

内蒙古狼山炭窑口热水喷流沉积矿床钾质“双峰式”火山岩层的发现及其示踪意义*

彭润民** 翟裕生

(中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083)

王志刚 韩雪峰

(内蒙古化工地质勘察院, 呼和浩特 010070)

摘要 研究发现, 炭窑口一带狼山群容矿第 2 组中的灰色-浅褐灰色钾长浅粒岩与变粒岩夹层具有如下特征: 其外观致密均一、分不出矿物晶粒; 具有变余斑状或聚斑状结构, 变余斑晶由具有波状消光的石英和遭受明显蚀变与变形的钠长石组成; 有显示海底火山喷发熔浆快速冷凝成岩特征的放射状、纤维状丛生的变余显微球粒结构和燕尾状分叉以及变余中空骸晶结构; 其 $\text{SiO}_2 = 70.80\% \sim 76.00\%$, $\text{K}_2\text{O}(4.83\% \sim 6.22\%) > \text{Na}_2\text{O}(2.78\% \sim 3.87\%)$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 8.63\% \sim 9.00\%$; 多种岩石化学图解结果一致表明其具火山岩特征, 从而可恢复其原岩是同沉积期形成的钾质石英角斑岩. 再根据它与钾质细碧岩夹层($\text{SiO}_2 = 46.12\% \sim 50.68\%$, $\text{K}_2\text{O}(4.23\% \sim 5.93\%) > \text{Na}_2\text{O}(2.15\% \sim 3.14\%)$, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.51\% \sim 8.08\%$)有共层产出的组合特征, 可以确认它们是钾质“双峰式”火山岩夹层. 炭窑口矿床容矿岩组中“双峰式”火山岩夹层的发现, 加上部分凝灰岩中有矿石矿物产出、矿石矿物的铅同位素分布特征和黄铁矿的 Co/Ni 比值 >1 以及内生成矿作用迹象明显等特征, 可证实它是形成于中元古代华北古陆北缘裂陷槽内张性断陷盆地的非典型SEDEX型矿床, 其成矿作用和同沉积期火山喷发活动及热水喷流作用有关, 成矿物质与火山岩具有同源性(来源于地幔或下地壳). 再结合在霍各乞、东升庙矿床已找到的变质(“双峰式”)火山岩夹层和容矿建造的总组合特征, 还可以进一步证实狼山-渣尔泰山中元古代被动陆缘裂陷槽经历过明显不均一的拉伸作用.

2004-04-28 收稿, 2004-08-16 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 40172040)、国家自然科学基金重点项目(批准号: 40234051)和国家基础研究发展规划项目(编号: G1999043215)联合资助

** E-mail: cprm@cugb.edu.cn

关键词 张性裂谷盆地 钾质双峰式火山岩 中元古界 狼山群二组 炭窑口矿床 内蒙古

炭窑口大型 Zn-Cu-Fe 硫化物矿床位于华北地台北缘西段狼山-渣尔泰山-白云鄂博中元古代矿集区^[1-9]西南端(图 1)。前人认为它与东升庙、霍各乞、甲生盘等矿床类似,是“海底火山喷气沉积-变质矿床”,容矿建造狼山群是冒地槽型泥炭质-碳酸盐沉积建造^[1],或是“海底火山喷气-沉积-后期改造矿床”^[2]和层控热水沉积矿床^[3],为进一步研究奠定了基础。自近年在该矿床的容矿岩组中发现同沉积期的钾质细碧岩^[4]以来,还未见其惟一容矿岩组中有钾质“双峰式”火山岩夹层的报道。国内外已有研究表明,典型以沉积岩容矿的喷流沉积型矿床(简称 SEDEX 型矿床)多形成于硅铝质冒地槽环境^[10],其容矿岩组中可有热水沉积岩或凝灰岩层,而无或极少有典型水下喷发成岩组构的火山岩层^[10-14],更未见具有球粒结构的酸性火山岩的报道。

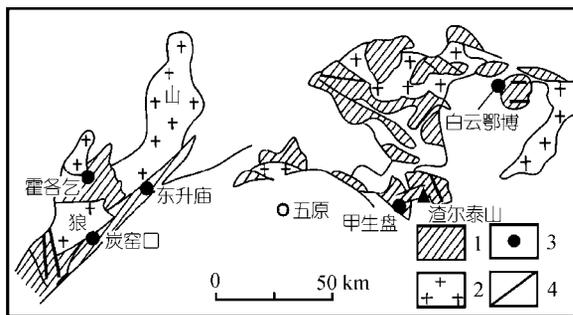


图 1 内蒙古狼山-渣尔泰山-白云鄂博中元古代裂陷槽内矿床分布略图

1. 中元古界狼山群、渣尔泰山群、白云鄂博群; 2. 花岗岩; 3. 矿床; 4. 断裂

本文介绍在炭窑口矿床惟一容矿的狼山群第 2 组中新找到的具有变余球粒结构、变余聚斑状、斑状与晶屑结构的钾质石英角斑岩夹层,并结合对钾质细碧岩的进一步研究,确认在矿区狼山群第 2 组内产有钾质“双峰式”火山岩夹层。这对于确认本矿床的成矿地质构造背景与赋矿盆地性质、研究矿床成因与成矿过程、探索成矿热动力来源、深入研究备受国内外普遍关注的狼山-渣尔泰山-白云鄂博中元古代裂陷槽构造-热事件的时空演化规律及其与成矿

的耦合关系以及与国际中元古代同类矿床的研究对比都有重要意义。炭窑口矿床的基本地质特征、狼山群的划分及含矿特征等见文献^[1, 2]。

1 钾质石英角斑岩的发现

炭窑口矿床的容矿建造是变质程度总体为绿片岩相、局部达角闪岩相的中元古界狼山群(Pt_2ls)。它自上至下分为 3 组,第 1 组主要由石英岩类、黑云母片岩类和混合岩类组成,不含矿体;第 2 组主要由细晶白云石大理岩类、炭质千枚岩与云母石英片岩类、浅粒岩和变粒岩类组成,所有的锌、铜和黄铁矿体都产在该组中^[1,2],层控特征非常明显;第 3 组主要为石英岩类,不含矿体。

作者经过近几年野外观察和室内研究,认为炭窑口一带狼山群第 2 组中的钾长浅粒岩和变粒岩的原岩是同沉积期的酸性喷出岩(钾质石英角斑岩),其确认依据和主要特征如下:

(1) 宏观特征与产状 本类岩石在地表因已受到长期风化,原岩的颜色、结晶程度等宏观特征已很难确认。但在深部钻孔的新鲜岩心,可见到岩石呈灰色-浅褐灰色、外观致密均一、肉眼分不出矿物晶粒,与矿区具有中-粗粒结构、肉眼即可分出矿物晶粒的其他后期酸性岩脉截然不同,且岩石根本无冷凝边,又是总体呈层产出,单层厚度为 0.50~4 m,层位稳定,表明其非侵入相、陆相或次火山岩相产物^[15,16]。

(2) 矿物成分与变余聚斑状、斑状结构 系统显微鉴定发现,本类岩石具有变余聚斑状、斑状结构和(微晶-细晶)晶屑结构。斑晶主要为钠长石(有时发育聚片双晶)(表 1 中 1~4, $An = 0\sim3$)、次为石英,二者有时呈聚斑(图 2(a))或单独呈斑晶产出(图 2(b), (c))。所有钠长石斑晶都有明显的被溶蚀或交代现象,斑晶的周边参差不齐(图 2(a)~(c)),呈港湾状(图 2(b)左上角)或受构造挤压碎裂(折裂)后被白云石(Do)交代、充填(图 2(c))。石英斑晶的晶内也同样的有裂开和被溶蚀交代现象(图 2(a), (b))以及十分明显的波状消光现象(图 2(a)),从而可以确认二者是变余斑晶而非变斑晶。基质的组成矿物主要是微晶-细晶钾长石(图 3, 4;

表 1 内蒙古狼山炭窑口矿床钾质石英角斑岩斑晶与基质的电子探针分析结果(%)^{a)}

序号	测试部位	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	总计
1	斑晶的新鲜处	68.54	0.00	19.49	0.00	0.00	0.00	0.05	11.49	0.08	0.01	99.66
2	斑晶的新鲜处	68.49	0.00	19.50	0.00	0.02	0.00	0.07	11.58	0.08	0.01	99.75
3	斑晶的新鲜处	68.15	0.00	19.65	0.01	0.01	0.00	0.14	11.70	0.10	0.01	99.77
4	斑晶的新鲜处	68.49	0.01	19.87	0.01	0.00	0.00	0.11	11.17	0.10	0.00	99.76
5	图 3 中球粒中心(白色部分)	65.33	0.00	17.40	0.01	0.00	0.00	0.00	0.13	16.34	0.02	99.24
6	图 3 中球粒中心(白色部分)	65.35	0.01	17.91	0.02	0.00	0.00	0.00	0.58	15.68	0.06	99.61
7	图 3 中球粒上部灰白色纤维	64.57	0.01	18.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	16.95	0.00	99.98
8	图 3 中球粒下部灰白色纤维	66.45	0.02	17.26	0.08	0.00	0.00	0.00	0.15	16.08	0.01	100.04
9	图 4 斜列板状长石晶屑(白色处)	64.71	0.01	18.09	0.05	0.00	0.01	0.00	0.17	16.96	0.00	99.99
10	图 4 Y 形板状长石晶屑(白色处)	65.22	0.01	17.69	0.02	0.00	0.00	0.00	0.12	16.53	0.02	99.96

a) 测试和校对由中国地质科学院矿产资源研究所电子探针室余静、周剑雄完成

表 1 中 5 和 6)、石英、钠长石, 另有少量绢云母和微量白云石等. 这进一步揭示其原岩是喷溢相海相火山岩^[15,16].

(3) 变余显微球粒结构和燕尾状分叉与中空骸晶结构 显微鉴定还发现, 这两种显示熔浆快速冷却成岩特征的结构在本类岩石中都发育(图 2(d), 3, 4). 由于石英角斑岩的矿物在单偏光下全透明, 再加上矿物颗粒细和干涉色的影响, 其基质中的长石晶屑与球粒的矿物成分及其内部结构在高倍偏光显微镜下都难清楚显示与准确鉴定. 为此, 作者作了电子探针分析与背散射成分摄影(图 3, 4), 清楚地揭示球粒由纤维状、放射状丛生的钾长石组成(表 1 中 5~8). 另外, 从图 3 和 4 还可以看出, 变余球粒周围有的细小钾长石晶屑(表 1 中 9 和 10)有清晰的变余中空骸晶结构和燕尾状分叉结构. 这二者显然不是岩浆侵入缓慢晶出或陆相喷出成岩的变余结构特征, 而是酸性熔浆在水下快速冷凝、淬火、迅速结晶的结果^[15,16]. 图 2(d)所示球粒被压偏、被白云石脉切割、穿插、受到后期改造的事实也表明其非变质成因.

(4) 岩石化学成分 将表 2 中 1~4 号样品的化学成分扣除 CO₂ 及相应的 MgO 与 CaO (岩石中含少量白云石) 并重新调整各组分的百分含量后, 在尼格里图解(图 5) 和普列多夫斯基等多种图解^[17] 中投影都落在火成岩区 (其余图略).

显然, 具有变余组构(斑晶为钠长石和石英, 二者有时呈聚斑产出, 有变余中空骸晶结构和显微球

粒结构)、斑晶与基质成分和表 2 中 1~4 号岩石化学成分特征的原岩可归为同沉积期的喷溢相海相火山岩(钾质石英角斑岩)^[15,16,18], 而不宜归为后期脉岩与次火山岩或热水沉积岩.

2 钾质石英角斑岩与细碧岩的组合特征

根据对已报道的钾质细碧岩^[4] 所做的野外与室内工作, 可确认它产出层位稳定、富钾低钠特征明显(表 2 中 8~15), 在深部与地表都可见变余杏仁构造(图 2(e)) 和变余聚斑状、斑状与晶屑结构(图 2(f)). 目前已在一些深部钻孔中见到钾质石英角斑岩与已确认的钾质细碧岩共层连续产出. 这两类岩石的岩相、总体呈层产出、有变余聚斑状与斑状结构、变余中空骸晶结构、变余显微球粒结构、燕尾状分叉结构等都显示海底喷发快速冷却成岩的典型组构特征(图 2~4) 和岩石化学成分(酸性岩 SiO₂ = 70.80%~76.00%, K₂O (4.83%~6.22%)>Na₂O(2.78%~3.87%) (表 2 中 1~4); 基性岩 SiO₂ = 46.12%~50.68%, K₂O(4.23%~5.93%)>Na₂O(2.15%~3.14%) (表 2 中 8~15)) 与国内典型钾质石英角斑岩(表 2 中 5~7) 和钾质细碧岩(表 2 中 16)^[18] 的成分相近. 二者有共层产出, 而细碧岩的 Sm-Nd 等时线年龄为 1824 Ma ± (T_{DM} = 2006~2132 Ma)^[4], 炭窑口矿床的容矿建造狼山群总体是以沉积变质岩为主体, 而不是以岩浆岩为主体, 所有这些表明它们是具有“双峰式”组合的中元古代海相火山喷出岩(钾质“双峰式”火山岩).

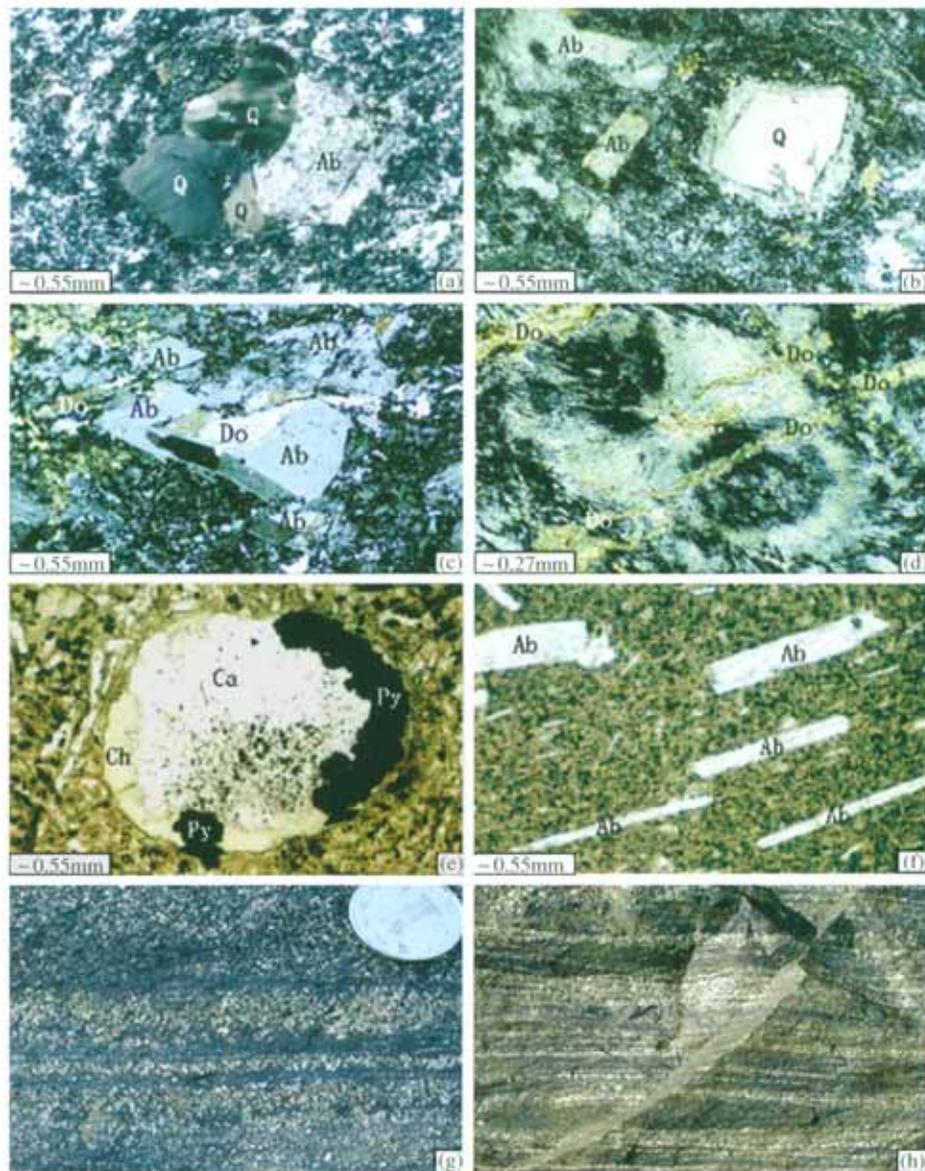


图 2 内蒙古狼山炭窑口矿床钾质“双峰式”火山岩的变余构造和矿石构造

(a), (b) 钾质石英角斑岩的变余聚斑状和斑状结构、基质都具有微晶-细晶晶屑结构(正交偏光), (a) 示变余聚斑结构(变余钠长石斑晶(Ab)和石英斑晶(Q)呈聚斑产出, 二者周边都被溶蚀或交代、石英斑晶有很明显的波状消光), (b) 示钠长石(Ab)与石英斑晶(Q)被蚀变成港湾状, 左上角钠长石斑晶(Ab)下半部轮廓已不完整; (c) 钠长石斑晶被断裂、错位, 晶内被白云石(Do)交代、充填或切割, 斑晶上部已不清晰; (d) 钾质石英角斑岩的变余显微球粒结构, 基质具有微晶-细晶晶屑结构(球粒被挤压成椭圆状, 并被白云石脉(Do)穿切(正交偏光)); (e) 钾质细碧岩的变余杏仁构造, 杏仁内充填有黄铁矿(Py)、方解石(Ca)、绿泥石(Ch)(单偏光); (f) 钾质细碧岩的变余斑状结构, 板状钠长石(Ab)定向排列(单偏光); (g) 条带状构造的黄铁矿(淡黄色)与闪锌矿矿石; (h) 纹层状黄铁矿(淡黄色)与闪锌矿(暗褐色)互层产出(比例尺同(g))

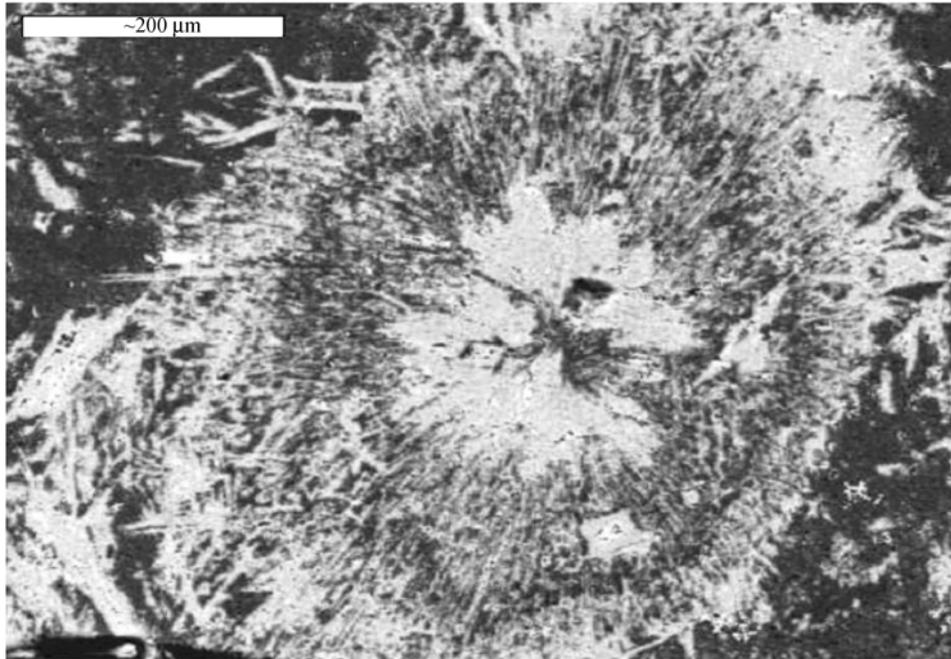


图 3 内蒙古狼山炭窑口矿床钾质石英角斑岩的变余显微球粒结构(电子背散射成分图像)

球粒由放射状钾长石(灰白色者)微-细晶组成、较大钾长石(灰白色者)晶屑具有清晰可见的变余中空骸晶结构(左上侧)和燕尾状分叉结构(左上侧和左右两侧)

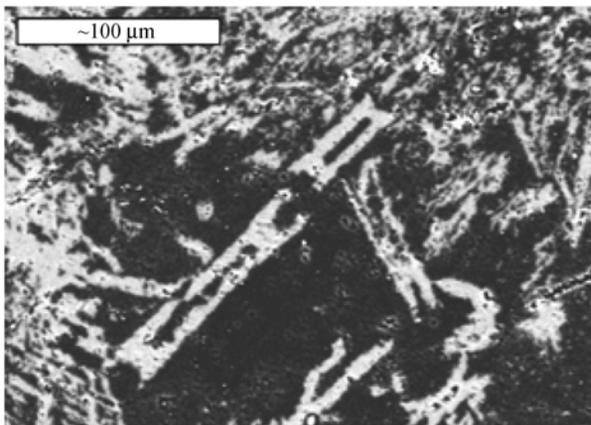


图 4 内蒙古狼山炭窑口矿床钾质石英角斑岩的变余中空骸晶结构与燕尾状分叉现象(电子背散射成分图像)

钾长石晶屑(中间斜列者、灰白色)具有变余中空骸晶结构和燕尾状分叉(右下方)

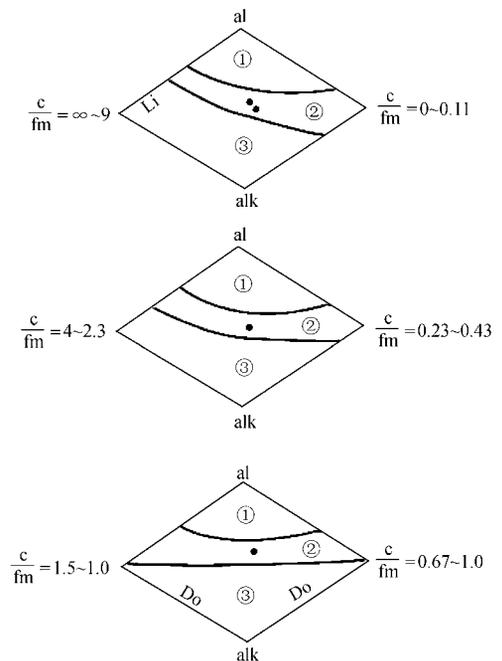


图 5 内蒙古狼山炭窑口矿床石英(钠)长浅(变)粒岩的尼格里图解^[17]

粘土质沉积岩区; 火成岩区; 化学沉积岩区. Do, 白云岩; Li, 石灰岩

表 2 岩石化学成分(%，质量百分数)^{a)}

序号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	CO ₂	总计	K ₂ O+Na ₂ O
1	75.51	0.06	12.29	0.26	0.66	0.05	0.14	0.46	3.87	5.01	0.02	0.38	0.74	99.45	8.88
2	76.00	0.05	12.00	0.84	0.29	0.05	0.17	0.88	3.21	5.77	0.02	0.44	0.47	100.19	8.98
3	70.80	0.07	12.33	0.28	1.63	0.08	0.81	1.51	2.78	6.22	0.02	0.90	2.40	99.83	9.00
4	75.21	0.08	12.59	0.68	0.34	0.03	0.36	0.63	3.80	4.83	0.02	0.06	0.56	99.73	8.63
5	71.99	0.12	11.88	0.57	1.54	0.06	1.03	2.39	4.08	4.50	0.11	1.16	1.39	100.82	8.58
6	70.84	0.10	13.78	1.11	1.40	0.03	1.27	0.79	2.29	5.44	0.06			97.11	7.73
7	75.46	0.00	11.70	0.77	1.94	0.02	0.29	0.89	3.48	4.38	0.02	0.64	0.75	100.34	7.86
8	46.12	1.22	15.88	3.04	6.54	0.15	6.11	4.99	2.15	5.93	0.27	4.24	2.14	98.78	8.08
9	47.13	1.23	17.21	2.40	6.92	0.15	6.36	4.37	2.17	5.62	0.28	4.30	1.88	100.02	7.79
10	47.96	1.29	16.67	2.71	6.52	0.14	4.93	4.96	2.86	4.99	0.41	4.00	2.40	99.84	7.85
11	50.68	0.92	16.89	2.66	5.64	0.13	4.70	5.33	2.37	4.23	0.23	3.92	1.96	99.66	6.60
12	47.86	1.24	16.05	2.19	6.49	0.13	5.20	5.64	3.14	4.48	0.40	3.96	2.54	99.32	7.62
13	49.68	1.18	15.95	1.91	5.71	0.11	6.65	6.65	2.23	4.28	0.38	2.68	3.19	100.60	6.51
14	49.51	0.91	16.27	2.23	5.78	0.14	4.92	5.01	2.17	5.32	0.24	4.28	3.28	100.06	7.49
15	48.11	2.29	16.80	2.72	8.39	0.12	4.80	2.31	2.77	5.12	0.60	4.28	1.00	99.31	7.89
16	48.05	0.88	16.52	1.38	5.98	0.17	4.58	7.05	3.40	4.51	0.58			93.10	7.91

a) 另外还含SO₃(0.67%)。1~4, 炭窑口矿床钾质石英角斑岩(由国家地质实验测试中心测试); 5~7, 北祁连质石英角斑岩^[18]; 8~15, 炭窑口矿床钾质细碧岩(由国家地质实验测试中心测试); 16, 北祁连钾质细碧岩^[18]

表 3 内蒙古狼山炭窑口矿床钾质“双峰式”火山岩的稀土元素分析结果(μg/g)^{a)}

岩性	编号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
钾质细碧岩	1	17.34	35.57	4.36	19.27	4.68	1.39	4.21	0.70	3.64	0.74	1.96	0.28	1.72	0.25
	2	18.23	35.78	4.34	19.03	4.28	1.28	4.00	0.51	2.96	0.60	1.61	0.24	1.46	0.22
	3	20.64	45.42	5.17	22.57	4.86	1.47	4.22	0.70	3.36	0.68	1.81	0.25	1.54	0.23
	4	9.82	24.35	3.66	15.46	5.27	0.17	5.87	1.05	6.19	1.27	3.45	0.52	3.19	0.39
钾质石英角斑岩	5	10.36	25.82	3.60	15.94	5.36	0.19	5.79	1.04	5.78	1.20	3.24	0.47	3.05	0.43
	6	10.82	25.89	3.83	17.31	5.88	0.32	6.18	1.07	6.35	1.26	3.52	0.52	3.36	0.50

a) 分析由国家地质实验测试中心完成

3 示踪意义

3.1 确认成矿地质构造背景与研究成矿热动力来源

炭窑口矿床的形成受狼山-渣尔泰山裂陷槽内三级阶陷盆地的制约^[19]。20世纪80年代以前认为它与东升庙、霍各乞和甲生盘等大型~超大型Zn硫化物Pb硫化物Cu硫化物以及Fe硫化物矿床相似,形成于华北古陆北缘的冒地槽环境^[1]。20世纪90年代以来,趋向于认为它是裂陷槽^[2]环境成矿,但缺少“双峰式”火山岩的直接证据。相邻东升庙矿床(图1)容矿岩组中“双峰式”火山岩的确认^[6],使区域成矿地质背景为张性裂陷槽的观点得到部分证实。炭窑口矿床容矿岩组中的火山岩“双峰式”组合特征明显,岩石化

学成分偏碱性,酸性火山岩的K₂O+Na₂O = 8.63%~9.00%(表2中1~4)、基性岩的K₂O+Na₂O=6.51%~8.08%(表2中8~15),稀土元素含量表现为轻稀土富集、重稀土亏损(钾质细碧岩的LREE(82.61~100.10 μg/g) > HREE(11.60~13.50 μg/g), 钾质石英角斑岩的LREE(58.73~64.05 μg/g) > HREE(21.00~22.76 μg/g)(表3), 球粒陨石标准化曲线都向右倾斜(图6), 具有大陆(边缘)裂谷火山岩的特征^[18,20~22]。这些表明,该矿床是形成于华北古陆边缘中元古代裂陷槽中的张性断陷盆地,在它喷流-沉积成矿过程中有海底火山喷发的直接热事件发生,喷出的岩浆将热量和部分(成矿)流体带到沉积盆地,带来的热能对地壳进行改造,使周围介质与环境升温,导致地热异常场的形成,并维持海底热水对流系统的形成与循环,使含矿热水溶

液持续从深部地壳、地幔顺同生断裂系统上升至海盆(储矿场)卸载、沉积、并与先期喷出沉积物交代,形成矿床^[23]。

3.2 研究成矿物质来源与矿床成因

(1) 成矿物质来源与火山岩物源的关系 炭窑口矿床火山岩的稀土元素特征(表 3, 图 6)揭示其来源于地幔或下地壳^[20]。基性火山岩的 $\varepsilon_{\text{ND}}(T)=3.48 \pm 3.46$, 意味着成岩物质来源于地幔。酸性火山岩的Eu负异常明显($\delta\text{Eu} = 0.09 \sim 0.16$, 图 6), 表明岩浆经历了较广泛的分馏作用^[24]。其稀土元素组成及Eu负异常特征和国际上与Cu-Zn块状硫化物矿床成矿有关的长英质火山岩的稀土配分曲线型式、Eu负异常特征^[24]极为相似。

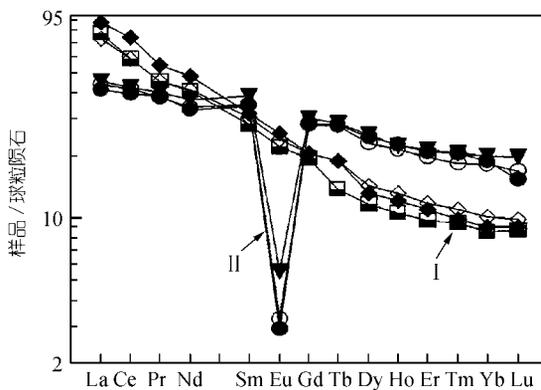


图 6 内蒙古狼山炭窑口矿床“双峰式”火山岩的 REE 标准化曲线

●, 钾质细碧岩; ○, 钾质石英角闪岩

国外还有研究证明, 许多沉积岩容矿的Pb-Zn矿床, 其成矿物质与幔源火山岩有关^[25]。炭窑口矿床部分凝灰岩层中有星点状黄铁矿等矿石矿物, 表明火山活动直接提供了部分成矿物质。各种矿石矿物的铅同位素分布在地幔与下地壳附近^[1,2]和矿石矿物的Co/Ni比值 = 2.15~17.20^[2]以及显示内生热液成矿特征^[26], 说明该矿床的某些成矿物质与火山岩有同源性, 推测有下地壳和地幔含矿流体参与了成矿, 同成矿期火山活动与成矿密切相关。

(2) 矿床成因 炭窑口矿床层控特征明显, 所有矿体都产在狼山群第 2 组的白云石大理岩、炭质千枚岩和片岩中, 有典型喷流-沉积成矿形成的变余纹

理、层理构造矿石(图 2(g), (h)), 并可见同生沉积构造, 应属于热水-沉积矿床。

依容矿岩石的不同, 热水沉积矿床可分为以火山岩为容矿岩石的矿床(VMS型)和以沉积(变质)岩为容矿岩石的矿床(SEDEX型)两大类^[14,27]。典型的SEDEX型矿床产在冒地槽环境^[10], 容矿岩组中缺少同沉积期的火山岩, 可有层凝灰岩^[10-14]和热水沉积岩。炭窑口矿床的容矿岩石是沉积变质岩, 容矿岩组中既有凝灰岩层(另文介绍), 又有典型的海底火山喷发成岩特征的火山岩(图 2(a)~(f)), 有的可达到 30 余米厚, 可归属近似优地槽岩组^[27]。在容矿地层中还有酸性火山岩屑(图略)和明显的内生成矿热液特征^[26](矿石矿物黄铁矿的Co/Ni比值远大于 1), 可以认为炭窑口矿床不是典型的SEDEX型矿床, 而是介于SEDEX型和VMS型之间的喷流-沉积矿床。

3.3 区域和国际研究对比

炭窑口矿床惟一容矿的第 2 组“双峰式”火山岩夹层明显富钾低钠(表 2 中 1~4 和 8~15)。相邻东升庙矿床容矿第 2 岩组中的“双峰式”火山岩富钠低钾(基性岩 $\text{Na}_2\text{O}(3.95\% \sim 4.30\%) > \text{K}_2\text{O}(2.49\% \sim 3.80\%)$, 酸性岩 $\text{Na}_2\text{O}(3.64\% \sim 5.31\%) > \text{K}_2\text{O}(1.09\% \sim 2.75\%)$)^[6], 霍各乞矿床容矿第 2 组中的火山岩总体也多钠少钾, 绝大多数样品的 $\text{Na}_2\text{O}(1.56\% \sim 3.78\%) > \text{K}_2\text{O}(0.20\% \sim 0.80\%)$ ^[5], 而甲生盘矿床容矿岩组中却只有少量凝灰岩夹层(无火山岩)等特征, 可证实顺裂陷槽走向(图 1), 从西部的炭窑口(霍各乞) 东升庙 甲生盘矿床, 火山活动由强到弱, 赋矿盆地离火山口的位置由近及远; 而顺垂直裂陷槽走向, 从狼山古陆南侧(裂陷槽内侧)东升庙-炭窑口一带 北侧(裂陷槽外侧)霍各乞一带火山活动特征明显不同: 内侧双峰式火山岩发育、富钠低钾(或富钾低钠)、且碱质总量高(炭窑口 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.51\% \sim 9.00\%$ (表 2)、东升庙 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 6.28\% \sim 7.92\%$)^[6], 外侧现还未见“双峰式”火山岩, 只有基性火山岩, 其碱质总量($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2.00\% \sim 4.69\%$)^[5]明显低。

由于该矿集区的成矿时代、矿化类型、容矿岩石特征等都与加拿大、澳大利亚等中元古代著名SEDEX型矿集区有相似性^[11-14], 所以炭窑口矿床容

矿岩组中钾质“双峰式”火山岩的确认,还可以为狼山-渣尔泰山中元古代喷流沉积矿集区与国际同类矿床在(准)同沉积期的构造-热事件、成矿热动力来源与背景、成岩成矿过程的研究对比提供新信息。

4 讨论与结论

(1) 炭窑口矿床惟一容矿的狼山群第 2 组中产有钾长浅、变粒岩和钾质钠长绿泥片岩,二者有共层产出现象,它们的原岩宜归为同沉积期的喷溢相“双峰式”火山岩,而不会是一般 SEDEX 型矿床容矿岩系中的热水沉积岩。其岩石化学成分富钾低钠、钾质(K_2O)含量与国内已确认的钾质石英角斑岩和钾质细碧岩的钾质(K_2O)含量^[18]相近。若把二者高含量的钾(K_2O)全归之于喷出期后的外来物,则似与它们都具有清晰的变余组构和狼山群属总体为绿片岩相、局部达角闪岩相的低、浅区域变质岩系不协调,更不好解释钾质石英角斑岩变余球粒的纤维和中心都为钾长石、而其变余钠长石斑晶周边却未见钾化边等钾交代现象。

(2) 典型的 SEDEX 型矿床的成矿作用与海底火山喷发活动并无直接关系^[10]。但在典型的 SEDEX 型矿床与典型的 VMS 型矿床之间存在过渡类型^[14,27,28]。炭窑口矿床容矿岩组中确认出钾质“双峰式”火山岩和发育多层凝灰岩表明,它形成于被动陆缘裂陷槽中的张性断陷盆地,同沉积期火山活动直接提供了部分成矿流体。本矿床各种硫化物的铅同位素组成分布在下地壳与地幔附近^[1,2],其矿石矿物的 Co/Ni 含量比值 >1 、内生热液成矿特征^[26]明显,由此可推测其成矿物质与火山岩具有同源性、成矿作用与火山活动密切相关。因此,综合来看,炭窑口矿床可以归为 SEDEX 型-VMS(VHMS)型之间、但靠近 SEDEX 型一侧的过渡型矿床,同沉积期火山喷发释放的热能是成矿热动力来源之一。但火山活动究竟直接提供了多大比重的成矿物质与热能,则还需要深入研究。

(3) 华北克拉通是中国重要的构造和成矿单元,在其内部及其周边有不同时代、不同类型的大规模成矿作用^[23,29]。因而,其结晶基底的形成与特征、演化及其大地构造意义备受关注^[30,31]。一般认为,华北克拉通的最终稳定固结主要与古元古代末期约 1800

Ma 的吕梁运动有关,炭窑口矿床钾质细碧岩的 Sm-Nd 同位素等时年龄为 1824 Ma^[4],与这一事件有较好的吻合性。可以认为,炭窑口矿床“双峰式”火山岩的形成,包括相应的水热喷流成矿作用,可能是华北克拉通在约 1800 Ma 前由不同陆块拼贴形成统一结晶基底^[30,31]之后的反弹拉张裂解过程中^[31]、在其北缘裂陷槽内地壳减薄、壳幔熔浆(包括含矿流体)上侵作用的结果。

翟明国等^[31]曾从华北克拉通的变质岩相分布、混合岩化、构造变形事件、克拉通内岩浆作用产物多方论证了早元古代-中元古代初的(2000~1700 Ma 期间)超大陆裂解事件(简称 1800 Ma 地质事件)的存在及性质,并认为是全球性古元古代末-中元古代初的大陆裂解事件的响应^[31]。新近又有了记录这一事件的碳同位素年龄的研究成果^[32]。显然,炭窑口矿床容矿岩组中钾质“双峰式”火山岩的发现,证实了狼山-渣尔泰山裂陷槽是这一裂解事件的产物,增添了约 1800 Ma 前超大陆裂解事件在华北克拉通北缘西段被动陆缘裂陷槽内也有相应“构造-热事件”发生的新证据,为研究华北克拉通及其周边的构造演化、壳幔作用及成矿过程提供了新信息。

(4) “热事件”是热水喷流成矿作用产生的热动力来源之一。由于典型的 SEDEX 型矿床容矿岩组中(非整个含矿岩系内)缺少海相火山岩层^[10-14],以往对 SEDEX 型矿集区构造-热事件及其与成矿关系的研究主要集中在查找深部有无(准)同沉积期高侵位的岩浆侵入活动或岩枝与岩墙形成等“热事件”发生、研究区域热事件与热历史,来探讨热动力来源及其与大规模 SEDEX 型矿床形成的耦合过程,以认识该成矿系统的成矿动力学背景,或根据“热水沉积岩(如钠长石岩类、硅质岩类、含电气石岩等)”追溯、判断热历史、探讨“热事件”产生的时间、性质及其与成矿的关系等,而没有考虑喷流成矿过程中海底火山喷发这类直接“热事件”释放出的热能对地热异常场形成以及热水对流系统产生的作用。

炭窑口矿床惟一容矿岩组中有“双峰式”火山岩的发现,在霍各乞、东升庙矿床相同容矿岩组中都有火山岩层^[5,6],甲生盘矿床(图 1)容矿岩组中只有少量凝灰岩层,由此可推知:1) 狼山地区三大矿床赋矿盆

地内同沉积期火山喷发释放的热能是热水对流系统产生、并导致热水喷流-沉积成矿作用产生的重要热动力来源之一; 2) 该裂陷槽在狼山地区经历了被动陆缘“从拉张、裂陷作用 地壳减薄、地幔物质上涌、间歇性火山喷发 热水喷流-沉积成矿 夭折、消亡”的事件序列; 3) “同沉积期火山喷发”这一事件在渣尔泰山地区的甲生盘矿床赋矿盆地内缺少或不明显, 其成矿动力来源主要是区域构造动力和区域构造-热事件. 这既扩大了认识被动陆缘“海底热水对流系统形成与循环的成矿热动力来源”的视野, 又证明了狼山各矿床的成矿过程与热动力来源和渣尔泰山地区矿床的成矿过程与热动力来源有明显差别.

如果再考虑在白云鄂博矿床元古代非造山岩浆岩^[7]、新厘定的碱性-碳酸岩杂岩^[8]和破火山机构成岩成矿实例^[9], 则可以更加明确狼山-渣尔泰山-白云鄂博中元古代矿集区(图 1)各赋矿盆地内火山活动的多样性与不均一性以及赋矿盆地的性质与成矿环境的差异性. 从而可为进一步研究该被动陆缘裂陷槽的时空演化过程与构造-热事件演化历史、探讨壳幔活动与物质交换特征、丰富元古宙被动陆缘热水成矿系统理论^[23]提供一些重要信息.

(5) 中元古代是重要的热水喷流沉积-成矿期, 在全球范围内具有一定的可对比性. 炭窑口矿床容矿岩组中发现钾质“双峰式”火山岩的事实进一步表明, 狼山-渣尔泰山中元古代热水喷流矿集区既在成矿地质构造背景、成矿元素与矿床地质特征等方面和国际中元古代著名SEDEX型矿床^[10-14]有相似之处, 又在同沉积期火山喷发活动、成岩成矿过程与深部(准)同沉积期高侵位岩浆岩的形成等方面存在明显差别(如在澳大利亚麦克阿瑟河-芒特艾萨-克朗克里成矿区深部, 有大约在 1670 Ma(准)同沉积期间侵位的锡贝拉(Sybella)花岗岩岩基^[13]. 而在狼山-渣尔泰山成矿带深部则还未见此类似准同沉积期岩基, 但狼山各矿床惟一容矿岩组中却都有典型同沉积期海相火山岩^[4-6], 与国内外典型的SEDEX型矿床^[10-14]又有明显区别. 这表明各自又都还有独特的成矿构造环境和成矿动力学背景.

致谢 感谢邱家骧、周珣若教授的有益启发和郭凤平、李永光高级工程师在野外工作中的帮助.

参 考 文 献

- 1 李兆龙, 许文斗, 庞文忠. 内古中部层控多金属矿床硫、碳和氧同位素组成及矿床成因. 地球化学, 1986, (1): 13~23
- 2 施林道, 谢贤俊, 巩正基. 狼山-渣尔泰山中元古代裂陷槽有色金属矿床. 见: 芮宗瑶, 施林道, 方如恒, 编. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社, 1994. 127~131
- 3 徐贵忠, 边千韬, 周少平. 华北板块西北缘元古宙大型-超大型矿床形成的地质构造条件. 中国科学, D 辑, 1998, 28(增刊): 78~84
- 4 彭润民. 内蒙古狼山炭窑口一带钾质细碧岩的发现. 科学通报, 1998, 43(2): 212~216
- 5 杨海明, 苏尚国. 内蒙古狼山北侧中元古代变基性岩特征及其成矿意义. 矿床地质, 1992, 11(2): 142~153
- 6 彭润民, 翟裕生. 内蒙古东升庙矿区狼山群中变质“双峰式”火山岩夹层的确认及其意义. 地球科学, 1997, 22(6)
- 7 王一先, 裘愉卓, 高计元, 等. 内蒙古白云鄂博矿区元古代非造山岩浆岩及其对成矿的制约. 中国科学, D 辑, 2002, 32(增刊): 21~32[摘要] [PDF]
- 8 王希斌, 郝梓国, 李 震, 等. 白云鄂博——一个典型的碱性-碳酸盐杂岩的厘定. 地质学报, 2002, 76(4): 502~524
- 9 郝梓国, 王希斌, 李 震, 等. 白云鄂博碳酸盐型 REE-Nb-Fe 矿床——一个罕见的中元古代破火山机构成岩成矿实例. 地质学报, 2002, 76(4): 525~540
- 10 韩 发, 孙海田. Sedex 型矿床成矿系统. 地学前缘, 1999, 6(1): 139~162
- 11 MacIntyre D G. SEDEX-sedimentary-exhalative deposits. In: McMillan W J, Hoy T, MacIntyre D G, et al, eds. Ore Deposits, Tectonics and Metallogeny in the Canadian Cordillera. Victoria: Queens Printer for British Columbia, 1992. 25~66
- 12 Plumb K A, Ahmad M, Wygralak A S. Mid-Proterozoic basins of the North Australian craton—regional geology and mineralisation. In: Hughes F E, ed. Geology of the Mineral Deposits of Australia and Papua New Guinea (Volume 1). The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Clunies Ross House, Victoria, 1990. 881~902
- 13 Patrick J W. An Introduction to the Metallogeny of the McArthur River_Mount Isa-Cloncurry Minerals Province. Economic Geology, 1998, 93: 1120~1131
- 14 Sangster D F. Sedimentary-exhalative(SEDEX)sulphide deposits. In: Maria da Glória da Silva Aroldo Misi, ed. Base metal deposits of Brazil. Brazil: Ernesto von Sperling, 1999. 16~17
- 15 邱家骧, 周珣若, 王人镜, 等. 应用岩浆岩岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 1~22
- 16 张树业, 刘如曦, 常丽华, 等. 火成岩结构构造图册. 北京: 地质出版社, 1982. 40~43
- 17 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法. 北京: 地质出版社, 1987. 1~43
- 18 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连-秦岭山系海相火山岩. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991. 59~106, 183~198

- 19 Peng Runmin, Zhai Yusheng. Hydrothermal mineralization on the Mesoproterozoic passive continental margins of China—a case study in the Langshan-Zha’ertaishan belt, Inner Mongolia, China. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(2): 534~547
- 20 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学. 北京: 冶金工业出版社, 1990. 59~114, 173~183
- 21 Hochstaedter A G. Volcanism in the Sumisu rift, major elements, volatile, and stable isotope geochemistry; and subduction and nonsubduction related components. *Earth Planetary Science Letter*, 1990, 100: 179~209[DOI]
- 22 Smity J R, Taylor B, Malahoff A, et al. Submarine volcanism in the Sumisu rift, IzuBonin arc: submersible and deep tow camera results. *Earth and Plane Science Letter*, 1990, 100: 148~160[DOI]
- 23 翟裕生. 古大陆边缘构造演化和成矿系统. 见: 北京大学地质系编. 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 1998. 769~778
- 24 Campbell I H, Coad P, Franklin J M, et al. Rare earth elements in volcanic rocks associated with Cu-Zn massive sulphide minerazation: a preliminary report. *Canada Journal of Earth sciences*, 1982, 619~632
- 25 Sawkins F J. Anorogenic felsic magmatism, rift dedimentation and giant Proterozoic Pb-Zn deposits. *Geol*, 1989, 17(7): 657~660[DOI]
- 26 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学. 重庆: 重庆科学出版社, 1987. 233~245
- 27 Sangster D F. Volcanic-exhalative massive sulphide deposits. In: Maria da Glória da Silva Aroldo Misi ed. *Base metal deposits of Brazil*. Brazil: Ernesto von Sperling, 1999. 13~15
- 28 宋叔和. 中国一些主要金属矿床类型及其时空分布规律问题. *矿床地质*, 1991, 10(1): 10~17
- 29 毛景文, 张作衡, 余金杰, 等. 华北及邻区中生代大规模成矿的地球动力学背景: 从金属矿床年龄精测得到启示. *中国科学, D辑*, 2003, 33(4): 289~299[摘要] [PDF]
- 30 赵国春, 孙敏. 华北克拉通基底构造单元特征及早元古代拼合. *中国科学, D辑*, 2002, 32(7): 538~549[摘要] [PDF]
- 31 翟明国, 卞爱国. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末-中元古代裂解. *中国科学, D辑*, 2000, 30(增刊): 129~137
- 32 储雪蕾, 张同钢, 张启锐, 等. 蓟县元古界碳酸盐的碳同位素变化. *中国科学, D辑*, 2003, 33(10): 951~959[摘要] [PDF]