

内蒙古翁牛特旗晚志留世二长花岗岩年代学及地球化学特征

陈井胜¹, 刘 淼¹, 李 斌¹, 李 伟¹, 李崴崴², 杨 帆¹, 汪 岩¹
CHEN Jingsheng¹, LIU Miao¹, LI Bin¹, LI Wei¹, LI Weiwei², YANG Fan¹, WANG Yan¹

1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034;

2. 辽宁省地质矿产研究院, 辽宁 沈阳 110029

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Liaoning Institute of Geology and Mineral Resources, Shenyang 110029, Liaoning, China

摘要: 内蒙古翁牛特旗小营子地区铅锌矿周围分布有大面积花岗岩, 野外地质调查及室内鉴定为二长花岗岩。通过LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试, 确定其形成时代为 419.3 ± 9.2 Ma, 属于晚志留世。二长花岗岩中SiO₂含量为74.41%~75.05%, K₂O含量为3.05%~4.42%, K₂O/Na₂O值介于0.70~1.11之间, Al₂O₃含量为13.22%~14.02%, 铝饱和指数(A/CNK)为0.99~1.1, Fe、Mg、Ti氧化物含量较低, 这些特征显示二长花岗岩为富硅、略富铝、中高钾钙碱性I型花岗岩。轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)在10.61~16.61之间, (La/Yb)_N值在12.52~27.44之间, 轻、重稀土元素分馏明显, δ Eu值为0.48~0.81, 显示中等负Eu异常。富集大离子亲石元素Rb、Ba、U、K, 相对亏损高场强元素Nb、Zr、Hf, 具有低的Sr、Yb含量。地球化学特征显示, 二长花岗岩形成于活动大陆边缘火山弧。结合区域地质资料推断, 小营子二长花岗岩是在古亚洲洋向华北板块俯冲背景下白乃庙岛弧消亡过程中形成的。

关键词: 翁牛特旗; 二长花岗岩; 锆石U-Pb测年; 地球化学; 白乃庙岛弧

中图分类号: P534.43; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)08-1359-10

Chen J S, Liu M, Li B, Li W, Li W W, Yang F, Wang Y. Zircon U-Pb chronology and geochemical characteristics of Late Silurian monzogranite in Ongniud Banner, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(8):1359-1368

Abstract: The granite widely distributed in the Xiaoyingzi lead-zinc ore deposit of Ongniud Banner, Inner Mongolia, consists of monzogranite as revealed by field geological survey and thin section identification. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating result shows that the monzogranite was formed in late Silurian (419.3 ± 9.2 Ma) rather than in Mesozoic as previously held. The values of SiO₂, K₂O, K₂O/Na₂O, Al₂O₃ are 74.41%~75.05%, 3.05%~4.42%, 0.70~1.11, 13.22%~14.02% respectively, the aluminum saturation indexes (A/CNK) range from 0.99 to 1.1, and the oxides of Fe, Mg, Ti are relatively low, which implies that the monzogranite is I-type granite. The ratios of light and heavy rare elements (LREE/HREE) are between 10.61 and 16.61, and the (La/Yb)_N ratios are between 12.52 and 27.44, suggesting obvious fractionation between light and heavy rare elements. The values of δ Eu are 0.48~0.81 with moderate negative europium anomaly. It is enriched in large ion lithophile elements (LILEs) Rb, Ba, U, K, depleted relatively in high field strength elements (HFSEs) Nb, Zr, Hf, and depleted relatively in Sr, Yb. All these geochemical characteristics show that the monzogranite is a product of volcanic arc on an active continental margin. The regional geological data reveal that the monzogranite

收稿日期: 2017-03-28; 修订日期: 2017-05-02

资助项目: 中国地质调查局项目《内蒙古1:5万敖汉旗、揭各郎营子、新地、铁匠营子幅区域地质矿产调查》(编号: 12120113053400)、《辽宁1:5万台吉、他拉皋、七道岭、十二台营子幅区域地质调查》(编号: DD20160048-05)、《内蒙古敖汉旗大黄花地区矿产地质调查》(编号: 12120114055501)

作者简介: 陈井胜(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 5202268@qq.com

通讯作者: 刘淼(1989-), 男, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 1171724956@qq.com

was formed in the process of extinction of Bainaimiao island arc in the setting of subduction of the Paleo Asian Ocean to the North China craton.

Key words: Ongniud Bannar; monzogranite; zircon U-Pb dating; geochemical; Bainaimiao island arc

华北地台北缘向北到大兴安岭中南部地区一直是中国重要的多金属成矿带,在西拉木伦河两侧发育有一条近 300km 北东走向的 Pb-Zn-Ag 异常带^[1-2]。尤其在翁牛特旗地区发育有多个大型-中型铅锌矿床^[3-9],其中小营子铅锌矿是规模最大、开发最早的铅锌矿床,一些新技术方法也应用到此矿的开采中^[10]。小营子铅锌矿周围发育不同期次的岩浆岩^[11]。前人通过对与成矿关系最密切的斜长花岗岩、石英闪长岩及二长闪长岩年代学研究,确定小营子铅锌矿的成矿时代为中侏罗世^[11-12]。但对于少郎河成矿带包括小营子、砬子、荷而勿苏等矿体周围分布的大面积的花岗质岩体未见深入研究。

本文在野外工作的基础上,对小营子铅锌矿周边分布的大面积岩体,进行典型标本岩相学观察、主量和微量元素分析及锆石 U-Pb 年龄测试,研究其成岩年龄、地球化学特征,并探讨其形成的动力学背景。

1 地质概况及岩石学特征

研究区地处华北地台北缘增生带,中朝古陆北部早古生代增生边缘西拉木伦河南部少郎河成矿带内,距离翁牛特旗西南约 30km。小营子铅锌矿床为多期岩浆热液形成的矽卡岩型矿床,矿体产于小营子岩体外接触带的大理岩和石英片岩中。1:20 万五分地幅报告将这些大理岩、片岩、斜长角闪片岩、斜长角闪岩岩石组合划归为古元古界宝音图群^[12]。内蒙古第三地质队将此赋矿层位归并到志留系^[12]。2012 年吉林大学开展 1:25 万赤峰市幅工作时,结合元宝山热水地区这套岩石组合斜长角闪岩的年龄为 1860Ma^[13],将此岩石组合重新厘定为古元古界宝音图群,本次工作采用此划分方案。区内还出露二叠系于家北沟组和白垩系白音高老组。矿区内构造断裂发育,赋矿岩浆热液沿断裂烘烤围岩,形成矽卡岩型铅锌矿^[11](图 1)。

小营子铅锌矿周围分布大面积的二长花岗岩(图 1),前人将其时代定为侏罗纪^[12],1:25 万赤峰市幅^①将其时代划为中三叠世。从野外产出状态看,岩体呈锯齿状侵入宝音图群(图 2-a、b)。小营子铅锌矿正在开采的矿井约 50 个,本次在小营子矿井附

近采取新鲜细粒二长花岗岩,采样位置见图 1。

细粒二长花岗岩风化面呈浅灰色,新鲜面为浅灰色,细粒结构,块状构造(图 2-c),主要由钾长石、斜长石、石英和少量黑云母组成。钾长石呈半自形柱状,浅肉红色,粒径 1~2mm,含量 25%~35%;斜长石呈半自形柱状,灰白色,粒径 1~2mm,含量 30%~35%;石英呈他形粒状,烟灰色,粒径 1~2mm,含量 25%~30%;黑云母呈黑色片状,粒径 1mm 左右,含量小于 2%;还含有少量副矿物,包括锆石、方铅矿、磷灰石、红帘石等(图 2-d)。

2 样品制备及分析方法

2.1 锆石 U-Pb 定年

选取干净、无污染的样品,在薄片鉴定后,由河北省区域地质调查大队地质实验室完成样品的破碎和锆石的挑选及重砂鉴定工作。镀膜后,在武汉地质调查中心国土资源部中南矿产监督检测中心完成阴极发光(CL)扫描电镜显微照相及锆石激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)U-Pb 同位素分析。锆石微量元素含量和 U-Pb 同位素利用 LA-ICP-MS 同时分析完成,激光剥蚀系统为 Geo-Las2005,ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作为载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(氩气+氦气)中加入少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度。每个时间分辨分析数据包括 20~30s 的空白信号和 50s 的样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用 ICPMSDataCal 软件完成。锆石微量元素含量利用 NIST610 作外标、Si 作内标的方法进行定量计算。U-Pb 同位素定年采用锆石标准 91500 作外标进行分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500 标样。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据参考文献[14]。普通铅校正采用 Anderson 的方法^[15]。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均值计算均采用 Isoplot/Ex_ver3 完成^[16]。数据列于表 1。

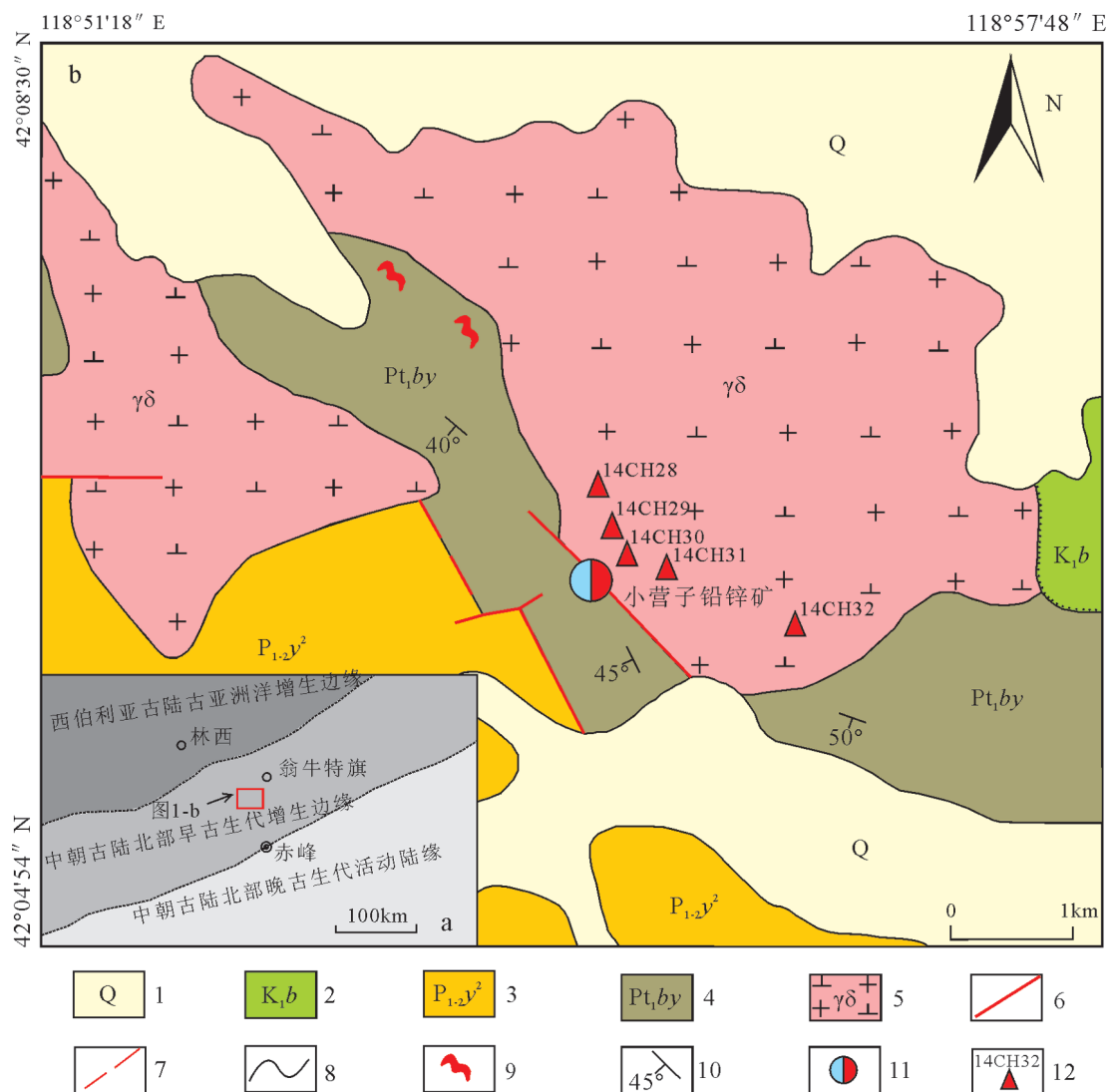
图 1 小营子地区地质简图^①

Fig. 1 Simplified geological map of Xiaoyingzi area

1—第四系;2—下白垩统白音高老组;3—下二叠统于家北沟组;4—古元古界宝音图群;5—二长花岗岩;6—断裂;
7—性质不明断裂;8—地质界线;9—混杂带;10—产状;11—小营子铅锌矿点;12—采样位置及编号

2.2 主量、稀土和微量元素

样品主量、微量和稀土元素测试在国土资源部沈阳地质调查中心检测分析中心完成。采用高压密封消解 ICP-MS 法,在美国热电公司 XSeries II 等离子体质谱仪上,对岩石进行微量元素的分析。准确称取 0.1g 样品于消解罐中,加入 1mL 浓硝酸、1mL 氢氟酸,将消解罐置于烘箱中加热,升温至 180℃ 保持 10~12h,取出消解罐敞开放于电热板上 120℃ 加热,当消解液剩下 2~3mL 时升温至 240℃,复溶后用 0.5% 的稀硝酸定容至刻度待测。对样品处理全流程空白进行

12 次测定,利用 3 倍标准偏差计算各元素的方法检出限,分析偏差均小于 5%。数据列于表 2。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

选择小营子铅锌矿围岩二长花岗岩(14CH30)进行锆石 U-Pb 测年。样品锆石均为晶形良好的长柱状,长短轴比为 1.5~4。在锆石阴极发光图像上可以清晰看出振荡环带发育(图 3),Th/U 值介于 0.41~1.15 之间,显示典型的岩浆锆石特征^[17-22]。

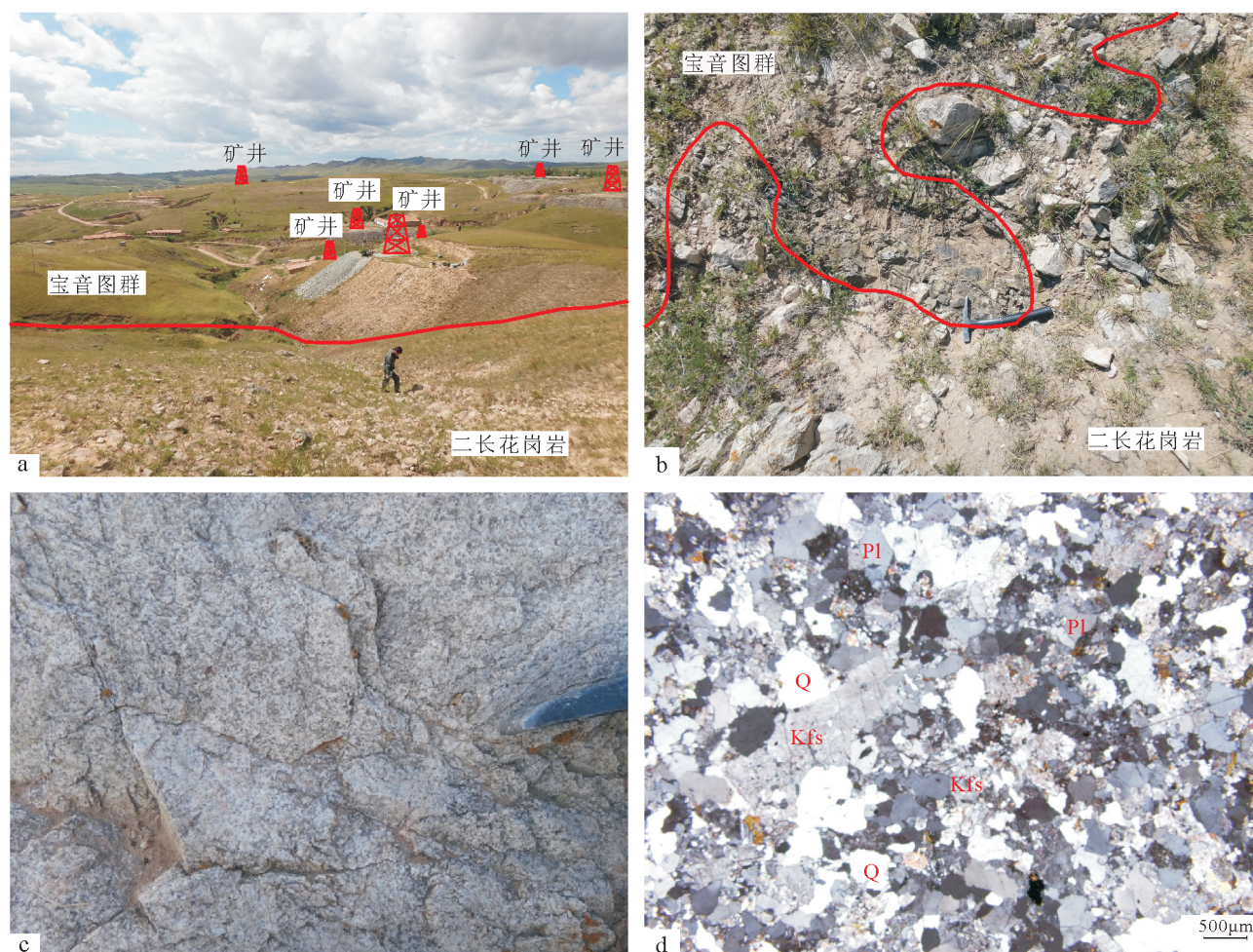


图2 小营子铅锌矿二长花岗岩与宝音图群关系及野外特征

Fig. 2 Contact relation of Baointu Group and monzogranite in Xiaoyingzi

Q—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石

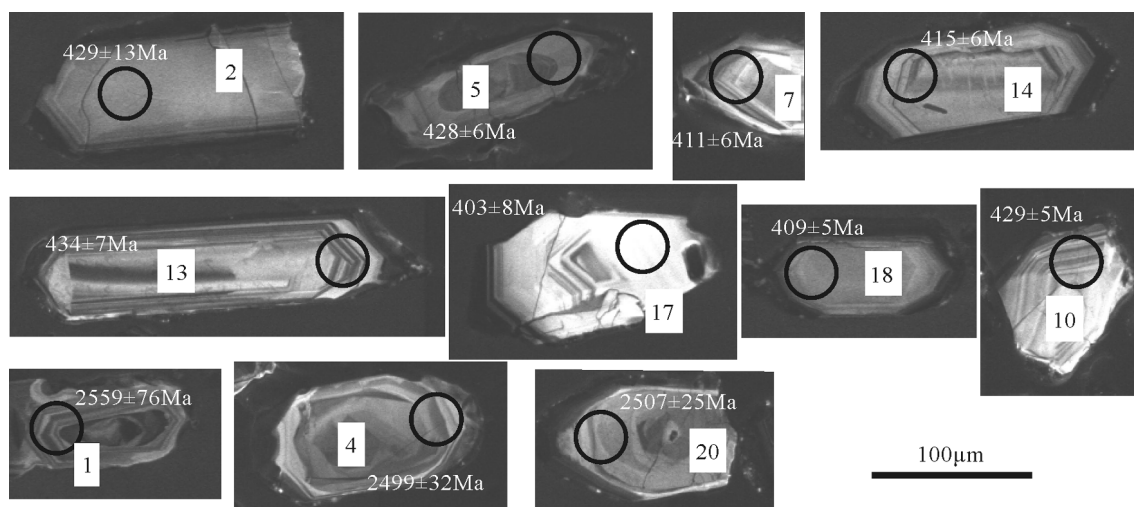


图3 小营子二长花岗岩锆石典型阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Zircon CL microscopic images of monzogranite in Xiaoyingzi

表 1 二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data of monzogranite

样品号及 分析点号	Pb	Th	U	Th/U	同 位 素 比 值						同 位 素 年 龄/Ma					
					$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	
14CH30-01	173	1056	1956	0.54	0.14460	0.01229	10.2871	0.85788	0.48752	0.01758	2559	76	2460	77	2283	152
14CH30-02	181	1101	1488	0.74	0.03957	0.00324	0.39171	0.03175	0.06895	0.00214	213	18	335.6	23	429	13
14CH30-03	351	2019	3013	0.67	0.16465	0.01117	6.87994	0.39444	0.29421	0.00853	2505	115	2096	51	1662	42
14CH30-04	235	1887	4602	0.41	0.15663	0.00578	10.5675	0.37767	0.47361	0.00742	2499	32	2485	33	2419	63
14CH30-05	166	1412	1358	1.04	0.05568	0.00251	0.53737	0.02330	0.06877	0.00102	438	128	436	15	428	6
14CH30-06	255	2101	3136	0.67	0.05341	0.00247	0.68635	0.03205	0.09230	0.00154	346	108	530	19	569	9
14CH30-07	187	1105	961	1.15	0.05733	0.00281	0.52334	0.02523	0.06595	0.00094	505	109	427	17	411	6
14CH30-08	691	2591	3926	0.66	0.16666	0.00308	9.45355	0.22848	0.40555	0.00718	2524	30	2383	22	2194	33
14CH30-09	158	982	2395	0.41	0.14367	0.00411	4.58271	0.12798	0.22926	0.00264	2271	49	1746	23	1330	14
14CH30-10	206	1762	2002	0.88	0.05916	0.00274	0.56146	0.02434	0.06881	0.00089	572	97	452	16	429	5
14CH30-11	144	887	1887	0.47	0.15679	0.00331	6.86632	0.19417	0.31330	0.00586	2421	36	2094	25	1756	29
14CH30-12*	361	2418	3900	0.62	0.08106	0.00434	0.81945	0.04324	0.07494	0.00152	1233	105	60	24	465	9
14CH30-13	140	801	1097	0.73	0.06164	0.00338	0.58333	0.03093	0.06976	0.00116	661	119	466	20	434	7
14CH30-14	396	2108	3634	0.58	0.05982	0.00274	0.55147	0.02559	0.06658	0.00102	598	100	446	17	415	6
14CH30-15	167	792	1320	0.6	0.16385	0.00337	8.42091	0.19182	0.36942	0.00450	2496	35	2277	21	2026	21
14CH30-16*	144	834	1158	0.72	0.12388	0.00742	1.31504	0.08581	0.07435	0.00155	2012	107	852	38	462	9
14CH30-17	229	1205	1401	0.86	0.07625	0.00594	0.64654	0.04043	0.06454	0.00125	1101	156	506	25	403	8
14CH30-18	133	699	813	0.86	0.05179	0.00269	0.47013	0.02410	0.06563	0.00086	276	119	391	17	409	5
14CH30-19*	351	1496	3053	0.49	0.06617	0.00430	0.65080	0.03810	0.07325	0.00150	813	105	509	23	455	9
14CH30-20	117	1076	2339	0.46	0.16254	0.00304	10.7902	0.21727	0.47554	0.00577	2507	25	2505	19	2483	31

注:测试单位为中国地质大学(北京)科学研究院地质过程与矿产资源国家重点实验室。*代表调谐度太低加权平均未计算点

测试结果数据列于表 1,除去谐和度太低的 12、16、19 号 3 个点,其余测试点可以分为 3 组(图 4-a)。第一组年龄由 8 个点排成一条直线,与谐和线上交点年龄为 $2504 \pm 53 \text{ Ma}$ ($n=8$),这个年龄与处于谐和线上的 3 个锆石点的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄加权平均值 $2508 \pm 38 \text{ Ma}$ ($n=3$) 一致。第二组为 1 个分析点,处于谐和线上, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $569 \pm 9 \text{ Ma}$ 。第三组年龄由 8 个点组成,成堆分布于谐和线上及其附近(图 4-b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $419.3 \pm 9.2 \text{ Ma}$ ($n=8$)。第一组、第二组年龄代表了捕获锆石的年龄,第三组年龄代表了二长花岗岩的形成年龄。

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素

二长花岗岩地球化学分析结果列于表 2。从表 2 可以看出,二长花岗岩具有较高的 SiO_2 含量 ($74.41\% \sim 75.05\%$), $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.36\% \sim 8.37\%$, 碱含量中等偏低, K_2O 含量较高 ($3.05\% \sim 4.42\%$), $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值介于 0.70~1.11 之间,为亚碱性岩石。在

$\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(图 5)中,除 1 个样品落入钙碱性系列外,其余均落入高钾钙碱性系列,岩石属于中-高钾钙碱性系列。分异指数 DI 为 $87.57 \sim 92.56$,显示岩石经历了高分异演化。岩石 Al_2O_3 含量较高 ($13.22\% \sim 14.02\%$),铝饱和指数 (A/CNK) 介于 0.99~1.1 之间,显示为轻微的过铝质(图 5)。Fe、Mg、Ti 氧化物含量较低。上述特点显示,该地区花岗岩具有富硅、略富铝、中高钾钙碱性特征。

3.2.2 稀土和微量元素

二长花岗岩稀土元素总量 (ΣREE) 不高,介于 $53.45 \times 10^{-6} \sim 68.11 \times 10^{-6}$ 之间,平均含量为 61.55×10^{-6} 。轻、重稀土元素比值 (LREE/HREE) 介于 10.61~16.61 之间, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值介于 12.52~27.44 之间。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6)上,轻、重稀土元素分馏明显,呈左高右低的左倾模式,重稀土元素呈较平坦分布。 δEu 值为 0.48~0.81,具有中等的负 Eu 异常。

在微量元素原始地幔蛛网图(图 6)上,二长花

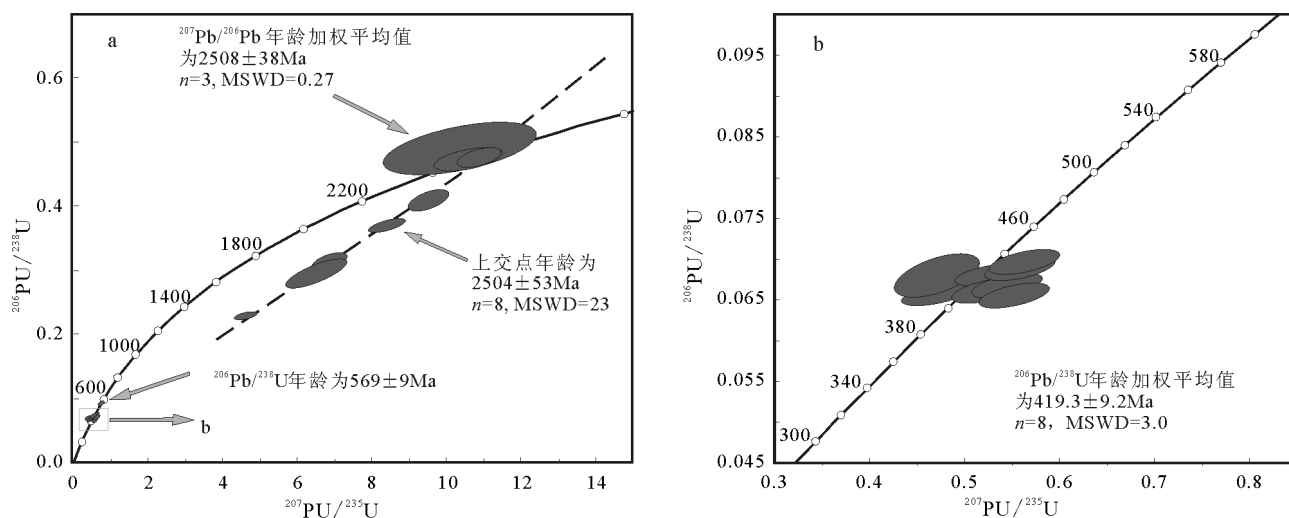


图4 小营子二长花岗岩样品锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams of monzogranite in Xiaoyingzi

花岗岩具有富集大离子亲石元素 Rb、Ba、U、K, 相对亏损高场强元素 Nb、Zr、Hf, 尤其出现强烈的 Nb 负异常。除此之外, 还存在 P、Ti 负异常。岩石具有轻微的负 Sr 异常, 结合负 Eu 异常, 说明岩浆源区有斜长石的残留, 或分离结晶作用过程中存在斜长石的分离。

4 讨论

4.1 岩体形成时代

小营子铅锌矿周围分布大面积的二长花岗岩,

前人将其时代定为侏罗纪^[12], 1:25 万赤峰市幅^①将其时代划为中三叠世, 但都未给出直接证据。本次二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果显示, 其年龄为 $419.3 \pm 9.2\text{Ma}$, 时代为志留纪末期, 与前人认识不同。

前人对华北地台北缘造山带早古生代的岩浆岩有大量研究, 但主要集中在温都尔庙—白乃庙地区和苏尼特左旗地区^[23-32], 在赤峰地区还未见报道。本次在小营子铅锌矿识别出的二长花岗岩是在本地区首次发现的早古生代岩体。其中捕获锆

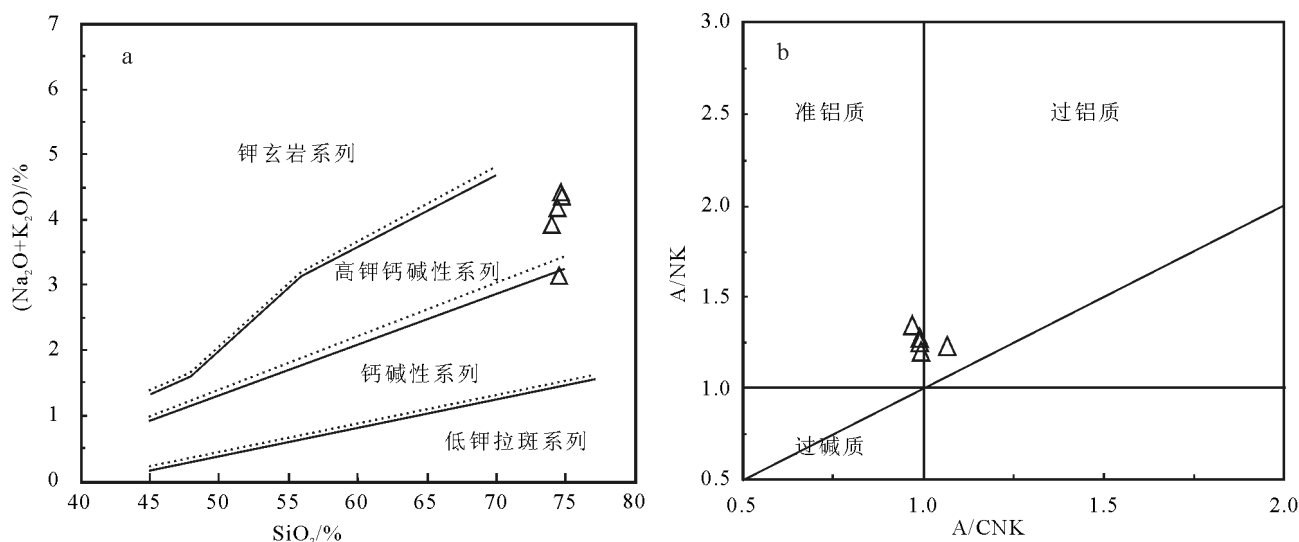
图5 小营子二长花岗岩岩体 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a) 及 $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ (b) 图解Fig. 5 $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (a) and $\text{A/CNK}-\text{A/NK}$ (b) patterns of monzogranite in Xiaoyingzi

表 2 二长花岗岩岩体主量、微量及稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth elements compositions of monzogranite

样品原号	14CH28	14CH30	14CH31	14CH32	14CH33	样品原号	14CH28	14CH30	14CH31	14CH32	14CH33
岩性	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	岩性	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩	二长花岗岩
SiO ₂	74.62	75.1	74.8	74.8	74.4	(La/Yb) _N	27.4	12.5	21.7	19.0	23.4
TiO ₂	0.12	0.13	0.10	0.11	0.10	δEu	0.70	0.48	0.81	0.86	0.77
Al ₂ O ₃	14.0	13.2	13.8	13.5	13.9	δCe	0.94	0.97	0.96	0.98	0.93
Fe ₂ O ₃ *	0.11	0.18	0.10	0.16	0.16	Li	5.28	9.15	5.80	4.71	4.63
FeO	0.87	1.22	0.83	0.98	0.69	Be	1.05	0.99	0.89	0.78	0.76
MnO	0.04	0.03	0.03	0.07	0.04	Sc	1.49	2.16	1.16	1.61	1.40
MgO	0.23	0.41	0.24	0.26	0.26	V	5.11	15.7	4.04	4.77	5.41
CaO	0.75	1.57	1.05	2.03	1.38	Cr	1.55	7.53	4.08	5.66	3.37
Na ₂ O	3.95	4.33	3.86	3.76	4.09	Co	0.60	1.63	0.82	0.71	1.21
K ₂ O	4.42	3.05	4.39	3.60	4.20	Ni	2.28	3.62	3.43	2.34	2.15
P ₂ O ₅	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	Cu	4.18	20.1	11.5	4.27	6.49
烧失量	0.84	0.78	0.67	0.70	0.76	Zn	135	181	155	93.1	111
总计	100	100	99.9	99.9	99.9	Ga	14.0	12.5	12.2	13.1	13.9
A/CNK	1.11	1.00	1.06	0.98	1.01	Rb	102	66.6	82.4	78.0	91.7
A/NK	1.24	1.27	1.25	1.34	1.23	Sr	238	359	227	253	241
分异指数(DI)	92.6	88.8	91.7	87.6	90.9	Y	3.96	7.69	3.86	4.76	4.07
La	15.8	15.5	14.4	13.8	12.8	Mo	0.24	0.69	0.44	0.47	0.22
Ce	29.0	29.5	26.9	26.5	23.4	Cd	0.30	0.19	0.34	0.23	0.22
Pr	3.25	3.21	2.97	2.88	2.68	In	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Nd	11.3	11.6	10.5	10.8	9.34	Sb	0.32	0.74	0.44	1.12	0.57
Sm	1.96	2.11	1.68	1.87	1.51	Cs	1.46	0.87	1.03	1.11	0.93
Eu	0.41	0.32	0.42	0.50	0.37	Ba	796	1250	586	567	720
Gd	1.56	1.88	1.40	1.59	1.37	W	0.22	0.16	0.19	0.26	0.47
Tb	0.18	0.28	0.18	0.20	0.18	Re	0.01	0.01	<0.002	0.01	0.01
Dy	0.87	1.45	0.75	0.92	0.77	Tl	0.55	0.54	0.52	0.64	0.54
Ho	0.16	0.31	0.14	0.17	0.14	Pb	106	69.5	71.1	36.4	38.8
Er	0.40	0.79	0.38	0.47	0.37	Bi	0.02	0.02	0.01	0.01	0.04
Tm	0.06	0.13	0.07	0.08	0.07	Th	8.02	9.01	7.83	8.06	6.06
Yb	0.41	0.89	0.48	0.52	0.39	U	1.58	1.66	1.32	1.33	0.82
Lu	0.07	0.14	0.08	0.09	0.07	Nb	6.28	11.6	4.22	6.00	5.35
ΣREE	65.4	68.1	60.3	60.4	53.5	Ta	0.39	0.80	0.28	0.35	0.37
LREE	61.7	62.2	56.9	56.4	50.1	Zr	75.9	65.1	73.1	77.6	57.1
HREE	3.72	5.87	3.47	4.04	3.35	Hf	2.49	2.42	2.35	2.48	1.76
LREE/HREE	16.6	10.6	16.4	13.9	14.9						

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量为10⁻⁶

石的2个年龄2504±53Ma、569±9Ma说明,二长花岗岩岩浆可能来自华北板块新太古代基底或新元古代原岩的部分熔融。

4.2 岩石成因及源区特征

二长花岗岩样品的主量元素特征显示,小营子二长花岗岩具有富硅、略富铝特征,属于中高钾钙碱性特征(图5)。Na₂O含量介于3.76%~4.33%之间,大于2.2%,平均值为4.00%。铝饱和指数(A/CNK)介

于0.99~1.1之间,均小于1.1(图5),显示为中铝含量,不具备S型花岗岩特征,而中碱含量,低钠含量,也不具备A型花岗岩特征。二长花岗岩稀土元素配分曲线显示出右倾V字型波谷状特征,(La/Yb)_N值介于18.96~27.44之间,表现出轻、重稀土元素的明显分异,且均具有中等负Eu异常,结合其矿物组合特征判断,该二长花岗岩为高钾钙碱性I型花岗岩^[33]。二长花岗岩岩体具有富集大

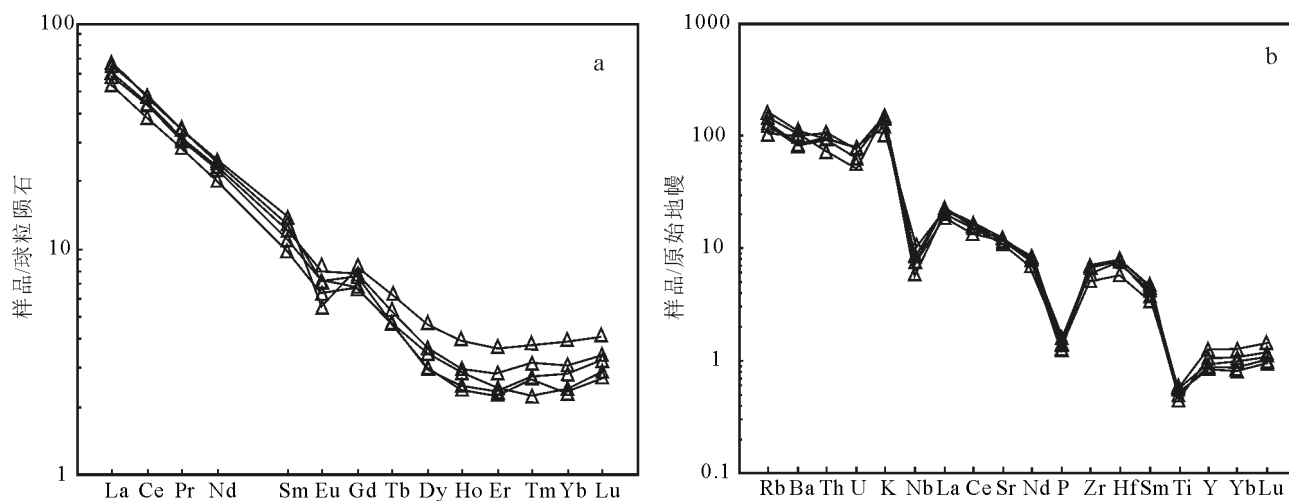


图6 小营子二长花岗岩稀土元素配分曲线(a)和微量元素蛛网图(b)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams (b) of monzogranite in Xiaoyingzi

离子亲石元素 Rb、Ba、U、K, 相对亏损高场强元素 Nb、Zr、Hf, 尤其出现强烈的负 Nb 异常, 显示在岩浆演化过程中源区具有斜长石残留, 或者可能在岩浆演化结晶过程中发生明显的斜长石分离结晶作用。Nb、Zr、Hf 的亏损说明, 源岩没有下地壳或地幔物质混染。岩石具有低的 Sr ($227 \times 10^{-6} \sim 359 \times 10^{-6}$)、Yb ($0.39 \times 10^{-6} \sim 0.89 \times 10^{-6}$) 含量, 说明岩石形成于相对低的压力环境^[34-37], 暗示其形成深度较浅^[38-39]。

4.3 构造环境及地质意义

锆石 U-Pb 测年结果表明, 小营子铅锌矿周围的二长花岗岩形成于 $419.3 \pm 9.2 \text{ Ma}$, 时代为志留纪末期, 而非前人划分的中生代。二长花岗岩高钾钙碱性、中铝、轻重稀土元素明显分异, 且均具有中等负 Eu 异常的地球化学特征显示, 其形成于活动陆缘。从构造环境判别 Y-Rb 图解也可以看出, 二长花岗岩处于火山弧与同碰撞花岗岩区域, 在 (Y+Nb)-Rb 图解上, 样品点落在火山弧花岗岩 (VAG)

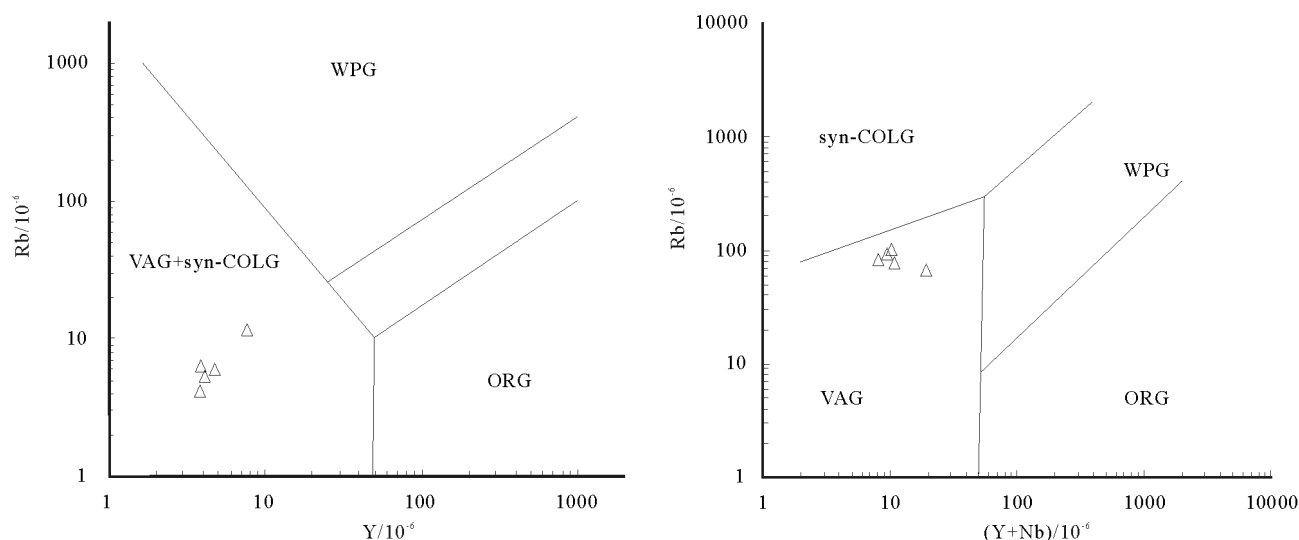


图7 小营子二长花岗岩 Y-Nb 和 (Y+Nb)-Rb 图解

Fig. 7 Y-N and (Y+Nb)-Rb patterns of monzogranite in Xiaoyingzi

VAG—火山弧环境; WPG—板内环境; syn-COLG—同碰撞环境; ORG—造山带环境

区域(图7),表明其形成于活动大陆边缘火山弧。

前人研究资料表明,早古生代华北地台北缘发育大量的岩浆岩^[23-32,40],前人将这些岩浆岩形成的带称为白乃庙岛弧带。近年对其火成岩锆石U-Pb测年结果显示,此岛弧始于晚寒武世490Ma的超基性岩^[27],奥陶纪及志留纪大规模的奥长花岗岩、石英闪长岩和英安岩标志白乃庙岛弧处于成熟稳定阶段^[23-28,41],志留纪末期(420Ma)角闪辉长岩的出现标志白乃庙岛弧的消亡^[29]。泥盆纪早期出现的英云闪长岩(417Ma)^[40]及赤峰地区八当山火山岩(403.7Ma)^[42]是白乃庙岛弧与华北地台弧-陆碰撞的产物。在河北固阳、张家口、承德一带,从泥盆纪400Ma开始出现的一套以碱性和碱长花岗岩为主的岩石组合,说明该带已进入了弧-陆碰撞后的伸展阶段^[43-47]。本文研究的二长花岗岩形成于志留纪末期,且属于火山弧花岗岩。根据以上证据推断,小营子二长花岗岩是古亚洲洋向华北板块俯冲背景下白乃庙岛弧消亡过程中形成的。

5 结 论

(1)通过野外地质调查及室内薄片鉴定,翁牛特旗大面积的岩体为二长花岗岩,锆石U-Pb测年结果显示,其形成时代为 419.3 ± 9.2 Ma,为志留纪末期,而非中生代。

(2)地球化学特征显示,二长花岗岩为富硅、略富铝、中高钾钙碱性的I型花岗岩。轻、重稀土元素分馏明显, δ Eu值为0.48~0.81,具有中等的负Eu异常。富集大离子亲石元素Rb、Ba、U、K,相对亏损高场强元素Nb、Zr、Hf,具有低的Sr、Yb含量。

(3)地球化学特征显示,研究区二长花岗岩形成于活动大陆边缘火山弧。结合区域地质资料推断,小营子二长花岗岩是古亚洲洋向华北板块俯冲背景下白乃庙岛弧消亡过程中形成的。

参考文献

- [1]赵耀娟,凤金龙. 内蒙古翁牛特旗铅锌多金属矿成矿地质条件及找矿前景[J]. 中国矿业, 2012,21(9):72-75.
- [2]唐永章. 内蒙古翁牛特旗铜铅锌矿地质特征及矿床成因[J]. 内蒙古科技与经济, 2013, 276(2):45-51.
- [3]张喜周,张振邦,王学贞,等. 敖包山铅锌矿区地质特征及找矿方向探讨[J]. 矿产与地质, 2002,16(5):277-280.
- [4]苏会平, 司国辉, 李得成. 内蒙古赤峰市鸡冠山钼矿邻区成矿远景分析[J]. 长春理工大学学报, 2011, (3):199-200.
- [5]刘云明. 当议敖包山铅锌矿区地质特征及找矿标志[J]. 中国新技术新产品, 2012, (10):83-83.
- [6]解洪晶,王玉往,蒋炜,等. 内蒙古盛世莲花铅锌银矿床地质特征及成因初探[J]. 矿物学报, 2013, (s2):14-15.
- [7]蒋炜,林龙军,张云国,等. 内蒙古翁牛特旗长汉卜罗铅锌矿伴生银赋存状态研究[J]. 矿产与地质, 2015,29(4):462-467.
- [8]张彦生. 内蒙古赤峰市翁牛特旗铜铅锌矿体特征及找矿标志[J]. 内蒙古科技与经济, 2016,354(8):54-55.
- [9]王春光,孙丰月,孙国胜,等. 内蒙古翁牛特旗荷尔勿苏铅锌矿床成矿流体性质与成因[J]. 世界地质, 2016, 35(2):450-457.
- [10]李怀渊,张景训,江民忠,等. 航空瞬变电磁法系统 VTEMplus 的应用效果[J]. 物探与化探, 2016,40(2): 360-364.
- [11]王春光. 内蒙古少郎河成矿带铅锌多金属矿床成矿作用研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2016.
- [12]内蒙古自治区地质矿产局. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社, 1987.
- [13]陈井胜,李斌,邢德和,等. 赤峰东部宝音图群斜长角闪岩锆石U-Pb 年龄及地质意义[J]. 地质调查与研究, 2015, (2):81-88.
- [14]Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. Geostandards and Geoanalytical Research, 1995,19(1): 1-23.
- [15]Anderson T. Correction of Common Lead in U-Pb Analysis That Do Not Report ^{204}Pb [J]. Chem. Geol., 2002, 192:59-79.
- [16]Ludwig K. R. Isoplot /Ex version 3. 00: a geochronology toolkit for microsoft excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, California, Berkeley, 2003, 4: 1-70.
- [17]Belousova E A, Griffin W L O, Reilly S Y, et al. Igneous Zircon: Trace Element Composition as an Indicator of Source Rock Type[J]. Contrib. Mineral. Petrol., 2002, 143:602-622.
- [18]Hoskin P W O. Rare Earth Element Chemistry of Zircon and Its Use as a Provenance Indicator[J]. Geology, 2001, 28(7):627-630.
- [19]李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. 地质调查与研究, 2009, 33(3):161-174.
- [20]钟玉芳,马昌前,余振兵. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1):27-35.
- [21]Liu D Y, Wilde S A, Wan Y S, et al. Combined U-Pb, hafnium and oxygen isotope analysis of zircons from meta-igneous rocks in the southern North China Craton reveal multiple events in the Late Mesoproterozoic-Early Neoproterozoic[J]. Chemical Geology, 2009, 261: 139-153.
- [22]刘福来,薛怀民,刘平华. 苏鲁超高压岩石部分熔融时间的准确限定: 来自含黑云母花岗岩中锆石U-Pb 定年、REE 和Lu-Hf同位素的证据[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1039-1055.
- [23]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.
- [24]刘敦一,简平,张旗,等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. 地质学报, 2003, 77: 318-327.
- [25]石玉若,刘敦一,张旗,等. 内蒙古苏左旗地区闪长-花岗岩类 SHRIMP 年代学[J]. 地质学报, 2004, 78: 789-799.

- [26] Miao L C, Zhang F Q, Fan W M, et al. Phanerozoic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling orogenic belt in North China: Constraints from geochronology of ophiolites and associated formations[C]//Zhai M G, Windley B F, Kusky T M, et al. Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning under Eastern Asia. Geological Society, London, Special publications, 2007, 280: 223-237.
- [27] Jian P, Liu D Y, Kroner A, et al. Time scale of an Early to Mid-Paleozoic orogenic cycle of the long-lived Central Asian Orogenic belt, Inner Mongolia of China: Implications for continental growth[J]. Lithos, 2008, 101: 233-259.
- [28] 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 2009, 25: 2695-2726.
- [29] Zhang X H, Wilde S A, Zhang H F, et al. Geochemistry of hornblende gabbros from Sonidzuoqi, Inner Mongolia, North China: Implication for magmatism during the final stage of suprasubduction zone ophiolite formation[J]. International Geology Review, 2009, 51: 345-373.
- [30] 冯晓曦, 姚书振, 王家松, 等. 内蒙古白乃庙铜钼矿区侵入岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. 地质与勘探, 2014, 50(2): 369-381.
- [31] 李俊建, 党智财, 赵泽霖, 等. 内蒙古白乃庙铜矿床成矿时代的研究[J]. 地质学报, 2015, 89(8): 1448-1457.
- [32] 赵利刚, 李承东, 常青松, 等. 内蒙古白乃庙铜矿区含矿中酸性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成矿时代[J]. 地质通报, 2016, 35(4): 542-552.
- [33] Baarbarin B A. Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. Lithos, 1999, 46(3): 605-626.
- [34] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern magmas by melting of young subduction lithosphere[J]. Nature, 1990, 347: 662-665.
- [35] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. Lithos, 2005, 79: 1-4.
- [36] Rapp P R, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. Nature, 2003, 425: 605-609.
- [37] Hollocher B J, Robinson P. Geochemistry of the metamorphosed Ordovician Taconian Magmatic Arc, Bronson Hill anticlinorium, western New England[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2002, 27: 5-45.
- [38] 张旗, 王焰, 李承东, 等. 花岗岩的 Sr-Yb 分类及其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(9): 2249-2269.
- [39] 张旗, 王元龙, 金惟俊, 等. 晚中生代的中国东部高原: 证据、问题和启示[J]. 地质通报, 2008, 27(9): 1404-1430.
- [40] 张维, 简平. 内蒙古达茂旗北部早古生代花岗岩类 SHRIMP U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 2008, 82(6): 778-787.
- [41] Guo F, Fan W, Li C, Miao L, et al. Early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean: Geochronological and geochemical evidence from the Dashizhai basalts, Inner Mongolia[J]. Science in China, 2009, 52: 940-951.
- [42] 刘建峰, 李锦轶, 迟效国, 等. 华北克拉通北缘与弧-陆碰撞相关的早泥盆世长英质火山岩[J]. 地质通报, 2013, 32(2/3): 267-278.
- [43] 张拴宏, 赵越, 刘建民, 等. 华北地块北缘晚古生代—早中生代岩浆活动期次、特征及构造背景[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 824-842.
- [44] 罗镇宽, 苗来成, 关康, 等. 河北张家口水泉沟岩体 SHRIMP 年代学研究及其意义[J]. 地球化学, 2001, 30(2): 116-122.
- [45] Jiang N. Petrology and geochemistry of the Shuiquangou syenitic complex, northern margin of the North China Craton[J]. Journal of the Geological Society, 2005, 162(1): 203-215.
- [46] Zhang S H, Zhao Y, Liu X C, et al. Late Paleozoic to Early Mesozoic mafic-ultramafic complexes from the northern North China Block: Constraints on the composition and evolution of the lithospheric mantle[J]. Lithos, 2009, 110: 229-246.
- [47] Shi Y R, Liu D Y, Miao L C, et al. Devonian A-type granitic magmatism on the northern margin of the North China Craton: SHRIMP U-Pb zircon dating and Hf-isotopes of the Hongshan granite at Chifeng, Inner Mongolia, China[J]. Gondwana Research, 2010, 17: 632-641.
- ① 内蒙古 1:25 万赤峰市幅区域地质调查修测项目. 吉林大学, 2012.