

内蒙古锡林浩特地区拜仁达坝矿区闪长岩体锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义

刘翼飞, 江思宏, 张 义

LIU Yi-fei, JIANG Si-hong, ZHANG Yi

中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

摘要: 对拜仁达坝矿区闪长岩体中的锆石进行了 SHRIMP U-Pb 定年, 获得 13 个锆石颗粒的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄的加权平均值 $326.5\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD=1.7), 表明岩体侵位于海西期。岩体的地球化学特征显示岩体较为明显地受到了锡林浩特杂岩的混染, 具有火山弧岩浆作用成因的特点。结合区域内其他海西期岩体的年代学和地球化学特征, 该区海西期经历了一次较为强烈的构造岩浆事件, 也暗示该火山弧环境可能从苏尼特地区一直向东延伸至克什克腾旗的北部地区。

关键词: 内蒙古中东部; 拜仁达坝闪长岩体; 锆石 SHRIMP U-Pb 定年; 火山弧

中图分类号: P597^{+.3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2010)05-0688-09

Liu Y F, Jiang S H, Zhang Y. The SHRIMP zircon U-Pb dating and geological features of Bairendaba diorite in the Xilin-haote area, Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(5):688-696

Abstract: The diorite in Bairendaba Ag polymetallic ore district was studied with SHRIMP zircon U-Pb and geochemical method. It has yielded a Hercynian emplacement age of $326.5 \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD=1.7), and the geochemical data suggest a volcanic arc setting genesis for the diorite, there was significant contamination with Xilinhaote complex in the magma evolution. Combined with the geological and geochronological features of granitoids in the nearby area, it shows that there has been an intensive Hercynian tectonic-magmatic event in this area, and the volcanic arc setting may extend from Sunid area to northern Hexigten.

Key words: central-eastern Inner Mongolia; Bairendaba diorite; SHRIMP zircon U-Pb dating; volcanic arc

内蒙古中东部地区近年来在有色多金属找矿勘查方面取得了较大的突破, 发现了一些重要的有色多金属矿床, 如拜仁达坝及维拉斯托多金属矿床。拜仁达坝闪长岩体是拜仁达坝及维拉斯托矿床的重要赋矿围岩, 受区域构造控制呈北东东向断续出露, 侵入于锡林浩特杂岩体内。对该岩体成岩时代及岩体演化过程的研究, 是认识该区拜仁达坝等一系列有色多金属矿床成矿过程的重要环节。因此, 本文在前人工作的基础上, 运用 SHRIMP 锆石 U-Pb 法, 岩

石地球化学法等综合研究手段, 探讨拜仁达坝闪长岩体的形成过程及其构造环境。

1 区域地质概况

锡林浩特杂岩体为区内变形变质程度较深的地质体。在矿区内地层主要呈帽状残余, 岩性主要为黑云斜长片麻岩, 片麻理走向 $36 \sim 58^\circ$, 并被后期岩体侵入。区域出露的地层主要有古生界上石炭统本巴图组海相碎屑岩、灰岩及火山岩组合, 上石炭统阿木

收稿日期: 2009-10-22; 修订日期: 2009-12-17

地调项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(编号: K0704)、全国危机矿山项目(编号: 20089948)和中国地质调查局地质大调查项目(编号: 1212010911029)联合资助

作者简介: 刘翼飞(1981-), 男, 硕士, 研究实习员, 从事金属矿床成矿规律研究。E-mail: lyfsky@126.com

山组海相碎屑岩、碳酸盐岩,二叠系大石寨组海陆交互碎屑岩与火山碎屑岩组合,二叠系林西组陆相碎屑岩建造,中生界侏罗系万宝组陆相湖盆沉积,以及侏罗系满克头鄂博组火山岩系。侵入岩主要为加里东期、海西期和燕山期的花岗岩类侵入体,海西期拜仁达坝闪长岩体是其中一个较大的岩体,呈岩基状产出,侵入于锡林浩特杂岩内,由于受后期构造作用的影响,形成了与区域构造方向一致的轻微的片麻理。研究区内地层、侵入岩的展布主要受北东向区域深断裂的控制。见图 1。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集

本次研究中用于锆石定年的岩石样品 BS-13 取自拜仁达坝银多金属矿区 ZK413 钻孔 260m 处。

用于进行主量、微量、稀土元素和同位素测试的闪长岩和锡林浩特杂岩样品采自于拜仁达坝矿区的不同部位。矿区中心坐标为 E117°33'4"、N44°6'45"。

石英闪长岩体呈灰白色,半自形细粒结构,具轻微的片麻状构造。岩体岩性主要为闪长岩及石英闪长岩,其内主要矿物有斜长石(55%~65%)、石英(15%~20%)和黑云母(10%~15%),次要矿物有普通角闪石(3%~7%),副矿物可见锆石、磷灰石。斜长石一般呈自形一半自形板状,石英呈他形粒状,黑云母一般呈半自形—他形针片状,分布较为均匀,普通角闪石呈他形晶,含量较少,不均匀分布。矿物粒度主要在 2~5mm 之间,在 1~2mm 之间的次之。岩石热液蚀变作用较为明显。

锡林浩特杂岩体主要岩性为黑云斜长片麻岩,岩石呈灰白色,其内矿物主要有斜长石(含量 50%左

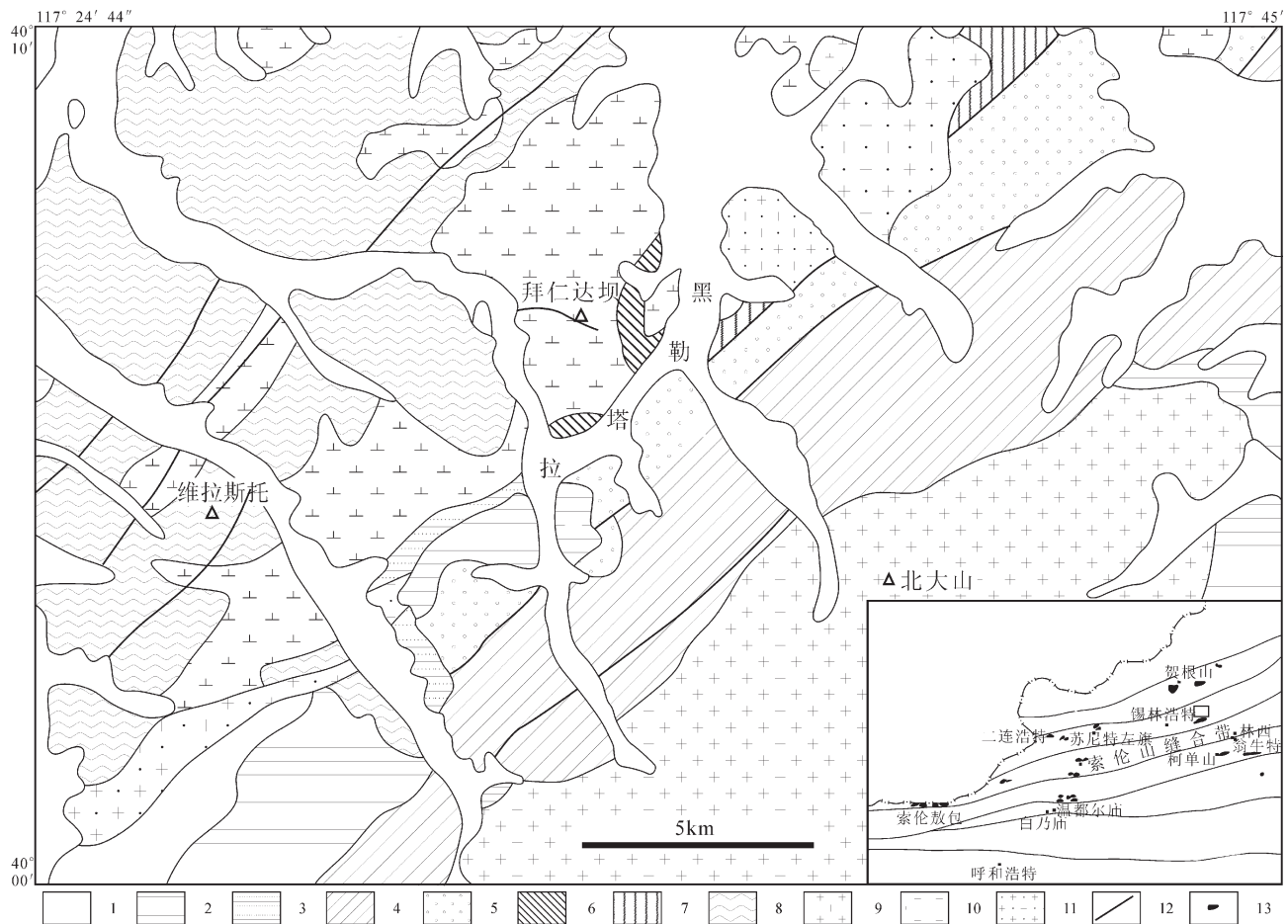


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of the study area

- 1—第四系;2—上侏罗统满克头鄂博组;3—下侏罗统万宝组;4—上二叠统林西组;5—下二叠统大石寨组;6—上石炭统阿木山组;
- 7—上石炭统本巴图组;8—锡林浩特杂岩;9—燕山期花岗岩;10—海西期石英闪长岩;11—加里东期花岗岩;12—断层;13—蛇绿岩

右)、石英(25%~30%)、黑云母(20%~25%)及少量的角闪石(2%~3%),次生矿物有绿泥石、绢云母、次闪石及粘土矿物,副矿物主要有锆石和磷灰石。斜长石一般呈等轴粒状变晶,石英也呈等轴粒状变晶。黑云母呈鳞片状,均匀分布并呈定向排列,形成片麻状构造。少量角闪石晶体较为粗大,有呈变斑晶的趋势。部分岩石受到混合岩化作用,表现为由斜长石和石英组成的浅色脉体,脉宽5mm左右。矿物粒度一般在0.3~0.5mm之间,角闪石在1~2mm之间。岩石蚀变明显。

2.2 锆石分选和分析流程

原岩样品经破碎达到合适的粒度后,用常规方法分选出锆石。在双目镜下挑选出完整的、透明度好的锆石颗粒用于测年。将挑选出的锆石颗粒与标准锆石一起置于环氧树脂中制成样品靶,将样品靶打磨并抛光至锆石中心部位暴露出来。对样品靶上的锆石进行透射光、反射光和阴极发光照相(图2),以

便在进行 SHRIMP 测定时选取合适的分析部位及测定完成后进行合理的数据解释。锆石阴极发光和锆石微区原位 U-Th-Pb 同位素分析在北京离子探针中心进行。在分析过程中,用标准锆石 TEM ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $416.8\text{Ma}\pm 1.3\text{Ma}^{[1]}$) 的测定值来进行 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比值的校正;用 M257 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $561.3\text{Ma}\pm 0.3\text{Ma}$, U 含量为 $840\times 10^{-6}^{[2]}$) 进行 U 含量校正。测试按照参考文献[3-5]描述的流程进行。测定时,标准样品和未知样品按照 1:4 的比例交替测定。在样品测试过程中,尽量选择无包裹体及无裂纹的部位作为一次离子流斑点的目标位置。数据处理及 U-Pb 谐和图绘制采用 Squid 程序和 Isoplot 程序完成。年龄值采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,单个点的误差为 1σ ,加权平均值的误差为 95%置信度误差(表 1)。

2.3 分析方法

本次研究对拜仁达坝闪长岩体的 4 个样品进行了化学全岩分析,分析在核工业北京地质研究院分

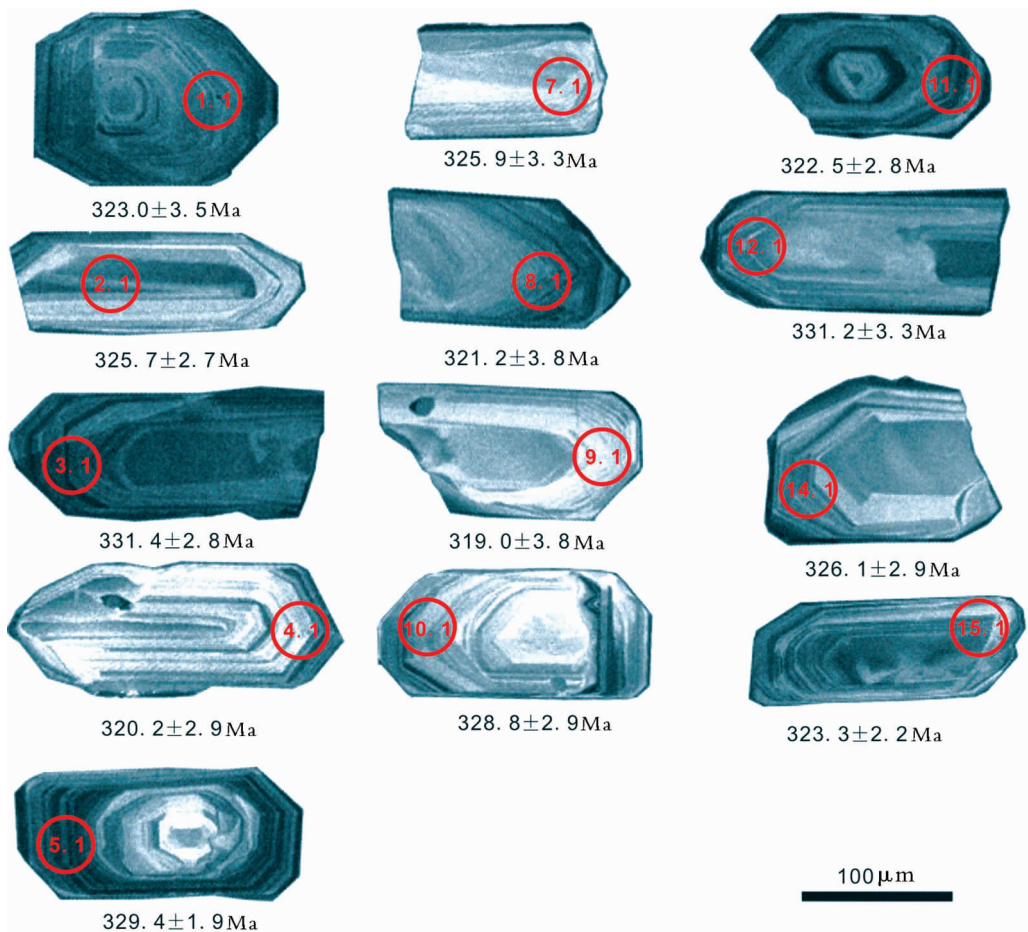


图2 拜仁达坝闪长岩体锆石(样品 BS-13)阴极发光图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 2 CL images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircon (sample BS-13) from Bairendaba diorite

表 1 拜仁达坝闪长岩体锆石 (样品 BS-13)SHRIMP U-Th-Pb 同位素测年结果
Table 1 SHRIMP U-Th-Pb dating on zircons (sample BS-13) of Bairendaba diorite

测点	²⁰⁶ Pb _c /%	²⁰⁶ Pb* /10 ⁻⁶	Th /10 ⁻⁶	U /10 ⁻⁶	Th/U	²⁰⁷ Pb* / ²⁰⁶ Pb*	±%	²⁰⁷ Pb* / ²³⁵ U	±%	²⁰⁶ Pb* / ²³⁸ U	±%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U 年龄/Ma
1.1	0.26	7.54	62	170	0.36	0.0509	4.3	0.361	4.4	0.05139	1.1	323.0±3.5
2.1	0.24	16.6	270	371	0.73	0.0526	2.9	0.376	3.0	0.05181	0.86	325.7±2.7
3.1	-	14.6	178	322	0.55	0.0534	2.4	0.3882	2.6	0.05275	0.86	331.4±2.8
4.1	0.17	13.1	136	289	0.47	0.0542	3.1	0.393	3.2	0.05255	0.89	330.2±2.9
5.1	0.15	51.8	441	1147	0.38	0.05218	1.2	0.3772	1.4	0.05243	0.61	329.4±1.9
7.1	0.05	7.57	94	170	0.55	0.0531	4.8	0.380	4.9	0.05186	1.0	325.9±3.3
8.1	0.09	6.26	61	142	0.43	0.0529	4.3	0.372	4.5	0.05109	1.2	321.2±3.8
9.1	0.53	5.29	49	121	0.41	0.0529	5.9	0.370	6.0	0.05073	1.2	319.0±3.8
10.1	0.31	10.3	90	229	0.40	0.0547	4.0	0.394	4.1	0.05233	0.91	328.8±2.9
11.1	0.20	26.8	272	606	0.45	0.0540	2.0	0.3817	2.2	0.05130	0.89	322.5±2.8
12.1	0.42	10.5	110	230	0.48	0.0512	3.4	0.372	3.5	0.05271	1.0	331.2±3.3
14.1	0.55	10.3	97	231	0.42	0.0526	3.4	0.376	3.5	0.05189	0.91	326.1±2.9
15.1	-	21.7	200	492	0.41	0.05394	1.6	0.3825	1.7	0.05143	0.71	323.3±2.2

注: Pb_c 和 Pb* 分别表示普通 Pb 和放射性 Pb,应用实测 ²³⁴Pb 校正锆石中的普通 Pb,误差为 1σ

表 2 拜仁达坝矿区闪长岩体的主量元素、微量元素和稀土元素分析结果
Table 2 Major elements, trace elements and REE data of Bairendaba diorite

样品	BS-13	YS-03	YS-04	YS-05	样品	BS-13	YS-03	YS-04	YS-05
SiO ₂	64.41	60.94	58.54	62.08	Zr	162	103	49.5	50.3
TiO ₂	0.85	0.8	0.81	0.74	Hf	5.18	3.1	1.58	1.74
Al ₂ O ₃	14.56	18.04	13.94	13.44	Y	39.6	19.4	21.4	48.4
TFeO	5.1	3.79	8.79	6.1	Rb/Sr	0.36	0.41	0.23	0.22
FeO	4.18	3.17	7.51	4.67	Nb/Ta	10.68	14.73	14.39	11.32
MnO	0.1	0.07	0.22	0.15	Zr/Hf	31.27	33.23	31.33	28.91
MgO	1.6	1.16	4.44	2.64	La	45.2	23.3	12.1	13.3
CaO	3.57	4.04	5.84	4.36	Ce	88.2	45.5	24.6	31.9
Na ₂ O	3.8	2.9	2.25	3.5	Pr	9.41	5.04	3.29	4.24
K ₂ O	2.04	1.81	1.17	1.2	Nd	37.8	20.9	15.4	20.6
P ₂ O ₅	0.22	0.2	0.19	0.93	Sm	6.77	3.7	3.35	5.91
LOI	2.74	5.34	2.26	3.7	Eu	1.50	0.92	1.07	1.13
Total	99.09	99.16	98.59	99.00	Gd	6.41	3.36	3.36	6.44
K ₂ O/Na ₂ O	0.54	0.62	0.52	0.34	Tb	1.04	0.561	0.637	1.38
σ	1.59	1.24	0.75	1.16	Dy	6.71	3.61	4.06	9.27
A/CNK	0.97	1.28	0.89	0.9	Ho	1.22	0.678	0.756	1.74
Ba	592	738	243	276	Er	3.99	1.96	2.24	4.81
Rb	124	82	65.3	57.9	Tm	0.571	0.289	0.364	0.755
Th	20.8	8.55	1.01	2.13	Yb	3.77	1.73	2.35	4.43
U	4.46	1.69	1.26	2.34	Lu	0.571	0.249	0.367	0.665
Nb	15.8	8.63	9.27	14.6	? REE	213.162	111.797	73.944	106.570
Ta	1.48	0.586	0.644	1.29	δEu	0.70	0.80	0.98	0.56
Sr	347	200	288	258	(La/Yb) _N	8.08	9.08	3.47	2.02

注:主量元素含量%,微量和稀土元素含量 10⁻⁶

析测试研究中心完成。主量元素分析在飞利浦制造的PW2404 X射线荧光光谱仪上进行,精度高于1%,微量元素分析在Finnigan MAT制造的HR-ICP-MS (Element I)上进行,精度高于5%。主量元素、微量元素和稀土元素的分析结果列于表2。Nd-Sr同位素分析在核工业北京地质研究院ISOPROBE-T质谱仪上完成,Sr同位素测定过程中的分馏效应采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=8.375219$ 进行正规化校正,实验室流程本底Rb为 $2\times 10^{-10}\text{g}$,Sr为 $2\times 10^{-10}\text{g}$,Nd质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.7219$ 校正,标准测量结果SHINESTU为 0.512118 ± 3 (标准值为0.512110),全流程本底Sm、Nd小于 $50\times 10^{-12}\text{g}$,样品Sr、Nd同位素分析结果列于表3。

3 分析结果

3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

样品BS-13的阴极发光照片见图2,锆石晶体形态较好,呈长柱状,长宽比为1.5:1~2:1,长100~200 μm ,表面洁净光滑,发育典型的韵律环带,显示岩浆成因锆石的特征。部分锆石具有细小的暗色矿物包裹体。

本次研究一共测定了13个锆石颗粒,获得了13个数据,测点位置见图2,分析数据见表1。锆石中U和Th的含量变化范围较大,分别介于 121×10^{-6} ~ 1147×10^{-6} 之间和 49×10^{-6} ~ 441×10^{-6} 之间,平均值为 347×10^{-6} 和 158×10^{-6} ,Th/U比值较为稳定,变化于0.36~0.73之间,平均为0.46。所得数据总体较为稳定,构成一个相关年龄组,在谐和曲线中接近一致,且集中分布(图3),给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $326.5\text{Ma}\pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD=1.7),为岩体的结晶年龄,显示拜仁达坝闪长岩体侵位于海西期。

3.2 拜仁达坝闪长岩体的地球化学特征

3.2.1 主量元素特征

从表2可见,拜仁达坝闪长岩体的主量元素具有以下特征:①岩体的 $\text{SiO}_2=58.54\%\sim 64.41\%$,平均为61.49%,岩性主要为闪长岩及石英闪长岩;②岩石主要为准铝质及弱的过铝质, $\text{Al}_2\text{O}_3=13.44\%\sim 18.04\%$,平均为15.00%,CIPW标准矿物中部分样品

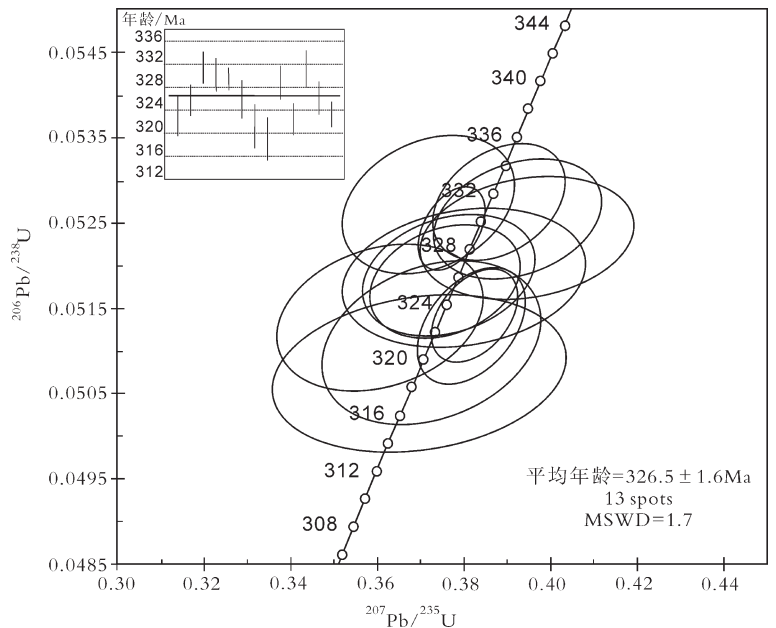


图3 拜仁达坝闪长岩体锆石 SHRIMP U-Pb 年龄谐和图(样品 BS-13)

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram and average age of Bairendaba diorite (sample BS-13)

有刚玉分子;③全碱含量中等偏低, $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=3.42\%\sim 5.84\%$,平均为4.67%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 变化于0.34~0.62之间,平均为0.51,较为富Na;④里特曼指数 σ 变化于0.75~1.59之间,平均为1.19,为钙碱性系列。

3.2.2 稀土元素和微量元素特征

从表2可以看出,拜仁达坝闪长岩体的 ΣREE 含量变化于 73.94×10^{-6} ~ 213.16×10^{-6} 之间,平均为 126.37×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 变化范围在2.02~9.08之间,在稀土元素配分图上总体呈右倾形态,其中轻稀土元素为陡倾,重稀土元素较为平缓(图4)。 δEu 变化于0.56~0.98之间,表现为弱到中等的负Eu异常。

岩体中所有样品的微量元素含量均高出原始地幔值几倍到几百倍,原始地幔标准化蛛网图解整体呈现右倾形态,大离子亲石元素相对于高场强元素和轻稀土元素较为富集,其中Nb、Ta、P和Ti明显亏损。 $\text{Rb}/\text{Sr}=0.22\sim 0.41$,平均为0.30; $\text{Zr}/\text{Hf}=28.91\sim 33.23$,平均为31.18; $\text{Nb}/\text{Ta}=10.68\sim 14.39$,平均为12.78,Nb和Ta之间具有良好的线性相关性,Nb/Ta比值与Nb的含量具有负的相关性。

3.2.3 Sr-Nd-Pb同位素特征

表3列出了拜仁达坝闪长岩体具有代表性的

Sr-Nd 同位素组成数据,拜仁达坝闪长岩体的 Sr、Nd 初始同位素比值基于 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 326.5Ma 反算得到。为了与拜仁达坝闪长岩体进行对比,锡林浩特杂岩的 Sr、Nd 同位素比值也根据现代值反算到 $t=326.5\text{Ma}$ 。拜仁达坝闪长岩体所有的样品都具有较低的初始 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t 值,该值的分布范围在 0.70546~0.70902 之间,平均为 0.70788。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-4.4\sim 0.6$,平均为 -2.7,样品中 $f_{\text{Sm}/\text{Nd}}$ 在 -0.30~0.65 之间,Sm/Nd 比值在 0.11~0.23 之间,显示岩体中 Sm/Nd 分异不甚明显,较好地记录了原岩的特征。亏损地幔模式年龄 T_{DM} 在 1~1.3Ga 之间,两阶段亏损地幔模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 在 1.2~1.4Ga 之间。在 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_t- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解上投点位于地幔趋势线上及其右侧,靠近锡林浩特杂岩,显示其与锡林浩特杂岩之间具有密切的关系。而与宝力道岩体相比,地幔组分含量明显较低(图 5),可能表明拜仁达坝闪长岩体在形成过程中受到锡林浩特杂岩体的混染更为明显。

4 讨论

4.1 构造意义

现代火山弧岩浆岩是洋壳俯冲作用过程中释放的流体、熔体与地幔楔系统相互作用的产物^[7-9],火山弧岩浆岩相对于大离子亲石元素(LILE)具有明显亏损 HFSE 元素(Nb、Ta 和 Ti 尤其明显)和轻稀土元素的特点,并以此与其他构造环境中的岩浆岩相区别。拜仁达坝闪长岩体的微量元素以富集 Rb、Ba、Th、K 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素为特征,在 Rb-(Y+Nb)图解(图 6)上,样品数据点主要落于火山弧花岗岩区域内及其附近。岩体中 Ti 与 SiO₂ 含量的增加具有较为明显的负相关性,同时 Nb/Ta 比值随着 Nb 含量的增加而减小,显示二者之间具有明显的负相关性,表明 Nb/Ta 比值随着 Nb 含量的变化产生了较为明显的分异作用,这可能与含 Ti 矿物在俯冲板片脱水过程中残留于源区引起高场强元素的分异有关^[10-14],这种分异作用也显示该区具有俯冲带岩浆作用的特点。

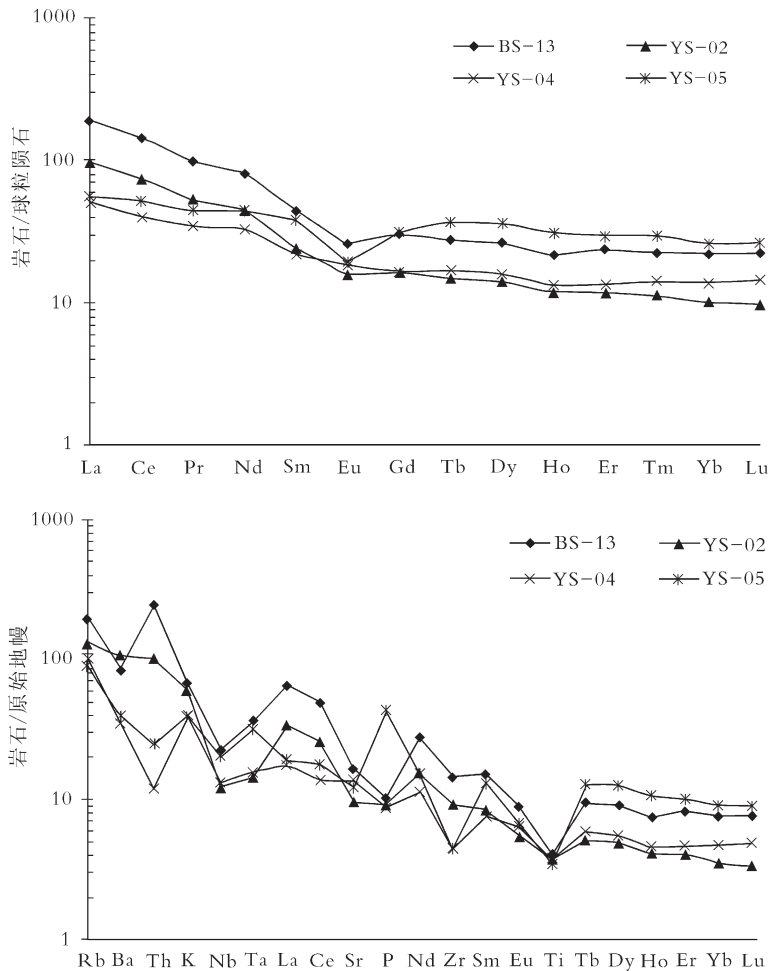


图 4 拜仁达坝闪长岩体球粒陨石稀土元素配分图解和微量元素蛛网图解^[9]

Fig. 4 Chondrite normalized REE patterns and the primitive mantle normalized spidergrams for Bairendaba diorite

从区域范围来看,研究区位于中亚造山带的东段、西伯利亚板块与华北板块的碰撞拼合地带,经历了复杂的演化历史,形成了多个增生地体和多条蛇绿岩带^[15]。区域内花岗岩类也广泛分布,其中一部分(例如加里东期和海西早期的)可能同板块俯冲作用有关^[16]。在索伦山缝合带北侧^[17]的苏尼特左旗地区,研究者^[18-19]通过较为系统的研究,识别出了 2 个对比明显的岩浆岩带,分别是宝力道岩套(约 310Ma)和哈拉图花岗岩(230~250Ma),并认为它们是大洋俯冲作用和大陆碰撞作用的产物,显示该区在石炭纪时期处于火山弧环境。而在克什克腾旗北部及其邻近区域也发现了大量石炭纪的侵入体^[20],其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄在 313~323Ma

表3 拜仁达坝矿区闪长岩体(上)和锡林浩特杂岩(下)Sr-Nd同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Bairendaba diorite and Xilinhaote complex

样品编号	BS-13	YS-02	YS-03	YS-04	YS-05	BK13	BK14	BK16	
Rb/ 10^{-6}	124	74.9	82	65.3	57.9	46.3	65.3	52.1	
Sr/ 10^{-6}	347	320	200	288	258	212	205	177	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	1.009027	0.660790	1.157510	0.640152	0.633630	0.632400	0.919300	0.851000	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	0.71222	0.71042	0.71059	0.71109	0.71136	0.71195	0.71215	0.71256	
$\pm(2\sigma)$	0.000014	0.000011	0.000012	0.000015	0.000011	0.000011	0.000011	0.000015	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.70775	0.70749	0.70546	0.70826	0.70855	0.70902	0.70788	0.70861	
Sm/ 10^{-6}	4.84	2.04	2.56	3.14	4.37	3.11	2.75	5.79	
Nd/ 10^{-6}	33.3	17.9	17.2	18.3	19.1	19.07	16.39	34.33	
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	0.0877	0.0688	0.0898	0.1041	0.138	0.0987	0.1015	0.102	
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	0.512351	0.512250	0.512200	0.512224	0.512380	0.512237	0.512464	0.512264	
$\pm(2\sigma)$	0.000007	0.000006	0.000005	0.000007	0.000007	0.000014	0.000006	0.000011	
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-5.6	-7.6	-8.6	-8.1	-5	-7.8	-3.4	-7.3	
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-1.3	-2.6	-4.3	-4.4	-2.6	-3.7	0.6	-3.4	
f_{SmNd}	-0.55	-0.65	-0.54	-0.47	-0.3	-0.50	-0.48	-0.48	
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	0.512172	0.512110	0.512020	0.512012	0.512100	0.512026	0.512247	0.512046	
T_{DM}	969	953	1171	1289	1545	1212	934	1210	
$T_{2\text{DM}}$	1176	1282	1424	1431	1288	1390	1039	1358	
样品编号	WB-01	WB-02	WB-03	WB-04	WB-05	WB-06	BK26	BK27	BK28
Rb/ 10^{-6}	59.2	142	194	93	101	164	73.3	66.2	39.1
Sr/ 10^{-6}	243	244	222	268	321	207	105	307	246
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.687892	1.643829	2.468531	0.980132	0.888765	2.237884	2.026600	0.623800	0.460200
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_m$	0.71209	0.71567	0.71641	0.71516	0.71596	0.71581	0.71123	0.70935	0.70798
$\pm(2\sigma)$	0.00001	0.000009	0.000021	0.000013	0.000016	0.00001	0.000014	0.000014	0.000012
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$	0.70889	0.70804	0.70495	0.71062	0.71184	0.70542	0.70182	0.70646	0.70585
Sm/ 10^{-6}	3.48	5.54	2.94	4.00	5.22	3.00	4.84	3.46	5.20
Nd/ 10^{-6}	24.50	37.10	23.80	29.90	36.90	23.30	20.25	19.98	19.46
$(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_m$	0.0859	0.0903	0.0748	0.0808	0.0856	0.0777	0.1445	0.1045	0.1615
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_m$	0.512089	0.512009	0.512057	0.511986	0.512032	0.512237	0.512461	0.512306	0.512488
$\pm(2\sigma)$	0.000005	0.000004	0.000006	0.000005	0.000007	0.000005	0.000004	0.000004	0.000010
$\epsilon_{\text{Nd}}(0)$	-10.7	-12.3	-11.3	-12.7	-11.8	-7.8	-3.5	-6.5	-2.9
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	-6.1	-7.8	-6.3	-7.9	-7.2	-2.9	-1.3	-2.6	-1.5
f_{SmNd}	-0.56	-0.54	-0.62	-0.59	-0.56	-0.60	-0.27	-0.47	-0.18
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_t$	0.511906	0.511816	0.511897	0.511814	0.511849	0.512071	0.512153	0.512083	0.512143
T_{DM}	1266	1410	1200	1336	1331	1025	1519	1180	1934
$T_{2\text{DM}}$	1581	1722	1594	1727	1670	1319	1189	1300	1204

注:下标 m 表示实验室实测数据

之间,属于海西期岩浆活动的产物。区域内这些海西期岩体的年龄特征及分布显示,沿着北东东方向可能存在一条连续的海西期的岩浆岩带。结合岩体的地球化学特征及其构造特征,拜仁达坝闪长岩体的侵位时期还处于岛弧构造环境,尽管与苏尼特地区的宝力道岩体有 17Ma 的时间差,但是这完全在一个火山弧的生命周期之内^[21],因此二者可能是同一个火山弧环境的产物,暗示该岛弧环

境可能从苏尼特地区向东延伸至克什克腾旗的北部地区。

4.2 岩石成因探讨

拜仁达坝闪长岩体在 Sr-Nd 同位素相关图解(图 5)上位于地幔趋势线的右侧,与宝力道岩体^[19]具有类似的特点,Chen 等^[19]认为这很可能受到了海水蚀变的影响,Depaolo 等^[23]在研究 New Britain 岛弧时也认为这种现象与洋壳在俯冲之前受到海水的蚀

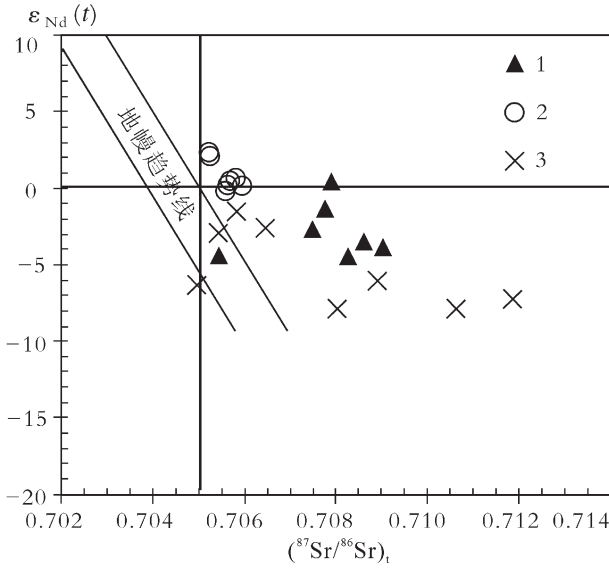


图 5 拜仁达坝闪长岩体 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解
 Fig. 5 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Bairendaba diorite
 1—拜仁达坝闪长岩体; 2—宝力道岩套; 3—锡林浩特杂岩

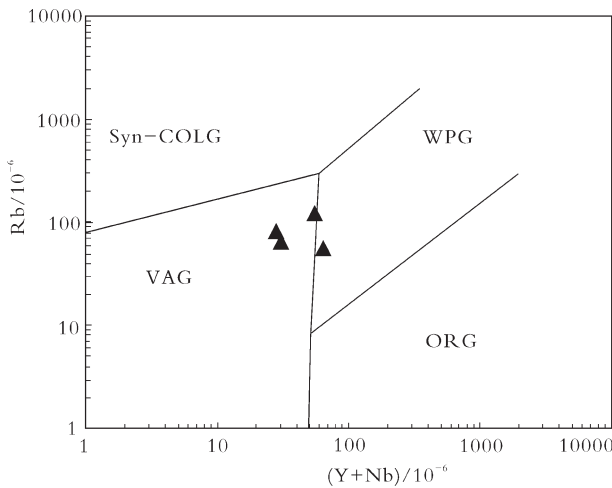


图 6 拜仁达坝闪长岩体 Rb-(Y+Nb) 构造环境判别图^[23]

Fig. 6 Rb-(Y+Nb) discrimination diagram of Bairendaba diorite
 Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩;
 WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩

变作用,并在俯冲过程中脱水或者熔融有关。同时考虑到岩体所侵入的围岩锡林浩特杂岩具有相对较高的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_t$ 值和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(表 3),岩体的 Sr 和 Nd 同位素受到锡林浩特杂岩混染的可能性也较大,这可能也是岩体 Sr 和 Nd 同位素数据点投影偏离地幔趋势线的一个重要原因。拜仁达坝闪长岩体

的亏损地幔模式年龄 T_{DM} 在 1~1.5Ga 之间,两阶段亏损地幔模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 在 1.1~1.4Ga 之间,都远远大于岩体的侵入年龄,显示岩体中有部分古老地壳物质(锡林浩特杂岩)组分的加入。从图 5 可以看出,拜仁达坝闪长岩体相对于宝力道岩体,总体具有较高的 Sr 同位素比值和较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值,显示拜仁达坝闪长岩体比宝力道岩体受到锡林浩特杂岩混染的程度可能更高。

5 结 论

(1)拜仁达坝闪长岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果为 $326.5\text{Ma} \pm 1.6\text{Ma}$ (MSWD=1.7),显示其侵入时代为早石炭世,属海西期。

(2)拜仁达坝闪长岩体为准铝质到弱过铝质闪长岩,具有钙碱性岩浆的演化趋势。岩体的地球化学特征显示,拜仁达坝闪长岩体具有火山弧岩浆作用成因的特点,同时受到古老地壳岩石(锡林浩特杂岩)的混染,与区域内的宝力道岩体相比,拜仁达坝闪长岩体受到古老地壳混染的程度明显更高。

(3)结合区域内其他海西期岩体的年代学和地球化学特征,该区海西期经历了一次较为强烈的构造岩浆事件,同时该火山弧环境可能从苏尼特地区一直向东延伸至克什克腾旗的北部地区。

致谢:野外工作中得到拜仁达坝矿业公司和维拉斯托矿业公司的大力协助,在此深表谢意。

参考文献

[1]Black L P, Kamo S L, Allen C M, et al. TEMORA 1: a new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology[J]. Chemical Geology, 2003, 200:155-170.
 [2]Nasdala L, Hofmeister W G, Norberg N, et al. Zircon M257—a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon[J]. Geoanalytical Research, 2008, 32:247-265.
 [3]Williams I S, Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides: II. Ion microprobe zircon U-Th-Pb[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 97: 205-217.
 [4]石玉若, 刘敦一, 张旗, 等. 内蒙古中部苏尼特左旗地区三叠纪 A 型花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其区域构造意义[J]. 地质通报, 2007, 26(2): 183-189.
 [5]宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. 地质论评, 2002, 48 (增刊): 26-30.
 [6]Sun S S, Mcdonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J].

- Geological Society, London, Special Publications, 1989,42: 313-345.
- [7]Tatsumi Y, Hamilton D, Nesbitt R W. Chemical characteristics of fluid phase released from a subducted lithosphere and origin of arc magmas: evidence from high-pressure experiments and natural rocks [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1986,29: 293-309.
- [8]Moriguti T, Nakamura E. Across-arc variation of Li isotopes in lavas and implications for crust / mantle recycling at subduction zones [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998,163: 167-174.
- [9]Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120-180 km depth [J]. *Nature*, 2005,437: 724-727.
- [10]Stolz A J, Spettel B, Hofmann A W. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts [J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587-590.
- [11]Foley S F, Barth M G, Jenner G A. Rutile/melt partition coefficients for trace elements and an assessment of the influence of rutile on the trace element characteristics of subduction zone magmas [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(5): 933-938.
- [12]Kamber B S, Collerson K D. Role of 'hidden' deeply subducted slabs in mantle depletion [J]. *Chemical Geology*, 2000,166: 241-254.
- [13]Pfänder J A., Münker C, Stracke A, et al. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007,254: 158-172.
- [14]Liang J L, Ding X, Sun X M, et al. Nb/Ta fractionation observed in eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project [J]. *Chemical Geology*, 2009, in press.
- [15]王荃, 刘雪亚, 李锦轶. 中国内蒙古中部的古板块构造 [J]. *中国地质科学院院报*, 1991,22: 1-15.
- [16]洪大卫, 王式洸, 谢锡林, 等. 兴蒙造山带正 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值花岗岩的成因和大陆地壳生长 [J]. *地质前缘*, 2000, 7(2): 441-456.
- [17]Xiao W J, Windley B, Hao J, et al. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: Termination of the central Asian orogenic belt [J]. *Tectonics*, 2003, 22(6): 801-820.
- [18]徐备, 陈斌. 内蒙古北部华北板块与西伯利亚板块之间中生代造山带的结构及演化 [J]. *中国科学(D辑)*, 1997, 27(3): 227-232.
- [19]Chen B, Jahn B M, Wilde S, et al. Two contrasting paleozoic magmatic belts in northern Inner Mongolia, China: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2000,328: 157-182.
- [20]鲍庆中, 张长捷, 吴之理, 等. 内蒙古白音高勒地区石炭纪石英闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学及其意义 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2007,37(1): 15-22.
- [21]Rogers G, Hawkesworth C J. A geochemical traverse across the North Chilean Andes: evidence for crust generation from the mantle wedge [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 91: 271-285.
- [22]Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Journal of Petrology*, 1984,25(4): 956-983.
- [23]Depaolo D J, Johnson R W. Magma genesis in the New Britain island-arc: Constraints from Nd and Sr isotopes and trace-element patterns [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979,70: 367-379.