

内蒙古白音查干锡多金属矿床成矿作用研究 II : 成矿花岗斑岩年代学、地球化学特征及地质意义

刘新^{1,2}, 李学刚³, 祝新友¹, 孙雅琳^{1,4}, 蒋昊原^{1,4}, 蒋斌斌¹, 王海^{1,5}, 程细音¹

(1. 北京矿产地质研究院, 北京 100012; 2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 赤峰市矿业权储备交易中心, 赤峰 024005; 4. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 5. 昆明理工大学国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要 白音查干锡多金属矿床成矿地质体为花岗斑岩, 岩体发生大规模电气石化、萤石化、云英岩化、闪锌矿化、黄铁矿化蚀变。花岗斑岩为早白垩世岩浆活动的产物, 锆石 U-Pb 年龄为 (141.4±4.6) Ma, 锡矿化时间与成岩时间一致。花岗斑岩经历过强烈的结晶分异演化, 高 Si、F, 富集 Cu、Pb、Zn、Sn、Ag 等金属元素, 富集 Rb、K 等大离子亲石元素和 Zr、Hf、Th、U 等高场强元素, 亏损 Ba、Sr、Ti, Rb/Sr 高而 Zr/Hf 和 Nb/Ta 低, 具有显著的 Eu 负异常和四分组效应, 为 A 型花岗岩。花岗斑岩具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (9.67~14.27) 和年轻的两阶段 Hf 模式年龄 (127~749 Ma), 源岩为显生宙新生地壳物质。花岗斑岩的形成与太平洋板块俯冲完成后的拉张背景下, 软流圈物质上涌造成的下地壳物质部分熔融有关。

关键词 白音查干 大兴安岭南段 锡多金属矿床 花岗斑岩 成矿地质体

中图分类号: P618.44 文献标识码: A 文章编号: 1674-7801(2017)06-0981-16

0 引言

锡多金属矿床是典型的和高演化花岗岩浆活动有关的矿床^[1-2], 锡成矿作用一直以来是矿床学研究的热点问题。锡矿床一般呈成矿省或者成矿带出现, 锡矿床常与铅锌银矿床^[3-4]、钨矿床^[5]、稀有稀土矿床及伟晶岩矿床等共生^[6], 锡矿床的产生均与花岗岩的侵入作用有关。金属元素在花岗质熔体中的行为受控于源岩成分、氧化还原状态、结晶分异过程和挥发分组分等^[7], 花岗岩的强烈结晶分异作用是锡富集的重要机制^[8-9]。以往的研究认为, 与锡矿化有关的岩体富氟, 与钨矿化有关的岩体富硼^[10]。

大兴安岭地区位于内蒙古东部, 是古亚洲洋构

造—成矿域、蒙古—鄂霍茨克洋构造—成矿域和古太平洋构造—成矿域的叠加区域, 发育有一系列锡、铅锌、银、铜、钼等多金属矿床, 是我国北方重要的锡多金属成矿带^[11-13]。近年来发现的一系列锡多金属矿床, 如维拉斯托^[14,3]、边家大院^[15]、大井^[16]、黄岗^[13]等, 均与早白垩世高演化岩浆活动有关。大兴安岭锡多金属矿集区是研究花岗岩属性与锡成矿作用关系的良好对象。

白音查干锡多金属矿床位于内蒙古西乌珠穆沁旗, 为 2015 年新发现的大型锡矿床, 目前已探明和控制的金属量为锡 22.33 万 t、锌 75.29 万 t、铅 15.08 万 t、银 9446 t^①。从发现至今, 该矿床研究较为薄弱, 聂凤军等^[17]根据早期地调成果指出该矿床成矿物质和热源来自于海西期中酸性岩浆活动; 白海玲

[收稿日期] 2017-09-13

[基金项目] 中国地质调查局国家二级项目内蒙古赤峰有色金属基地综合地质调查(编号: DD20160072)及博士后科学基金项目(编号: 2016M600930)联合资助。

[第一作者简介] 刘新, 女, 1987 年生, 博士, 从事锡多金属矿床成矿作用研究工作。

[通讯作者简介] 祝新友, 男, 1965 年生, 硕士, 教授级高工, 从事矿产勘查工作。

①山东省地质勘查开发局第六地质大队. 内蒙古自治区西乌珠穆沁旗白音查干东山矿区锌多金属矿储量核实报告, 2015.

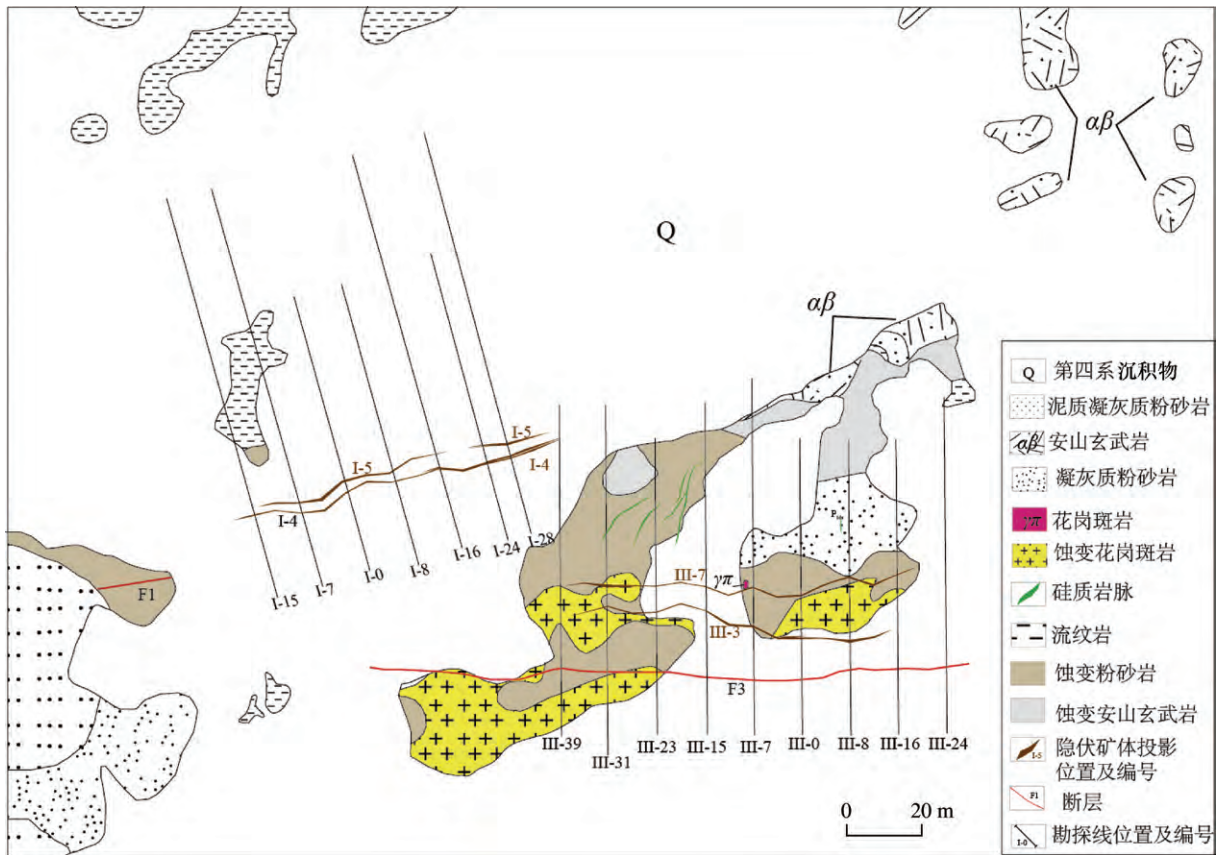


图1 白音查干锡多金属矿床矿区地质简图(据①修改)

等^[18]简单阐述了矿床地质条件和控矿构造;徐仁廷等^[19]根据原生晕分布规律指出可根据金属元素组合特征来预测隐伏矿体;赵占峰等^[20]探讨了金属元素时空分布规律。目前为止,白音查干锡多金属矿床成矿地质体及其特征、成矿时代、成矿构造背景等问题,仍未解决。

本文对白音查干矿区花岗斑岩进行了详细的岩相学、LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征研究,同时结合矿床地质特征,来探讨该矿床成岩成矿时代、成矿地质体特征及成矿动力学背景。

1 样品采集和分析测试方法

花岗斑岩在地表出露范围较小,主要由坑道和钻孔控制(图1)。花岗斑岩近东西向展布,倾向NW,较为陡倾,倾角约6°。本文中所用花岗斑岩样品采自矿区900中段(2中段)、860中段(3中段)及钻孔Ⅲ-35线ZK5。花岗斑岩手标本为灰白色,可

见被硅质岩穿插(图2-b)表面可见浸染状黑色硫化物集合体(图2-c)。

花岗斑岩发生强烈萤石化、云英岩化、高岭土化、闪锌矿化、黄铁矿化,地表出露花岗斑岩中萤石含量可达15%,金属矿物主要为闪锌矿和锡石。向深部蚀变减弱。隐爆角砾岩中可见花岗斑岩角砾(图2-a),表明隐爆作用发生时岩浆已经全部固结。

花岗斑岩呈细粒斑状结构,斑晶为石英(5%~10%)、长石(5%~10%),含少量黑云母(1%)。石英为浑圆状,粒径0.8~2.5 mm,内部包裹少量早期长石包体(图3-c)。长石斑晶粒径0.5~1.5 mm,自形晶,但已全部发生电气石、萤石、绢云母化蚀变,无原始长石成分残留,仅保留原始晶型。黑云母发生绢云母化蚀变,形成绢云母和铁质矿物残留,保留原始晶型。基质已全部发生高岭土化和绢云母化,看不出原始结构,推断应为微细粒花岗结构。

花岗斑岩中萤石为紫红色(图3-b),电气石为

①山东省地质勘查开发局第六地质大队.内蒙古自治区西乌珠穆沁旗白音查干东山矿区锌多金属矿储量核实报告,2015.

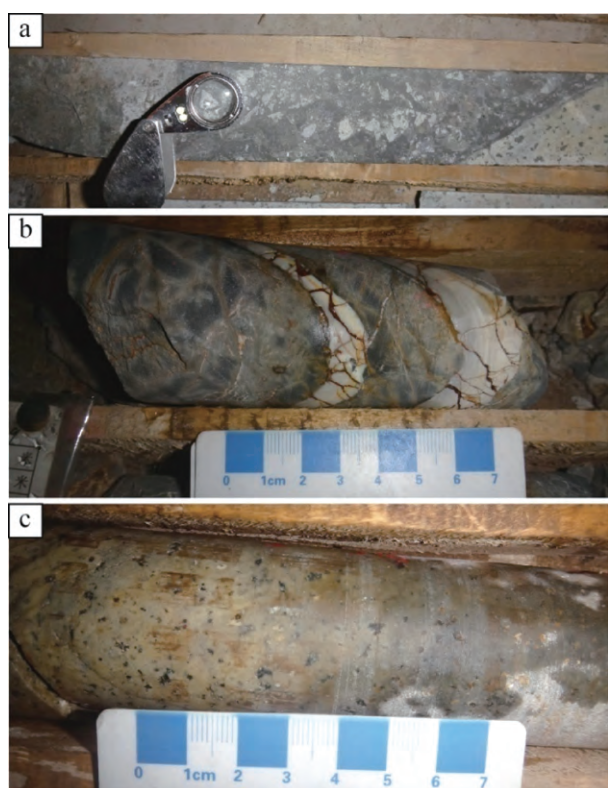


图2 白音查干锡多金属矿花岗斑岩样品

a—隐爆角砾岩,胶结物为硫化物,角砾中可见花岗斑岩;b—硅质岩切穿粉砂岩;c—花岗斑岩,发生强烈蚀变

蓝色—蓝绿色,在BSE图像中可见成分环带(图3-d)。绢云母呈片状集合体存在,多为细小的他形晶体(图3-a、b、c)。闪锌矿为红棕色—浅红棕色,他形,呈浸染状产于花岗斑岩基质中,或与电气石、萤石等组成长石残余晶型(图3-a)。锡石为细粒他形晶,浅棕色,呈浸染状分布于花岗岩基质中。

1.1 主、微量元素测试

主量元素和微量元素分析均在核工业北京地质研究院完成,主量元素测试利用碱熔法将样品溶制成玻璃片,使用X射线荧光光谱仪(XRF-1500)完成,采用国家一级岩石标样GBW07101-07114为基本效应校正,每10个样品添加1个平行样,利用标准曲线法校正。微量和稀土元素含量测试利用酸溶液法制备样品,在电感耦合等离子质谱仪上进行测试,每10个样品添加1个平行样,另有空白样作为对比。以GSR为标样进行质量监控,采用标准曲线法来校正,相对偏差一般 $\leq 10\%$ 。分析结果见表1。

1.2 锆石年代学与Hf同位素测试

锆石单矿物分选在廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司进行,在双目镜下选取合适大小锆石颗粒进行制靶。锆石透反射照片在北京矿产地质研究院显微镜实验室拍摄,阴极发光照片在中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室完成。锆石U-Pb年代学测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,仪器型号为Agilent 7500a,束斑为 $32\mu\text{m}$,参考标准物质为NIST610,年龄参考标准为91500。锆石年龄及微量校正采用glitter软件。年代学测试结果见表2。

锆石Lu-Hf原位微区测试同样在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用等离子体质谱仪Nu Plasma II MC-ICPMS, ^{176}Lu 和 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰校正使用比值 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02656$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 0.78696$,仪器质量歧视效应使用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 校正,使用91500和Mudtank作为监控样品,激光剥蚀束斑为 $50\mu\text{m}$ 。锆石原位微区Hf同位素测试结果见表3。

2 分析测试结果

2.1 花岗斑岩主、微量元素特征

全岩主量元素测试结果表明花岗斑岩富 SiO_2 (70.31%~80.28%)、 Al_2O_3 (11.96%~16.52%)、F(0.25%~2.27%),贫MgO(0.14%~0.37%)、CaO(0.10%~1.75%),当萤石含量升高时,CaO含量升高,可达3.8%。 K_2O 含量0.09%到3.73%,与云母含量有关。花岗斑岩主量元素特征与矿物成分中富含绢云母、萤石、电气石等相符。

花岗斑岩发生强烈的萤石化、云英岩化、高岭土化及矿化,一定程度上改变了原岩主量元素组成,造成花岗斑岩中 Na_2O 、 K_2O 含量降低,CaO、 Al_2O_3 、F含量升高,导致硅碱图、 $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 等一系列主量元素判别图解失效。

全岩微量元素测试结果表明花岗斑岩富集成矿元素(地表出露的强烈萤石化花岗斑岩除外):Cu $1.68 \times 10^{-6} \sim 106 \times 10^{-6}$,平均 29.9×10^{-6} ;Pb $19.4 \times 10^{-6} \sim 877 \times 10^{-6}$,平均 135.9×10^{-6} ;Zn $133 \times 10^{-6} \sim 5035 \times 10^{-6}$,平均 919.6×10^{-6} ;Sn $> 100 \times 10^{-6}$;Ag $0.35 \times 10^{-6} \sim$

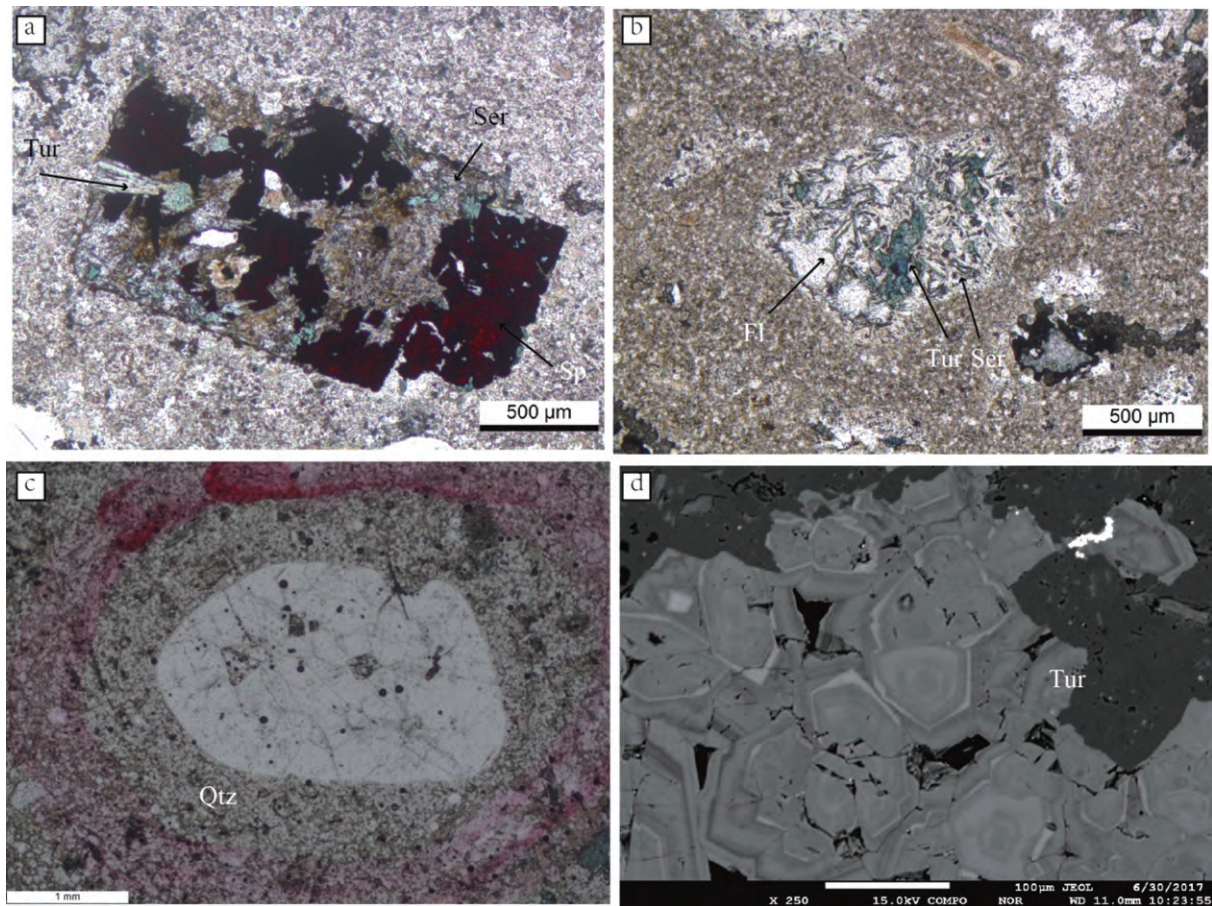


图3 白音查干锡多金属矿花岗斑岩相学照片

a—长石斑晶发生电气石、绢云母和闪锌矿化,仍保留原始晶型;b—长石斑晶发生萤石化和电气石化;c—石英斑晶,内部包裹的长石包体已全部发生绢云母化;d—电气石具有成分环带;Tur—电气石;Ser—绢云母;Fl—萤石;Qtz—石英;Sp—闪锌矿

20×10^{-6} ,部分样品 Ag 含量高于 20×10^{-6} ,超出检测上限,平均 1.13×10^{-6} (表1)。金属元素的富集与花岗斑岩中含有浸染状金属矿物一致。花岗斑岩稀土总量较低, $\Sigma \text{REE} = 32.48 \times 10^{-6} \sim 266.48 \times 10^{-6}$,且具有强烈的负铕异常(图4a), $\delta \text{Eu} = 0.06 \sim 0.23$, $\text{LREE/HREE} = 0.99 \sim 8.31$,在球粒陨石标准化稀土配分图中可见具有明显的四分组效应特征,表明其经历了强烈的结晶分异过程,演化程度高。

2.2 花岗斑岩锆石 U-Pb 年代学测试结果

对3个花岗斑岩样品进行了原位锆石 U-Pb 定年(图5)。

样品 NMB147 中锆石分为3组,第一组锆石较为浑圆,且粒度较小,测年结果得出单点年龄为 $896.5 \sim 1127.6 \text{ Ma}$,为继承锆石;第二组粒度较大, $120 \sim 220 \mu\text{m}$,自形长柱状,在 CL 图中较暗,U 含量

高,且多数具有核边结构,测年结果获得单点年龄 $159.7 \sim 296.5 \text{ Ma}$,锆石 CL 图像及测年结果表明其为继承锆石;第三组锆石为半自形短柱状,粒度为 $90 \sim 120 \mu\text{m}$,测年结果获得 $130.6 \sim 150.0 \text{ Ma}$,锆石具有振荡环带,Th/U 比值为 $0.22 \sim 0.49$,表明其为岩浆锆石,此组锆石获得平均年龄为 $(144.3 \pm 8.5) \text{ Ma}$ (图6-a)。

样品 NMC110 锆石分为两组分别为较大颗粒的继承锆石与花岗岩自身结晶的岩浆锆石,前者获得单点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $164.3 \sim 569.6 \text{ Ma}$,后者共获得3个单点年龄,分别为 134.6 Ma 、 139.4 Ma 和 140.9 Ma (图6-b)。

样品 NMC111 锆石与 NMB147 类似,分为3组:前寒武纪粒度较小的高 U 含量继承锆石有2颗,年龄分别为 976 Ma 和 691.4 Ma ;古生代继承锆石粒度及形态不均匀,获得年龄为 $195.9 \sim 484.9 \text{ Ma}$;花岗

表1 白音查干锡多金属矿花岗岩石主、微量分析测试结果

岩性	萤石花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	含矿花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	含矿花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩
样品号	NMC101	NMC107	NMC108	NMC109	NMC110	NMC104	NMC106	NMC111	NMC102	NMC112	NMB147	NMB162	NMB166	NMB171
取样位置	地表露头	2中7号矿	2中7号矿	2中7号矿	2中7号矿	2中7号矿	2中7号矿	2中17号矿	3中7号矿	3中17号矿	35线ZK5	35线ZK5	35线ZK5	35线ZK5
SiO ₂	70.31	78.84	77.01	75.87	80.28	67.97	77.58	73.86	75.84	73.14	77.96	79.01	75.98	78.49
TiO ₂	0.01	0.12	0.13	0.12	0.12	0.02	0.13	0.02	0.12	0.02	0.07	0.10	0.09	0.07
Al ₂ O ₃	16.52	12.98	12.72	12.20	11.96	14.55	10.52	16.31	14.03	15.40	12.47	11.68	12.99	12.66
Fe ₂ O ₃	0.07	0.51	1.21	0.55	0.35	2.58	3.36	0.11	0.86	0.03	0.33	0.99	0.36	0.07
FeO	0.23	1.35	2.43	3.52	0.85	4.46	3.62	0.45	0.88	2.74	1.94	1.79	1.69	1.08
MnO	0.02	0.01	0.05	0.27	0.02	0.13	0.02	0.03	0.01	0.08	0.02	0.01	0.00	0.01
MgO	0.16	0.23	0.17	0.17	0.14	0.35	0.32	0.16	0.18	0.22	0.36	0.37	0.19	0.21
CaO	3.80	0.06	0.09	0.10	0.34	1.00	0.10	1.06	0.60	0.82	0.08	0.87	1.75	0.84
Na ₂ O	0.16	0.21	0.45	0.20	0.12	0.45	0.56	0.10	0.11	0.30	0.22	0.39	0.24	0.26
K ₂ O	2.36	3.05	2.78	2.85	3.06	2.01	0.17	3.73	3.14	3.54	3.29	1.78	0.09	3.32
P ₂ O ₅	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02
LOI	5.80	1.88	1.52	3.14	2.06	4.75	2.59	3.55	3.52	2.79	2.46	2.20	2.90	2.30
F	1.30	0.30	0.26	0.25	0.41	0.78	0.13	0.72	0.84	0.67	0.14	0.67	2.27	0.91
总量	99.46	99.27	98.59	99.02	99.31	98.30	99.00	99.40	99.32	99.09	99.23	99.22	96.31	99.31
Cu	3.93	48.7	10.1	34.8	6.97	28.1	64.4	1.68	106	3.89	8.78	3.03	67.4	4.49
Pb	5.43	257	85.2	56.5	22.5	19.4	186	16.7	71.1	32.5	19.4	68.2	877	55.3
Zn	21.6	368	5035	1143	133	1380	492	127	281	189	1533	198	748	328
W	3.79	6.4	8.32	5.49	9.97	5.95	4.56	4.69	5.27	4.1	2.67	6.68	1.72	6.73
Sn	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100	>100
Bi	0.294	0.375	0.786	0.433	0.093	0.241	1.08	1.23	0.904	3.07	3.48	2.34	1.8	0.268
Mo	0.243	3.56	2.14	1.45	2.32	0.843	0.949	1.47	1.5	0.451	0.82	0.634	0.354	0.611
Ag	0.52	>20	0.347	0.468	0.131	0.903	8.061	0.062	1.274	0.198	0.218	0.332	1.422	0.199
Cd	0.051	0.563	20.4	0.244	0.144	0.403	2.3	0.201	0.434	0.072	5.95	0.851	5.27	1.83
Ca	64.3	28.4	26.8	24.3	28.2	47.1	20	61.5	27.5	54.9	24	20.5	8.94	25.6
Co	0.343	0.752	1.06	2.62	0.404	2.22	1.09	0.57	0.654	0.947	3.74	0.498	0.642	0.464
Ni	3.47	19.6	3.02	3.27	2.79	9.52	7.41	7.85	5.52	2.99	72.9	3.56	5.54	5.08
Rb	718	269	289	265	288	374	25.3	993	362	851	323	129	8.71	361
Sr	66.5	15.5	18.2	15.9	8.72	23.1	67.8	13.9	19.4	25.8	14.2	28.2	29.1	10
Ba	93	61.2	112	79.5	84.8	76.9	36.6	124	91.1	183	148	72.6	63	42.4
Cs	15.6	8.63	9.08	7.96	7.39	10.4	1.67	30.2	15.9	17.9	10.1	4.64	0.816	7.13
In	0.251	1.49	5.71	1.24	0.653	2.31	3.83	0.495	0.67	1.82	1.85	0.77	1.39	0.665
Tl	5.07	4.91	5.32	4.73	6.14	5.06	0.885	7.73	6.71	7.8	4.09	1.77	0.27	2.42
Cr	1.75	2.25	0.925	1.51	1.87	3.3	4.11	1.28	2.64	2.21	1.56	0.698	1.5	1.04
V	2.13	18.9	4.9	10.7	14.7	17.5	7.96	12	5.29	4.06	8.29	5.57	2.92	1.61

续表 1

岩性	萤石 花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	含砂花 花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	含砂花 花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩	花岗斑岩			
Li	99	20.7	47.5	31.9	13.1	56	32.9	59.7	237	24.8	75.6	18.2	91.4	29.7	91.4	18.2	75.6	18.2	91.4	29.7	
Be	3.25	4.17	4.39	3.99	2.69	4.26	6.27	2.73	4.12	4.65	3.77	3.03	1.54	2.69	1.54	3.03	3.77	3.03	1.54	2.69	
Nb	54.8	25.5	26.4	25.6	29.3	48.3	18.8	61.2	30.4	56.1	26.9	27	21.8	31.2	21.8	27	26.9	27	21.8	31.2	
Ta	25.8	4.26	4.09	3.99	4.65	14.6	3.17	20.3	5.33	17	4.81	3.6	3.64	5.28	3.64	3.6	4.81	3.6	3.64	5.28	
Zr	63.7	139	128	129	138	73.2	116	93.8	150	82.2	128	126	127	130	127	126	128	126	127	130	
U	6.07	20.1	13.8	11.1	10.2	7.45	10.4	21.8	17	15	21	16.6	14.6	15.7	14.6	16.6	21	16.6	14.6	15.7	
Hf	13.4	7.68	7.4	7.49	7.62	11.5	5.66	15.6	7.79	12.6	7.74	7.52	6.58	7.74	6.58	7.52	7.74	7.52	6.58	7.74	
Th	14	44.2	44.4	40.7	41.2	12.9	28.4	18.8	41.1	14.5	39.4	44.2	31.7	40.6	31.7	44.2	39.4	44.2	31.7	40.6	
Sc	13.2	9.49	3.27	4.74	5.69	17.1	3.47	14.7	3.02	16	2.7	2.69	1.31	4.94	1.31	2.69	2.7	2.69	1.31	4.94	
Y	6.59	39.3	35.3	39.7	44.7	11.8	25.4	28.4	185	17.3	35.4	27.8	18.1	14.1	18.1	27.8	35.4	27.8	18.1	14.1	
La	5.62	34.1	33.7	27.8	26.6	14.4	24.7	13.6	36.6	10.8	42.5	38.4	21.2	1.38	21.2	38.4	42.5	38.4	21.2	1.38	
Ce	19.1	74.5	74.3	61.3	59.7	42.1	53.8	41.7	89.3	32.5	92.5	91.3	50.3	3.63	50.3	91.3	92.5	91.3	50.3	3.63	
Pr	2.61	9.52	9.23	7.75	7.81	6.15	7.08	5.93	13	4.51	11.9	12	6.59	0.551	6.59	12	11.9	12	6.59	0.551	
Nd	7.08	36.5	35.7	30.3	31.3	21.3	28.1	19.6	61.2	15.3	46.5	47.6	27.3	2.55	27.3	47.6	46.5	47.6	27.3	2.55	
Sm	2.85	8.02	7.3	7.51	7.7	7.49	6.55	8.11	22.2	6.25	10.2	10	5.92	0.971	5.92	10	10.2	10	5.92	0.971	
Eu	0.094	0.291	0.343	0.307	0.278	0.296	0.356	0.132	0.743	0.226	0.619	0.253	0.154	0.042	0.154	0.253	0.226	0.619	0.253	0.154	0.042
Gd	1.66	5.5	5.37	5.51	5.84	3.94	4.45	5.1	22.4	3.9	6.76	6.6	4.02	1.11	4.02	6.6	6.76	6.6	4.02	1.11	
Tb	0.663	1.12	1.05	1.12	1.28	1.07	0.839	1.9	4.66	1.4	1.22	1.12	0.673	0.329	0.673	1.12	1.22	1.12	0.673	0.329	
Dy	5.11	6.45	5.88	6.72	7.72	6.64	4.35	14.1	23.7	9.78	6.79	5.54	3.44	2.34	3.44	5.54	6.79	5.54	3.44	2.34	
Ho	0.919	1.3	1.26	1.41	1.57	1.19	0.863	2.89	4.1	1.77	1.29	1.05	0.636	0.502	0.636	1.05	1.29	1.05	0.636	0.502	
Er	3.58	4.07	3.94	4.39	4.85	4.21	2.63	9.99	10.7	6.34	3.96	3.27	1.96	1.66	1.96	3.27	3.96	3.27	1.96	1.66	
Tm	1.07	0.849	0.83	0.931	1.04	1.11	0.533	2.88	1.85	1.67	0.747	0.673	0.373	0.342	0.373	0.673	1.67	0.747	0.673	0.342	
Yb	10.2	6.07	5.88	6.64	6.98	9.58	3.91	23.7	11.3	14	5.16	4.99	2.74	2.57	2.74	4.99	5.16	4.99	2.74	2.57	
Lu	1.41	0.892	0.869	0.971	1	1.43	0.576	3.31	1.55	2.03	0.73	0.76	0.421	0.399	0.421	0.76	2.03	0.76	0.421	0.399	
ANK	5.86	3.56	3.38	3.57	3.41	4.97	9.49	3.87	3.91	3.55	3.17	4.55	27.13	3.15	27.13	4.55	3.17	4.55	27.13	3.15	
ACNK	1.70	3.45	3.24	3.40	2.90	3.06	8.21	2.65	2.99	2.64	3.06	2.81	3.54	2.28	3.54	2.81	2.64	2.81	3.54	2.28	
Nb+Zr+Ce+Y	144.19	278.30	264.00	255.60	271.70	175.40	214.00	225.10	454.70	188.10	282.80	272.10	217.2	178.93	217.2	272.10	282.80	272.10	217.2	178.93	
Zr/Hf	4.75	18.10	17.30	17.22	18.11	6.37	20.49	6.01	19.26	6.52	16.54	16.76	19.30	16.80	19.30	16.76	16.54	16.76	19.30	16.80	
Rb/Sr	10.80	17.35	15.88	16.67	33.03	16.19	0.37	71.44	18.66	32.98	22.75	4.57	0.30	36.10	0.30	4.57	22.75	4.57	0.30	36.10	
Nb/Ta	2.12	5.99	6.45	6.42	6.30	3.31	5.93	3.01	5.70	3.30	5.59	7.50	5.99	5.91	5.99	7.50	5.59	7.50	5.99	5.91	
10000Ga/Al	2.43	1.37	1.31	1.24	1.47	2.02	0.43	2.35	1.22	2.22	1.20	1.10	1.19	1.26	1.19	1.10	1.20	1.10	1.19	1.26	
ΣREE	68.56	228.48	220.95	202.36	208.37	132.71	164.14	181.34	488.30	127.78	266.28	251.36	143.83	32.48	143.83	251.36	266.28	251.36	143.83	32.48	
LREE/HREE	1.52	6.21	6.40	4.87	4.41	3.14	6.64	1.39	2.78	1.70	7.66	8.31	7.81	0.99	7.81	8.31	7.66	8.31	7.81	0.99	
La/Yb *	0.37	3.79	3.86	2.82	2.57	1.01	4.26	0.39	2.18	0.52	5.55	5.19	5.22	0.36	5.22	5.19	5.55	5.19	5.22	0.36	
Eu/Eu *	0.13	0.13	0.17	0.15	0.13	0.17	0.20	0.06	0.10	0.14	0.23	0.10	0.10	0.12	0.10	0.10	0.23	0.10	0.10	0.12	

注:主量元素单位:%;微量元素单位:10⁻⁶。

表2 白音查干锡多金属矿花岗岩年代学测试结果

测试点	含量/ 10^{-6}		同位素比值						年龄/Ma				Th/U		
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
			1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ	1 σ			
NMB147	79.34	162.75	0.077613302	0.003753085	2.052609339	0.092987558	0.191157217	0.002935568	1136.7	96.3	1133.2	30.9	1127.6	15.9	0.49
NMB147-2	426.60	2359.62	0.141513176	0.006216086	0.51257997	0.022897444	0.025820049	0.000436322	2246.0	75.8	420.2	15.4	164.3	2.7	0.18
NMB147-3	429.57	906.91	0.42434628	0.021048677	2.944133612	0.242716033	0.047071025	0.002445992	3997.8	74.3	1393.3	62.5	296.5	15.1	0.47
NMB147-4	1041.61	4748.86	0.469254201	0.016143754	2.645437078	0.143187605	0.039676198	0.001365435	4147.4	51.0	1313.4	39.9	250.8	8.5	0.22
NMB147-5	1036.49	2355.13	0.154803673	0.009523333	0.603036811	0.038559342	0.027720651	0.000575044	2399.7	105.4	479.2	24.4	176.3	3.6	0.44
NMB147-6	585.85	3049.07	0.115631338	0.006336509	0.415373496	0.023370659	0.02556899	0.000417608	1900.0	99.5	352.7	16.8	162.8	2.6	0.19
NMB147-8	2286.86	4639.14	0.536634205	0.014820943	3.014569594	0.101510905	0.040210364	0.000840855	4345.4	40.5	1411.3	25.7	254.1	5.2	0.49
NMB147-9	627.06	2100.24	0.297389814	0.009781111	1.251104033	0.043336553	0.030136676	0.000420127	3456.5	51.1	823.9	19.6	191.4	2.6	0.30
NMB147-10	2532.23	4572.95	0.193620099	0.010215479	0.678584372	0.036818907	0.02509254	0.000362928	2773.2	86.7	525.9	22.3	159.8	2.3	0.55
NMB147-11	351.11	451.69	0.150894843	0.005397735	5.007069756	0.167455262	0.24123935	0.004873532	2366.7	60.6	1820.5	28.3	1393.1	25.3	0.78
NMB147-12	706.72	2630.14	0.119602724	0.006501738	0.379996972	0.020742759	0.022872023	0.000390111	1950.3	97.2	327.0	15.3	145.8	2.5	0.27
NMB147-13	287.54	589.44	0.048674768	0.0038316	0.136091908	0.010479513	0.020462403	0.000413363	131.6	177.8	129.6	9.4	130.6	2.6	0.49
NMB147-14	340.47	920.78	0.0475872	0.00441949	0.156021151	0.014679009	0.022989623	0.000557799	79.7	207.4	147.2	12.9	146.5	3.5	0.37
NMB147-17	248.18	1103.61	0.059227631	0.00450893	0.197430283	0.017525293	0.023496418	0.000516214	576.0	132.4	182.9	14.9	149.7	3.3	0.22
NMB147-18	30.75	110.27	0.070587537	0.004590847	1.471376942	0.086423774	0.152217303	0.003171817	946.3	133.8	918.7	35.5	913.4	17.8	0.28
NMB147-19	573.28	325.43	0.071409617	0.003106704	1.587250277	0.064047263	0.159862659	0.002575774	968.5	88.9	965.2	25.1	956.0	14.3	1.76
NMB147-20	5386.14	8182.49	0.348932082	0.015813919	1.436772576	0.078696974	0.028944196	0.00085129	3702.3	69.0	904.4	32.8	183.9	5.3	0.66
NMB147-21	1183.08	4213.64	0.403757141	0.033368193	1.277889018	0.074304161	0.023388788	0.000903616	3923.2	124.6	835.9	33.1	149.0	5.7	0.28
NMB147-22	470.81	1758.17	0.214460298	0.012614304	0.771427494	0.047230465	0.025515699	0.000511616	2939.8	94.6	580.6	27.1	162.4	3.2	0.27
NMB147-23	1184.44	3683.96	0.49533176	0.018866576	2.288098	0.09880417	0.03282391	0.000797697	4227.5	56.2	1208.6	30.5	208.2	5.0	0.32
NMB147-24	762.79	3421.26	0.212112737	0.012505232	0.716842521	0.045356029	0.02354988	0.000392031	2921.9	90.3	548.8	26.8	150.1	2.5	0.22
NMB147-25	1215.36	4346.61	0.566566149	0.019598818	2.720106861	0.092140389	0.034313435	0.000551739	4424.5	51.4	1334.0	25.2	217.5	3.4	0.28
NMB147-26	56.71	46.96	0.075122391	0.010041258	1.452733118	0.16540785	0.14439433	0.003951211	1072.2	272.2	911.0	68.5	869.5	22.3	1.21
NMB147-27	231.42	1014.51	0.051791551	0.002154739	0.33439057	0.013989198	0.046136484	0.000668615	276.0	89.8	292.9	10.6	290.8	4.1	0.23
NMC110															
NMC110-1	452.87	1858.82	0.216258024	0.009113006	0.844248639	0.036111191	0.028321768	0.000415257	2952.8	67.9	621.5	19.9	180.0	2.6	0.24
NMC110-2	218.86	581.08	0.151110723	0.010058001	0.634952015	0.036786597	0.031394048	0.000720849	2358.3	113.9	499.2	22.8	199.3	4.5	0.38
NMC110-3	1037.01	2962.14	0.625080487	0.02285969	8.681910429	0.619659432	0.091728285	0.004800026	4567.6	53.0	2305.2	65.0	565.8	28.3	0.35
NMC110-8	617.19	1243.32	0.499570698	0.021539134	2.542673378	0.147916026	0.036128259	0.001049008	4240.0	63.6	1284.3	42.4	228.8	6.5	0.50

续表 2

测试点	含量/ 10^{-6}		同位素比值										年龄/Ma			Th/U		
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
			1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
NMB147																		
NMC110-9	271.78	542.37	0.048990322	0.003294797	0.140634167	0.009114588	0.021080369	0.000387995	146.4	151.8	133.6	8.1	134.5	2.5	0.50			
NMC110-10	480.49	1537.00	0.431077037	0.01637297	2.61247013	0.154883477	0.042410881	0.001152909	4021.3	56.0	1304.1	43.5	267.8	7.1	0.31			
NMC110-11	513.82	861.56	0.084905218	0.003486511	0.257784928	0.010682046	0.022105444	0.000309961	1322.2	79.6	232.9	8.6	140.9	2.0	0.60			
NMC110-13	277.82	459.64	0.194539652	0.015085527	0.854461602	0.088203006	0.028118712	0.000833537	2781.2	127.5	627.1	48.3	178.8	5.2	0.60			
NMC110-16	476.47	806.39	0.338069519	0.020567962	1.762800264	0.12872126	0.033300955	0.001017929	3654.0	93.2	1031.9	47.3	211.2	6.4	0.59			
NMC110-17	610.49	1544.07	0.344997463	0.022767514	1.990275414	0.17289581	0.035675033	0.00139691	3685.0	100.9	1112.2	58.7	226.0	8.7	0.40			
NMC110-18	828.26	1267.89	0.590280184	0.018949567	5.789345106	0.282654606	0.069108006	0.001970859	4484.2	46.7	1944.8	42.3	430.8	11.9	0.65			
NMC110-20	1882.11	3051.11	0.620382389	0.019380742	8.667645119	0.917716976	0.092375365	0.007557497	4556.4	45.3	2303.7	96.4	569.6	44.6	0.62			
NMC110-21	411.45	688.84	0.087505488	0.004637145	0.312943777	0.016372479	0.025809064	0.000489113	1372.2	101.9	276.5	12.7	164.3	3.1	0.60			
NMC110-22	1048.32	1396.98	0.153949817	0.00657509	0.45209545	0.020121372	0.021096602	0.000302119	2390.4	72.4	378.7	14.1	134.6	1.9	0.75			
NMC110-23	162.45	1006.26	0.064945359	0.003345358	0.197518438	0.010409835	0.021857796	0.000358922	772.2	108.2	183.0	8.8	139.4	2.3	0.16			
NMC111																		
NMC111-1	2551.39	6367.18	0.71583	0.01446	11.17616	0.12443	0.11322	0.00125	4762.8	28.7	2537.9	10.4	691.4	7.2	0.40			
NMC111-2	472.07	948.19	0.57912	0.0119	4.3576	0.05033	0.05457	0.00061	4456.5	29.6	1704.3	9.5	342.5	3.8	0.50			
NMC111-3	777.45	2203.07	0.49394	0.01007	2.77649	0.03151	0.04076	0.00045	4223.2	29.8	1349.2	8.5	257.6	2.8	0.35			
NMC111-4	1963.07	5856.81	0.6545	0.01328	5.72557	0.06412	0.06344	0.0007	4633.9	29.0	1935.2	9.7	396.5	4.3	0.34			
NMC111-6	597.06	613.57	0.16059	0.00353	0.96818	0.01331	0.04372	0.0005	2461.8	36.7	687.5	6.9	275.8	3.1	0.97			
NMC111-7	3611.88	6738.95	0.69873	0.0142	5.79595	0.0649	0.06015	0.00066	4728.1	28.9	1945.8	9.7	376.5	4.0	0.54			
NMC111-8	447.72	879.52	0.48056	0.01044	2.23839	0.02897	0.03378	0.0004	4182.6	31.7	1193.2	9.1	214.1	2.5	0.51			
NMC111-9	313.74	1152.80	0.39614	0.00833	1.50445	0.01823	0.02754	0.00031	3894.5	31.3	932.2	7.4	175.1	2.0	0.27			
NMC111-10	656.12	1905.80	0.11151	0.00244	0.32579	0.00446	0.02118	0.00024	1824.2	39.3	286.3	3.4	135.1	1.5	0.34			
NMC111-12	497.87	986.73	0.41577	0.00875	1.81884	0.02202	0.03172	0.00036	3967.1	31.2	1052.3	7.9	201.3	2.3	0.50			
NMC111-13	4056.19	8163.87	0.69316	0.01412	6.27833	0.07014	0.06568	0.00072	4716.6	29.0	2015.4	9.8	410.0	4.4	0.50			
NMC111-14	1528.54	5703.95	0.58082	0.01189	3.52382	0.03982	0.04399	0.00049	4460.7	29.5	1532.6	8.9	277.5	3.0	0.27			
NMC111-15	358.32	837.38	0.598	0.01233	5.96936	0.0686	0.07238	0.00081	4503.2	29.6	1971.4	10.0	450.5	4.9	0.43			
NMC111-16	245.24	792.97	0.17255	0.00392	0.56451	0.00825	0.02372	0.00028	2582.5	37.5	454.5	5.4	151.1	1.7	0.31			
NMC111-17	2490.03	4895.17	0.69556	0.01421	7.04213	0.07893	0.07341	0.00081	4721.6	29.1	2116.8	10.0	456.7	4.8	0.51			
NMC111-19	988.25	3402.03	0.58369	0.01206	3.2252	0.03702	0.04006	0.00045	4467.9	29.8	1463.2	8.9	253.2	2.8	0.29			
NMC111-20	14474.68	7385.84	0.75269	0.01534	16.9685	0.18871	0.16346	0.00178	4834.7	28.8	2933.1	10.7	976.0	9.9	1.96			

续表 2

测试点	含量/ 10^{-6}		同位素比值				年龄/Ma				Th/U				
	Th	U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ		
NMB147															
NMC111-21	295.43	818.34	0.30412	0.00661	1.2941	0.01682	0.03085	0.00036	3491.3	33.2	843.1	7.4	195.9	2.2	0.36
NMC111-22	469.39	1249.78	0.54061	0.01149	3.17258	0.03871	0.04255	0.00049	4356.0	30.8	1450.5	9.4	268.6	3.0	0.38
NMC111-23	2182.31	4707.86	0.65685	0.01342	6.65586	0.07422	0.07347	0.0008	4639.1	29.2	2066.8	9.8	457.0	4.8	0.46
NMC111-24	2506.91	5140.03	0.686	0.01403	7.39149	0.08248	0.07813	0.00085	4701.7	29.1	2159.9	10.0	484.9	5.1	0.49
NMC111-25	853.45	2912.65	0.34982	0.00777	1.08847	0.01464	0.02256	0.00027	3706.2	33.4	747.8	7.1	143.8	1.7	0.29
NMC111-26	3629.79	6259.32	0.68993	0.01414	5.57916	0.06224	0.05863	0.00064	4709.9	29.2	1912.9	9.6	367.3	3.9	0.58
NMC111-27	2006.47	4530.60	0.65357	0.01351	4.29768	0.04887	0.04768	0.00053	4631.9	29.5	1692.9	9.4	300.3	3.2	0.44
NMC111-28	3844.17	7929.82	0.70061	0.01436	5.00749	0.05578	0.05182	0.00056	4732.0	29.1	1820.6	9.4	325.7	3.5	0.48
NMC111-29	1779.63	4727.44	0.63522	0.01315	4.30528	0.04906	0.04914	0.00054	4590.7	29.6	1694.4	9.4	309.3	3.3	0.38

表 3 白音查干锡多金属矿花岗斑岩锆石 LA-ICP-MS Hf 同位素测试结果

测试号	岩性	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	2σ	T_{DM1}/Ma	2σ	T_{DM2}/Ma	2σ	f_{Lu}/Hf
NMB147-12	花岗斑岩	145.8	2.5	0.167543	0.000867	0.004086	0.000034	0.283162	0.000016	0.283151	13.41	16.61	0.56	137.0	2.6	127.6	2.6	-0.88
NMB147-13	花岗斑岩	130.6	2.6	0.052717	0.000451	0.001275	0.000009	0.282968	0.000017	0.282964	6.80	9.67	0.59	406.5	15.0	749.5	15.0	-0.96
NWB147-14	花岗斑岩	146.5	3.5	0.116069	0.001080	0.002411	0.000031	0.283076	0.000015	0.283069	10.50	13.72	0.54	259.4	7.8	391.9	7.8	-0.93
NMC110-9	花岗斑岩	134.5	2.5	0.047065	0.000322	0.001185	0.000009	0.282995	0.000021	0.282992	7.76	10.71	0.73	366.9	13.1	657.0	13.1	-0.96
NMC110-11	花岗斑岩	140.9	2.0	0.108088	0.000774	0.002721	0.000023	0.283045	0.000024	0.283038	9.40	12.49	0.85	307.3	10.0	499.7	10.0	-0.92
NMC110-21	花岗斑岩	164.3	3.1	0.071455	0.000526	0.001761	0.000014	0.283079	0.000017	0.283073	10.66	14.27	0.61	249.8	7.1	353.7	7.1	-0.95
NMC110-22	花岗斑岩	134.6	1.9	0.081312	0.000961	0.002005	0.000031	0.283039	0.000027	0.283034	9.25	12.21	0.94	310.4	10.4	521.2	10.4	-0.94
NMC111-10	含矿花岗斑岩	135.1	1.5	0.084809	0.001250	0.002209	0.000027	0.283072	0.000021	0.283066	10.41	13.37	0.76	263.2	8.3	415.3	8.3	-0.93
NMC111-25	含矿花岗斑岩	143.8	1.7	0.469291	0.009310	0.010094	0.000272	0.283061	0.000182	0.283034	9.27	12.43	6.44	356.4	10.2	507.8	10.2	-0.70

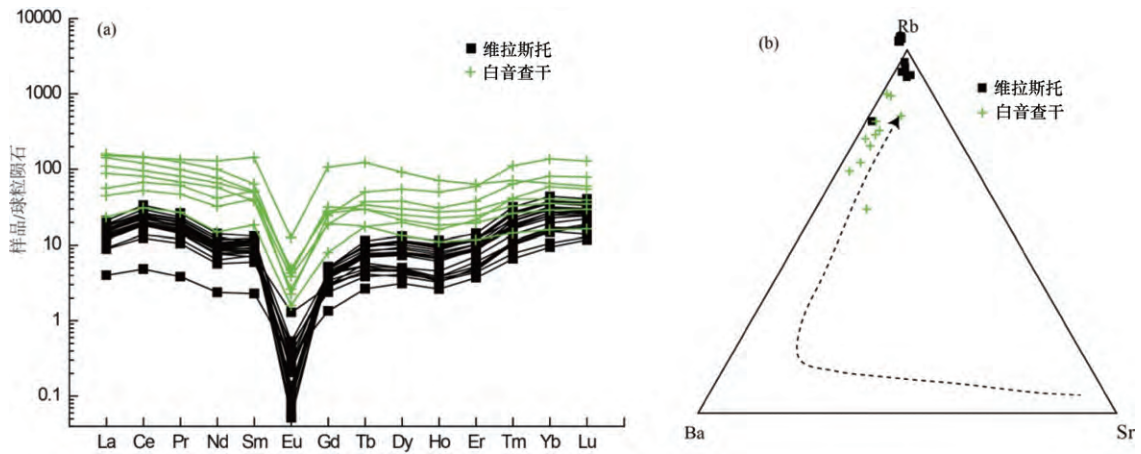


图4 白音查干球粒陨石标准化稀土配分图解(a, 标准化数据来自文献[21])及花岗斑岩演化程度判别图(b)

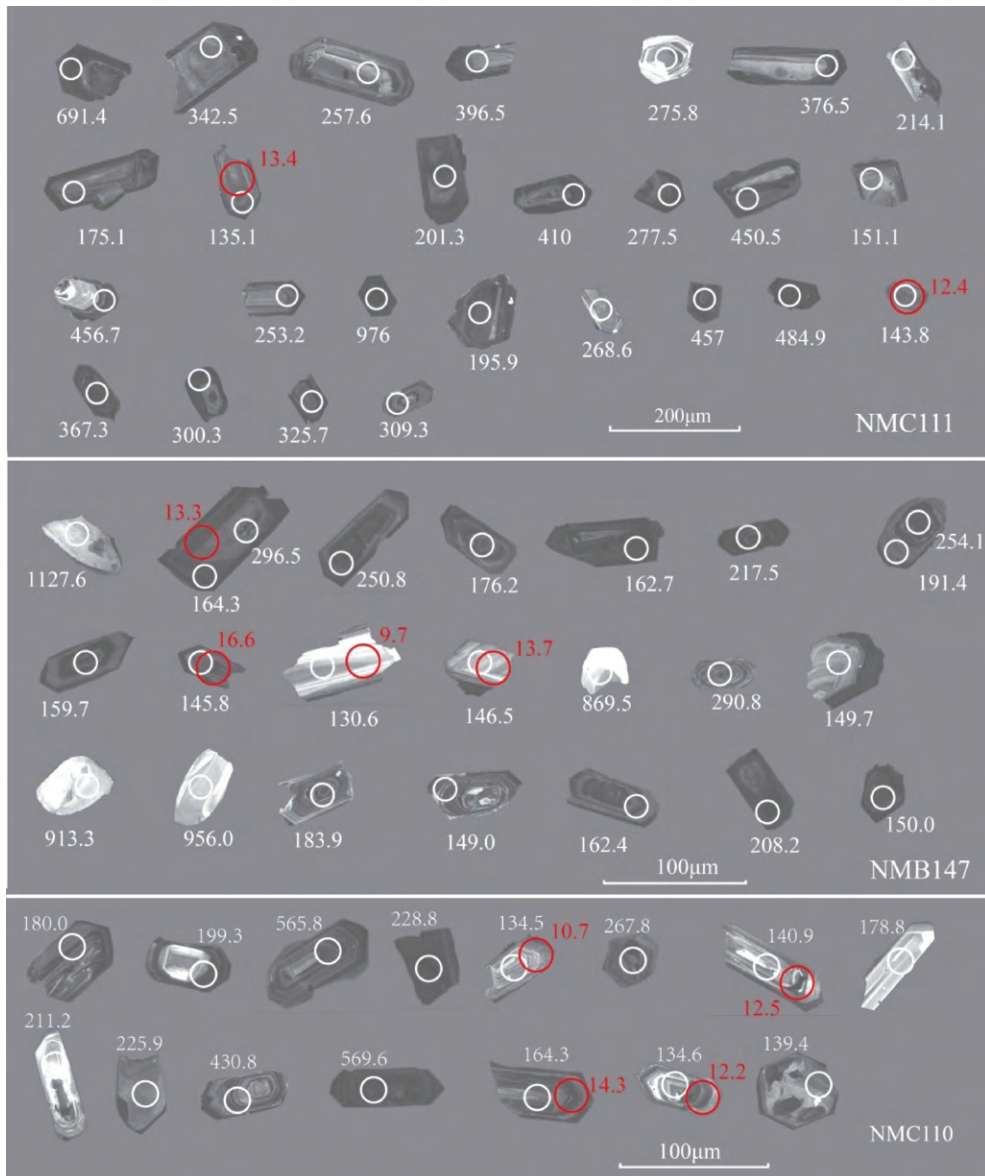


图5 白音查干锡多金属矿花岗斑岩代表性锆石阴极发光图像(CL)、LA-ICP-MS测年及锆石Hf同位素测试结果

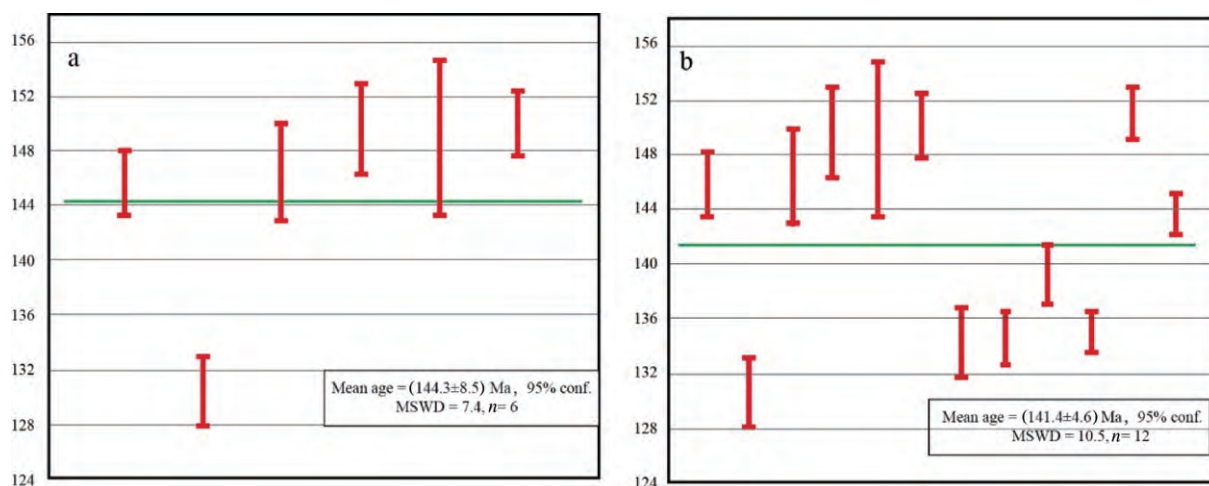


图6 NMB147 锆石平均年龄(a)及 NMB147、NMC111、NMC110 锆石平均年龄(b)

斑岩自身岩浆结晶锆石有3个,年龄分别为143.8、135.1和143.8Ma(表2)。

2.3 锆石 Hf 同位素特征

在U-Pb定年之后,选取3个花岗斑岩中自身岩浆结晶锆石进行原位Hf同位素测试(表3,图5)。测试结果表明,除2个锆石颗粒外,其余颗粒中 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 均小于0.002,表明放射性Hf积累较少,样品 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值可代表锆石结晶时Hf同位素组成^[22]。NMB147中 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为0.282 968~0.283 162,按照单颗粒锆石年龄计算, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为9.67~13.72,单阶段模式年龄 T_{DM1} 为137~406.5,两阶段模式年龄 T_{DM2} 为127.6~749.5。NMC110获得4个测试数据, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为0.282 995~0.283 079,按照单颗粒锆石年龄计算, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为10.71~14.27, T_{DM1} 为249.8~366.9,两阶段模式年龄 T_{DM2} 为353.7~657.0。NMC111获得2个测试数据, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为0.283 061~0.283 072,按照单颗粒锆石年龄计算, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为12.43~13.37, T_{DM1} 为263.2~356.4,两阶段模式年龄 T_{DM2} 为415.3~507.8。3个花岗斑岩中 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 为-0.99~-0.70,平均-0.91,小于镁铁质地壳和硅铝质地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 数值(分别为-0.34和-0.72)^[23-24],故两阶段年龄更能代表源区物质从地幔中分离时间。

3 讨论

3.1 成岩成矿时代

样品NMB147中6颗岩浆结晶锆石获得平均年

龄(144.3±8.5)Ma(图6-a),NMC110和NMC111岩浆锆石较少,仅分别获得3个单点年龄(表2)。锡多金属矿床成矿岩体岩浆中富含不相容元素和挥发性组分,岩浆固相线可低至500~600℃,使岩浆可运移至地壳浅部^[25-26],岩浆结晶温度的降低在一定程度上影响到自身岩浆锆石的形成,使花岗斑岩中白垩纪锆石数量较少。3个样品均采自同一个花岗斑岩体,且距离不远(NMB147 III-35线ZK5,NMC110和NMC111分别采自900中段7号和17号矿体下盘),白音查干花岗斑岩体无岩相分带,故3个样品可视为同一期岩浆结晶活动的产物。3个样品锆石可获得平均年龄(141.4±4.6)Ma,为花岗斑岩结晶年龄。

花岗斑岩在矿区沿控矿断裂侵入,花岗斑岩中富含金属元素(表1),岩体发生强烈自蚀变和金属矿化蚀变,矿体围绕花岗斑岩体具有清晰的矿化分带^[20],这均可证明花岗斑岩为白音查干锡多金属矿床的成矿地质体,成岩与成矿时间一致,成岩年龄可代表锡多金属成矿作用的时间,这表明白音查干锡多金属成矿作用发生在早白垩世。

大兴安岭南段地区发育一系列锡多金属矿床,成矿时代均发生在140Ma左右,如维拉斯托139.5Ma^[14]、拜仁达坝133~135Ma^[27-28]、边家大院140Ma^[15]、黄岗135Ma^[13]、大井133~146Ma^[16]、白音诺尔140~147Ma(蒋斌斌未发表数据)等,这表明在早白垩世,大兴安岭南段存在一起锡多金属成矿作用大爆发事件。白音查干成岩成矿时间一致,为

(141.4±4.6) Ma, 与大兴安岭南段早白垩世大规模锡多金属成矿作用同期。

3.2 白音查干花岗斑岩类型

目前最为常用的花岗岩分类方式为 I 型、S 型、A 型和 M 型, 其中前 3 种最为常见。通常情况下, 碱性暗色矿物, 比如钠闪石—钠铁闪石、霓石—霓辉石等矿物的出现是判断过碱性 A 型花岗岩的重要矿物学标志^[29-30], $1000\text{Ga}/\text{Al} \geq 2$ 、 $\text{Zr} > 250 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} > 350 \times 10^{-6}$ 通常作为 A 型花岗岩的地区化学判别标准^[31]。但对于强烈结晶分异的 A 型花岗岩, 铝质 A 型花岗岩会表现出与 I 型、S 型花岗岩相类似的矿物和地球化学特点^[32], A 型花岗岩中 Zr 可能低至 100×10^{-6} ^[33], 使得 A 型花岗岩的判别标志失效。

花岗岩中 Rb/Sr、Zr/Hf、Nb/Ta 等比值可以反映岩浆结晶演化程度。Sr 为相容元素, 在岩浆分异过程中易于在熔体中亏损, Rb 为不相容元素, 易于在熔体中富集, Rb/Sr 比值随着岩浆的演化而增大。Nb、Ta 均为不相容元素, 但是 Ta 不相容性大于 Nb, 且 Ta 与 Rb、Li、F 等元素关系更为密切, 随着岩浆的演化, Nb/Ta 比值逐渐减小; Zr/Hf 比值不会随岩浆演化程度发生改变, 但锆石的结晶会使残留熔体中 Zr/Hf 比值显著降低^[34], 从黑云母花岗岩到浅色花岗岩再到 Li-F 花岗岩, Zr/Hf 值逐渐降低^[35]。白音查干花岗斑岩富集 Rb, 亏损 Ba、Sr, Rb/Sr 为 4.57~71.44, 平均 22.83, 在 Rb-Ba-Sr 三角图解中聚集在富 Rb 端元(图 4-b), 与维拉斯托强烈分异的碱长花岗岩一致^[14]。花岗斑岩 Zr/Hf 与 Nb/Ta 比值分别为 4.75~20.49 和 2.12~7.5, 与南岭高分异锡成矿花岗岩地球化学特征类似^[10]。花岗斑岩具有强烈的 Eu 负异常, $\delta\text{Eu} = 0.06 \sim 0.23$, 在球粒陨石标准化稀土配分图中, 显示清晰的“四分组效应”, 与巴尔哲典型的强烈结晶分异的 A 型花岗岩一致^[30]。稀土元素、微量元素比值均表明白音查干花岗斑岩经历过强烈结晶分异作用, 具有高演化特征。

白音查干花岗斑岩发生强烈的电气石化、萤石化和金属矿化, 原生矿物除石英外均不可识别, 花岗岩类型的矿物学标志在该矿床中无法使用。在 $\text{Zr} + \text{Nb} + \text{Ce} + \text{Y} - \text{Fe}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 判别图解中大部分落在 I 型和 S 型花岗岩范围之内, 在 $1000\text{Ga}/\text{Al} - \text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$ 判别图解中大部分落在 A 型花岗岩范围, 一部分落在

分界线附近, 少量落在 I+M+S 范围(图 7-a、b)。判别图解的失效与白音查干花岗斑岩的高度演化和强烈结晶分异作用有关。

大兴安岭属于兴蒙造山带的一部分, 兴蒙造山带分布大量侏罗—白垩纪 A 型花岗岩, 少量为 I 型花岗岩。白音查干花岗斑岩主量元素中 $\text{K}_2\text{O} \gg \text{Na}_2\text{O}$, 与 I 型花岗岩特征不符, 且花岗斑岩富集 Rb、K 和高场强元素 Zr、Hf, 而亏损 Sr、Ba, 具有强烈的四分组效应, 地球化学特征与 A 型花岗岩类似^[12]。白音查干花岗斑岩形成时代为 (141.4±4.6) Ma, 大兴安岭南段早白垩世锡多金属成矿花岗岩均为高演化的 A 型花岗岩^[13-15]。地球化学特征及区域锡多金属成矿性质可推断白音查干花岗斑岩为高演化的 A 型花岗岩。

白音查干花岗斑岩为该矿床的成矿岩体, 发生强烈的萤石化和电气石化, 表明成矿热液中同时富集 B 和 F, 与前人认为的锡成矿体系中富集 F、钨成矿系统中富集 B 的观点不一致^[10]。岩浆热液体系中挥发组分与金属元素富集种类之间的关系, 仍需进一步探讨。

3.3 白音查干花岗斑岩源区及构造背景

A 型花岗岩具有多种成因机制, 一般来讲可分为以下几种: 由玄武质幔源岩浆直接结晶分异而成^[37]; 富 F 的下地壳麻粒岩相岩石部分熔融形成; 幔源岩浆和壳源岩浆混合后部分熔融而成^[38]。一般情况下, 玄武质幔源岩浆直接经过部分熔融形成中酸性岩浆的可能性较小^[39], 白音查干花岗斑岩富硅, 具有明显的富 Eu 异常, 亏损 Ba、Sr, 表明其源区有斜长石、钾长石残留, 岩浆结晶深度较浅; 亏损 P、Ti、Nb、Ta 等元素, 表明受到金红石、榍石、磷灰石等副矿物结晶影响。这表明白音查干花岗斑岩不可能是幔源岩浆分异而来^[29]。白音查干花岗斑岩中未见岩浆混合过程中特征性的闪长质微粒包体, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 9.67~14.27, 较为均一, 不显示混合特点, 这表明花岗斑岩形成过程中无明显的岩浆混合过程。

兴蒙造山带晚古生代花岗岩其中除少数产出于新元古代微陆块上的花岗岩之外, 绝大部分具有正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值、正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值、年轻的 Nd 模式年龄和 Hf 模式年龄 (<1000 Ma, 多数在 500~1000 Ma 之间)、低的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i^[30,40-41], 这表明在显生宙时

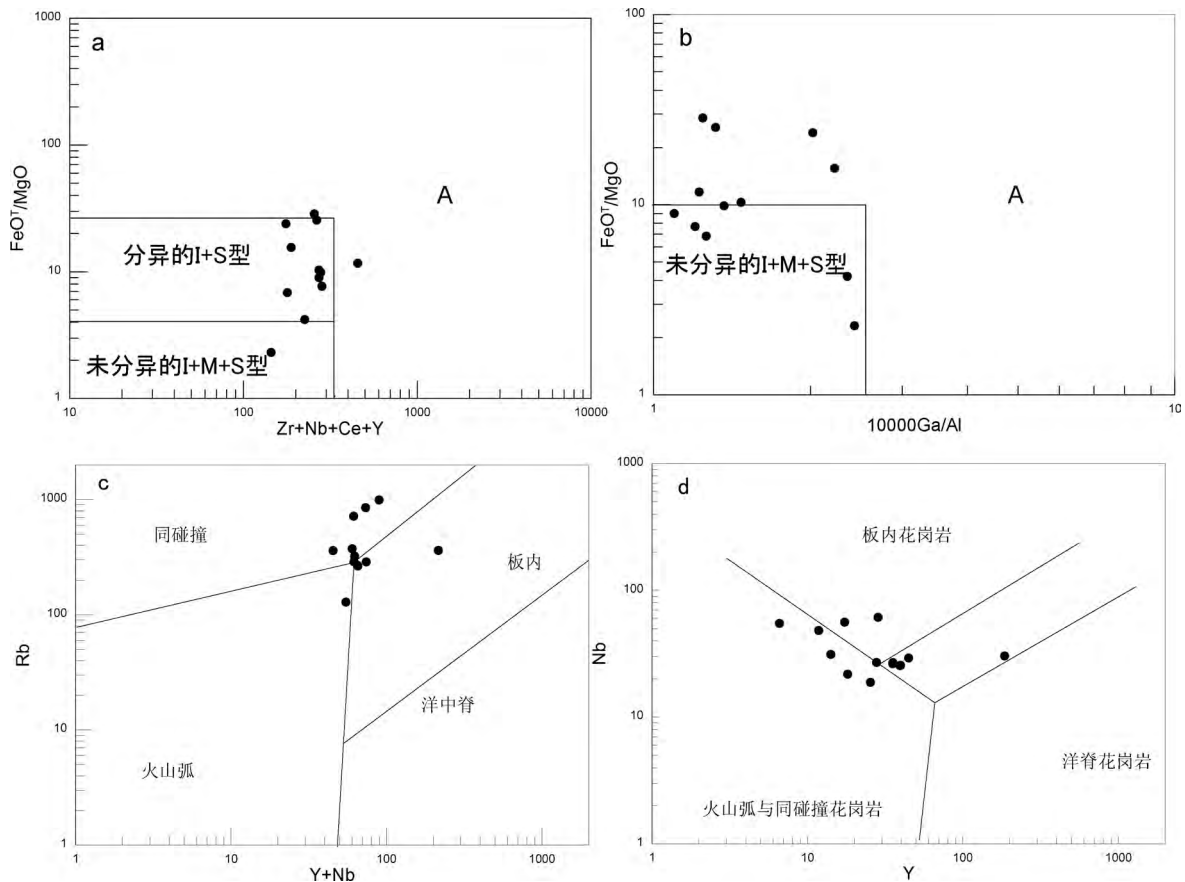


图 7 花岗斑岩主量元素判别图解(a, b;底图据文献[32])及花岗斑岩构造环境判别图解(c, d;底图据文献[36])

期,由于古亚洲洋的俯冲作用,中亚造山带地区经历过显著的垂向地壳生长,新生地壳物质来自于年轻的亏损地幔物质的部分熔融。部分 $\epsilon_{Nd}(t)$ 为零值的花岗岩中可能有少量古老陆壳物质的混染^[42-45]。白音查干花岗斑岩¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 为 0.282 967 5 ~ 0.283 078 9, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 9.67 ~ 14.27, 变化范围较窄,落在球粒陨石与亏损地幔之间(图 8),未表现出明显的岩浆混染过程。两阶段模式年龄为 $T_{DM2} = 127 \sim 749$ Ma,这与花岗斑岩中继承锆石 U-Pb 年龄一致(159.7~569.6 Ma)表明花岗斑岩源区为新生物质。锆石年龄和 Hf 同位素数据表明,白音查干花岗斑岩源岩最有可能来自新生下地壳物质的部分熔融,下地壳物质由古生代时期古亚洲洋俯冲过程中由亏损地幔物质转化而来的新生洋壳物质转化而来^[44,46]。花岗斑岩中获得两个前寒武纪年龄数据,896.5 Ma 和 1127.6 Ma,表明其源区可能有极少量的古老陆壳物质的混染。

在古生代,兴蒙造山带地区主要受古太平洋构

造域控制,在大约 250 Ma,古亚洲洋闭合。中生代,大兴安岭南段经历鄂霍茨克洋和古太平洋构造活动的改造和叠加。在早侏罗世(185~180 Ma),鄂霍茨克洋向南俯冲,兴蒙造山带西部发育钙碱性岛弧岩浆岩;在中侏罗世(170~165 Ma),鄂霍茨克洋闭合,大兴安岭西坡一带发生地壳增厚并逐渐进入后造山伸展环境^[47]。中侏罗世,古太平洋板块向 NE 方向的快速俯冲加速了地壳加厚过程,造成岩浆上涌并造成了局部加厚下地壳的拆沉。在侏罗世末期一早白垩世,太平洋板块俯冲方向发生改变,导致大兴安岭地区由挤压变为伸展,加厚下地壳发生拆沉,软流圈物质上涌,形成大量中生代岩浆岩侵入^[48]。白音查干花岗斑岩形成时代为 141 Ma,此时大兴安岭地区进入后造山环境,花岗斑岩的形成应该与拉张背景下,软流圈物质的上涌造成的下地壳物质的部分熔融有关。在 Y+Nb-Rb 和 Y-Nb 构造判别图解中(图 7c, d),白音查干花岗斑岩落在板内花岗岩和同碰撞花岗岩的混合区域。白音查干矿区距离北西侧

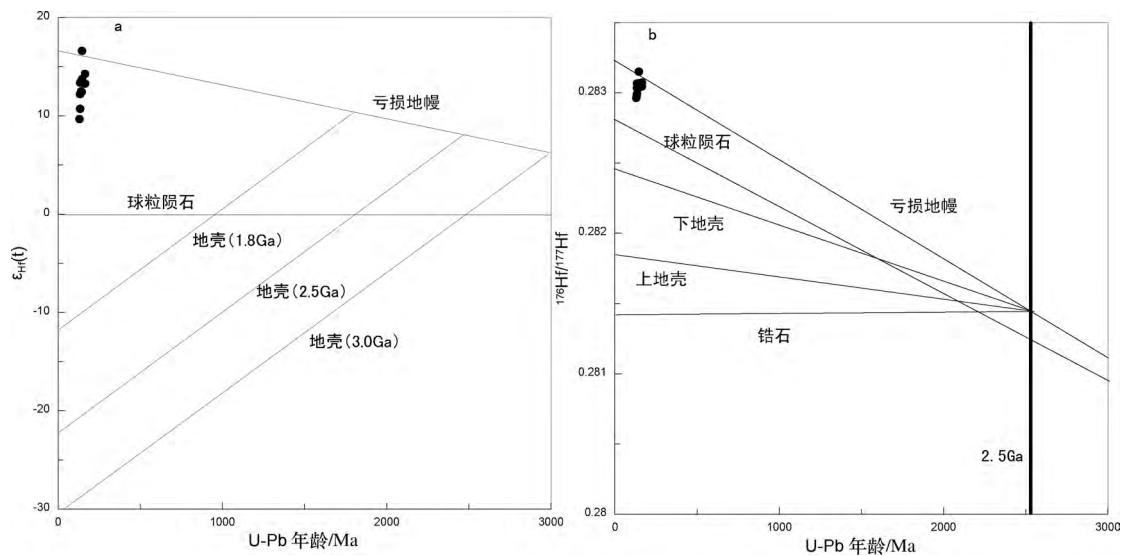


图8 白音查干花岗岩锆石 Hf 同位素特征(底图据文献[24])

二连—贺根山断裂仅二十余千米,在花岗斑岩母岩浆侵位过程中,捕获了周边部分俯冲带俯冲过程中物质,使得花岗斑岩中显示部分同碰撞地球化学性质,落在分界线处。

4 结论

(1) 白音查干锡多金属矿床成矿地质体为花岗斑岩,岩体发生大规模电气石化、萤石化、云英岩化、闪锌矿化、黄铁矿化蚀变。3个花岗斑岩样品锆石 LA-ICPMS U-Pb 加权平均年龄 (141.4 ± 4.6) Ma,成岩与成矿时间一致,该矿床锡多金属矿化发生于早白垩世。

(2) 花岗斑岩经历过强烈的结晶分异演化,高 SiO_2 、F,富集 Rb、K 等大离子亲石元素和 Zr、Hf、Th、U 等高场强元素,亏损 Ba、Sr、Ti,具有高的 Rb/Sr 比值和低的 Zr/Hf 和 Nb/Ta,富集 Cu、Pb、Zn、Sn、Ag 等金属元素。在球粒陨石标准化稀土配分图解中具有显著的负 Eu 异常和四分组效应,具有 A 型花岗岩的地球化学特征。

(3) 白音查干花岗斑岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 为 $0.282\ 967\ 5 \sim 0.283\ 078\ 9$,具有正的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($9.67 \sim 14.27$) 和年轻的 Hf 模式年龄 ($T_{\text{DM}2}(\text{Ma}) = 127 \sim 749 \text{ Ma}$),其源岩为生宙古亚洲洋俯冲过程中亏损地幔转化而成的新生地壳物质。花岗斑岩的形成与早白垩世太平洋板块俯冲完成后的拉张背景下,软流圈物质上涌造成的新生洋壳物质转化而成的下地壳物质部分熔融

有关。

致谢 感谢银漫矿业领导和技术人员对外野工作的支持和指导;感谢核工业北京地质研究所老师、西北大学大陆动力学国家重点实验室老师、中国科学院地质与地球物理研究所扫描电镜实验室老师在实验中给予的帮助;感谢多位老师和审稿人在稿件审理中对文章提出的修改意见和建议。

参考文献

- [1] E J Cobbing, D I J Mallick, P E J Pitfield, et al. The granites of the South-East Asian tin belt [J]. *Journal of the Geological Society*, 1992, 143(3): 537-550.
- [2] C A Heinrich. The chemistry of hydrothermal tin (-tungsten) ore deposition [J]. *Economic Geology*, 1990, 85(3): 457-48.
- [3] Y Liu, S Jiang, L Bagas. The genesis of metal zonation in the Weilasituo and Bairendaba Ag-Zn-Pb-Cu-(Sn-W) deposits in the shallow part of a porphyry Sn-polymetal system, Inner Mongolia, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 75 (Part 2): 150-173.
- [4] Wang Fengxiang, Bagas Leon, Jiang Sihong, et al. Geological, geochemical, and geochronological characteristics of Weilasituo Sn-polymetal deposit, Inner Mongolia, China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 80: 1206-1229.
- [5] R Q Zhang, J J Lu, R C Wang, et al. Constraints of in situ zircon and cassiterite U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ages on multiple generations of granitic magmatism and related W-Sn mineralization in the Wangxianling area, Nanling Range, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(4): 1021-1042.

- [6] S Dewaele, F Henjes-Kunst, F Melcher, et al. Late Neoproterozoic overprinting of the cassiterite and columbite-tantalite bearing pegmatites of the Gatumba area, Rwanda (Central Africa) [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2011, 61(1):10-26.
- [7] 张连昌, 吴华英, 相鹏, 等. 中生代复杂构造体系的成矿过程与成矿作用-以华北大陆北缘西拉木伦铅铜多金属成矿带为例 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(05):1351-1362.
- [8] K Breiter, H J Förster, R Seltmann. Variscan silicic magmatism and related tin-tungsten mineralization in the Erzgebirge-Slavkovsky les metallogenic province [J]. *Mineralium Deposita*, 1999, 34(5-6):505-521.
- [9] R Q Zhang, J J Lu, R C Wang, et al. Constraints of in situ zircon and cassiterite U-Pb, molybdenite Re-Os and muscovite $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ ages on multiple generations of granitic magmatism and related W-Sn mineralization in the Wangxianling area, Nanling Range, South China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 65(4):1021-1042.
- [10] 章荣清, 陆建军, 王汝成, 等. 湘南王仙岭地区中生代含钨与含锡花岗岩的岩石成因及其成矿差异机制 [J]. *地球化学*, 2016, 45(2):105-132.
- [11] J B Wang, Y W Wang, L J Wang, et al. Tin-polymetallic mineralization in the southern part of the Da Hinggan Mountains, China [J]. *Resource Geology*, 2001, 51(4):283-291.
- [12] 王京彬, 王玉往, 王莉娟. 大兴安岭南段锡多金属成矿系列 [J]. *地质与勘探*, 2005, 41(6):15-20.
- [13] 周振华. 内蒙古黄岗锡铁矿床地质与地球化学 [D]. 北京: 中国地质科学院, 2011:1-182.
- [14] 祝新友, 张志辉, 付旭, 等. 内蒙古赤峰维拉斯托大型锡多金属矿的地质地球化学特征 [J]. *中国地质*, 2016, 43(1):188-208.
- [15] 王喜龙, 刘家军, 翟德高, 等. 内蒙古边家大院矿区石英斑岩 U-Pb 年代学、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*, 2014, 33(5):654-665.
- [16] 江思宏, 梁清玲, 刘翼飞, 等. 内蒙古大井矿区及外围岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及其对成矿时间的约束 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(2):495-513.
- [17] 聂凤军, 温银维, 赵元艺, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿化区地质特征及找矿方向 [J]. *矿床地质*, 2007, 26(2):213-220.
- [18] 白海玲, 肖渊甫, 王良果, 等. 内蒙古白音查干锌-铁-铅-铜多金属矿床地质条件分析 [J]. *高校地质学报*, 2013, 19(增刊):250-251.
- [19] 徐仁廷, 温银维, 刘华忠, 等. 内蒙古白音查干银多金属矿床原生晕评价指标研究 [J]. *物探化探计算技术*, 2014, 36(6):715-722.
- [20] 赵战锋. 内蒙古白音查干多金属矿金属元素时空分布规律研究 [J]. *中国矿山工程*, 2016, 45(3):1-6.
- [21] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geol Soc London Spec Pub*, 1989, 42(1):313-345.
- [22] Y Amelin, D C Lee, A N Halliday, et al. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons [J]. *Nature*, 1999, 399(6733):1497-1503.
- [23] Y Amelin, A N Halliday, D C Lee. Early-middle archaean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2000, 64(24):4205-4225.
- [24] J D Vervoort, P J Patchett, G E Gehrels, et al. Constraints on early Earth differentiation from hafnium and neodymium isotopes [J]. *Nature*, 1996, 379(6566):624-627.
- [25] Robb L. Introduction to ore-forming processes [M]. Blackwell Publishing, 2004, 41(7):735-736.
- [26] Strong D F. A review and model for granite-related mineral deposits [J]. *Recent Advances in the Geology of Granite-related Mineral Deposits Canadian Institute of Mining Metallurgy, Special Volume*, 1988, (39):424-445.
- [27] 常勇, 赖勇. 内蒙古银都银铅锌多金属矿床成矿流体特征及成矿年代学研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, (4):581-593.
- [28] 潘小菲, 郭利军, 王硕, 等. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 Ar/Ar 年龄探讨 [J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(5):473-479.
- [29] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(6):1217-1238.
- [30] B M Jahn, F Wu, R Capdevila, et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [J]. *Lithos*, 2001, 59(4):171-198.
- [31] J B Whalen, K L Currie, B W Chappell. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 1987, 95(4):407-419.
- [32] B W Chappell, A J R White. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1992, 83(1-2):1-26.
- [33] P L King, B W Chappell, C M Allen, et al. Are A-type granites the high-temperature felsic granites? Evidence from fractionated granites of the Wangrah Suite [J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2001, 48(4):501-514.
- [34] W Irber. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1999, 63(3-4):489-508.
- [35] G P Zraisky, A M Aksyuk, V N Devyatova, et al. The Zr/Hf ratio as a fractionation indicator of rare-metal granites [J]. *Petrology*, 2009, 17(1):25.
- [36] Pearce J. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19(4):120-125.
- [37] B Bonin. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects [J]. *Lithos*, 2007, 97(1-2):1-

- 29.
- [38] P L King, A J R White, B W Chappell, et al. Characterization and Origin of Aluminous A-type Granites from the Lachlan Fold Belt, Southeastern Australia [J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38 (3): 371–391.
- [39] M J Defant, M S Drummond. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [40] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185–220.
- [41] 邵济安. 大兴安岭的隆起与地球动力学背景[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1–250.
- [42] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. The nature of basement beneath the Songliao Basin in NE China: geochemical and isotopic constraints [J]. *Physics and Chemistry of the Earth A*, 2001, 26 (9): 793–803.
- [43] Wu F Y, Sun D Y, Li H M, et al. A-type granites in northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis [J]. *Chemical Geology*, 2002, 187(1): 143–173.
- [44] Wu F Y, Jahn B M, Wilde S A, et al. Highly fractionated I-type granites in NE China (I): geochronology and petrogenesis [J]. *Lithos*, 2003, 66(3): 241–273.
- [45] 洪大卫, 王涛, 童英. 中国花岗岩概述[J]. *地质论评*, 2007, 53(Supp.): 9–16.
- [46] 邵济安, 牟保磊, 朱慧忠, 等. 大兴安岭中南段中生代成矿物质的深部来源与背景[J]. *岩石学报*, 2010, 26(3): 649–656.
- [47] Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1), 1–30.
- [48] J H Zhang, S Gao, W C Ge, et al. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeastern China: Implications for subduction-induced delamination [J]. *Chemical Geology*, 2010, 276(3–4): 144–165.

Mineralization process of the Baiinchagan tin polymetallic deposit in Inner Mongolia II : chronology of ore-bearing porphyry, geochemical characteristics and geological implications of the granite porphyry

LIU Xin^{1,2}, LI Xue-gang³, ZHU Xin-you¹, SUN Ya-lin^{1,4},
JIANG Hao-yuan^{1,4}, JIANG Bin-bin¹, WANG Hai^{1,5}, CHENG Xi-yin¹

(1. *Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012*;

2. *State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002*;

3. *Chifeng Trading Center of Mining Rights, Chifeng 024005*;

4. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083*;

5. *Faculty of Land and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093*)

Abstract: The mineralized granite in the Baiinchagan tin polymetal deposit area is granite porphyry, which experienced through intense tourmalinization, fluoritization, greisenization, sphalerite and pyrite mineralization stage. The dating result of zircon U–Pb by LA–ICM–PS for three granite porphyry gave a weighted average of (141.2±4.6) Ma based on ²⁰⁶Pb/²³⁸U isotope measurement, which indicated the tin mineralization is related to the Late Cretaceous magmatic event. The granite porphyry is highly evolved and is characterized with high Si, F and metallic elements such as Cu, Pb, Zn, Sn and Ag. The granite porphyry is enriched in large ion lithophile elements of Rb, K and high field strength element Zr, Hf, Th, U, and has depletion of Ba, Sr, Ti elements, which resulted in a high Rb/Sr ratio and low Zr/Hf and Nb/Ta ratio. In the chondrite-normalized REE diagram, the granite porphyry has strong negative Eu anomalies and spectacular tetrad effect. All of geochemical characteristics indicate the Baiinchagan granite porphyry is A-type granite. The high $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (9.67~14.27) and young two stages of Hf model age (127~749 Ma) indicate the granite was derived from the part melting of the newborned lower crust, which was originated from depleted mantle, initiated by the upwelling and underplating of the asthenospheric material, which related to the extension after the subduction of the paleo-Pacific plate.

Key words: tin polymetal deposit, granitic porphyry, mineralized porphyry, Baiinchagan, southern segment of the Da Hinggan Mountains area