

文章编号:0258-7106 (2001) 01-0015-08

流体包裹体轻烃有机气体组成及对矿床成因的制约

——以嵩溪大型银(锑)矿为例*

孙晓明^{1,2} D. I. Norman³ 孙凯¹ 陈敬德¹ 陈炳辉¹

(1 中山大学地球科学系, 广州 510275; 2 南京大学成矿作用国家重点实验室, 南京 210093; 3 Department of Earth and Environmental Sciences, New Mexico Institute of Mining and Technology, Socorro, NM87801, USA)

提 要 嵩溪银(锑)矿是一个新发现的大型独立银矿。矿物流体包裹体超高真空四极气相质谱系统测定显示,该矿成矿流体中存在多种轻烃有机气体,主要由 C₁-C₄ 饱和烷烃组成,仅含微量 C₂-C₄ 不饱和烯烃和芳烃,说明成矿过程基本未受到高温岩浆作用的影响。化学平衡研究表明,这些轻烃气体为微生物成因和沉积岩围岩中Ⅱ类干酪根热解成因的混合气体,其中前者占 2/3 以上,说明成矿中微生物活动曾起到相当大的作用;后者的平衡温度为 300℃,远超过成矿深度所能达到的地热温度,因此这部分轻烃气体可能源于沉积盆地深处,经成矿流体长距离携带到达较浅的矿化部位。文章从一个侧面证实嵩溪矿可能为沉积热卤水改造型矿床,而不是前人所认为的海底基性火山喷流或中低温火山热液充填矿床。

关键词 轻烃有机气体 成矿流体 大型银(锑)矿 粤东嵩溪

中图分类号 P593; P618.52

文献标识码 A

有机质在热液矿床形成中的作用是目前矿床学界关注的焦点之一。成矿流体中,特别是与沉积盆地有关的建造水或热卤水中,常含有较多的有机质。这些有机质主要为各种烃类,且由于大多数热液矿床的成矿温度高于液态烃的稳定温度,因而这些烃类主要以轻烃气体存在(Zhuang et al., 1997)。相对于无机组分来说,有机气体在流体包裹体中多属微量。限于测定方法,除 CH₄ 外,人们对成矿流体中有机气体的组成和性状所知甚少,有关的资料也极少。最近,笔者利用超高真空四极气相质谱系统对粤东新发现的嵩溪大型独立银(锑)矿成矿期主要矿石矿物流体包裹体中的有机气体组成进行了测定,并据此对矿床成因进行初步讨论。

1 矿床地质概况

嵩溪银(锑)矿床位于永梅拗陷南段寨岗上中生代火山沉积盆地之北缘,赋存于盆地内近南北走向的拉张性断裂的局部凹陷中。赋矿围岩主要为下侏

罗统嵩灵组上段之富含有机质的黑色碳质页岩和沉凝灰岩,局部地段出露有厚达十米的安山玄武岩。矿体多呈顺层的层状、似层状、透镜状和脉状,主要矿石为硫化物石英脉型,矿石矿物主要为辉锑矿、黄铁矿、毒砂、闪锌矿等,次为黄铜矿、磁黄铁矿、银黝铜矿、黝锑银矿、深红银矿和辉锑银矿等,主要脉石矿物有石英、方解石、绿泥石和白云石等。矿石结构主要有草莓状、自形到半自形粒状和胶状等,矿石构造主要为层纹状、条带状、网脉状,局部见角砾状。矿区为一轴向东西、向南东倾伏的开阔背斜。与国内外现有独立银矿相比,该矿具有独特的 Ag-Sb 矿化组合,且矿化具有一定的分带性:水平方向上表现为由西向东锑矿化减弱,银矿化增强,而垂直方向上表现为上部富集锑,下部富集银。关于矿床成因,目前主要有海底基性火山喷流(郑庆年, 1996)和浅成中低温火山热液充填(姚德贤等, 1996)两种观点,前者认为成矿流体来自海底热卤水,后者则认为主要来自岩浆水,但晚期有大气降水加入。然而,笔者的

* 本文得到国家自然科学基金(49773195, 49502029)、广东省自然科学基金(970123)、国家教育部优秀青年教师基金、高等学校国家重点实验室访问学者基金、中山大学“211”基础研究前沿课题基金、南京大学成矿作用国家重点实验室开放基金和美国岭南基金会优秀中青年教师培养基金联合资助

第一作者简介 孙晓明,男,1963年生,教授,博士,从事矿床地球化学研究。Email: eessxm@zsu.edu.cn

收稿日期 2000-11-29; 改回日期 2001-01-08。李岩编辑。

最新研究表明该矿属沉积热卤水改造型矿床,成矿流体主要由建造水组成,其中岩浆水含量很低(孙晓明等,1999)。

2 样品和测定方法

本次分析所用样品除 97214(方解石)外,均采自主成矿期,因此其中流体包裹体的成分基本上可以代表嵩溪矿床的成矿流体。冷热台下观测表明石英等透明矿物中的流体包裹体绝大多数为原生包裹体,其主要类型为气液两相包裹体,偶见有机包裹体和含子晶的三相包裹体,未观察到 CO_2 包裹体。流体包裹体长轴长一般为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$,偶见大于 $100 \mu\text{m}$ 者。包裹体的均一温度主要为 $170 \sim 250^\circ\text{C}$,盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $8\% \sim 15\%$ 。

矿物流体包裹体中有机气体组成的测定在美国新墨西哥矿业技术学院(NMT)进行。单矿物样品经双目镜下挑选和丙酮及二次去离子水洗净并烘干后,将 100 mg 粒径为 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 左右的纯净矿物样品置于螺旋式手动碎样装置中,在 100°C 条件下烘烤约 8 h ,以去除次生包裹体和可能赋存在矿物解理或裂隙中的微量气体,同时抽真空,直到碎样装置及气相提取和处理系统达到超高真空($p < 2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$)。在高真空管中手动压碎矿物样品,从被打开的流体包裹体中释放出的气体被真空提取系统快速吸入 Balzer QMS420 型四极气相质谱仪中。分析精度一般 $< 5\%$ 。气体输运管道均由玻璃制成,且气体运移时间极短($< 1 \text{ s}$),因此被测定的有机气体完全可以保持其原有组成。测定数据采用 Quaqstar420 软件处理。具体过程参见 D. I. Norman et al. (1987) 的文章。透明矿物流体包裹体均一温度用英国产 Linkam THMS600 型冷热台测定,测试误差 $< 0.2^\circ\text{C}$;不透明矿物中流体包裹体的均一温度近似采用同一样品中共生石英的温度。

3 测定结果及讨论

由表 1 可见:嵩溪银(锑)矿床成矿流体中的有机气体主要由 4 种烷烃[甲烷(CH_4)、乙烷(C_2H_6)、丙烷(C_3H_8)和丁烷(C_4H_{10})]、3 种烯烃[乙烯(C_2H_4)、丙烯(C_3H_6)和丁烯(C_4H_8)]和 2 种芳香烃[苯(C_6H_6)和甲苯(C_7H_8)]组成,其中饱和烷烃类占绝对优势,大部分样品 $\sum x(\text{alka})/\sum x(\text{alke}) > 100$ (alka 为烷烃,alke 为烯烃),而不饱和烯烃和芳香烃的含量相当低,其中乙烯(C_2H_4)大多数低于检测限。

3.1 岩浆活动与成矿

Giggenbach 等(1994,1997)在大量研究的基础上指出:地热流体中轻烃气体均为地壳流体与沉积岩相互作用产生的,其中存在两种端员组分:一种(简称“天然气”型)是地热流体与沉积岩在中低温条件下相互作用形成的,其组成十分类似于天然气,其中饱和烃除 CH_4 外, C_2H_6 和 C_3H_8 含量亦较高, $x(\text{CH}_4)/x(\text{C}_2\text{H}_6)$ 和 $x(\text{C}_2\text{H}_6)/x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 分别为 $50 \sim 350$ 和 2.5 左右,而不饱和烯烃和芳烃含量很低;另一种(简称“岩浆气”型)则是由岩浆岩侵入时流体与沉积岩在高温条件下($> 400^\circ\text{C}$)相互作用而形成的,其中饱和烷烃主要为 CH_4 ,其余含量均较低, $x(\text{CH}_4)/x(\text{C}_2\text{H}_6)$ 和 $x(\text{C}_2\text{H}_6)/x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 分别为 > 1000 和 10 左右,不饱和烯烃和芳香烃的含量较高,其原因在于高温条件有利于短链烷烃和不饱和烯烃及芳香烃的形成。由表 1 可以看出:嵩溪成矿流体 $x(\text{CH}_4)/x(\text{C}_2\text{H}_6)$ 大部分介于 $20 \sim 50$,而 $x(\text{C}_2\text{H}_6)/x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 绝大多数 < 3 ,且烯烃和芳烃的含量均很低,因而该矿流体包裹体中轻烃有机气体显然属于“天然气”型,图 1 也显示所有分析值均落在“天然气”型范围内,说明这些轻烃气是在中低温条

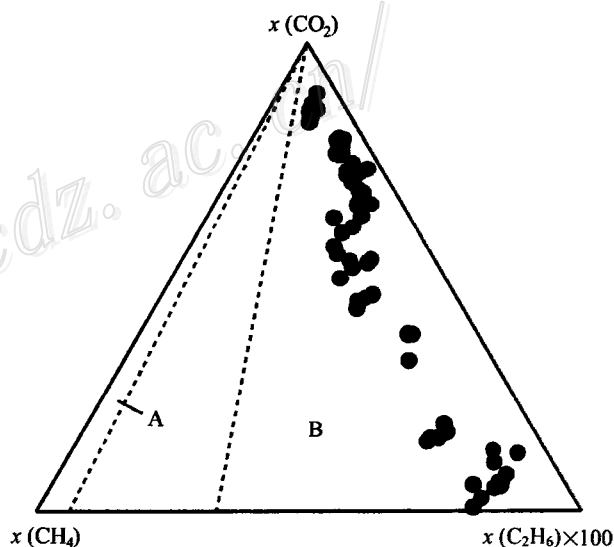


图 1 嵩溪银(锑)矿床成矿流体
 $x(\text{CH}_4)$ - $x(\text{CO}_2)$ - $x(\text{C}_2\text{H}_6)$ 三角图解

A—“岩浆气”型范围; B—“天然气”型范围
(据 W. F. Giggenbach 等,1994)

Fig. 1 $x(\text{CH}_4)$ - $x(\text{CO}_2)$ - $x(\text{C}_2\text{H}_6)$ ternary diagram
of ore-forming fluids in the Songxi Ag(Sb) deposit
A—“Magmatic gas type” field; B—“Natural gas type” field
(after W. F. Giggenbach et al., 1994)

表 1 嵩溪银(锑)矿成矿流体包裹体中轻烃有机气体及 CO₂ 含量Table 1 Light hydrocarbons and CO₂ contents of fluid inclusions in the Songxi Ag(Sb) deposit

样号 (矿物)	位置及矿 物组合	t _b /℃	碎样 次数	x(B)/%										$\frac{x(\text{CH}_4)}{x(\text{C}_2\text{H}_6)}$		$\frac{x(\text{C}_2\text{H}_6)}{x(\text{C}_3\text{H}_8)}$		$\lg K_e^{\text{②}}$	$\lg K_e - \lg K_T^{\text{③}}$
				CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈	C ₅ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	C ₇ H ₁₆	CO ₂							
97201Q (Q)	宝山矿 -13m 中段, TD4; Sb+Q	193.7	1	8.5375	0.0000	0.2631	0.0760	0.1489	0.0271	0.0243	0.0019	0.0014	90.9189	32.4473	1.7559	82.0246	-1.2667	-0.0637	
			2	8.6178	0.0000	0.2783	0.0878	0.1746	0.0232	0.0221	0.0027	0.0020	90.7915	30.9691	1.5935	81.9213	-1.2886	-0.0856	
			3	8.8379	0.0000	0.2968	0.0894	0.1754	0.0307	0.0262	0.0032	0.0017	90.5388	29.7817	1.6916	77.7553	-1.2456	-0.0426	
			4	12.3040	0.0000	0.3925	0.0995	0.2156	0.0308	0.0274	0.0023	0.0021	86.9258	31.3479	1.8201	99.3337	-1.2361	-0.0331	
			5	10.6557	0.0000	0.3623	0.0918	0.1994	0.0310	0.0287	0.0050	0.0037	88.6224	29.4090	1.8169	91.5732	-1.2092	-0.0062	
			6	8.8638	0.0000	0.2691	0.0843	0.1811	0.0256	0.0220	0.0055	0.0024	90.5462	32.9348	1.4861	84.9075	-1.3456	-0.1426	
			7	6.8363	0.0000	0.2197	0.0874	0.1563	0.0148	0.0129	0.0040	0.0010	92.6677	31.1234	1.4056	70.7051	-1.3452	-0.1422	
			8	11.1804	0.0000	0.3578	0.0894	0.2174	0.0304	0.0408	0.0061	0.0048	88.0729	31.2448	1.6462	98.4453	-1.2783	-0.0753	
			9	5.2036	0.0000	0.1895	0.0911	0.1480	0.0149	0.0125	0.0062	0.0016	94.3326	27.4585	1.2805	52.3870	-1.3313	-0.1283	
			10	9.1178	0.0000	0.3484	0.0953	0.2082	0.0373	0.0425	0.0035	0.0023	90.1447	26.1702	1.6731	73.2754	-1.1943	0.0087	
97201sB (Sb)	宝山矿 -13m 中段, TD4; Sb+Q	193.7	1	3.3255	0.0000	0.3219	0.0085	0.2738	0.01438	0.0201	0.0031	0.0012	96.0316	10.3308	1.1757	171.9065	-0.9438	0.2592	
			2	8.0568	0.0000	0.4018	0.0701	0.4288	0.0072	0.0086	0.0094	0.0013	91.0159	20.0494	0.9372	114.9740	-1.3303	-0.1273	
			3	7.4366	0.0034	0.2199	0.0256	0.1806	0.0072	0.0072	0.0072	0.0008	92.1117	33.8214	1.2175	217.0444	-1.4437	-0.2407	
			4	5.9080	0.0000	0.2070	0.0472	0.2519	0.0053	0.0042	0.0043	0.0007	93.5716	28.5431	0.8218	121.4708	-1.5407	-0.3377	
			5	6.0735	0.0000	0.2995	0.0276	0.2746	0.0082	0.0092	0.0073	0.0013	93.2989	20.2799	1.0906	178.0576	-1.2694	-0.0664	
97209Q (Q)	宝山矿 -13m 中段, TD4; Sb+Q	212	1	5.9109	0.0000	0.2673	0.0487	0.1851	0.0101	0.0094	0.0083	0.0009	93.5594	22.1109	1.4446	108.3995	-1.1849	-0.0654	
			2	4.6169	0.0000	0.2006	0.0468	0.1560	0.0093	0.0063	0.0062	0.0006	94.9574	23.0195	1.2858	88.7315	-1.2529	-0.1334	
			3	7.0803	0.0000	0.2753	0.0438	0.1833	0.0099	0.0063	0.0054	0.0003	92.3956	25.7205	1.5022	140.5308	-1.2336	-0.1141	
			4	7.9045	0.0000	0.3544	0.0430	0.1875	0.0112	0.0078	0.0067	0.0006	91.4843	22.3043	1.8897	155.7574	-1.0720	0.0475	
97209Sb (Sb)	宝山矿 -13m 中段, TD4; Sb+Q	212	1	30.5586	0.1652	0.5865	0.1614	0.4832	0.0530	0.0604	0.0174	0.0028	68.0603	52.1035	1.2138	137.2292	-1.6327	-0.5132	
			2	23.1499	0.0000	0.4689	0.1660	0.4807	0.0472	0.0511	0.0275	0.0063	75.6025	49.3681	0.9756	113.2906	-1.7042	-0.5847	
			3	15.8680	0.0000	0.3846	0.0818	0.2691	0.0312	0.0363	0.0098	0.0027	83.3167	41.2575	1.4295	146.5093	-1.4603	-0.3408	
			4	18.9753	0.0000	0.5213	0.0851	0.2929	0.0358	0.0365	0.0068	0.0037	80.0427	36.4021	1.7797	164.0505	-1.3108	-0.1913	
			5	18.8910	0.0029	0.3587	0.0997	0.3142	0.0409	0.0472	0.0145	0.0033	80.2277	52.6683	1.1415	136.7148	-1.6641	-0.5446	
			6	17.4228	0.0000	0.5296	0.1015	0.2959	0.0448	0.0410	0.0042	0.0049	81.5553	32.8999	1.7896	124.9935	-1.2644	-0.1449	
97214 (Cc)	宝山矿 -13m 中段, TD1; Q+Cc	220.8	1	56.1997	0.0000	1.7499	0.2237	0.8757	0.2097	0.1882	0.0451	0.0058	40.5022	32.1152	1.9984	146.1433	-1.2060	-0.0910	
			2	54.1287	0.0000	1.7659	0.1466	0.6229	0.1191	0.1093	0.0257	0.0031	43.0788	30.6522	2.8349	213.1953	-1.2809	-0.1659	
			3	51.8645	0.0000	1.8926	0.1540	0.6317	0.1099	0.1181	0.0330	0.0044	45.1918	27.4037	2.9959	206.4843	-1.2383	-0.1233	
			4	27.1607	0.0000	4.1385	0.9734	4.0797	0.7064	0.0271	0.3005	0.0000	62.6137	6.5629	1.0144	21.0755	-0.8109	0.3041	
			5	80.6682	0.0000	3.8259	0.3323	1.5386	0.2541	0.0206	0.0070	0.0000	13.3534	21.0849	2.4866	146.7511	-0.9284	0.1866	

续表 1

样号 (矿物)	位置及矿 物组合	碎样 次数	$t_h/^{\circ}\text{C}$	$x(\text{B})/\%$												$x(\text{CH}_4)/$ $\tau(\text{C}_2\text{H}_6)$	$\tau(\text{C}_2\text{H}_6)/$ $\tau(\text{C}_3\text{H}_8)$	$\Sigma x(\text{alka})/$ $\Sigma \tau(\text{alke})^{\oplus}$	$\lg K_g^{\ominus}$	$\lg K_g - \lg K_T$
				CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_4H_6	C_5H_{12}	C_6H_{14}	C_7H_{16}	CO_2	C_8H_{18}	C_9H_{20}					
97232Q (Q)	宝山矿 -38m 中段, TD2; Q+Sb	1	220.8	69.3597	0.0000	3.1762	0.5403	2.5573	0.3845	0.3432	0.0072	0.0077	23.6239	21.8372	1.2420	81.5704	-1.2451	-0.0601		
		2	51.9510	0.0000	4.3546	0.6631	0.8460	0.4800	0.4556	0.0112	0.0017	41.2370	11.9301	5.1471	50.3959	-0.3651	0.8199			
		3	39.8024	0.0000	3.2573	0.3111	0.8792	0.2144	0.2122	0.0144	0.0018	55.3070	12.2194	3.7050	84.0133	-0.5183	0.6667			
		4	63.8656	0.0000	4.3932	0.6732	1.8012	0.4299	0.3876	0.0069	0.0027	28.4398	14.5374	2.4390	63.8639	-0.7753	0.4097			
97232Sb (Sb)	宝山矿 -38m 中段, TD2; Q+Sb	1	200.8	8.0797	0.0171	0.0932	0.0792	0.1740	0.0149	0.0188	0.0093	0.0023	91.5113	86.7278	0.5353	72.2070	-2.2096	-1.0246		
		2	7.4507	0.0171	0.0826	0.0777	0.1513	0.0104	0.0148	0.0080	0.0021	92.1853	90.1846	0.5462	73.1924	-2.2178	-1.0328			
		3	8.8856	0.0233	0.0968	0.0727	0.1686	0.0135	0.0156	0.0111	0.0017	90.7111	91.8074	0.5739	83.6827	-2.2040	-1.0190			
		4	3.9771	0.0000	0.0774	0.0566	0.1337	0.0085	0.0072	0.0061	0.0012	95.7322	51.3685	0.5791	64.4286	-1.9480	-0.7630			
97257 (Q)	ZK609, 208.75m, As + Cp + Py + Q	5		5.8735	0.0000	0.0974	0.0625	0.1592	0.0115	0.0143	0.0096	0.0014	93.7707	60.3083	0.6118	83.0255	-1.9937	-0.8087		
		6	6.2957	0.0012	0.0796	0.0657	0.1409	0.0103	0.0119	0.0084	0.0022	93.3840	79.0612	0.5650	84.5589	-2.1459	-0.9609			
		7	5.9179	0.0022	0.0863	0.0766	0.1463	0.0099	0.0124	0.0073	0.0015	93.7396	68.5516	0.5901	69.4850	-2.0651	-0.8801			
		1	46.7716	0.0000	1.9489	0.4488	1.4126	0.0599	0.0405	0.0349	0.0026	49.2802	23.9984	1.3797	98.6328	-1.2404	-0.1224			
97299 (Q)	ZK609, 407.75m, Py + Q	2		8.5115	0.0000	0.3299	0.0531	0.2236	0.0160	0.0039	0.0044	0.0005	90.8571	25.8009	1.4754	131.2203	-0.7611	0.3569		
		3	8.0350	0.0000	0.2050	0.0537	0.1759	0.0000	0.0029	0.0034	0.0003	91.5238	39.2048	1.1651	156.7542	-1.5270	-0.4090			
		4	6.1389	0.0000	0.1870	0.0445	0.1422	0.0000	0.0023	0.0023	0.0003	93.4826	32.8333	1.3147	145.2825	-1.3975	-0.2795			
		1	47.7664	0.0000	3.5091	0.4103	1.4111	0.1767	0.1377	0.0201	0.0016	46.5671	13.6121	2.4868	89.9892	-0.7383	0.3662			
97325Q (Q)	ZK208, 218m,Asp + Py + Q	2		24.7862	0.0000	0.9591	0.1286	0.4085	0.0803	0.0626	0.0019	0.0006	73.5721	25.8430	2.3481	125.5070	-1.0416	0.0629		
		3	23.5461	0.0000	0.9940	0.1079	0.3788	0.0734	0.0568	0.0016	0.0003	74.8410	23.6872	2.6240	137.7891	-0.9555	0.1490			
		4	31.7842	0.0000	1.0826	0.2107	0.4003	0.0017	0.0581	0.0016	0.0005	66.4604	29.3595	2.7048	156.8893	-1.0356	0.0689			
		1	69.1160	0.0000	4.1745	0.3140	1.0310	0.2307	0.1879	0.0068	0.0028	24.9364	16.5568	4.0489	136.8075	-0.6116	0.5724			
97325Asp (Asp)	ZK208, 218m, Asp + Py + Q	2		61.5426	0.0000	4.1963	0.3824	1.2638	0.2512	0.2309	0.0057	0.0014	32.1257	14.6658	3.3205	106.1116	-0.6451	0.5389		
		3	44.5593	0.0000	1.8487	0.1477	0.4846	0.0943	0.0915	0.0035	0.0013	52.7691	24.1026	3.8147	194.1283	-0.8006	0.3834			
		4	59.3560	0.0000	4.3395	0.4677	1.3794	0.3342	0.2846	0.0070	0.0034	33.8282	13.6780	3.1460	81.5103	-0.6383	0.5457			
		5	90.5001	0.0000	3.7331	0.2548	0.7918	0.1597	0.1541	0.0051	0.0017	4.3998	24.2428	4.7149	229.6400	-0.7111	0.4729			
97325Asp (Asp)	ZK208, 218m, Asp + Py + Q	1	200.9	18.1620	0.0000	0.3046	0.0731	0.1544	0.0210	0.0197	0.0008	0.0019	81.2625	59.6235	1.9731	198.1177	-1.4803	-0.2963		
		2	23.1169	0.0000	0.3590	0.0756	0.1430	0.0325	0.0348	0.0014	0.0036	76.2332	64.3996	2.5107	218.8030	-1.4091	-0.2251			
		3	27.7868	0.0000	0.4470	0.0820	0.1757	0.0257	0.0254	0.0010	0.0033	71.4530	62.1666	2.5439	263.8676	-1.3881	-0.2041			
		4	23.7801	0.0083	0.3861	0.0708	0.1882	0.0251	0.0278	0.0014	0.0031	75.5092	61.5971	2.0511	234.1393	-1.4776	-0.2936			
97325Asp (Asp)	ZK208, 218m, Asp + Py + Q	5		26.6818	0.0000	0.6026	0.0867	0.2211	0.0388	0.0434	0.0018	0.0061	72.3076	44.2759	2.7247	219.4772	-1.2109	-0.0269		
		6	22.4555	0.0000	0.4444	0.0891	0.1890	0.0206	0.0187	0.0008	0.0027	76.7793	50.5305	2.3511	210.8127	-1.3323	-1.483			
		7	24.1436	0.0000	0.6272	0.1174	0.2614	0.0350	0.0377	0.0008	0.0017	74.7751	38.4914	2.3992	164.4689	-1.2053	-0.0213			
		8	28.9608	0.0000	0.5746	0.1221	0.3140	0.0442	0.0549	0.0014	0.0043	69.9237	50.3992	1.8300	179.8593	-1.4400	-0.2560			

矿物代号: Sb—辉钼矿; Q—石英; Py—黄铁矿; C—方解石; Asp—毒砂; Cp—黄铜矿。①alka: 烷烃类; alke: 烯烃类。② K_g : 反应式 $\text{CH}_4 + \text{C}_3\text{H}_8 = 2\text{C}_2\text{H}_6$ 的计算平衡常数; ③ K_T : ②所示反应式在均一温度下的平衡常数(据 Shock and Helgeson, 1990)。

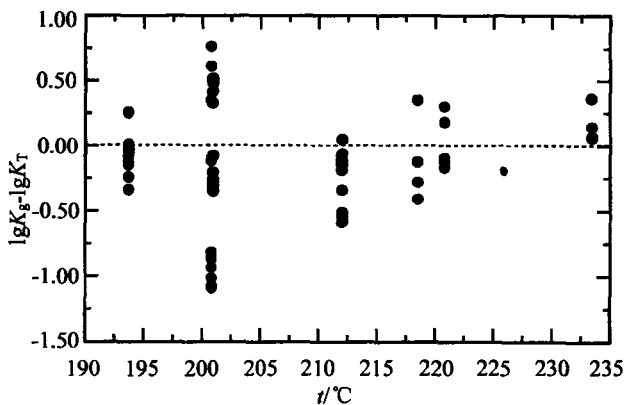
图2 嵩溪银(锑)矿成矿流体 $\lg K_g - \lg K_T - t$ 图

Fig. 2 $\lg K_g - \lg K_T$ versus t diagram of ore-forming fluids in the Songxi Ag(Sb) deposit

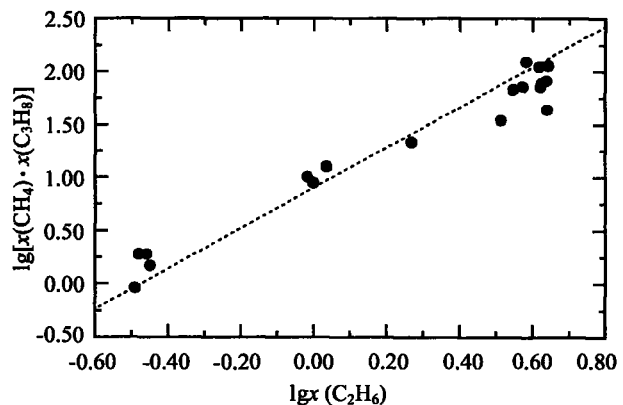


图3 嵩溪银(锑)矿成矿流体

$\lg x(C_2H_6) - \lg [x(CH_4) \cdot x(C_3H_8)]$ 图

图中点线为式(1)在300℃下的平衡线

Fig. 3 $\lg x(C_2H_6) - \lg [x(CH_4) \cdot x(C_3H_8)]$ diagram of ore-forming fluids in the Songxi Ag(Sb) deposit

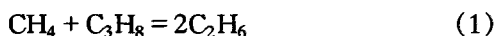
The dash line represents the equilibrium line of equ. (1) at 300°C

件下由流体与围岩相互作用产生的,成矿中基本未受高温岩浆活动的影响。因此,嵩溪矿区安山玄武岩的喷出和银(锑)矿床成矿之间可能并没有直接的成因联系。事实上,成矿流体 N_2 -Ar-He 示踪体系研究已表明其中岩浆水比例很少,一般<5%(孙晓明等,1999)。此外,几乎所有安山玄武岩均受到强烈的绿泥石化等围岩蚀变,表明其喷出可能主要发生于成矿之前。

3.2 轻烃气体的来源:微生物活动和干酪根热解

天然气中轻烃气的成因一般有三:①微生物作用;②沉积岩中干酪根的热解;③无机合成(J. A. Welhan, 1988)。③一般仅在很高的温度条件,如洋中脊等环境下方可实现,因而地热系统中的有机气体一般仅有①和②两种成因(J. A. Welhan, 1988)。

Sugisaki 等(1995)从化学平衡的角度对轻烃气体性状进行了研究,结果显示:三种最轻的烷烃 CH_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 之间在 200℃ 以上时即可达到化学平衡:



对微生物成因天然气来说,式(1)的 $\lg K_g - \lg K_T < 0$,式中 K_g 为由实测气体含量求得反应常数, K_T 为地热温度下的理论平衡常数(Shock et al., 1990),而干酪根热解成因的有机气体 $\lg K_g - \lg K_T > 0$ (R. Sugisaki et al., 1995)。由图2可见嵩溪成矿流体之 $\lg K_g - \lg K_T$ 变化较大,介于 -1.0328~0.8199,表明其中的有机气体为微生物成因和沉积岩围岩中干

酪根热解成因气体的混合气体,且其中 2/3 以上属前者,说明嵩溪矿成矿过程中微生物作用可能曾起到相当大的作用。

将表1和图1中的 $\lg K_g - \lg K_T > 0$ 者投到 $\lg x(C_2H_6) - \lg [x(CH_4) \cdot x(C_3H_8)]$ 图上(见图3),可见投影点基本上落在式(1)在 300℃ 下的平衡线附近,表明这些干酪根热解成因轻烃气已基本达到化学平衡,其平衡温度为 300℃ 左右。但流体包裹体研究显示(姚德贤等,1996):嵩溪银(锑)矿成矿流体压力为 159×10^5 Pa~ 177×10^5 Pa,相应的成矿深度为 606~670 m。在基本排除了岩浆活动参加成矿的可能性后(见前文),即使在较高的地热梯度下,要在 <1 km 的成矿深度内使沉积岩中的干酪根热解产生轻烃气,并使其在 300℃ 条件下达到化学平衡,显然是很难实现的。因此比较合理的解释应当是:这些轻烃气可能源于沉积盆地(寨岗上盆地)深部干酪根的热解,并经过成矿流体的长距离搬运到达目前较浅的成矿部位。此点从一个侧面证实了嵩溪成矿流体主要为来自沉积盆地深部的热卤水(孙晓明等,1999)。

沉积岩中的干酪根主要有两类:海相的库克油页岩(Kukersite)型(即Ⅱ型)和陆相的木质煤(Xylite)型(即Ⅲ型)。这两种干酪根在高温热解时产生的有机气体组成有所不同(E. L. Shock et al., 1990)。将嵩溪样品中 $\lg K_g - \lg K_T > 0$ 者投入图4,可见其落点接近海相库克油页岩的热解线,表明该

矿成矿流体中热解成因的轻烃气主要来自Ⅱ型干酪根的热解。

3.3 成矿构造背景

Giggenbach 等(1992,1997)的研究显示:地热流体中释放的有机气体的 $x(\text{C}_2\text{H}_6)/x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 比值可用来判别其源区的大地构造背景:来自裂谷者 $x(\text{C}_2\text{H}_6)/x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 约为 2.5,而来自岛弧者约为 10,其原因在于岛弧环境中的高温岩浆活动和较低的压力有利于短链烷烃的形成,而裂谷环境中的低温和高压条件则相反(W. F. Giggenbach, 1997)。同时由于苯(C_6H_6)在热水中的溶解度远高于 C_2H_6 和 C_3H_8 ,因而地热气体中 C_6H_6 的含量可用来判别水-岩作用中有机气体被释放的早晚(W. F. Giggenbach et al., 1992)。由图 5 可以看出,嵩溪样品落在裂谷线附近,清楚地表明该矿成矿地质背景可能为陆内断裂环境。事实上,其他证据也显示出嵩溪银(锑)矿所在的永梅拗陷南端为具有早期裂谷性质的陆内裂陷(郑庆年,1996)。此外,图 5 还显示出样品数据也落在早期气体(EV)范围内,表明该矿成矿流

体中的轻烃气体是在水-岩作用的早期即被释放出来的。

3.3 矿床成因探讨

如前文所述,对嵩溪银(锑)矿的成因存在不同看法,主要有海底基性火山喷流(郑庆年,1996)、中低温火山热液充填(姚德贤等,1996)和笔者等最近提出的沉积盆地热卤水改造成矿等观点。其中前两者均认为火山活动在嵩溪矿床成矿中起了重要作用。但成矿流体 $\text{N}_2\text{-Ar-He}$ 示踪体系的研究清楚地表明其成矿流体主要来源于沉积盆地中的热卤水,其中基本不含岩浆水(孙晓明等,1999)。本文对流体包裹体中轻烃气体组成的研究再次证实了嵩溪矿区基性火山喷发活动与成矿之间可能并无成因上的联系,而部分轻烃气体可能源于沉积盆地的深部。因此有必要充分考虑沉积盆地的演化和矿床成因之间的联系。从现有资料推测,嵩溪银(锑)矿床的成因似应大体如下:燕山中晚期,从中泥盆世始即接收了巨厚沉积的寨岗上火山沉积盆地为一个断陷盆地,在其断陷过程中,地热梯度升高,加之上覆沉积

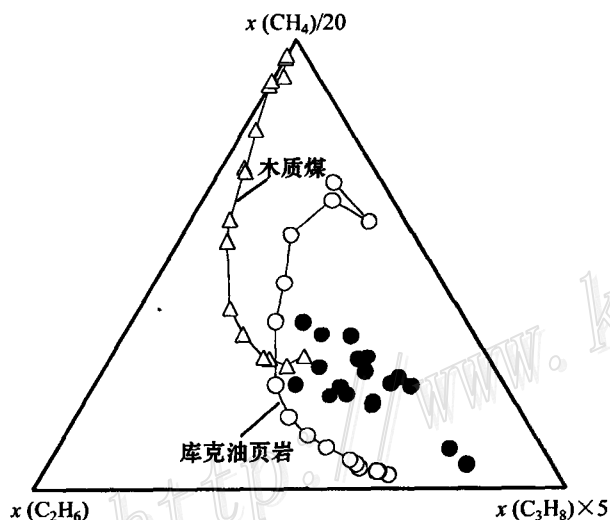


图 4 嵩溪银(锑)矿成矿流体

$x(\text{C}_2\text{H}_6)$ - $x(\text{CH}_4)$ - $x(\text{C}_3\text{H}_8)$ 三角图

图中:○和△的连线分别是Ⅱ类(库克油页岩)和Ⅲ类(木质煤)干酪根的热解线(据 U. Berner 等,1995)

Fig. 4 $x(\text{C}_2\text{H}_6)$ - $x(\text{CH}_4)$ - $x(\text{C}_3\text{H}_8)$ ternary diagram

of ore-forming fluids in the Songxi Ag(Sb) deposit

The connected lines of open triangles and open circles are pyrolysis lines of Type II (kukersite) and Type III (xylite) kerogens (after U. Berner et al., 1995)

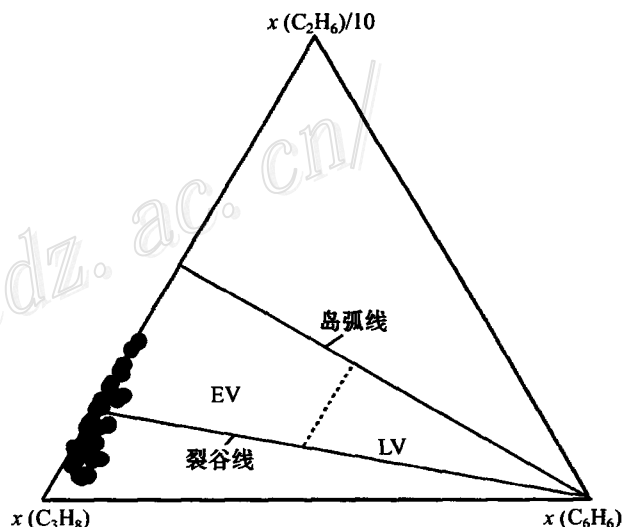


图 5 嵩溪银(锑)矿床成矿流体轻烃气

$x(\text{C}_3\text{H}_8)$ - $x(\text{C}_2\text{H}_6)$ - $x(\text{C}_6\text{H}_6)$ 三角图

图中: EV—早期气体; LV—晚期气体。图中岛弧线和裂谷线及 EV 和 LV 的位置据 Giggenbach 等(1992)

Fig. 5 $x(\text{C}_3\text{H}_8)$ - $x(\text{C}_2\text{H}_6)$ - $x(\text{C}_6\text{H}_6)$ ternary

diagram of ore-forming fluids in the Songxi deposit

EV—Early stage vapor field; LV—Late stage vapor field The positions of island arc line and rift line, as well as EV and LV, come from Giggenbach et al. (1992)

物的压力,使沉积岩中的沉积热卤水顺地层向盆地边缘断裂大规模侧向迁移,并在有利的构造部位,如背斜轴部张裂等处富集成矿。成矿热卤水在侧向迁移过程中,将沉积盆地深部由于酪根热解形成的轻烃气体溶解并带到距地表较近部,同时又有浅部地层中微生物成因的轻烃气逐步混入,特别是在热卤水迁移的中晚期。因此,流体包裹体中有机气体的研究可提供成矿流体大规模迁移和富集的有关证据。

4 小 结

(1) 嵩溪成矿流体中轻烃气主要由 C_1 - C_4 烷烃组成,而不饱和烯烃和芳香烃的含量很低,表明成矿过程未受到高温岩浆作用的影响。

(2) 嵩溪成矿流体中轻烃气为微生物成因和沉积岩围岩中Ⅱ类干酪根热解成因气体的混合气,其中前者占2/3以上,表明成矿过程中微生物活动曾起到相当大的作用。

(3) 嵩溪成矿流体中热解成因的轻烃气已在300℃下达到平衡,此平衡温度远超过矿化深度所能达到的地热温度,表明它们可能源于沉积盆地深部,被成矿流体远距离携带到较浅的矿化部位。

(4) 本文的研究从一个侧面证实了嵩溪矿应属沉积热卤水改造型矿床,而不是前人所认为的海底基性火山喷流或中低温火山热液充填矿床。

致 谢 本文第一作者在美国合作研究期间,得到 Andrew Campbell 教授和 Beverly Chomiak 女士技术上的指导;野外工作中得到广东有色地勘局肖振宇高工的大力支持,谨致谢忱!

参考文献

- 孙晓明, Norman D. I, 孙凯, 等. 1999. 利用 N_2 -Ar-He 示踪法研究粤东嵩溪大型银锑矿成矿流体[J]. 自然科学进展, 9(12): 1364~1367.
- 姚德贤, 李兆麟, 叶银法, 等. 1996. 粤东宝山银(锑)矿床地质特征和成因[J]. 矿床地质, 15(2): 123~132.
- 郑庆年. 1996. 一个海底基性火山喷流成因的银锑矿床地质特征[J]. 矿床地质, 15(3): 238~248.
- Berner U, Faber E, Scheeder G, et al. 1995. Primary cracking of algal and landplant kerogens: kinetic models of isotopic variations in methane, ethane and propane[J]. Chem. Geol., 126(3~4): 233~245.
- Giggenbach W F, Golver R B. 1992. Tectonic regime and major processes governing the chemistry of water and gas discharges from the Rotorna geothermal field, New Zealand[J]. Geothermics, 21(1/2): 121~140.
- Giggenbach W F, Sheppard D S, Robinson B W, et al. 1994. Geochemical structure and position of the Waiotapu geothermal field, New Zealand[J]. Geothermics, 23(6): 599~644.
- Giggenbach W F. 1997. Relative importance of thermodynamic and kinetic processes in governing the chemical and isotopic composition of carbon gases in high-heatflow sedimentary basins[J]. Geochim. et Cosmochim. Acta, 61(17): 3763~3785.
- Norman D I, Sawkins I J. 1987. Analysis of gases in fluid inclusions by mass spectrometer[J]. Chem. Geol., 61(1~4): 1~10.
- Shock E L, Helgeson H C. 1990. Calculation of the thermodynamic and transport properties of aqueous species at high pressures and temperatures[J]. Geochim. et Cosmochim. Acta, 54(4): 915~945.
- Sugisaki R, Nagamine K. 1995. Evolution of light hydrocarbon gases in subsurface processes: constraints from chemical equilibrium[J]. Earth & Planet. Sci. Lett., 133(1~2): 151~161.
- Welhan J A. 1988. Origin of methane in hydrothermal systems[J]. Chem. Geol., 71(1/4): 183~198.
- Zhuang H P, Lu J L, Fu J M, et al. 1997. Preliminary study on light hydrocarbons in ore-forming fluids of gold and antimony deposits in southwestern Guizhou, China[J]. Chinese Science Bulletin, 42(20): 1708~1711.

Light Hydrocarbon Composition of Fluid Inclusions and Its Constraints on Ore Genesis: A Case Study of the Songxi Ag(Sb) Deposit, Eastern Guangong

Sun Xiaoming^{1,2}, David I. Norman³, Sun Kai¹, Chen Jingde¹, Chen Binghui¹

(1 Department of Earth Sciences, Zhongshan University, Guangzhou, 510275; 2 State Key Laboratory of Metallogenesis, Nanjing University, Nanjing 210093; 3 Department of Earth & environmental Sciences, New Mexico Institute of Mining and Technology (NMT), Socorro, NM 87801, USA)

Key words: light hydrocarbon, fluid inclusion, large-size Ag(Sb) deposit, Songxi

Abstract

Songxi is a newly-discovered large-size Ag(Sb) deposit. Using a suite of high vacuum quadrupole gas mass spectrometer systems, the authors recognized many kinds of light hydrocarbons in fluid inclusions of minerals. These hydrocarbons are mainly composed of C₁-C₄ saturated alkanes, while the contents of C₂-C₄ unsaturated alkenes and aromatic hydrocarbons are quite low, suggesting that the metallogenic processes seem not to have been affected by magmatic activities. Chemical equilibrium studies show that these hydrocarbons may be mixture of organic gases generated by microorganism activity and thermal cracking of Type II kerogens (kukersite) in sedimentary host rocks, and the former may constitute more than two-thirds, implying that microorganism might have played an important role in the metallogenesis. The equilibrium temperature of the latter is about 300°C, which is much higher than the geothermal temperature at the estimated depth of metallogenesis. Thus, the light hydrocarbons generated by thermal cracking of kerogens probably originated in the deep part of the sedimentary basins and then migrated through a long distance to the shallow position of the basin. The analytical data presented in this paper support from ore aspect the genetic model that Songxi may be a sedimentary hot brine transformed deposit instead of being a submarine basic volcanic exhalation and low-medium temperature volcanic hydrothermal fluid filling deposit proposed by most previous researchers.