

内蒙古浩布高铅锌多金属矿床两种花岗岩地球化学特征及含矿性分析

颜晓华^{1,2}, 李进喜³, 李欢^{4*}, 朱大鹏⁵, 谢一鸣⁴, 蒋永芳^{1,2}

(1. 湖南继善高科技; 2. 湖南省深地资源电磁法勘探工程技术研究中心;

3. 河南省地质矿产勘查开发局第一地质勘查院;

4. 中南大学地球科学与信息物理学院, 中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室;

5. 拜罗伊特大学巴伐利亚地质研究所)

摘要:浩布高铅锌多金属矿床的矿床规模达到大型,与成矿有关的侵入岩主要是乌兰坝岩体,该岩体主要由二长花岗岩和石英二长岩组成。为研究乌兰坝岩体成因及其与成矿的相关性,分别对该两类岩石的主量元素、微量元素(包括稀土元素)进行了分析。结果显示:二长花岗岩和石英二长岩的 SiO_2 平均质量分数分别为73.85%、66.94%,均具高钾($w(\text{K}_2\text{O})=4.48\%$ 、 5.72%)、富铝($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=12.59\%$ 、 15.10%)特征,前者为高钾钙碱性岩类,后者为钾玄岩系列岩类,岩石分异指数(DI)分别为90.27~93.07及83.94~90.55。二者稀土元素球粒陨石标准化配分模式均符合A型花岗岩特征,富集大离子亲石元素、亏损高场强元素。石英二长岩具有更高的稀土元素含量,同时显示出较弱的Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.70\sim 0.96$);二长花岗岩的Eu负异常较强($\delta\text{Eu}=0.38\sim 0.56$),同时具有较低的La、Ce、Nd、Sm、Y、Yb、Lu等元素含量。二长花岗岩属于A1型花岗岩,而石英二长岩属于A2型花岗岩。结合区域地质背景,认为乌兰坝岩体形成于古太平洋板块向华北板块俯冲方向转变时期,区域伸展引起地幔物质的上涌和大量花岗岩浆的上升侵位,两种花岗岩主量元素、微量元素的差异与地幔物质的混入程度有直接关系。岩体变异系数和成矿系数的差异表明,二长花岗岩为主岩浆成矿期的产物,对Cu、Mo、Pb、W、Zn、Ag及Sn成矿有贡献;而石英二长岩促使了Cu、Bi、Ag和Sn的成矿。主成矿期及岩浆岩的确定对指导深部找矿和厘定矿床成因起到关键作用,同时也为区域花岗岩体成矿潜力的判断提供了重要依据。

关键词:浩布高;铅锌多金属矿床;二长花岗岩;石英二长岩;地球化学特征;含矿性

中图分类号:TD11 P579

文章编号:1001-1277(2025)02-0072-011

文献标志码:A

doi:10.11792/hj20250212

引言

浩布高铅锌多金属矿床是内蒙古东南部地区一大型矽卡岩型铅锌多金属矿床,前人对该矿床地质及地球化学特征、成矿过程和成矿规律等多方面进行了深入研究^[1-6],这些成果对解释浩布高铅锌多金属矿床的成因起到了重要的作用。

浩布高铅锌多金属矿区内岩浆岩广泛发育,主要侵入岩为乌兰坝岩体,位于矿区东南部,岩性主要为二长花岗岩和石英二长岩,其次为少量黑云母花岗岩和角闪二长花岗岩。其中,哪类岩浆岩类型与成矿关系最为密切仍具争议^[7-10]。本文选取乌兰坝

岩体二长花岗岩和石英二长岩为研究对象,通过对比分析这两种花岗岩的主量元素、微量元素(包括稀土元素)特征,结合成矿元素丰度、岩浆来源及演化特征,来判别浩布高铅锌多金属矿床的主要成矿岩浆事件,进而对矿区深部找矿及矿床成因的厘定提供有力支持。

1 矿区地质

浩布高铅锌多金属矿床行政区划隶属于内蒙古自治区赤峰市巴林左旗,成矿区带划分处于大兴安岭成矿带中南段、西拉木伦成矿带北段,大地构造位置位于中亚造山带东段。该矿床属于与早白垩世酸性

收稿日期:2024-06-28;修回日期:2024-08-29

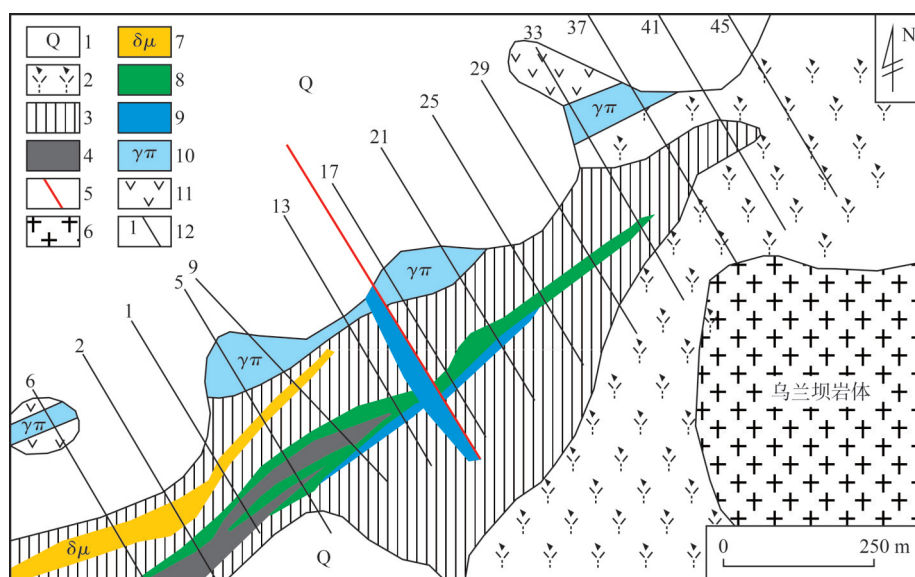
基金项目:国家自然科学基金重大研究计划资助项目(92162103);湖南省科技创新计划(2021RC4055,2022RC1182);湖南省自然科学基金项目(2022JJ30699,2023JJ10064)

作者简介:颜晓华(1979—),男,高级工程师,从事地球物理勘探、找矿勘探、矿山信息化等研究工作;E-mail:yanxh2005@126.com

*通信作者:李欢(1985—),男,教授,博士,从事与花岗岩有关的关键金属矿床成因及找矿预测研究工作;E-mail:lihuan@csu.edu.cn

岩浆岩活动有关的矽卡岩型矿床,发育有铅、锌多金属矿化。矿区内出露的地层主要有古生界下二叠统大石寨组(P_1d)、中生界上侏罗统满克头鄂博组(J_3m)和新生界第四系(Q)(见图1)。其中,大石寨组中段(P_1d^2)为矿体的赋矿层位,岩性主要为泥质、粉砂质板岩夹大理岩、变质砂岩^[11-12]。矿区内以北东向为主的成矿前及成矿期断裂为含矿热液的运移和富集提供了通道和场所,也是导矿、容矿构造^[13-14]。矿区出露的侵入岩主要为燕山晚期的2个花岗岩体,分别为矿

区西北部的乌兰楚鲁特岩体(黑云母钾长花岗岩和花岗斑岩)和东南部的乌兰坝岩体(主要为石英二长岩和二长花岗岩,其次为少量黑云母花岗岩和角闪二长花岗岩)^[15-20]。从矿体产出位置来看,铅锌矿体位于乌兰坝岩体与下二叠统大石寨组大理岩接触带上,因此矿区与成矿有关的岩体是乌兰坝岩体,该岩体呈岩基产出,在矿化带北东端直接与含大理岩的粉砂岩、泥质板岩接触,使围岩发生角闪岩化及矽卡岩化,矿区内的矿体都产于该岩体内外接触带中。



1—第四系 2—满克头鄂博组 3—大石寨组砂岩、粉砂岩、板岩 4—大石寨组大理岩 5—断裂 6—乌兰坝岩体
7—闪长玢岩 8—矿体 9—砂卡岩 10—花岗斑岩 11—安山岩 12—勘探线及编号

图1 浩布高铅锌多金属矿区地质图

Fig. 1 Geological map of the Haobugao Pb-Zn polymetallic district

二长花岗岩具有中粗粒花岗结构,块状构造。其矿物成分主要为不规则板状条纹长石(具卡氏双晶,钠长石条纹主晶以中正长石为主,还有少量低微斜长石)、板柱状斜长石(具聚片双晶,有的具环带构造,被条纹长石交代)和他形粒状石英,其次为棕褐色片状黑云母和金属矿物、锆石、磷灰石等。

石英二长岩具有少斑结构、基质半自形粒状结构,斑晶由斜长石、条纹长石组成,粒度0.2~4 mm;基质主要由斜长石、钾长石、黑云母、石英、金属矿物等组成,粒度0.05~0.15 mm。

2 样品及分析测试方法

本次共采集岩石硅酸盐全分析样品8件(二长花岗岩和石英二长岩各4件),稀土元素和微量元素测试样品16件(二长花岗岩和石英二长岩各8件)。样品均采自基岩露头,样品新鲜、无蚀变,采集位置避开了矿区内的接触带、蚀变带、断裂破碎带等。测试工作在承德华勘五一四地矿测试研究院完成,测试方法为荧光光谱分析(XRF,主量元素)及等离子体质谱分

析(ICP-MS,微量元素)。主量元素分析测试精度为0.01%,稀土元素及微量元素分析测试精度为 0.01×10^{-6} 。相关地球化学数据处理及作图利用路远发教授开发的Geokit软件完成。

3 两类花岗岩地球化学特征

3.1 常量元素

二长花岗岩和石英二长岩主量元素分析结果见表1。

由表1可知:二长花岗岩的 SiO_2 质量分数为72.80%~75.10%,平均值为73.85%; K_2O 质量分数为4.30%~4.80%,平均值为4.48%; Na_2O 质量分数为3.51%~4.12%,平均值为3.93%;全碱(K_2O+Na_2O)平均质量分数为10.34%。因此,二长花岗岩具有高钾(K_2O 含量高于 Na_2O)、铝过饱和(Al_2O_3 质量分数为12.12%~12.97%,平均值为12.59%)的特征。

石英二长岩 SiO_2 质量分数为64.90%~68.70%,平均值为66.94%; K_2O 质量分数为5.33%~6.15%,平均值为5.72%; Na_2O 质量分数为4.40%~4.89%,平均

表1 二长花岗岩和石英二长岩主量元素分析结果

Table 1 Major elements analysis results of monzogranite and

元素	石英二长岩				二长花岗岩				%
	GS01	GS02	GS03	GS04	GS05	GS06	GS07	GS08	
SiO ₂	64.90	67.00	68.70	67.10	73.70	73.70	72.80	75.10	
Al ₂ O ₃	15.85	14.89	14.52	15.15	12.71	12.55	12.97	12.12	
CaO	1.56	0.97	1.13	0.97	0.54	0.64	0.38	0.27	
Fe ₂ O ₃	1.97	2.27	1.55	0.53	1.07	1.18	0.81	1.04	
FeO	3.00	2.04	2.15	3.41	1.69	1.74	2.40	1.85	
P ₂ O ₅	0.15	0.10	0.06	0.07	0.09	0.07	0.09	0.04	
MgO	0.52	0.28	0.31	0.31	0.47	0.42	0.34	0.23	
Na ₂ O	4.40	4.63	4.56	4.89	3.98	4.12	4.12	3.51	
MnO	0.08	0.07	0.07	0.06	0.14	0.15	0.19	0.16	
TiO ₂	0.53	0.43	0.32	0.34	0.27	0.32	0.32	0.16	
K ₂ O	5.33	5.61	5.80	6.15	4.39	4.30	4.42	4.80	
H ₂ O	0.22	0.26	0.24	0.21	0.20	0.28	0.19	0.24	
烧失量	1.14	1.30	0.43	0.58	1.10	0.95	1.08	0.61	
总量	99.70	99.80	99.90	99.70	100.40	100.40	100.10	100.20	

值为4.62 %;全碱(K₂O+Na₂O)平均质量分数为8.41 %。石英二长岩亦具有高钾(K₂O含量高于Na₂O)、铝过饱和(Al₂O₃质量分数为14.52 %~15.85 %,平均值

为15.10 %))的特点。

在TAS图解(见图2)中,二长花岗岩样品投在花岗岩区域,而石英二长岩样品落入石英二长岩范围。在w(SiO₂)-w(K₂O)图解(见图3-a))中,二长花岗岩属于高钾钙碱性系列岩石,而石英二长岩属于钾玄岩系列岩石。此外,这2种花岗岩均属于碱性岩(见图3-b))。

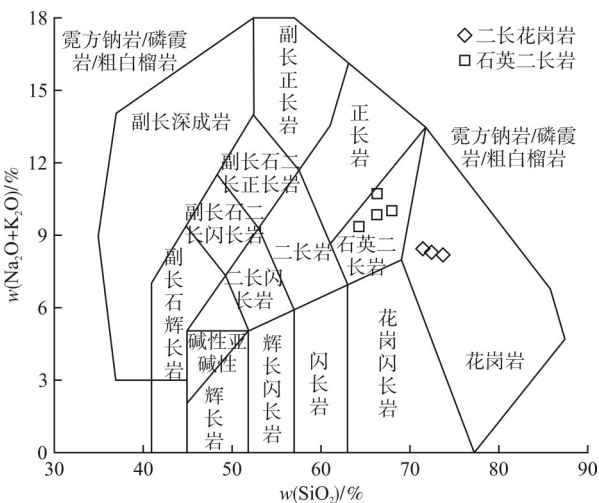


图2 二长花岗岩和石英二长岩TAS图解

Fig. 2 TAS diagram of monzogranite and quartz monzonite

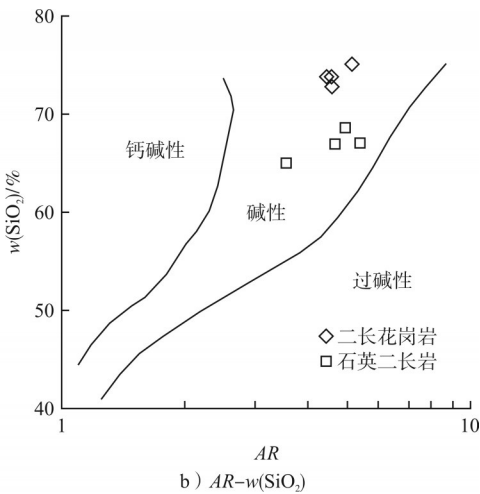
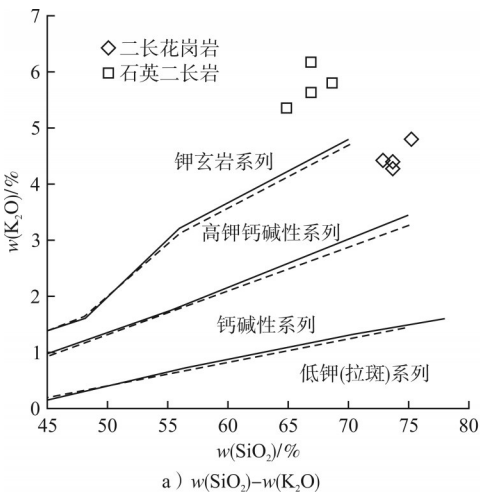


图3 二长花岗岩和石英二长岩岩性判别图解

Fig. 3 Lithological discrimination diagram of monzogranite and quartz monzonite

二长花岗岩和石英二长岩CIPW标准矿物计算结果见表2。由表2可知:二长花岗岩石英质量分数为29.59 %~34.61 %,钙长石质量分数为1.09 %~2.10 %,钠长石质量分数为29.90 %~35.23 %,正长石质量分数为25.61 %~28.56 %;石英二长岩石英质量分数为11.10 %~17.09 %,钙长石质量分数为1.24 %~6.87 %,钠长石质量分数为37.86 %~41.81 %,正长石质量分数为32.03 %~36.73 %。二长花岗岩和石英二长岩碱度率(AR)分别为4.43~5.07和3.53~5.35,里特曼指数分别为2.14~2.43和4.15~5.02。

相比之下,石英二长岩的SiO₂质量分数明显较低,为64.94 %~68.72 %,平均值为66.9 %。与全国花岗岩的平均值相比,两类花岗岩具有更高的SiO₂、Fe₂O₃、Na₂O和K₂O含量,而相对亏损TiO₂、CaO、MgO和P₂O₅。此外,二长花岗岩中相对于全国花岗岩平均值是富MnO贫FeO的,而在石英二长岩中则相反。二长花岗岩和石英二长岩均具有SiO₂饱和、高碱性及含钙低的特征。前者的分异指数(DI)较高,为91.27~93.07,而后者则相对较低(83.94~90.55);而2种花岗岩的固结指数(SI)则分别为2.01~4.05和

表2 二长花岗岩和石英二长岩 CIPW 标准矿物计算结果

矿物及参数	石英二长岩				二长花岗岩			
	GS01	GS02	GS03	GS04	GS05	GS06	GS07	GS08
石英(Q)	14.05	16.15	17.09	11.10	31.52	30.85	29.59	34.61
钙长石(An)	6.87	3.33	2.04	1.24	2.10	2.71	1.31	1.09
钠长石(Ab)	37.86	39.86	38.90	41.81	34.00	35.14	35.26	29.90
正长石(Or)	32.03	33.73	34.56	36.73	26.19	25.61	26.42	28.56
刚玉(C)	0.37	0	0	0	0.65	0.13	0.95	0.76
透辉石(Di)	0	0.76	2.75	2.76	0	0	0	0
紫苏辉石(Hy)	4.53	1.89	1.65	4.76	3.24	3.04	4.46	3.17
钛铁矿(Il)	1.02	0.83	0.61	0.65	0.52	0.61	0.61	0.31
磁铁矿(Mt)	2.90	3.19	2.27	0.78	1.57	1.72	1.19	1.52
磷灰石(Ap)	0.35	0.24	0.14	0.16	0.21	0.17	0.21	0.09
合计	99.99	99.99	100.01	99.99	100.00	99.98	100.00	100.01
分异指数(DI)	83.94	89.74	90.55	89.64	91.71	91.6	91.27	93.07
密度/(g·cm ⁻³)	2.71	2.68	2.68	2.68	2.67	2.67	2.68	2.67
液相密度/(g·cm ⁻³)	2.44	2.41	2.41	2.42	2.38	2.38	2.39	2.38
干黏度/(Pa·s)	6.73	7.40	7.77	7.16	10.04	9.93	9.68	10.68
湿黏度/(Pa·s)	5.54	5.88	6.07	5.73	7.12	7.06	6.97	7.36
液相线温度/℃	919	880	860	887	766	768	780	743
H ₂ O 质量分数/%	2.52	2.93	3.15	2.86	4.20	4.18	4.05	4.46
铝饱和度(A/CNK)	1.000	0.964	0.917	0.920	1.035	0.996	1.059	1.058
里特曼指数(σ)	4.25	4.31	4.15	5.02	2.27	2.30	2.43	2.14
固结指数(SI)	3.42	1.89	2.16	2.03	4.05	3.57	2.81	2.01
碱度率(AR)	3.53	4.64	4.92	5.35	4.43	4.53	4.55	5.07

1.89 ~ 3.42。这两种指数均表明,这两类花岗岩都经历了较强的分异作用。

两种花岗岩样品的 SiO₂ 与 Al₂O₃、TiO₂、TFeO 和

P₂O₅ 均呈现出明显的负相关关系(见图4),体现了两种花岗岩在分离结晶过程中逐步沉淀出长石、单斜辉石、磷灰石及钛铁矿等矿物^[21-25]。

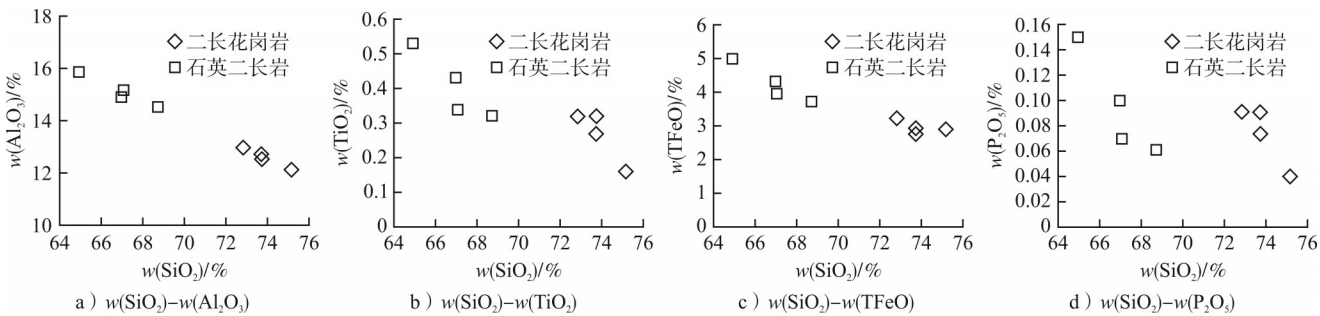


图4 二长花岗岩和石英二长岩 Harker 图解

Fig. 4 Harker diagram of monzogranite and quartz monzonite

3.2 微量元素

二长花岗岩和石英二长岩微量元素分析结果见表3。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图见图5-a)。由表3、图5-a)可知:二长花岗岩富集大离子亲石元素(LILE),但亏损高场强元素(HFSE),具有较高的Rb(173×10⁻⁶ ~ 290×10⁻⁶)和Y(13×10⁻⁶ ~ 16×10⁻⁶),而强烈亏损Ba、P、Ti及Sr,且具有较高的w(Sr)/w(Y)值(2.22 ~ 7.20),与岛弧花岗岩的地球化学特征相似。

石英二长岩同样富集大离子亲石元素(LILE),亏损高场强元素(HFSE),富集Rb和Y,亏损Sr。与二长花岗岩相比,石英二长岩具有更高的La(58×10⁻⁶ ~ 79×10⁻⁶)、Ce(92×10⁻⁶ ~ 153×10⁻⁶)、Nd(43×10⁻⁶ ~ 55×10⁻⁶)、Sm(7.2×10⁻⁶ ~ 9.1×10⁻⁶)、Y(28×10⁻⁶ ~ 39×10⁻⁶)、Yb(3.6×10⁻⁶ ~ 5.1×10⁻⁶)和Lu(0.6×10⁻⁶ ~ 0.8×10⁻⁶)。

总之,两类花岗岩均具有富集Ra、Th、U、Nd,贫Ba、Sr、P、Ti的特征,二长花岗岩相比石英二长岩,其

表3 二长花岗岩和石英二长岩微量元素分析结果
Table 3 Trace element analysis results of monzogranite and quartz monzonite $\times 10^{-6}$

元素	石英二长岩								二长花岗岩							
	WL01	WL02	WL03	WL04	WL05	WL06	WL07	WL08	WL09	WL10	WL11	WL12	WL13	WL14	WL15	WL16
Be	4.6	4.4	4.4	4.7	4.2	3.7	5.6	3.1	4.0	4.2	4.4	4.1	3.4	4.5	3.3	2.4
Co	1.0	1.1	1.8	1.6	1.4	1.6	1.8	1.6	1.8	1.9	1.8	1.8	1.1	2.2	1.7	1.7
Cr	28	28	28	27	24	22	23	24	30	29	32	25	25	27	27	26
Cu	5	5	7	6	6	4	39	18	24	26	9	12	7	13	14	15
Li	30	31	28	28	38	45	34	31	27	32	30	26	22	25	18	16
Mn	200	191	208	204	207	141	224	166	224	287	236	273	255	320	314	186
Mo	1.0	2.0	1.9	2.0	2.4	1.8	0.7	0.9	0.7	1.0	2.8	2.0	0.8	0.8	1.2	1.7
Ni	2.8	3.5	3.7	2.9	4.2	2.9	6.6	4.9	6.1	8.5	5.3	7.6	2.9	5.2	3.8	3.1
Pb	17	17	39	25	22	14	35	35	47	26	32	27	22	19	21	12
Ti	382	455	699	650	884	550	1 326	1 040	1 151	1 269	1 719	957	711	1 116	630	606
V	45	41	53	51	48	44	49	43	53	55	60	46	47	51	48	46
W	1.9	2.0	2.3	2.2	2.4	2.5	3.2	3.6	3.6	3.2	3.8	2.4	2.9	2.3	2.7	2.7
Zn	50	58	73	72	66	49	143	80	136	103	111	72	73	70	56	56
Sb	2.1	2.1	2.3	2.0	2.6	2.2	0.6	0.7	1.0	0.7	0.5	0.4	0.3	0.6	0.6	0.7
Bi	0.54	0.48	0.82	0.67	0.68	0.57	2.55	2.31	6.08	9.37	1.38	3.81	1.23	0.30	0.23	0.25
P	86	84	98	106	115	92	104	93	100	150	154	89	46	185	56	57
Sc	3.7	3.3	3.5	3.6	3.5	3.3	5.0	3.7	4.6	4.6	4.6	4.3	1.7	3.5	1.4	1.3
Ga	9.9	9.8	9.3	8.7	9.2	9.6	13.7	11.1	11.4	9.7	13.8	8.8	8.4	12.0	7.8	7.6
Rb	237	227	181	183	273	177	274	183	241	173	206	176	290	184	183	179
Sr	30	32	51	33	39	31	102	71	76	72	102	48	42	77	36	31
Zr	185	185	156	161	186	166	188	196	197	237	223	188	244	276	252	252
Nb	8.1	9.2	13.2	12.5	15.4	10.0	21.4	13.9	17.7	16.5	16.4	20.3	23.1	17.8	19.7	18.9
Te	0.025	0.045	0.040	0.035	0.047	0.043	0.053	0.043	0.057	0.069	0.052	0.041	0.034	0.049	0.046	0.036
Ba	188	183	140	122	192	168	341	363	304	236	466	173	64	335	78	90
Hf	5.71	5.64	4.51	5.33	6.95	5.20	5.61	5.69	6.19	6.74	6.25	6.37	6.54	7.25	7.67	8.12
Ta	1.0	1.2	1.5	1.5	1.6	1.1	2.4	1.6	2.1	1.7	1.6	2.6	2.1	1.6	1.7	1.7
Th	21	19	21	20	20	19	26	20	25	21	18	25	22	20	22	20
U	6.3	6.2	7.5	7.0	6.9	6.1	6.6	5.3	6.3	4.7	5.7	5.2	3.4	4.3	3.5	3.3
As	10.4	11.9	25.5	28.5	15.5	13.1	28.5	13.1	19.3	24.4	4.2	24.6	2.2	13.4	13.8	15.2
Hg	0.016	0.033	0.020	0.064	0.025	0.027	0.027	0.042	0.033	0.027	0.017	0.033	0.022	0.022	0.028	0.032
Au ¹⁾	0.4	1.5	0.8	1.0	0.8	0.9	0.5	4.8	0.4	0.7	1.6	0.7	0.2	0.7	0.7	0.6
Ag	0.15	0.15	0.16	0.24	0.16	0.19	0.07	0.10	0.07	0.07	0.03	0.04	0.06	0.07	0.08	0.11
Sn	6.1	6.3	5.2	5.6	4.9	6.2	9.7	5.3	7.4	7.7	5.5	9.4	6.7	11.9	10.9	6.2
B	10.6	14.0	10.2	11.0	11.7	12.5	4.0	3.6	5.5	3.0	3.6	2.0	1.8	1.0	1.3	1.1
F	293	319	293	334	293	334	564	215	348	306	473	415	733	189	159	133
Cl	20.0	27.0	20.0	20.0	29.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	26.0	20.0	20.0	20.0
Se	<0.03	<0.03	0.04	<0.03	<0.03	<0.03	0.07	0.05	0.06	0.10	<0.03	<0.03	0.04	0.04	<0.03	<0.03
Y	30	28	33	28	39	34	30	36	16	15	14	15	16	15	13	14

注:1) $w(\text{Au})\times 10^{-9}$ 。

La、Ce、Nd、Sm、Y、Yb、Lu 含量明显较多。

3.3 稀土元素

二长花岗岩和石英二长岩稀土元素分析结果见表4。

由表4可知:二长花岗岩的稀土元素(REE)质

量分数为 $79\times 10^{-6}\sim 98\times 10^{-6}$,平均值为 88×10^{-6} ; $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Yb})_{\text{N}}$ 和 $w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$ 值分别为6.0~8.1和6.7~7.8,表明二长花岗岩轻稀土元素、重稀土元素分异较强。此外, $w(\text{La})_{\text{N}}/w(\text{Sm})_{\text{N}}$ 值为3.5, $w(\text{Gd})_{\text{N}}/$

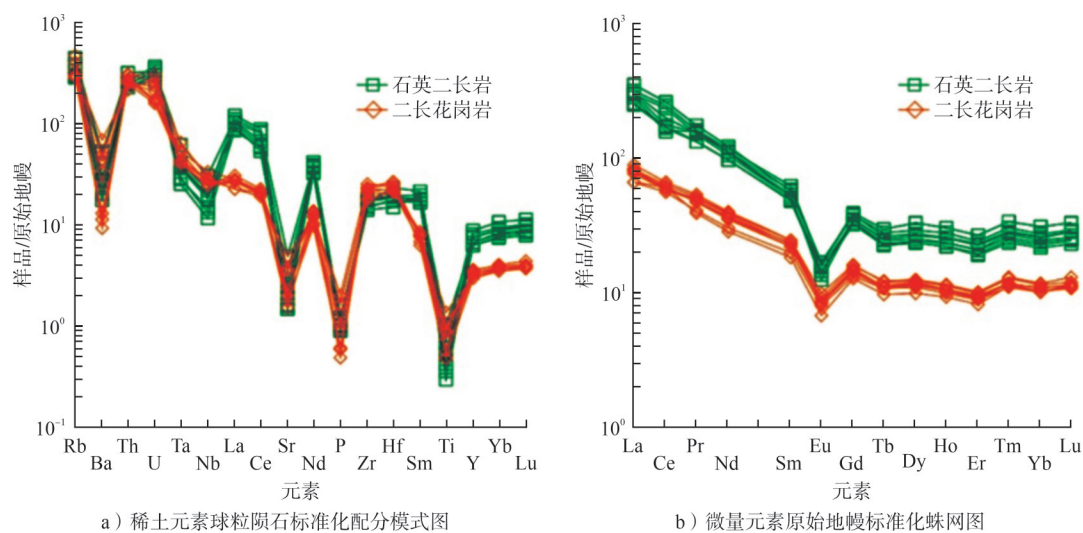


图 5 二长花岗岩和石英二长岩微量元素与稀土元素图解

Fig. 5 Trace and rare earth element diagrams of monzogranite and quartz monzonite

$w(\text{Yb})_N$ 平均值为 1.4, 说明二长花岗岩的轻稀土元素也发生了一定分馏作用。稀土元素标准化曲线呈右倾的“V”字形(见图 5-b)), 轻稀土元素部分较为陡峭而重稀土元素部分则平缓, 其 Eu 负异常较强 ($\delta\text{Eu}=0.38 \sim 0.56$)。

表 4 二长花岗岩和石英二长岩稀土元素分析结果

Table 4 Rare earth element analysis results of monzogranite and quartz monzonite $\times 10^{-6}$

元素	石英二长岩								二长花岗岩							
	XT01	XT02	XT03	XT04	XT05	XT06	XT07	XT08	XT09	XT10	XT11	XT12	XT13	XT14	XT15	XT16
La	58	69	79	58	65	67	73	67	20	19	18	15	19	18	15	18
Ce	102	116	153	99	92	138	144	103	39	35	35	33	37	36	36	36
Pr	12.3	14.2	16.2	12.3	14.6	13.8	14.7	14.4	5.0	4.7	4.5	3.7	4.7	4.4	3.6	4.4
Nd	43	49	55	44	52	47	50	51	18	17	16	14	18	16	13	16
Sm	7.3	7.6	8.5	7.2	9.2	7.5	7.9	8.6	3.7	3.4	3.5	3.0	3.7	3.3	2.7	3.3
Eu	0.9	0.8	0.9	0.8	0.9	0.8	0.7	0.9	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5
Gd	6.6	6.8	7.7	6.5	7.8	7.0	7.0	7.4	3.2	2.9	3.0	2.7	3.1	2.9	2.6	2.8
Tb	0.8	0.8	1.0	0.8	1.1	0.9	0.9	1.0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Dy	6.0	5.9	6.7	5.8	8.0	6.6	6.2	7.1	3.0	2.9	2.8	2.8	3.1	2.9	2.5	2.7
Ho	1.3	1.2	1.4	1.2	1.7	1.4	1.3	1.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
Er	3.3	3.1	3.7	3.2	4.3	3.6	3.3	3.9	1.6	1.5	1.4	1.5	1.6	1.5	1.3	1.4
Tm	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	0.7	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Yb	3.9	3.6	4.3	3.7	5.1	4.2	4.0	4.5	1.9	1.7	1.7	1.8	1.9	1.8	1.7	1.7
Lu	0.6	0.6	0.7	0.6	0.8	0.7	0.6	0.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
ΣREE	247	280	339	243	264	300	314	271	98	90	88	79	94	89	80	89
LREE	224	257	313	221	234	275	290	244	87	79	77	69	83	78	70	79
HREE	23.1	22.5	26.1	22.4	29.6	25.1	24.1	26.8	11.4	10.5	10.5	10.3	11.5	10.7	9.4	10.1
$w(\text{LREE})/w(\text{HREE})$	9.7	11.4	12.0	9.9	7.9	11.0	12.0	9.1	7.6	7.5	7.4	6.7	7.2	7.3	7.5	7.8
δEu	0.39	0.34	0.33	0.36	0.32	0.32	0.28	0.35	0.48	0.45	0.44	0.48	0.45	0.46	0.43	0.46
δCe	0.89	0.86	0.99	0.87	0.7	1.05	1.02	0.77	0.92	0.87	0.94	1.03	0.95	0.98	1.16	0.95

石英二长岩明显富集稀土元素, 其稀土元素质量分数为 $243 \times 10^{-6} \sim 339 \times 10^{-6}$ (平均值为 282×10^{-6}), 也经历了显著的轻稀土元素、重稀土元素分馏($w(\text{LREE})/w(\text{HREE})=7.9 \sim 12.1$, $w(\text{La})_N/w(\text{Yb})_N=9.2 \sim 13.9$)。石英二长岩 $w(\text{La})_N/w(\text{Sm})_N$ 和 $w(\text{Gd})_N/w(\text{Yb})_N$ 平均值分别为 5.4 和 1.4, 同样反映了其轻稀土元素具有一定的分馏作用。相比二长花岗岩, 石英二长岩的 Eu 负异常较弱 ($\delta\text{Eu}=0.70 \sim 0.96$), 其稀土元素球粒陨石标准化配分曲线也呈现相似的向右倾斜的平缓曲线。

4 讨论

4.1 大地构造背景

古生代,大兴安岭及邻区处于古亚洲洋活动板块边缘,经历过多次板块之间的碰撞造山作用和拼接缝合作用;中生代以来,又受到了古太平洋板块向华北克拉通俯冲碰撞作用影响^[21-22]。古太平洋板块俯冲导致了地幔物质上涌;直至白垩纪,其俯冲方向从西到北西转变,并进一步引发了下地壳物质的部分熔融,同时引起构造体制从挤压到拉张的转变,随后引

发下地壳大规模加厚和岩石圈的地幔拆沉^[23]。岩石圈的拆沉及随后上涌的软流圈地幔形成了深部的花岗质岩浆房,并在拉张的大地构造背景下促使了大量花岗质岩浆的上升侵入^[24]。这些岩浆从深部带来了大量的硫和其他金属成矿元素,为后期大规模的热液成矿作用提供了充足的成矿物质^[25-26]。从大地构造判别图解(见图6)来看,浩布高铅锌多金属矿床两类花岗岩样品均落入到同碰撞花岗岩、后碰撞花岗岩区域,说明它们应该是白垩纪从挤压到拉张的转变过程中酸性岩浆上涌的产物。

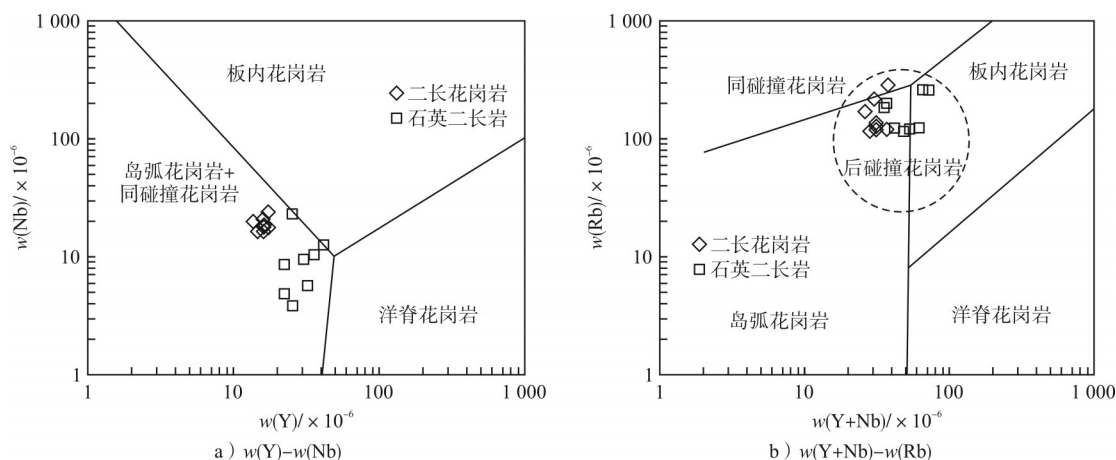


图6 二长花岗岩和石英二长岩大地构造判别图解(底图据文献[26])

Fig. 6 Geotectonic discrimination diagram of monzogranite and quartz monzonite

4.2 岩浆起源及演化过程

花岗岩的岩石特征可以提供岩浆演化方面的相关信息^[27],在相异的大地构造背景及造山作用先后阶段,不同来源花岗岩浆的地球化学特征和分异演化程度差异显著,这是控制不同成矿元素组合及最终成矿的一个关键因素^[17,28]。乌兰坝岩体二长花岗岩和石英二长岩均具有高硅、富碱、低钙、低镁的特征,平均铝饱和指数(A/CNK)分别为1.04和0.95,分异指数(DI)都较高,分别为91.91和88.47,指示前者属于高钾钙碱性系列,后者属于钾玄岩系列。两类花岗岩均以富 SiO_2 、 K_2O ,贫 Al_2O_3 为特征;且具有富硅和碱,富集大离子亲石元素Th、Zr、Hf、Rb、U及亏损Ba、Sr、Eu、P、Ba的特征,同时还有着丰富的稀土元素和“右倾海鸥型”稀土元素球粒陨石标准化配分模式,这与世界范围内的A型花岗岩特征相一致^[17,29-31]。此外,结合花岗岩类型判别图解(见图7),认为浩布高铅锌多金属矿床内侵位的二长花岗岩和石英二长岩均是典型的A型花岗岩。

A型花岗岩所具有的地球动力学和特殊的地球化学特征对于解释花岗岩的成因模式和其构造条件有着重要意义^[32]。在本研究中,二长花岗岩具有相对中等的 $w(Y)/w(Nb)$ 值(0.677~0.915)和 $w(Yb)/$

$w(Ta)$ 值(0.895~1.144),与A1型花岗岩(产于非造山大陆裂谷、地幔热柱或热点环境)特征一致,而石英二长岩则具有较高的 $w(Y)/w(Nb)$ 值(2.230~3.709)、 $w(Yb)/w(Ta)$ 值(2.536~3.798)和 $w(Ce)/w(Nb)$ 值(5.960~13.861),与A2型花岗岩(产于碰撞后造山期或非造山的构造背景)特征一致(见图7)。形成于相同构造背景的A型花岗岩显示A1和A2亚类共存的现象,认为是幔壳物质混入比例不同所致^[17,33]。EBY^[34]也指出,当岩浆与陆壳相互作用时,由于陆壳具有较高的 $w(Y)/w(Nb)$ 值和 $w(Yb)/w(Ta)$ 值,会使得图中的点由A1向A2区域移动。当花岗岩处于A1型和A2型过渡的位置时,表明其主要物质来源于部分熔融的地壳基底岩石并混入了部分上涌的地幔物质。因此,结合主微量元素及其配分图可得出,二长花岗岩和石英二长岩应属于不同期岩浆活动产物,但其微量元素所具有的差异可能是石英二长岩混入较多上涌的地幔物质的原因。

4.3 成矿模式

前人对于浩布高铅锌多金属矿床提出了不同的成矿模式。李剑锋^[35]认为,碰撞造山流体成矿模式(CMF模式)适用于浩布高铅锌多金属矿区及整个大兴安岭南段成矿带成矿过程的解释。王承洋^[36]测试

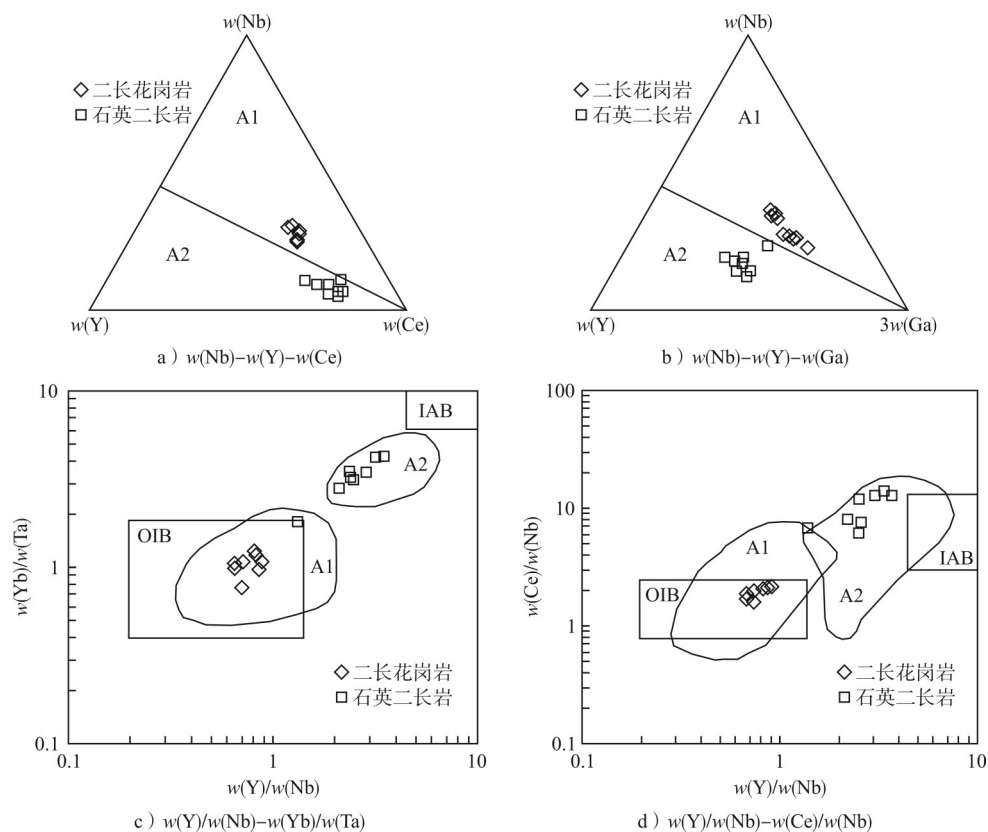


图7 二长花岗岩和石英二长岩花岗岩类型判别图解(底图据文献[34])

Fig. 7 Granite type discrimination diagram of monzogranite and quartz monzonite

了浩布高铅锌多金属矿床不同矿物中的多种类型包裹体,并划分出了4个成矿期次:早期矽卡岩阶段、磁铁矿-石英阶段、黄铁矿-方铅矿-闪锌矿-石英阶段和黄铜矿-方铅矿-方解石阶段。结合区域中生代成矿动力学环境,本文初步建立了浩布高铅锌多金属矿床的岩浆成矿模式:白垩纪时期,古太平洋板块向华北板块俯冲导致了下地壳岩石的部分熔融,与此同时俯冲方向从西到北西转变,引起构造体制从挤压到拉张的转变,这与A型花岗岩的形成背景即处于伸展构造中相吻合^[25]。当岩浆侵位到该地区的二叠系和侏罗系碳酸盐岩地层中后,释放出大量的热来活化萃取附近乃至远端地层的成矿元素,并且在岩体分异过程中会逐步分离出富集了Cu、Fe、Zn、Pb等元素的流体。这种流体沸腾的含矿气水热液,交代改造围岩地层为石榴子石矽卡岩(早期矽卡岩阶段)。当演化到中期氧化物阶段时,流体开始沉淀出磁铁矿。在晚期的石英-硫化物阶段,成矿流体除了均一温度和盐度明显降低之外,其成分也相对均一,可能是矽卡岩中含水矿物较多吸收流体中Cl⁻的结果;Cl⁻含量的降低会破坏Pb、Zn等成矿元素的运载平衡,进而导致这些元素的快速沉淀成矿^[37-39]。伴随着大气降水的加入,成矿流体温度进一步降低,研究区内Cu、Zn、Pb等中低温成矿元素及石英开始大量沉淀。综上所述,该区经历了最初岩浆上升侵位和成矿流体的逐步演化,最终形

成了浩布高矽卡岩型铅锌多金属矿床。

4.4 两类花岗岩控矿特征对比

与乌兰坝岩体中其他两类岩石(黑云母花岗岩、角闪二长斑岩)相比,石英二长岩SiO₂含量最低,而二长花岗岩SiO₂含量最高;各侵入体中的条纹长石含量由老到新逐渐增加;斜长石含量最低的是二长花岗岩,最高的是石英二长岩;角闪石在石英二长岩中含量相对较高,其他岩性中相对较低。从以上岩石矿物综合考虑,二长花岗岩的酸度最高,相反石英二长岩则是最低的。岩浆岩从老到新呈现出酸度增加,以及Fe、Mg、Ca氧化物减少的趋势。矿区内所有岩体均是高碱的($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})>8\%$),以石英二长岩最高。

二长花岗岩属酸度偏高的花岗岩类,有利于Mo、W、Bi、Sn的成矿。而石英二长岩混入较多的上涌地幔物质,导致含碱偏高。中-酸性过渡的花岗闪长岩类,对Cu、Pb、Zn多金属成矿有利,而对Mo、W、Bi、Sn成矿不利^[40]。二长花岗岩和石英二长岩成矿元素分析结果见表5。由表5可知:与中国花岗岩平均值进行比较^[41-46],矿区二长花岗岩中所有元素含量都偏高,Be、Cu、Mo、Pb、V、W、Zn、Bi、Ag、Sn的变异系数较大,反映出它们在岩体中的不均匀性,Cu、Mo、Pb、W、Zn、Ag、Sn容易富集成矿。与中国石英二长岩平均值相比,石英二长岩中Cu、Pb、W、Nb、Hf、Sn、Ge的变异系数较大,Cu、Sn容易富集成矿。

表5 二长花岗岩和石英二长岩成矿元素分析结果
Table 5 Ore-forming element analysis results of monzogranite and quartz monzonite

元素	参数	石英二长岩		二长花岗岩	
		w/×10 ⁻⁶	序数	w/×10 ⁻⁶	序数
Cu	平均值	35.5	1	32.4	2
	变异系数	72	3	110	1
Mo	平均值	0.2	4	1	1
	变异系数	7.7	4	450	1
Pb	平均值	23	3	43	1
	变异系数	192	1	149	2
W	平均值	0.6	4	2.9	1
	变异系数	323	1	102	4
Zn	平均值	31.2	2	87	1
	变异系数	40	3	355	1
Bi	平均值	2.1	4	7.8	1
	变异系数	11	3	388	1
As	平均值	29.8	1	29.3	2
	变异系数	5	4	88	1
Ag	平均值	0.21	4	0.34	3
	变异系数	24	4	217	1
Sn	平均值	6.9	2	24	1
	变异系数	62	3	265	1
总成矿系数		51		26	

注:变异系数=标准差/平均值;各元素成矿系数=平均值序数+变异系数序数。

两类花岗岩对应元素含量的差异达几倍至十几倍,岩体中某种元素的含量偏高,变异系数偏大,从某种程度上反映这次岩体对这种矿产成矿有利。为得出各岩体对成矿有利程度的总体概念,表5中各元素在各岩体中平均值序数和变异系数序数分别用1,2,3,4标出,然后分别统计各岩体各元素平均值序数与变异系数序数之和,即“成矿系数”,其数值越小,则成矿可能性越大,很明显可以看出,二长花岗岩是矿区内最有利的成矿岩体。

因此,矿区内最有利成矿的侵入岩是二长花岗岩,是大部分金属成矿元素(如Cu、Pb、Zn、Ag、Sn、W、Mo和Bi等)的主要来源;其次为石英二长岩,其促使了Cu、Bi、Ag和Sn的成矿。

5 结 论

1)浩布高铅锌多金属矿床属于与白垩世酸性岩浆活动有关的矽卡岩型矿床,成矿动力学背景是古太

平洋板块俯冲导致了地幔物质上涌;白垩纪,俯冲方向从西到北西转变,并进一步引发了下地壳物质的部分熔融,同时引起构造体制从挤压到拉张的转变,即产于陆壳伸展环境。

2)乌兰坝岩体二长花岗岩和石英二长岩均具有高钾、富铝的特征,前者属于高钾钙碱性系列岩石,后者属于钾玄岩系列岩石。二者均富集大离子亲石元素、亏损高场强元素,稀土元素球粒陨石标准化配分模式存在轻稀土元素、重稀土元素分异较强的特点,且均符合“右倾海鸥型”A型花岗岩的特征。

3)二长花岗岩和石英二长岩相比,SiO₂的含量明显较高,La、Ce、Nd、Sm、Y、Yb、Lu含量明显较多,同时岩石分异指数也相对较高,前者属于A1型花岗岩,而后者属于A2型花岗岩。引起主微量元素差异的原因可能是石英二长岩混入了较多的地幔物质。

4)二长花岗岩对Cu、Mo、Pb、W、Zn、Ag、Sn等元素的成矿起主导作用,为主成矿岩体;而石英二长岩促使了Cu、Bi、Ag和Sn的成矿。

[参 考 文 献]

[1] 王祥东.内蒙古林东地区银铅锌多金属矿床成矿作用[D].武汉:中国地质大学,2018.

[2] 于志强.内蒙古西乌旗乌兰坝地区地质、地球化学特征及找矿前景分析[D].北京:中国地质大学(北京),2019.

[3] 袁盛睿.内蒙古浩布高矽卡岩型Zn-Pb矿床岩石地球化学研究及其意义[D].北京:中国地质大学(北京),2020.

[4] 徐巧,唐果,邹滔,等.大兴安岭南段巴林左旗浩布高锡多金属矿田成矿系统与靶区预测[J].地质与勘探,2020,56(2):265-276.

[5] 张丰隆.内蒙古浩布高矽卡岩型铅锌多金属矿床地质特征和成矿年代学研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020.

[6] 曾庆文,戴香麟,董国臣,等.内蒙古浩布高铅锌矿床闪锌矿微量元素特征及其地质意义[J].岩石学报,2023,39(2):567-582.

[7] 孙晓峰.内蒙古乌兰坝和小罕山岩体年代学、地球化学特征及其地质意义[D].北京:中国地质大学(北京),2020.

[8] 周桐,孙珍军,于赫楠,等.内蒙古浩布高铅锌矿床小罕山岩体年代学、Hf同位素及地球化学特征[J].现代地质,2022,36(1):282-294.

[9] 胡涛.大兴安岭南段浩布高地区古生代—中生代花岗岩岩浆活动及其构造意义[D].三河:防灾科技学院,2023.

[10] 杨帆.大兴安岭中南段铅锌多金属矿床地球化学建模及定量预测[D].北京:中国地质大学(北京),2017.

[11] 齐锦超.内蒙古赤峰市浩布高铅锌多金属矿床地质特征及找矿预测[D].石家庄:河北地质大学,2018.

[12] 杜青松,李志华,鄂阿强,等.大兴安岭中南段夕卡岩型铅锌矿床地质特征及成因[J].矿产勘查,2017,8(3):366-373.

[13] 王莉娟,王京彬,王玉往,等.内蒙古东部与夕卡岩型矿床有关的花岗岩氧同位素特征——以浩布高矿床为例[J].地质论评,2004,50(5):513-560.

[14] 季斌.内蒙古浩布高地区多金属矿床综合信息找矿预测研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.

[15] 刘源,江思宏.内蒙古东部浩布高铅-铁矿床地质特征及成因[J].矿床地质,2014,33(增刊1):227-228.

- [16] 牛吉芳. 内蒙古浩布高铅锌铜矿床地质特征研究与成矿预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [17] LI H, PALINKAŠ L A, WATANABE K, et al. Petrogenesis of Jurassic A-type granites associated with Cu-Mo and W-Sn deposits in the central Nanling region, South China: Relation to mantle upwelling and intra-continental extension [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 449-462.
- [18] HU X, LI H, FÖRSTER M W, et al. Using apatite to differentiate metallogenic potential and environment of granitic rocks: A case study from the Tongshanling W-Sn-Cu-Pb-Zn ore field, Nanling Range (South China) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, 245: 107143.
- [19] BOYNTON W V. Geochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies [C]// HENDERSON P. Rare earth element geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63-114.
- [20] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42: 313-345.
- [21] WU J, LI H, XI X, et al. Geochemistry and geochronology of the mafic dikes in the Taipusi area, northern margin of North China Craton: Implications for Silurian tectonic evolution of the Central Asian Orogen [J]. *Journal of Earth System Science*, 2017, 126: 64.
- [22] LI H, SUN H, WU J, et al. Re-Os and U-Pb geochronology of the Shazigou Mo polymetallic ore field, Inner Mongolia: Implications for Permian-Triassic mineralization at the northern margin of the North China Craton [J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 83: 287-299.
- [23] CHEN Y, LI H, WANG W, et al. Tectonic transition during the Jurassic-Cretaceous in the Jiaodong Peninsula, North China: insights from asynchronous adakitic and A-type granitic plutons [J]. *International Geology Review*, 2024, 66(9): 1743-1764.
- [24] LI H, SUN H, EVANS N J, et al. Geochemistry and geochronology of zircons from granite-hosted gold mineralization in the Jiaodong Peninsula, North China: Implications for ore genesis [J]. *Ore Geology Reviews* 2019, 115: 103188.
- [25] CHEN Y, LI H, HALASSANE N, et al. Pyrite geochemistry reveals the key controlling factors of large gold deposit formation in Jiaodong Peninsula: A comparative study [J]. *Ore Geology Reviews*, 2024, 165: 105934.
- [26] PEARCE J A. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19: 120-125.
- [27] 任涛, 李欢. 与花岗岩有关的锡成矿研究进展 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 514-534.
- [28] VINCENT V I, LI H, GIREI M B, et al. Genesis and age of Pb-Zn mineralization from the Ningi-Burra ring complex, North Central Nigeria: Constraints from zircon morphology, U-Pb dating and Lu-Hf isotopes [J]. *Lithos*, 2021, 390/391: 106115.
- [29] LI H, WATANABE K, YONEZU K. Geochemistry of A-type granites in the Huangshaping polymetallic deposit (South Hunan, China): Implications for granite evolution and associated mineralization [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 88: 149-167.
- [30] LI H, WU J, EVANS N J, et al. Zircon geochronology and geochemistry of the Xianghualing A-type granitic rocks: Insights into multi-stage Sn-polymetallic mineralization in South China [J]. *Lithos*, 2018, 312/313: 1-20.
- [31] LI H, MYINT A Z, YONEZU K, et al. Geochemistry and U-Pb geochronology of the Wagone and Hermyingyi A-type granites, southern Myanmar: Implications for tectonic setting, magma evolution and Sn-W mineralization [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 95: 575-592.
- [32] GIREI M B, LI H, ALGEO T J, et al. Petrogenesis of A-type granites associated with Sn-Nb-Zn mineralization in Ririwai complex, north-central Nigeria: Constraints from whole-rock Sm-Nd and zircon Lu-Hf isotope systematics [J]. *Lithos*, 2019, 340/341: 49-70.
- [33] KONG H, LI H, WU Q, et al. Co-development of Jurassic I-type and A-type granites in southern Hunan, South China: Dual control by plate subduction and intraplate mantle upwelling [J]. *Chemie der Erde-Geochemistry*, 2018, 78: 500-520.
- [34] EBY G N. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications [J]. *Geology*, 1992, 20: 641-644.
- [35] 李剑锋. 内蒙古赤峰红岭铅锌多金属矿床成矿作用及外围成矿预测[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [36] 王承洋. 内蒙古黄岗梁-甘珠尔庙成矿带铅锌多金属成矿系列与找矿方向[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [37] 李欢, 王冲, 朱大鹏, 等. 黄沙坪砂卡岩型和脉状铅锌矿成矿环境及其对深部找矿的指示 [J]. *中国有色金属学报*, 2023, 33(2): 630-651.
- [38] ZHU D, LI H, TAMEHE L S, et al. Two-stage Cu-Pb-Zn mineralization of the Baoshan deposit in southern Hunan, South China: Constraints from zircon and pyrite geochronology and geochemistry [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 241: 107070.
- [39] ZHU D, LI H, JIANG W, et al. Ore-forming environment of Pb-Zn mineralization related to granite porphyry at Huangshaping skarn deposit, Nanling Range, South China [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32: 3 015-3 035.
- [40] 李进喜, 方怀宾, 曹宇岗, 等. 内蒙古边墙里矿区银铜铅锌矿床成矿地质条件及找矿模型 [J]. *金属矿山*, 2019(9): 132-140.
- [41] 武葆源, 裴世嘉. 内蒙古鄂尔格地区矿化蚀变、地球化学异常特征及找矿前景 [J]. *黄金*, 2023, 44(5): 73-77.
- [42] 常翔, 孙景贵, 陈旭, 等. 吉林省南部集安大石湖-大台子铜矿化区中生代中酸性杂岩岩石成因与地球动力学背景 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2023, 53(3): 920-945.
- [43] 王绍波, 郭运康, 张维权, 等. 滇西北衙超大型斑岩-矽卡岩-浅成低温热液成矿系统关键金属及其成因分析 [J]. *地质与勘探*, 2023, 59(3): 465-480.
- [44] 李敏, 赵忠海, 李海军, 等. 内蒙古科右前旗复兴屯银铅锌多金属矿床的发现及其意义 [J]. *黄金*, 2022, 43(11): 5-12.
- [45] 王硕, 孙丰月, 王冠, 等. 黑龙江省四平山金矿床成矿作用及矿床成因——来自矿床地质、地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 H-O-S 同位素的制约 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(5): 1 626-1 648.
- [46] 薛全君, 沈存利, 杨发亭, 等. 内蒙古察右前旗李清地矿区铅锌银矿床探采新进展及成矿规律 [J]. *地质与勘探*, 2022, 58(1): 37-48.

Geochemical characteristics and metallogenic prediction of 2 types of granite from the Haobugao lead–zinc polymetallic deposit in Inner Mongolia

Yan Xiaohua^{1,2}, Li Jinxi³, Li Huan⁴, Zhu Dapeng⁵, Xie Yiming⁴, Jiang Yongfang^{1,2}

(1. Hunan Geosun Hi-technology Co., Ltd.;

2. Hunan Provincial Deep Resource Electromagnetic Exploration Engineering Technology Research Center;

3. The First Geological Exploration Institute, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Henan;

4. School of Geosciences and Info-physics, Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University;

5. Bayerisches Geoinstitut, University of Bayreuth)

Abstract: The Haobugao lead–zinc polymetallic deposit is classified as a large-scale deposit, with the intrusive rocks closely associated with mineralization being the Ulanba rock mass, which primarily comprises monzogranite and quartz monzonite. To investigate the genesis of the rock mass and its relation to mineralization, major and trace elements (including rare earth elements) of the 2 rock types were analyzed. Results show that the SiO_2 mass fractions of monzogranite and quartz monzonite average 73.85 % and 66.94 %, respectively. Both exhibit high potassium ($w(\text{K}_2\text{O})=4.48\%$, 5.72%) and rich aluminum ($w(\text{Al}_2\text{O}_3)=12.59\%$, 15.10%) characteristics. Monzogranite belongs to alkaline rocks rich in K and Ca, whereas quartz monzonite corresponds to the shoshonite series. Their rock differentiation indices (DI) range from 90.27–93.07 for monzogranite and 83.94–90.55 for quartz monzonite. The chondrite-normalized rare earth element (REE) patterns of both align with A-type granite features, enriched in large ion lithophile elements (LILEs) and depleted in high field strength elements (HFSEs). Quartz monzonite has higher REE contents and exhibits a weaker negative Eu anomaly ($\delta\text{Eu}=0.70\text{--}0.96$) compared to monzogranite ($\delta\text{Eu}=0.38\text{--}0.56$), which has lower La, Ce, Nd, Sm, Y, Yb, and Lu contents. Monzogranite is classified as A1-type granite, while quartz monzonite is categorized as A2-type granite. Based on the regional geological context, the Ulanba rock mass is interpreted to have formed during the transition of subduction direction of the Paleo–Pacific Plate beneath the North China Plate. Regional extension in the period triggered mantle upwelling and the emplacement due to granitic magma rising. Differences in major and trace elements between the 2 granites are directly linked to the degree of mantle material mixing. Variations in alteration coefficients and metallogenic factors suggest that monzogranite is associated with Cu, Mo, Pb, W, Zn, Ag, and Sn mineralization, while quartz monzonite contributed to Cu, Bi, Ag, and Sn mineralization. Determining the main mineralization stage and related magmatic rocks provides key guidance for deep prospecting and deposit genesis studies and offers important insights into assessing the metallogenic potential of regional granitoids.

Keywords: Haobugao; lead–zinc polymetallic deposit; monzogranite; quartz monzonite; geochemical characteristics; metallogenic potential