岗闪长岩、石英闪长岩分布于二连-贺根山蛇绿岩带的北侧, 1:20 万区域地质调查将其归于华力西晚期侵入体($\gamma\delta^{(3)}$)。经研究, 该岩体具高铝($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.69\% \sim 16.48\%$)、富钠($\text{Na}_2\text{O} = 3.53\% \sim 4.58\%$)、贫钾($\text{K}_2\text{O} = 2.12\% \sim 4.10\%$)、高锶($\text{Sr} = 425.1 \times 10^{-6} \sim 645.2 \times 10^{-6}$)的特点, $\text{SiO}_2 = 62.13\% \sim 72.87\%$, $Y < 18 \times 10^{-6}$ ($7.23 \times 10^{-6} \sim 14.29 \times 10^{-6}$), $\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.83$ 。轻重稀土元素分馏强烈, 稀土元素配分曲线为右倾斜型, 铕异常不明显, 为典型的埃达克质岩。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中具明显 Sr 高峰和 Nb 低谷, 有与埃达克岩一致的曲线, 与岛弧安山岩-英安岩-流纹岩及大陆弧安山岩-英安岩-流纹岩有明显差异。花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 $256.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$, 为早二叠世岩浆活动的产物。 $\text{Mg}^\#$ 值很高 (> 50), 表明晚古生代洋壳向北俯冲时在 75~85 km 深度(角闪岩相与榴辉岩相过渡相)发生部分熔融形成埃达克质熔体, 侵入地壳形成埃达克岩。

关键词: 二叠纪, 锆石 U-Pb 年龄, 埃达克质岩, 地球化学, 俯冲洋壳, 巴音乌拉, 内蒙古

中图分类号: P588.12⁺2; P59

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2009)04-0329-10

Geochemical characteristics of Permian adakitic granodiorite in Bayinwula of Sonid Left Banner, Inner Mongolia

ZHANG Yu-qing

(Inner Mongolia Institute of Geological Survey, Hohhot 010020, China)

Abstract: Permian adakitic granodiorite and quartz-diorite in Bayinwula of Sonid Left Banner are distributed on the northern side of the Erlian-Hegen Mountain ophiolite zone. The 1:200 000 regional geological survey has assigned it to Late Variscan intrusive mass ($\gamma\delta^{(3)}$). Studies show that the rocks have characteristics of high aluminum ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 13.69\% \sim 16.48\%$), higher sodium ($\text{Na}_2\text{O} = 3.53\% \sim 4.58\%$), lower potassium ($\text{K}_2\text{O} = 2.12\% \sim 4.10\%$) and higher strontium ($\text{Sr} = 425.1 \times 10^{-6} \sim 645.2 \times 10^{-6}$), $\text{SiO}_2 = 62.13\% \sim 72.87\%$, $Y < 18 \times 10^{-6}$ ($7.23 \times 10^{-6} \sim 14.29 \times 10^{-6}$), $\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.83$. The fractionation of light-weight thulium is sharp and the partition curve of thulium forms a right-oblique model. Europium anomaly is not conspicuous, suggesting typical adakitic rock. The spidergram of traced elements relative to the original mantle obviously shows a Sr peak and a Nb valley, and the original earth mantle standard curve is in accordance with that of adakites but obviously different from things of island arc andesite, dacite and rhyolite and continental arc andesite, dacite and rhyolite. The zircon U-Pb age of granodiorite is $256.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$, implying a product of Early Permian magmatic movement. $\text{Mg}^\#$ is quite high (> 50), indicating that the northward subduction of the Late Paleozoic oceanic crust experienced partial melting and formed adakitic melt at 75~85 km (the transitional point of amphibolite

收稿日期: 2008-11-17; 修订日期: 2009-04-20

基金项目: 中国地质调查局区域地质调查资助项目(200413000012)

作者简介: 张玉清(1965-)男, 高级工程师, 主要从事区域地质调查和综合研究工作, E-mail: zhangyqnm@yahoo.com.cn.

facies and eclogite facies), which then intruded the earth's crust and eventually formed adakites.

Key words: Permian; zircon U-Pb age; adakitic rock; geochemistry; subduction of oceanic crust; Bayinwula; Inner Mongolia

埃达克岩是产于岛弧的、具有独特地球化学组分的中酸性火成岩,是靠近洋中脊的较热玄武岩在俯冲带部分熔融及其演化的产物(Defant *et al.*, 1990, 1993; Drummond *et al.*, 1990; Kay and Kay, 1993; Kay *et al.*, 1993)。与由俯冲洋壳脱水引起上盘地幔楔部分熔融形成的正常岛弧火山岩不同,它是由热的俯冲洋壳本身在角闪岩相到榴辉岩相过渡相发生部分熔融,形成埃达克质熔体,喷出地表或侵入地壳形成的(Martin, 1993, 1999; Marc *et al.*, 1993; Michael *et al.*, 1993; Robet *et al.*, 2002; Robert, 2002; 王焰等, 2000; 王强等, 2001b; 许继峰等, 2001a; 肖庆辉等, 2002)。21 世纪以来,国内的地质学者对埃达克岩十分关注,从不同角度对其进行了研究和论述(王强等, 2000, 2001a, 2001b; 许继峰等, 2001; 王焰等, 2000; 张旗等, 2001a, 2001b, 2001c, 2001d, 2002; 钱青, 2001; 许继峰等, 2001b; 葛小月等, 2002; 熊小林等, 2001a, 2001b; 李伍平等, 2001; 史仁灯等, 2003; 许立权等, 2003; 裴先治等, 2003; 侯增谦等, 2005, 2006), 大大推动和提高了国内埃达克岩的研究程度。不单是埃达克岩本身研究程度,更重要的是众多的埃达克岩被地质学家们识别出来之后,该类型岩石本身的认识程度得以提高。

二连-贺根山构造带的北侧分布有大量晚古生代花岗岩类岩石,其成因类型各不相同,代表了造山带的不同演化阶段。其中构造带北侧的花岗闪长岩在 1:20 万区域地质调查巴音乌拉幅中被划归华力西晚期侵入体($\gamma\delta^{(3)}$) 称扎胡尔特音敖包岩体^①。

1:25 万巴音乌拉幅区域地质调查^②对二连-贺根山构造带两侧的岩浆岩进行了重点研究,这对探讨晚古生代地壳演化及大洋闭合有着十分重要的意义。同时发现在二连-贺根山构造带北侧有一条与其平行展布的具埃达克质岩成分特征的花岗闪长岩带、石英闪长岩带。当时由于项目以生产为主,只在报告中列出了埃达克质岩的主要特征及存在的依据,没有对其展开深入分析和讨论。之后笔者对巴音乌拉及周边的埃达克岩体进行了详细研究,从岩

石学、岩石化学等方面验证和深化了前人的结论,确认该地区发育典型的埃达克质花岗闪长岩类,进一步了解其成因和地球动力学背景,这对研究晚古生代洋壳俯冲有着极其重要的地质意义。

1 地质背景

研究区位于内蒙古中北部中蒙边境地区,古生代期间位于二连-贺根山蛇绿岩带北侧,属于西伯利亚板块东南缘古生代陆壳增生区。该增生区主要是通过微陆块增生、弧-弧、弧-陆碰撞方式形成的^③。

研究区古生界发育有奥陶系、泥盆系、石炭系和二叠系。其中上石炭统一下二叠统宝力高庙组为一套陆相含安哥拉植物群的中酸性火山-碎屑岩系,属后碰撞火山岩系。二叠系大石寨组、哲斯组、林西组局限于二连-贺根山蛇绿混杂岩带南侧。侏罗系、白垩系、古近系和新近系发育,共同构成二连盆地群。

侵入岩十分发育,主要为石炭-二叠纪岩体,由高钾钙碱性-碱性花岗岩类组成,包括早石炭世花岗闪长岩($C_1\gamma\delta$)、黑云母二长花岗岩($C_1\eta\gamma$)、早二叠世黑云母二长花岗岩($P_1\eta\gamma$)、黑云母正长花岗岩($P_1\xi\gamma$)、花岗斑岩($P_1\gamma\pi$)、碱长花岗岩($P_1\kappa\gamma$)、碱性花岗岩($P_1\epsilon\gamma$)和少量埃达克质花岗闪长岩、石英闪长岩。侵入体与宝力高庙组多呈断层接触,部分早二叠世侵入体侵入到宝力高庙组中。石炭-二叠纪侵入体连同宝力高庙组火山岩系共同构成规模宏大的北东向构造岩浆岩带(图 1)。

2 岩石特征

出露岩石以花岗闪长岩为主,石英闪长岩很少,分布于苏尼特左旗巴音乌拉苏木一带,呈北东东向断续带状展布,呈岩珠、小岩基状产出。在研究区内出露面积大于 200 km²,长约 1 500 km,宽度 1 km 至 18 km 不等。与宝力高庙组(C_2P_1bl)多呈断层接触,被早二叠世碱性花岗岩($P_1\epsilon\gamma$)侵入,但其内外接触

① 内蒙古自治区地质局. 1980. 区域地质调查报告 1:20 万白音吉日嘎拉大队幅、巴音乌拉幅。

② 内蒙古自治区地质调查院. 2008. 区域地质调查报告 1:25 万巴音乌拉幅(归档资料)。

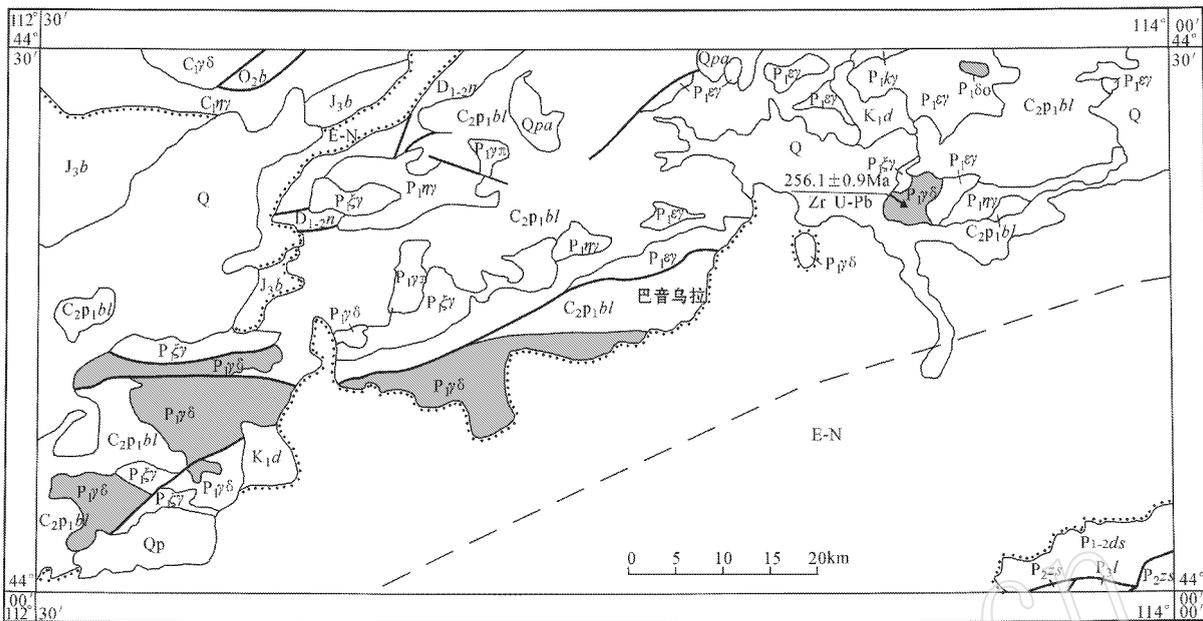


图 1 巴音乌拉地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Bayinwula area

Q—第四系；E-N—古近系和新近系；K_{1d}—大磨拐河组；J_{3b}—白音高老组；P_{3l}—林西组；P_{2zs}—哲斯组；P_{1.2ds}—宝力高庙组；D_{1.2n}—泥鳅河组；O_{2b}—巴彦呼苏组；P_{1γπ}—早二叠世花岗岩斑岩；P_{1εγ}—早二叠世碱性花岗岩；P_{1κγ}—早二叠世碱长花岗岩；P_{1ξγ}—早二叠世正长花岗岩；P_{1ηγ}—早二叠世二长花岗岩；P_{1γδ}—早二叠世花岗闪长岩；P_{1δo}—早二叠世石英闪长岩；C_{1ηγ}—早石炭世二长花岗岩；C_{1γδ}—早石炭世花岗闪长岩；▲—同位素采样点 粗实线—断层；虚线—推测板块缝合带

Q—Quaternary；E-N—Paleogene and Neogene；K_{1d}—Damoguaihe Formation；J_{3b}—Baiyingaolao Formation；P_{3l}—Linxi Formation；P_{2zs}—Zhesi Formation；P_{1.2ds}—Dashizhai Formation；C_{2P1bl}—Baoligaomiao Formation；D_{1.2n}—Niquhe Formation；O_{2b}—Bayanhusu Formation；P_{1γπ}—Early Permian granite porphyry；P_{1εγ}—Early Permian alkali granite；P_{1κγ}—Early Permian alkali-feldspar granite；P_{1ξγ}—Early Permian syenogranite；P_{1ηγ}—Early Permian monzogranite；P_{1γδ}—Early Permian granodiorte；P_{1δo}—Early Permian quartz diorite；C_{1ηγ}—Early Carboniferous monzogranite；C_{1γδ}—Early Carboniferous granodiorte；▲—isotopic sampling point；thick solid line—fault；dotted line—inferred plate suture zone

带均不发育。原生节理、次生节理比较发育。岩体内专属性脉岩为花岗闪长斑岩，区域性脉岩为辉绿岩脉、闪长玢岩脉、霏细岩脉、石英脉及花岗斑岩脉。受构造挤压，局部岩石发生片理化。

花岗闪长岩呈灰色、灰白色、灰黄色，具中（细）粒花岗结构，块状构造。主要矿物：更中长石含量 44%~50%，为 0.2~3.0 mm 的板状半自形晶，少数达 5.0 mm 左右，具不明显的环带构造，核部弱绢云母化、绿帘石化，部分颗粒边缘有碎粒化现象；正长石含量 15%~25%，为 1.0~7.0 mm 的板状、粒状，自形程度不及斜长石，粗颗粒内包有细粒斜长石；石英含量 20%~25%，为 0.8~4.0 mm 之间的他形粒状，部分重结晶，呈细粒镶嵌状集合体；黑云母含量 5%~10%，为 0.3~1.5 mm 之间的鳞片状，多被绿泥石交代，受应力挤压，部分呈波状弯曲状。

副矿物主要有磁铁矿、褐铁矿、锆石、榍石、磷灰石等。其中锆石呈淡黄色、浅黄色、玫瑰色，透明，金刚光泽，性脆，紫外灯下发黄光。长轴长 0.068~0.40 mm，长宽比以 2:1 为主，个别 3:1~4:1。

石英闪长岩为灰绿紫色、绿灰色，具中细粒半自形粒状结构，块状构造。主要矿物：斜长石含量 65% 左右，为 1~5 mm 间的自形-半自形板状，以 1~2 mm 粒级的为主，少数绢云母化，发育聚片双晶及环带构造，为中更长石；钾长石含量 5%，为 0.5~3.5 mm 的他形粒状，常包含细小自形斜长石；石英含量 10%，为 0.3~1.2 mm 的他形粒状，角闪石含量 12% 左右，0.3~2 mm 间的短柱状，具浅黄-深黄色多色性，个别绿帘石化；黑云母含量 8%，为 0.2~1.5 mm 间的鳞片状，具浅黄-深褐色多色性，个别绿帘石化。

表 1 巴音乌拉地区埃达克质岩石化学分析结果

$w_B/\%$

Table 1 Chemical composition of Bayinwula adakitic rock

序号	样号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	Na ₂ O	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	Los	总量	A/ CNK	Na ₂ O/ K ₂ O	σ	Mg [#]	KN/A
1	3P29-4	72.87	0.20	14.10	0.70	0.98	0.01	0.48	3.60	1.85	3.30	0.10	1.54	99.73	1.10	1.09	1.59	46.61	0.67
2	1722	67.72	0.60	14.54	1.79	2.83	0.15	1.81	3.60	2.36	2.98	0.15	2.30	100.83	1.08	1.21	1.75	53.27	0.63
3	3P29-1-4	72.35	0.40	13.69	1.38	1.03	0.10	1.09	3.53	1.35	4.10	0.10	1.35	100.47	1.08	0.86	1.98	65.36	0.75
4	3P30-1-1	68.84	0.50	14.61	2.28	1.64	0.10	1.33	3.54	2.69	3.13	0.10	1.14	99.90	1.04	1.13	1.72	59.11	0.63
5	3GS4010-2	72.68	0.18	14.66	1.48	0.11	0.063	0.29	4.23	1.80	3.58	0.086	0.70	99.86	1.04	1.18	2.06	82.45	0.74
6	3GS3056-3	70.57	0.27	15.27	1.99	0.61	0.067	0.66	4.58	2.34	3.05	0.10	0.54	100.05	1.01	1.50	2.11	65.86	0.71
7	3GS5047	62.13	0.84	16.48	3.06	2.15	0.085	2.95	4.13	4.73	2.44	0.20	0.69	99.885	0.91	1.69	2.26	70.98	0.57
8	3053-1	62.56	1.00	15.76	2.54	2.70	0.16	2.81	3.80	4.19	2.12	0.26	2.10	100.00	0.98	1.79	1.79	64.98	0.54

注:1~4,8来源于1:25万巴音乌拉幅(2008);5~7由地质矿产部内蒙古自治区中心实验室在原子吸收分光光度计下测试,分析方法:日立508, YX-01; Mg[#] = 100MgO/(MgO+FeO)(分子数);1~6号样为花岗闪长岩,7~8号样为石英闪长岩。

3 地球化学特征

3.1 主元素特征

花岗闪长岩 SiO₂ 含量为 67.72%~72.87%(表 1)均>56%; Al₂O₃ 含量为 13.69%~15.27%, 近于 15%(其中样品 3GS3056-3 的 Al₂O₃ 含量为 15.27%, >15%); 富 Na₂O, 贫 K₂O, Na₂O = 3.53%~4.58%, K₂O = 2.98%~4.10%, Na₂O/K₂O 绝大部分在 1.09~1.50 之间, 均>1, 即 Na₂O>K₂O, 属钠质系列(许立权等 2003); 碱度指数(NK/A)在 0.63~0.75 之间, 均<0.9, A/CNK = 1.0~1.1, 均≥1, 里特曼指数 σ 为 1.59~2.11, 属钙碱性系列过铝质岩石(高秉璋等, 1991); MgO 为 0.29%~1.81%, 均<3%; Mg[#] 除 3P29-4 为 46.61 外, 其他均>50(53.27~82.45)。在 K₂O-SiO₂ 图解(图 2)中样品点主要落入中钾钙碱性区, 与 Droummod 和 Defant(1990)以及 Martir(1993, 1999)所定义的俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克质岩石的化学成分较为接近。在花岗质岩浆成因分析图解(K-Ca-Na 图解)(图 3)中几乎所有样品均投在岩浆花岗岩区。

石英闪长岩 SiO₂ 含量为 62.13%~62.56%, 均>56%; Al₂O₃ 含量为 15.76%~16.48%, 大于 15%; Na₂O = 3.80%~4.13%, K₂O = 2.12%~2.44%, Na₂O/K₂O 在 1.69~1.79 之间, 均>1, 即 Na₂O>K₂O; 碱度指数(NK/A)在 0.54~0.57 之间, 均<1, A/CNK = 0.91~0.98, 接近于 1, 里特曼指数 σ 为 1.79~2.26。MgO 含量为 2.81%~2.95%, 均<3%; Mg[#] 为 64.98~70.98, >40。元素含量对比及投图分析表明, 石英闪长岩和上述花岗闪

长岩特征一样, 与埃达克岩的化学成分接近。

3.2 微量元素特征

岩石(花岗闪长岩、石英闪长岩)稀土元素总量

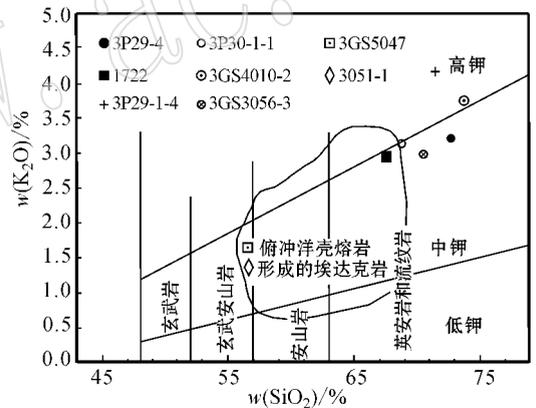


图 2 K₂O-SiO₂ 图解

Fig. 2 Diagram of K₂O-SiO₂

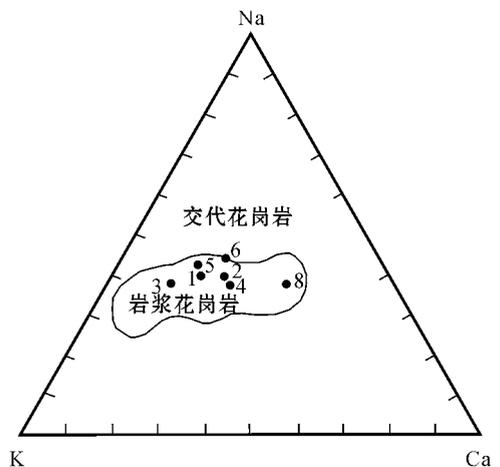


图 3 K-Ca-Na 图解(引自 Raju, 1972)

Fig. 3 Diagram of K-Ca-Na (after Raju, 1972)

表 2 巴音乌拉地区埃达克质岩及典型岩石稀土元素含量($w_B/10^{-6}$)及特征参数

Table 2 REE contents and parameters of adakite in Bayinwula, and typical rocks

序号	1	2	3	4	5	6
样号	3XT4010-2	3XT3056-3	3XT5047	埃达克岩, 大陆弧 TTD	岛弧 ADR	岛弧 ADR
La	21.2	23.5	19.1	22.62	29.94	32.01
Ce	39.5	34.7	37.9	41.03	60.15	55.27
Pr	4.28	4.51	5.46	—	—	—
Nd	18.2	15.9	22.9	18.53	28.27	17.85
Sm	2.81	2.91	4.45	2.88	5.28	6.40
Eu	0.64	0.72	1.12	0.91	1.81	3.60
Gd	2.62	2.65	3.59	2.05	4.26	6.99
Tb	0.31	0.29	0.55	0.30	0.72	0.76
Dy	1.48	1.42	2.9	1.22	3.57	6.88
Ho	0.31	0.35	0.55	—	—	—
Er	0.82	0.88	1.62	0.64	0.20	5.03
Tm	0.14	0.14	0.27	—	—	—
Yb	0.95	0.91	1.52	0.65	2.44	4.26
Lu	0.15	0.16	0.26	0.11	0.39	0.47
Y	7.83	7.23	14.29	8.8	27.4	28.5
LREE	86.3	82.24	90.93			
HREE	6.78	6.80	11.2			
∑REE	101.24	96.27	116.48			
Y/Yb	8.24	7.95	9.40			
(La/Yb)	22.32	25.82	12.57			
(Yb) _N	4.55	4.35	7.27			
(La/Yb) _N	15.05	17.41	8.47			
(La/Sm) _N	4.75	5.08	2.70			
(Gd/Yb) _N	2.23	2.35	1.90			
δEu	0.71	0.78	0.83			

1~3 号样由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所测试, 分析方法 DJZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS) 4~6 引自肖庆辉等(2002)。

较低(表 2), ∑REE = 96.27 × 10⁻⁶ ~ 116.48 × 10⁻⁶, Y < 18 × 10⁻⁶, 在 7.23 × 10⁻⁶ ~ 14.29 × 10⁻⁶ 之间, Yb < 1.9 × 10⁻⁶, 在 0.91 × 10⁻⁶ ~ 1.52 × 10⁻⁶ 之间, 显示出低的 HREE 含量, La/Yb > 10, 在 12.57 × 10⁻⁶ ~ 25.82 × 10⁻⁶ 之间 (La/Yb)_N = 8.47 ~ 17.41。上述成分特征与典型的埃达克质岩(钱青, 2001)一致。在 (La/Yb)_N - Yb_N 图解中全部投入埃达克岩区(图 4)。δEu = 0.71 ~ 0.83, 轻重稀土元素分馏强烈, 稀土元素配分曲线为右倾斜型, 稍异常不明显, 与埃达克岩模式曲线基本一致, 而与岛弧 ADR (ADR 表示安山岩-英安岩-流纹岩岩石组合) 和大陆边缘弧 ADR 的曲线明显不同(图 5)。

Sr, Ba 含量高, Sr = 425.1 × 10⁻⁶ ~ 645.2 × 10⁻⁶ (> 400 × 10⁻⁶), Ba = 4 778.0 × 10⁻⁶ ~ 4 993.0 × 10⁻⁶ (表 3); Sr/Y 比值为 45.15 ~ 58.80, 明显 > 40;

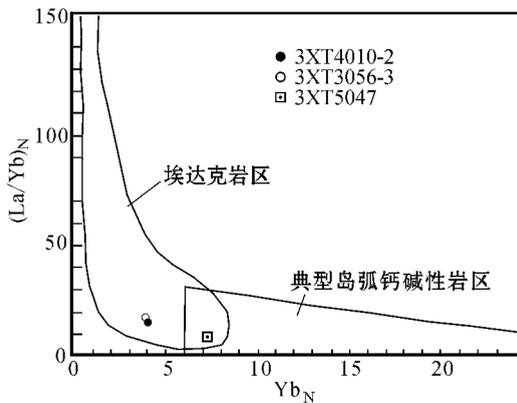


图 4 (La/Yb)_N - Yb_N 图解

Fig. 4 Diagram of (La/Yb)_N - Yb_N

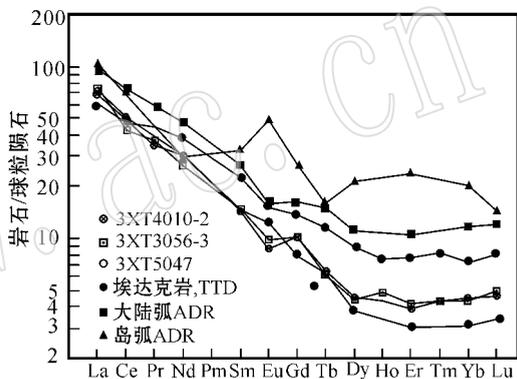


图 5 巴音乌拉地区埃达克质岩及典型岩石稀土元素配分型式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of adakite in Bayinwula and typical rocks

富集大离子亲石元素, 相对亏损高场强元素 (HFSE), 具埃达克岩特征。在微量元素蛛网图中具明显的 Sr 高峰和 Nb 低谷, 并且有与埃达克岩一致的原始地幔标准化曲线, 而与岛弧 ADR 及大陆弧 ADR 有明显差异(图 6)。

3.3 岩体年代学特征

本次研究采用单颗粒锆石 U-Pb 同位素稀释法测定, 分析测试由天津地质矿产研究所实验测试室完成。锆石的溶解和 U、Pb 的分离在超净化学实验室中进行, 锆石在 0.25 mL 容积的氟塑料容器内溶解, 使用 ²⁰⁵Pb/²³⁵U 混合稀释剂。将铀和铅用硅胶-磷酸溶液加在同一单铯带灯丝上, 在 VG354 型热离子质谱仪上用高灵敏度 Daly 检测器进行铀铅同位素测定。所有铀铅同位素数据均对质量歧视效应进行校正, 误差以 2σ 表示。检测依据 DJZ/T0184.3-1997 检测环境 温度 22℃, 湿度 16%。

表 3 巴音乌拉地区埃达克质岩及典型岩石微量元素含量

Table 3 Trace elements content of adakite in Bayinwula and typical rocks

样品	Rb	Ba	Th	U	K	Nb	Cr	La	Ce	Sr	Nd	P	Ti	Y
3DG3056-3	657.0	4778.0	11.7	1.4	2 531 9.31	5.5	10.1	23.5	34.7	425.1	15.9	436.38	1 619	7.23
3DG5047	60.80	4 993.0	11.0	1.4	2 025 5.63	5.0	65.9	19.1	37.9	645.2	22.9	872.76	5 035	14.29
埃达克岩,TTD	41.0	615.0	4.5	0.96	1 386 3.36	6.5	38	22.62	41.03	668.0	18.53	611	2518	8.8
大陆弧 ADR	83.0	501.0	13.2	3.61	1 967 4.35	15.0	29.0	29.94	60.15	424.0	28.27	916.5	4 077	27.4
岛弧 ADR	109.0	514.0	4.96	0.67	2 448 9.17	15.8	21.0	32.01	55.27	229.0	17.85	480.1	2 938	28.5
原始地幔值	0.635	6.989	0.085	0.021	250.000	0.750	—	0.678	1.775	21.100	1.354	95.000	1300	4.550

样品 3DG3056-3(花岗闪长岩) 3DG5047(石英闪长岩)中 Rb、Sr、Ba、Th、Nb、U 由地质矿产部内蒙古自治区中心实验室在原子吸收分光光度计下测试,型号:日立 508。埃达克岩、TTD、ADR 引自肖庆辉等(2002),原始地幔值引自 Sun & McDonough(1989);TTD 表示奥长花岗岩-英云闪长岩-英安岩岩石组合。

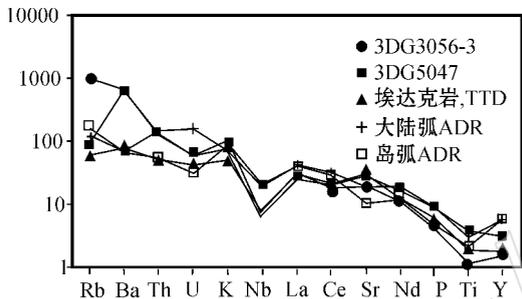


图 6 巴音乌拉地区埃达克质岩及典型岩石的微量元素原始地幔标准化图

Fig. 6 Primitive mantle normalized spidergram for trace elements of adakite in Bayinwula and typical rocks

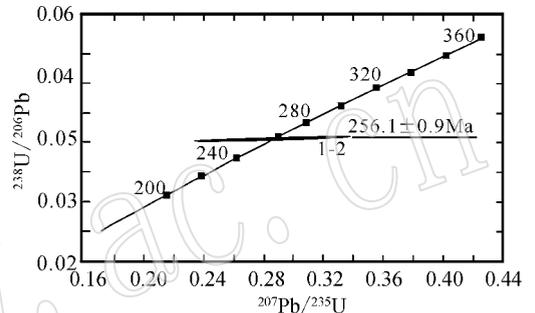


图 7 巴音乌拉埃达克质花岗闪长岩锆石 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 7 Zircon U-Pb concordia diagram of adakitic granodiorite in Bayinwula

花岗闪长岩 3TW3056-3 中两粒不同晶形锆石 U-Pb 同位素测试结果(表 4)表明,两粒锆石均落在谐和线上(图 7),样品中放射成因铅没有扩散、丢失(张宗清,1996;蔡剑辉等,2002)。但 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 同位素原子比率值的误差偏大,这可能与锆石结晶以后丢失或得到了极少量铅、铀、钍或者它们的中间子体有关(福尔,1983;陈岳龙等,2005)。它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值与 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的年龄值近乎一致,1、2 两个

数据点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $256.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$ 。结合区域地质资料看,其年龄值是可信的,可作为花岗闪长岩的结晶年龄,属早二叠世的产物。

4 讨论

埃克达岩系是在上世纪 90 年代初首次由 Defant 和 Drummond 引入地质文献的(肖庆辉等,

表 4 巴音乌拉花岗闪长岩锆石 U-Pb 同位素分析结果

Table 4 Zircon U-Pb analyses of adakitic granodiorite in Bayinwula

点号	锆石类型及特征	质量/ μg	$w_B/10^{-6}$		普通铅含量/ ng	同位素比值			表面年龄/ Ma				
			U	Pb		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
1	浅黄色透明长柱状自形晶体	50	804	35	0.093	736	0.094 57	0.040 49 (15)	0.287 3 (192)	0.0514 6 (335)	255.9	256.5	261.5
2	浅黄色透明长柱状半自形晶体	50	604	53	0.830	75	0.169 9	0.040 73 (35)	0.284 0 (412)	0.050 57 (693)	257.4	253.8	221.4

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 已对实验空白($\text{Pb}=0.050 \text{ ng}$, $\text{U}=0.002 \text{ ng}$)及稀释剂做了校正,其他比值中的铅同位素均为放射成因铅同位素,括号内数字为 (2σ 绝对误差,例如 $0.040 73(35)$ 表示 $0.04073 \pm 0.00035(2\sigma)$);1~2 号点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $256.1 \pm 0.9 \text{ Ma}$,由天津地质矿产研究所实验测试室测试,李惠民校核。

2002) 经过国内外地质学者近 20 年的科研, 对其产出部位和形成机理都有了进一步的拓展。不只限于由年轻的 ($< 25 \text{ Ma}$) 热的俯冲消减洋壳在角闪岩相和榴辉岩相过渡相部分熔融形成, 洋壳斜向或快速俯冲、平板俯冲、初始俯冲、残留板片 (Marc *et al.*, 2002) 及非岛弧环境下的加厚 ($> 40 \text{ km}$) 下地壳镁铁质岩石的部分熔融也可以形成 (Michael *et al.*, 1993; Robert *et al.*, 2002; 张旗等, 2001c; 许立权等, 2003), 只要源岩是基性的、含水、残留相有石榴石、角闪石等矿物存在, 在合适的理化条件下, 俯冲板片和下地壳的熔融都可以形成埃达克质岩石 (裴先治等, 2003)。

巴音乌拉地区的花岗闪长岩、石英闪长岩形成于晚二叠世 (256.1 Ma), 岩石学、岩石化学、地球化学等特征都与典型的埃达克岩基本符合, 同时具有岛弧花岗岩类的地球化学特征, 即具有高场强元素 (Nb) 的亏损和大离子亲石元素的富集, 表明它形成于一个岛弧环境, 属于俯冲洋壳板片 MORE 部分熔融形成的埃达克质岩 (I 类埃达克岩, 表 5) (王强等, 2001a; 裴先治等, 2003)。Y 的亏损以及高的 Sr/Y、La/Yb 比值说明这类花岗岩的源区部分熔融的残留物应为榴辉岩 (Defant and Deummond, 1990, 1993; Drummond *et al.*, 1990; 钱青, 2001)。造成这个结果的原因是由于在熔融过程中斜长石全部或部分进

入熔体, 使熔体中 HREE 和 Y 含量明显降低 (许立权等, 2003)。因此埃达克岩可以定义为形成于岛弧环境下高铝高锆贫重稀土元素的一种特殊岩石组合。

$Mg^\#$ 值除 3P29-4 为 46.61 外, 其余 7 个样均大于 50。由下地壳铁镁质岩石直接部分熔融所形成的岩浆其 $Mg^\#$ 值一般不会超过 40 (许继峰等, 2001a; 许立权等, 2003), MORE 部分熔融产生的熔体的 $Mg^\#$ 值一般不会超过 45, 而由 MORE 产生的熔体如在上升过程中与地幔楔发生交代作用, 其 $Mg^\#$ 值可超过 50 (Marc *et al.*, 2002; 肖庆辉等, 2002; 许立权等, 2003)。

富集地幔来源的玄武岩质岩石及其演化产物在图解中也可落在埃达克岩的区域, 但它的 SiO_2 和重稀土元素含量、矿物组合与岩石系列等与埃达克岩存在明显差别。

区域资料研究表明, 晚泥盆世—早石炭世南戈壁微陆块与锡林浩特微陆块发生弧—陆、弧—弧碰撞对接, 拼贴增生于西伯利亚板块南缘, 晚泥盆世—早石炭世在锡林浩特微陆块北缘 (苏尼特左旗一带) 发育有色日巴彦敖包组磨拉石建造和同碰撞花岗岩带^①。南戈壁微陆块与锡林浩特微陆块之间的对接部位构成二连—贺根山蛇绿构造杂岩带。这次构造缝合作用致使二连—贺根山边缘海洋盆关闭。

此次早二叠世埃达克质岩 (256.1 Ma) 的发现,

表 5 巴音乌拉地区花岗闪长岩、石英闪长岩与两类埃达克岩的地球化学特征值

Table 5 Geochemical characteristic values of two kinds of adakites as well as Early Permian granodiorite and quartz diorite in Bayinwula

地球化学参数	典型埃达克岩		巴音乌拉 (平均值)	
	I 类埃达克岩	II 类埃达克岩	花岗闪长岩	石英闪长岩
$\alpha(\text{SiO}_2) \%$	≥ 56.00	56.06 ~ 72.48	70.84 ($n=6$)	62.35 ($n=2$)
$\alpha(\text{Al}_2\text{O}_3) \%$	≥ 15.00 (很少 < 15.00)	14.53 ~ 19.81	15.00 ($n=6$)	16.12 ($n=2$)
$\alpha(\text{Na}_2\text{O}) / \alpha(\text{K}_2\text{O})$	> 1.00	1.00 ~ 5.57	1.16 ($n=6$)	1.74 ($n=2$)
$\alpha(\text{MgO}) \%$	< 3 (很少 > 6)	0.10 ~ 2.56	0.94 ($n=6$)	2.88 ($n=2$)
$Mg^\#$	> 47	一般 < 50	58.36 ($n=6$)	67.98 ($n=2$)
$\alpha(\text{Sr}) \times 10^{-6}$	> 400 (很少 < 400)	355 ~ 1512	425.1 ($n=1$)	645.2 ($n=1$)
$\alpha(\text{Y}) \times 10^{-6}$	≤ 18.00	2.00 ~ 15.00 (6.9)	7.53 ($n=2$)	14.29 ($n=1$)
$\alpha(\text{Yb}) \times 10^{-6}$	≤ 1.90	0.17 ~ 1.03 (0.36)	0.93 ($n=2$)	1.52 ($n=1$)
$\alpha(\text{Sr}) / \alpha(\text{Y})$	$> 20.0 \sim 40.0$	38.1 ~ 617.3 (67)	58.80 ($n=1$)	45.15 ($n=1$)
$\alpha(\text{La}) / \alpha(\text{Yb})$	≥ 10	26.9 ~ 142.9 (71)	24.07 ($n=2$)	12.57 ($n=1$)
δSr	正异常	正异常	正异常	正异常
δEu	正异常或微弱负异常	≥ 0.60	异常不明显	异常不明显

注: 典型埃达克岩地球化学参数引自裴先治等 (2003), I 类埃达克岩是俯冲洋壳板片熔融形成的, II 类埃达克岩是底侵玄武质下地壳熔融形成的, n 为样品数。

① 中国地质大学 (北京) 内蒙区调队, 1996. 区域地质调查报告 1:5 万苏尼特左旗等 5 幅 (归档资料)。

说明二连-贺根山边缘海虽然关闭了,但向下俯冲的洋壳还一直在活动,洋壳板片 MORB 岩石仍在向下俯冲,当俯冲到发生榴辉岩相变质深度时(75~85 km)(肖庆辉等,2002)开始部分熔融,形成原始的埃达克质岩浆熔体,该岩浆在上侵过程中与地幔楔物质发生了明显的相互作用(Martin,1999),形成了现在 $Mg^\#$ 值很高的(>50)典型埃达克岩;与之相伴而生的是早二叠世岛弧花岗岩类(闪长岩为主),其高镁、富 LILE 特征反映源区为交代的地幔橄榄岩。二连-贺根山蛇绿岩带以北缺失石炭系大量正常碎屑沉积地层也证实了石炭纪到早二叠世该地区仍处于挤压造山阶段。

西伯利亚板块和中朝板块于泥盆纪—石炭纪碰撞缝合之后,西伯利亚板块南缘就从挤压转向拉张的构造环境,在西伯利亚板块南缘形成早二叠世碱性花岗岩带(洪大卫等,2000;邵济安等,2002)。而在中朝板块北缘,直到三叠纪才有拉张构造环境的物质记录,如位于该研究区东部的东乌珠穆沁旗查干敖包石英闪长岩,张万益等(2008)在该石英闪长岩中获 SHRIMP U-Pb 年龄为 237 ± 6 Ma。

5 结论

巴音乌拉地区花岗闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 256.1 ± 0.9 Ma,为早二叠世岩浆活动的产物;花岗闪长岩、石英闪长岩具高铝($Al_2O_3 = 13.69\% \sim 16.48\%$)、富钠($Na_2O = 3.53\% \sim 4.58\%$)、贫钾($K_2O = 2.12\% \sim 4.10\%$)、高锶($Sr = 425.1 \times 10^{-6} \sim 645.2 \times 10^{-6}$)特点, $SiO_2 = 62.13\% \sim 72.87\%$; $\delta Eu = 0.71 \sim 0.83$,轻重稀土元素分馏强烈,稀土元素配分曲线为右倾斜型,稍异常不明显,为典型的埃达克岩; $Mg^\#$ 值很高(46.61~82.45),表明晚古生代洋壳向北俯冲时在 75~85 km 深度(角闪岩相与榴辉岩相过度相)发生部分熔融形成埃达克质熔体,熔体侵入地壳形成本文所报道的埃达克岩。

巴音乌拉地区北东向展布的埃达克质岩的发现对研究华北地区晚古生代地壳演化和大陆动力学特征有着十分重要的意义。

致谢 本文得到内蒙古自治区地质调查院二连地区 5 幅 1:25 万区域地质调查项目大力支持,文中引用了内蒙古自治区地质矿产局、内蒙古自治区地质调查院等多家单位的区调成果,评审专家为本文

的修改提出了宝贵的意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Cai Janhui, Yan Cuohan, Mu Baolei, *et al.* 2002. U-Pb and Sm-Nd isotopic ages of alkaline syenite complex body in Liangtun-kuangdong-guo, Gaixian County, Liaoning Province, China and geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(9): 349~354 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuelong, Yang Zhongfang and Zhao Zhidan. 2005. Isotopic Geochronology and Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House, 76~96 (in Chinese with English abstract).
- Defant M J and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subduction lithosphere [J]. *Nature*, 47: 662~665.
- Defant M J and Drummond M S. 1993. Mount St Helens: potential example of the partial melting of the subducted lithosphere in a volcanic arc [J]. *Geology*, 21: 547~550.
- Drummond M S and Defant M J. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons [J]. *J. Geophys. Res.*, 95(B13): 21 503~21 521.
- Faure G (Pan Shulan and Qiao Guangsheng translate). 1983. Principles of Isotope Geology [M]. Beijing: Science Publishing House, 156~180.
- Gao Bingzhang, Hong Dawei, Zheng Jijian, *et al.* 1991. A Guide to the Method of the 1:50 000 Regional Geological Survey in Igneous Granite Area [M]. Wuhan: Publishing House of China University of Geosciences, 20~37 (in Chinese with English abstract).
- Ge Xiaoyue, Li Xianhua, Chen Zhigang, *et al.* 2002. Geochemical characteristics and genesis of high Sr and low Y type intermediate-acid igneous rocks in east China during Yanshanian Period: Constraints on crust thickness of east China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(6): 474~480 (in Chinese).
- Hong Dawei, Wang Shiguang, Xie Xilin, *et al.* 2000. Genesis of Positive (δNd) granitoids in the dating MTS-Mongolia orogenic belt and growth continental crust [J]. *Earth Science Frontiers*, 7(2): 441~456 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Meng Xiangjin, Qu Xiaoming, *et al.* 2005. Copperore potential of adakitic intrusives in Gangdese porphyry copper belt: Constrains from rock phase and deep melting process [J]. *Mineral Deposits*, 24(2): 109~121 (in Chinese with English abstract).
- Hou Zengqian, Qu Xiaoming, Yang Zhusen, *et al.* 2006. Metallogensis in Tibetan collisional orogenic belt: III. Mineralization in post-collisional extension setting [J]. *Mineral Deposits*, 25(6): 630~651 (in Chinese with English abstract).
- Kay R W and Kay S M. 1993. Delamination and delamination magmatism [J]. *Tectonophysics*, 19: 177~189.
- 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 [J]. *Journal of Geology*, 101 : 703~714.
- Li Wuping, Wang Tao and Wang Xiaoxia. 2001. Source of Huichizi granitoid complex pluton in Northern Qinling, Central China: constraints in element and isotopic geochemistry [J]. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 26(3): 269~278 (in Chinese with English abstract).
- Marc J D, Xu Jifeng, Pavel K, *et al.* 2002. Adakites: Some variation on a theme [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 129~140.
- Martin H. 1993. The mechanisms of petrogenesis of the Archaean continental crust-comparison with modern processes [J]. *Lithos*, 30 : 373~388.
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 46 : 411~429.
- Michael P A and Nick P. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. *Nature*, 362 : 144~146.
- Pei Xianzhi, Wang tao, Ding Saping, *et al.* 2003. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling [J]. *Geology in China*, 30(4): 372~381 (in Chinese with English abstract).
- Qian Qing. 2001. Adakite: Geochemical Characteristics and Genesis [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 297~306 (in Chinese with English abstract).
- Robert P R, Xiao Long and Nobu S. 2002. Experimental constraints on the Origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 293~302.
- Robert W K and Suzanne M K. 2002. Andean adakites: three ways to make them [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 303~310.
- Shao Ji'an, Hong Dawei and Zhang liqiao. 2002. Genesis of Sr-Nd isotopic characteristics of igneous rocks in Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(12): 817~822 (in Chinese with English abstract).
- Shi Rendeng, Yang Jingsui and Wu Cailai. 2003. The discovery of adakitic dacite in Early Palaeozoic island arc volcanic rocks on the northern margin of Qaidam basin and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 230~236 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Wang Jianxin, *et al.* 2000. The recognition of adakite-type gneisses in the North Dabie Mountains and the relationship between them and ultrahigh pressure metamorphism [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 1 017~1 024 (in Chinese).
- Wang Qiang, Xu Jifeng and Zhao Zhenhua. 2001a. The summary and comment on research on a new kind of igneous rock-adakite [J]. *Advances in Earth Sciences*, 16(2): 201~208 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qiang, Xu Jifeng, Zhao Zhenhua, *et al.* 2001b. The petrogenesis and geodynamic significances of HREE depleted granitoids during Yanshan period in the Dabie Mountains [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 551~564 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Zhang Qi and Qian Qing. 2000. The geochemical characteristics of adakite and its tectonic implication [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 35(2): 251~256 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Deng Jinfu, Ma Daquan, *et al.* 2002. The Ways of Investigation on Granitoids [M]. Beijing: Geological Publishing House, 172~191 (in Chinese).
- Xu Jifeng, Mei Houjun, Yu Xueyuan, *et al.* 2001a. Adakites related to subduction in the northern margin of Junggar arc for the Late Paleozoic: products of slab melting [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(15): 684~688 (in Chinese).
- Xu Jifeng, Wang Qiang, Xu Yigang, *et al.* 2001b. Geochemistry of Anjishan intermediate-acid intrusive rocks in Ningzhen area: Constraint to origin of magma HREE and Y depletion [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 576~584 (in Chinese with English abstract).
- Xu Liquan, Deng Jinfu, Cheng Zhiyong, *et al.* 2003. The identification of Ordovician adakites and its significance in northern Damao, inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 17(4): 428~434 (in Chinese).
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua and Bai Zhenghua. 2001a. Adakite-type sodium-rich rocks in Awulale Mountain of west Tianshan: Significance for the vertical growth of continental crust [J]. *Chinese Science Bulletin*, 46(10): 810~817 (in Chinese).
- Xiong Xiaolin, Zhao Zhenhua, Bai Zhenghua, *et al.* 2001b. Origin of Awulale adakite-type sodium-rich rocks in western Tianshan: Constraints for Nd and Sr isotopic compositions [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 514~522 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi, *et al.* 2001a. An east China plateau in mid-late Yanshanian period: implication from adakites [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 248~255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing, *et al.* 2001b. 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 Qi, Wang Yan, Liu Wei, *et al.* 2002. Adakite: characteristics and implication [J]. *Geological Bulletin of China*, 21(7): 431~435 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Wang Yan and Wang Yuanlong. 2001c. Preliminary study on the components of the lower crust in east China Plateau during Yanshanian Period: Constraints on Sr and Nd isotopic compositions of adakite-like rocks [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(4): 505~513 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Zhao Taiping, Wang Yan, *et al.* 2001d. A discussion on the Yanshanian magmatism in Eastern China [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 273~280 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing. 1996. Application and limitation of isotopic age dating [A]. Zhang Bingxi, Hong Dawei and Wu Xuanzhi. *Modern Methods of Lithosphere Research* [C]. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 168~199 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanyi, Nie Fengjun, Jiang Sihong, *et al.* 2008. Zircon SHRIMP U-Pb age of quartz diorite in Qagan Obo of Inner Mongolia and its geological significance [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 177~184 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 蔡剑辉, 阎国翰, 牟保磊, 等. 2002. 辽宁盖县梁屯-矿洞沟碱性正长岩杂岩体的 U-Pb 和 Sm-Nd 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 18(3): 349~354.
- 陈岳龙, 杨忠芳, 赵志丹. 2005. 同位素地质年代学与地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 76~96.
- 福尔 G 著. 潘曙兰, 乔广生 译. 1983. 同位素地质原理[M]. 北京: 科学出版社, 156~180.
- 高秉璋, 洪大卫, 郑基俭, 等. 1991. 花岗岩类区 1:5 万区域地质填图方法指南[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 20~37.
- 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 2002. 中国东部高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. 科学通报, 47(6): 474~480.
- 洪大卫, 王式洗, 谢锡林, 等. 2000. 内蒙造山带正 $\epsilon(\text{Nd}_{it})$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长[J]. 地学前缘, 7(2): 441~456.
- 侯增谦, 孟祥金, 曲晓明, 等. 2005. 西藏冈底斯斑岩铜矿带埃达克质斑岩含矿性、源岩相变及深部过程约束[J]. 矿床地质, 24(2): 109~121.
- 侯增谦, 曲晓明, 杨竹森, 等. 2006. 青藏高原碰撞造山带: III 后碰撞伸展成矿作用[J]. 矿床地质, 25(6): 630~651.
- 李伍平, 王涛, 王晓霞. 2001. 北秦岭灰池子花岗岩复式岩体的源岩讨论——元素-同位素地球化学制约[J]. 地球科学, 26(3): 269~278.
- Marc J D, 许继峰, Pavel K, 等. 2002. Adakites: Some variation on a theme[J]. 岩石学报, 18(2): 129~140.
- 裴先治, 王涛, 丁仁平, 等. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义[J]. 中国地质, 30(4): 372~381.
- 钱青. 2001. adakite 的地球化学特征及成因[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 297~306.
- Robert P R, 肖龙, Nobu S. 2002. Experimental constraints on the Origin of potassium-rich adakites in eastern China[J]. 岩石学报, 18(3): 293~302.
- Robert W K, Suzanne M K. 2002. Andean adakites: there ways to make them[J]. 岩石学报, 18(3): 303~310.
- 邵济安, 洪大卫, 张履桥. 2002. 内蒙古火成岩 Sr-Nd 同位素特征及成因[J]. 地质通报, 21(12): 817~822.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来. 2003. 柴北缘早中生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 22(3): 230~236.
- 王强, 许继峰, 王建新, 等. 2000. 北大别山 adakite 型灰色片麻岩的确定及其与超高压变质作用的关系[J]. 科学通报, 45(10): 1017~1024.
- 王强, 许继峰, 赵振华. 2001a. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. 地球科学进展, 16(2): 201~208.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 2001b. 大别山燕山期亏损重稀土元素花岗岩的成因及动力学意义[J]. 岩石学报, 17(4): 551~564.
- 王焰, 张旗, 钱青. 2000. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. 地质科学, 35(2): 251~256.
- 肖庆辉, 邓晋福, 马大铨, 等. 2002. 花岗岩研究思维与方法[M]. 北京: 地质出版社, 172~191.
- 许继峰, 梅厚钧, 于学元, 等. 2001a. 准噶尔北缘晚中生代岛弧中与俯冲作用有关的 adakite 火山岩: 消减板片部分熔融的产物[J]. 科学通报, 46(8): 684~688.
- 许继峰, 王强, 徐义刚, 等. 2001b. 宁镇地区中生代安基山中酸性侵入岩的地球化学: 亏损重稀土和钇的岩浆产生的限制[J]. 岩石学报, 17(4): 576~584.
- 许立权, 邓晋福, 陈志勇, 等. 2003. 内蒙古达茂旗北部奥陶纪埃达克岩类的识别及其意义[J]. 现代地质, 17(4): 428~434.
- 熊小林, 赵振华, 白正华. 2001a. 西天山阿吾拉勒 adakite 型钠质中酸性岩及地壳垂向增生[J]. 科学通报, 46(4): 281~287.
- 熊小林, 赵振华, 白正华, 等. 2001b. 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[J]. 岩石学报, 17(4): 514~522.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等. 2001a. 燕山晚期的中国东部高原埃达克岩的启示[J]. 地质科学, 36(2): 248~255.
- 张旗, 王焰, 钱青, 等. 2001b. 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.
- 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 2002. 埃达克岩的特征及其意义[J]. 地质通报, 21(7): 431~435.
- 张旗, 王焰, 王元龙. 2001c. 燕山期中国东部高原下地壳组成初探: 埃达克质岩 Sr、Nd 同位素制约[J]. 岩石学报, 17(4): 505~513.
- 张旗, 赵太平, 王焰, 等. 2001d. 中国东部燕山期岩浆活动的几个问题[J]. 岩石矿物学杂志, 20(3): 273~280.
- 张宗清. 1996. 同位素年代学方法的应用和限制[A]. 张炳熏, 洪大卫, 吴宣志. 岩石圈研究的现代方法[C]. 北京: 原子能出版社, 186~199.
- 张万益, 聂凤军, 江思宏, 等. 2008. 内蒙古查干敖包石英闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 27(3): 177~184.