康滇地轴东缘铅锌矿床地球化学特征*

Geochemical Characteristics of Lead-Zinc Deposits at Eastern Margin of Kangdian Axis

刘文周 王奖臻 李泽琴

（成都理工大学，四川 成都 610059）

Liu Wenzhou, Wang Jiangzhen, Li Zeqin

(Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

摘 要 通过野外观察及对铅、硫、碳同位素、微量元素和矿物包裹体的测定，经系统对比研究表明：金属元素主要来自含矿的围岩，硫具有地层硫与非生物还原的混合来源，成矿热液为主要来自大气降水的“二元”流体，成矿温度为 150～200℃，成矿时期主要为燕山期。

关键词 地球化学特征 铅锌矿床 康滇地轴东缘

康滇地轴东缘是我国西南地区的著名铅锌成矿带，在北起四川荥经、汉源，南经甘洛、会理、会东进入云南省巧家、会泽等地长约 480 km，向东可延伸至贵州西部地域及赫章等地。分布有铅锌矿产地 382 处，其中大型矿床 5 处，中型矿床 18 处，小型矿床 27 处。除已探明的铅锌储量外，潜在远景还十分巨大。

1 地轴东缘铅锌成矿带的分布特征

在区域构造上，铅锌矿床（点）分布在南北向安宁河线性断裂带和石棉—小江线性断裂带以东至北西向垭都—紫云断裂之间一个不大的地区。该区除发育古生代地层外，还分布有海西晚期的峨眉山玄武岩。在安宁河线性断裂带以西为构造隆起区，铅锌成矿带（区）就位于地轴东侧的洼陷带。

铅锌矿赋存的层位主要为上震旦统灯影组，主要矿床都赋存于该层位，该组自上而下可分 3 个岩性段：一段藻体最发育，又称富藻层；二段藻体发育较差，又称含藻层；三段富硅质和泥沙质，不利藻类生长，又称贫藻层。铅锌矿的富集，并非产于富藻层，而是以含藻层最富集。其次是三段的硅质白云岩。下石炭统摆佐组、下寒武统龙王庙组也是较重要的赋矿层位。

含矿层位在区域展布上，有由西往东逐渐抬升变新的规律。含矿层位的时代由西往东逐渐变新的现象，显然与西部地壳的抬升和大洋海盆向东南方向的逐步退缩有关。

1 矿床地球化学特征

2.1 微量元素地球化学背景

康滇地轴东缘成矿元素铅锌的地球化学背景有以下特点：① 整个康滇地轴东（缘）侧，无论是沉积岩，还是岩浆岩，铅锌的丰度和丰度系数均较高。地层中铅锌的平均丰度分别为 39 $\times10^{-6}$和 110$\times10^{-6}$，平均丰度系数分别为 3.9 和 2.05；在晋宁—澄江期的酸性岩浆中，铅锌的平均丰度分别为 45$\times10^{-6}$和 95$\times10^{-6}$，平均丰度系数分别为 3 和 1.48；② 在各地地层中，铅锌的丰度和丰度系数以上震旦统和中、下石炭统最高，这两个层位恰恰也是川、滇、黔交界地区最重要的两个赋矿层位；③ 晋宁运动后的第一个盖层震旦系中的成矿元素的高丰度显然与前震旦系有关，反映矿化具明显的继承性。

表 1 列出了 5 个矿床中闪锌矿和方铅矿的主要元素及比值，有下列特征：① 闪锌矿中 Cd 的含量：赤普为 940$\times10^{-6}$～1600$\times10^{-6}$，天宝山为 944$\times10^{-6}$～1472$\times10^{-6}$，大梁子为 1250$\times10^{-6}$～1492$\times10^{-6}$金沙厂 1137$\times10^{-6}$～2410$\times10^{-6}$，茂租 2900$\times10^{-6}$,有从北到南 Cd 逐渐增加的趋势；② 与碳酸盐岩型层控铅锌矿床的一般特点相似具 In 低 Ge 高,Ga/ln 和 Ge/Cd 比值高的特点；③ 方铅矿中 Sb 含量高，Bi 和 Ag 含量低，具有高的 Sb/Bi 比值。明显不同于岩浆热液 、火山热液和火山

* 国家自然科学基金（编号：40172039）资助

第一作者简介 刘文周，男，50 岁，副教授，从事矿产资源经济的教学和研究。

喷气-沉积矿床。

表 **1** 不同矿床闪锌矿、方铅矿的微量元素各量及比值特征（10^{-6}）

矿床	样号	矿物	Ga	Ge	Sb	Bi	Ti	Cd	In	Ag	Ga/In	Ga/Ge	Sb/Bi
赤普	PD17-11	闪锌矿	13	229			1.46	1600	3.09		4.2	0.057	
	PD17-16	闪锌矿	17	197			1.60	1330	5.97		2.8	0.086	
	PD15-14	闪锌矿	9	174			1.46	1600	4.93		1.8	0.052	
	PD3	闪锌矿	11	201			1.60	940	4.57		2.4	0.055	
天宝山	S-19-Lsp	闪锌矿	13.9	81			1.60	944	3.00		4.63	5.83	
	A006-Dsp	闪锌矿	30.0	48			1.6	1141	11.5		2.62	1.59	
	S-22-Msp	闪锌矿	27.3	61			1.6	1472	4.5		6.07	2.23	
	TB080-Msp	闪锌矿	56.8	96			1.6	1331	3.5		16.23	1.69	
	A006-Gn	方铅矿			18360	0.45				400			40800
	An 矿-Gn	方铅矿			3888	0.12				380			32400
	40E-2-Gn	方铅矿			918	0.18				476			5100
	5-22-Gn	方铅矿			954	0.10				440			9540
	45E-6-Gn	方铅矿			693	0.10				548			6930
大梁子	T33-Dsp	闪锌矿	11.6	75			1.6	1391	2.0		5.08	6.47	
	T4-Dsp	闪锌矿	13.60	93			1.6	1371	9.0		1.51	6.84	
	T19-Lsp	闪锌矿	32.1	96			1.6	1371	7.5		4.28	2.99	
	C56-Lsp	闪锌矿	60.0	75			1.6	1492	11.0		5.45	1.25	
	T38-Bsp	闪锌矿	14.1	49			1.6	1250	6.5		2.17	3.48	
	T15-Gn	方铅矿			1890	0.12				432			15750
	T38-Gn	方铅矿			11988	0.15				476			79920
金沙厂	KT-2	闪锌矿	26.6	6.1			1.6	1137	5.0		5.32	0.23	
	KT-1	闪锌矿	10.7	2.2			1.6	1161	5.5		1.95	0.21	
	NO1	闪锌矿	35	17			1.6	2310	2.0		17.5	0.49	
	NO2	闪锌矿	40	18			1.0	2410	2.0		20.0	0.45	
	KT-3	闪锌矿	47..4	10.5			1.6	1161	4.5		10.5	0.22	
	KT-4	方铅矿			10044	0.18				608			55800
	YT-1	方铅矿			2484	0.28				560			8871
茂租	M-1	闪锌矿	56	300		3.5		2900	25		2.24	12.0	
	M-2	方铅矿			3600	6.4	2.1			555			563

注：赤普矿床、茂租矿床样品由成都理工学院分析，天宝山、大梁子、金沙厂矿床样品由西南冶金地质研究所分析。

2.2 稳定同位素特征

2.2.1 铅同位素特征

铅同位素组成变化范围大，各矿床同位素组成及 Doe 模式年龄如表 2 所示，各矿床矿石正常铅模式年龄变化极大，从 593 Ma 至 24 Ma，这表明铅是从各时代地层中淋滤而来，且在这一过程中还会受到地层中放射性成因铅的不同程度的混染。将铅同位素组成数据投于 Zartman & Doe（1981）不同地质构造环境铅同位素演化曲线图上，投点有落在 地幔铅同位素演化曲线与造山带的铅同位素演化曲线附近；也有落在上地壳同位素演化曲线上的。表明该矿带的铅既有来自地壳中不同的地层中，也有可能来自地壳构造活动强烈部位及地幔。总之该区铅同位素明显分为两类，一类为丁型异常铅，如金沙厂和乐洪矿床；另一类为混合铅，即大多数投点落于正常铅范围内，部分落在 J-Pb 范围内。根据本区铅具多来源混合，并有放射成因铅加入的特点，是不同年龄正常铅混合的比例不同，或由于混入放射性成因铅及 U、Th 量的不同，必然会出现不同的模式年龄，直至负值，绝大部分模式年龄会“年轻化”。因此，矿石铅同位素模式年龄不能指示成矿年代。

2.2.2 硫同位素特征

几年来，我们分析了闪锌矿、方铅矿及黄铁矿的硫同位素近 50 件，收集前人有关资料约 89 件，综合列于表 3。从表 3 可看出：① 就单个矿床而言，δ^{34}S 值的弥散度大，如大梁子矿床的变化范围为－6.5‰～16.79‰，天宝山矿床为－2.2‰～22.1‰。但除少数黄铁矿、方铅矿外，绝大部分的 δ^{34}S 值为正值，在 1‰～19‰ 之间，十分类似于美国伊利诺斯－威斯康星地区的密西西比河谷型铅锌矿床；② 就单个矿物而言，黄铁矿的 δ^{34}S 值变化范围较宽，（从负值至正大值）。而闪锌矿和方铅矿的变化区间较窄，峰值范围更窄，表明铅锌硫化物形成阶段，其硫源的硫同位素组成的均一化程度较高；③ δ^{34}S 明显偏离零值，在成矿带中，具相似成矿环境及成因的各个矿床的 δ^{34}S 值有着不同的变化区间，这些特征显然说明硫源属地壳硫。

表 2　各矿床铅同位素组成

矿床	序号	样号	铅同位素组成 /‰ $^{206}Pb/^{204}Pb$	$^{207}Pb/^{204}Pb$	$^{208}Pb/^{204}Pb$	模式年龄 /Ma	资料来源
赤普	1	PD3	18.299	15.902	39.135	592.715	本文
	2	PD15-W7	18.295	15.900	39.082	593.242	
	3	PD5-15	18.226	15.830	38.867	564.159	
	4	PD17-11	18.242	15.867	39.006	593.330	
天宝山	1	A006-Gn	18.389	15.690	38.478	205	
	2	Gn-1	18.359	15.682	38.493	224	
	3	Pbcd6300-Tcpb1	18.288	15.603	38.259	269	西南冶金 602 队
	4	Pbcd8300-Tcpb1	18.214	15.575	38.090	316	
	5	Pbcd8300-Tcpb2	18.517	15.682	38.597	122	
大梁山	1	T4-Gn	18.485	15.771	38.830	143	本文
	2	T38-Gn	18.617	15.881	39.247	57	
	3	T15-Gn	18.969	15.853	39.586	—	
	4	T11-Gn	18.667	15.693	38.994	24	
	5	Dm17	18.290	15.740	38.481	268	
	6	DO 25	18.229	15.675	38.380	307	
	7	DO 69	18.396	15.839	38.818	200	
金沙厂	1	Pbs-G	20.884	15.846	41.124	—	本　文
	2	PbS-J	21.017	15.888	41.300	—	
	3	Pbs-Y	21.174	15.856	41.289	—	
	4	1-105	21.170	16.140	41.740	—	西南冶金 315 队
	5	YJ_4-1	21.35	15.90	41.79	—	涂光炽等，1984
	6	YJ_6-1	20.48	15.42	40.03	—	
团宝山	1	T-01	18.369	15.776	38.469	218	本文
	2	T-02	18.647	15.82	39.191	372	
银厂沟	1	Y-01	18.517	15.809	38.692	122	
	2	Y-02	18.417	15.795	38.729	187	
茂租	1	I-104	17.98	15.47	38.01	416	西南冶勘 317 队
	2	M-1	18.154	15.632	38.216	386	本　文
	3	M-2	18.124	15.628	38.176	403	
矿山厂	9 个样		17.98~18.45	15.01~16.61	36.93~39.48	170~327	唐森宁,1984
麒麟厂	8 个样		18.20~18.83	15.50~15.58	38.62~38.75	100~110	
杉树林	4 个样		18.34~18.62	15.36~15.74	38.3~39.34	104~291	

注：计算时采用常数：a_0=9.307，b_0=10.294，c_0=29.476，λ_8=1.5525×$10^{-10}a^{-1}$，λ_5=9.8484×$10^{-10}a^{-1}$，λ_2=0.49475×$10^{-10}a^{-1}$，t=4.43×10^9a；西南冶金 602 队，四川会理天宝山铅锌矿区二号矿体详细勘探报告，1983；西南冶勘 317 队，云南省巧家县茂组铅锌矿评价报告，1972；西南冶金 315 队，金沙厂铅锌矿区第一期地质勘探报告，1970

表 3　各矿床的硫同位素组成

矿床	测定矿物	样品数	$\delta^{34}S$ /‰ 最低值	最高值	平均值	资料来源
赤普	方铅矿	5	7.17	10.30	8.82	本　文
	闪锌矿	3	9.44	10.70	10.27	
	黄铁矿	3	−14.28	0.5	−6.78	
天宝山	方铅矿	1	−2.2			
	闪锌矿	3	1.3	1.8	1.5	
	黄铁矿	2	11.6	22.1	16.85	
大梁子	方铅矿	4	8.34	10.87	10.18	
	闪锌矿	8	10.51	14.99	12.89	
	黄铁矿	2	−6.5	16.37		
	方铅矿	8	6.72	11.5	9.71	据川冶地
	闪锌矿	13	9.86	14.4	12.77	勘 603 队
	黄铁矿	8	−8.5	16.79	7.98	等
金沙厂	方铅矿	5	1.1	5.1	3.18	本　文
	闪锌矿	4	4.6	6.1	5.02	
	方铅矿	2	3.8	7.0	5.40	涂光炽
	闪锌矿	3	6.5	7.0	6.67	等，1984
银厂沟	方铅矿	4	13.04	16.41	14.68	本　文
团宝山	方铅矿	2	13.14	16.17	14.65	
	闪锌矿	2	19.22	19.65	19.43	
茂组	方铅矿	1			11.93	
	闪锌矿	1			10.67	
	方铅矿	1			12.6	廖文，1985
	闪锌矿	1			14.1	
五星厂	闪锌矿	1			11.8	
矿山厂	方铅矿	15	7.00	10.10	8.33	唐森宁，1984
	闪锌矿	4	9.70	11.30	10.65	
麒麟厂	方铅矿	5	10.7	12.80	11.54	
	闪锌矿	7	13.00	15.80	14.44	
	黄铁矿	5	14.30	16.70	15.50	
杉树林	方铅矿	4	10.51	13.40	12.21	
	闪锌矿	6	14.87	16.30	15.81	
	黄铁矿	4	14.67	16.99	15.86	

注：川冶地勘 603 队，四川会东大梁子铅锌矿床中间储量报告，1982；廖文，川滇黔三省交界地区层控铅锌矿床成矿模式及成矿规律. 第二届全国层控矿床地球化学学术会议，1985。

该铅锌成矿带（区）的赋矿层位，无论是上震旦统灯影组，还是下寒武统的龙王庙组及石炭系的摆佐组都有膏盐层相伴生。天水溶滤膏盐层所形成的循环卤水，其中的 SO_4^{2-}在还原环境中可被细菌或非生物（包括 Fe^{2+}，有机炭，沥青等）还原，产生 H_2S。考虑到铅锌硫化物的形成温度在 200 ℃ 左右，含矿地层中有机质含量较高，矿区碳酸盐岩中普遍发育有沥青等。有理由认为硫酸盐的还原剂为非生物。据 P.A 特鲁丁格的研究，有机质对 $\delta^{34}S$ 值 20‰的硫酸盐进行非生物还原，所产生的 H_2S 的 $\delta^{34}S$ 值在 10‰～20‰之间，此结论与本区的实际情况基本相符。

2.2.3　矿物包裹体特征

（1）包裹体的类型及特征。矿物原生包裹体小而少，类型简单，大多为单一的异相包裹体，在气-液两相包裹体中，气液比很低，是该类矿床中矿物包裹体的总特征。但是，在各矿床之间，不同矿物之间也有一定的差别，例如，大梁子及天宝山矿床中，闪锌矿、石英、方解石和白云石等矿物中，包裹体不仅少而小，（一般小于 3 μ），且多数为单一的液相包裹体，而金沙厂矿床包裹体稍多，并出现大量次生包体，但各矿物间又有明显差别。一般在重晶石和萤石中包裹体较少，大小悬殊（5～20 μ）,并富含有机气体和 CO_2 气体，部分可见含子矿物者，沸腾现象明显。

（2）包裹体成分。矿物包裹体成分分析表明，成矿溶液为 Ca-Na-Mg-CI-HCO_3^-型(大梁子、天宝山)Ca-Na-CI-SO_4^{2-}型（金沙厂），茂租矿床成矿流体为 F-CI-Na-Ca 型。

在金沙厂包裹体成分中，K^+/Na^+和 K^+/SO_4^{2-}比值以及水质类型，与当今永善金沙厂上菜园上升泉水相近，有助于说明矿液的天水来源。

（3）流体的含盐度。利用冷冻法测定 NaCl-H_2O 体系包裹体的冰点，然后在相图上查得或利用盐度计算公式计算出溶液的盐度 w（$NaCl_{eq}$），天宝山矿床为 4.94 %，大梁子矿床为 4.25%～11.71%，金沙厂矿床为 4.9 %～24.06 %。

表 **4** 各矿床矿物流体包裹成分

矿床	样号	矿物	分析项目及分析结果/（μg/g）													
			液相								气相					
			K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	F^-	Cl^-	H_2O	SO_4^{2-}	H_2	N_2	CO_2	CO	CH_4	O_2
天宝山	TB049	闪锌矿	2.6	10.0.	83.4	28.3	2.9	65.4	585	nd	微	6.8	微	1.9	15.8	nd
大梁子	T15	闪锌矿	4.3	4.9	38.7	9.9	7.0	75.7	470	nd	微	5.4	微	1.1	13.8	nd
	KBC-2	闪锌矿	0.31	5.58	17.9	0.20	16.3	9.69	180	7.54	0.14	4.3	888.1	nd	0.66	nd
金沙厂	KBC-1	萤石	0.62	2.85	13.84	1.30	7.08	5.15	380	16.3	0.006	0.7	26.1	微	nd	nd
茂租	M-1	闪锌矿	14.338	13.293	10.599	0.520	3.618	4.556	134.0	nd	0.44	nd	46.0	nd	nd	nd
	M-2	方铅矿	8.613	15.472	34.037	nd	5.327	1.946	319	nd	0.56	nd	1680.0	nd	nd	nd

注：天宝山和大梁子矿床的样品，原成都地院九室测定，金沙厂矿床的样品由原中南工业大学分析，茂租矿床的样品由有色金属总公司北京矿产地质研究所色谱室测定。

（4）成矿温度。通过对大梁子、天宝山、赤普和金沙厂矿床进行了矿物包裹体均一法和爆裂法测温，对主要成矿阶段中闪锌矿-方铅矿进行了对硫同位素温度计算，同时利用闪锌矿中 Ga/Ge 比值在：闪锌矿的 Ga/Ge 温度与包裹体均一温度对比曲线图上投点所得成矿温度。3 种方法得到的结果近似，可以确定区内方铅矿、闪锌矿的主要成矿温度为 150～200℃。

（5）成矿介质（水）的来源。通过对大梁子、赤普矿床与方铅矿、闪锌矿等硫化物共生的石英中的包裹体水溶液的氢、氧同位素测定及其在 δD 和 δ^{18}O 坐标图上的投点，表明成矿溶液中的水主要来自大气降水。

3 结 论

（1） 矿床的地质地球化学特征表明，康滇地轴东缘的层控铅锌矿床属典型的密西西比河谷型（MVT）矿床，具明显的后生特点。

（2） 成矿物质铅锌主要来自含矿围岩地层，基底的地层和岩石也提供了金属。硫同位素组成表明，硫是循环卤水中的 SO_4^{2-}被地层中的有机炭、沥青等非生物还原剂还原所提供。铅同位素（大部分）为组成变化很大的混合铅，表明可能是由地下热水从不同时代地层中淋滤而来的铅的混合。

（3） 流体包体及氢氧同位素组成的分析研究表明，成矿流体主要为来自大气降水的“二元”成分的地下热水，盐度 w（$NaCl_{eq}$）为 4.25%～24 %，成矿温度为 150～200℃。比美国的三州地区的 MVT 矿床的成矿温度 90～150℃要高些，这可能与该区燕山期大规模的岩浆活动有关。

参 考 文 献

唐森宁. 1984. 黔西北滇东北层控铅锌矿床特征及其成矿模式. 地质与勘探，(12)：1～8.

涂光炽，等. 1984. 中国层控矿床地球化学. 第一卷，30～55.

徐新煌，等. 1996. 赤普铅锌矿床成矿物质来源研究. 矿物岩石，16（3）：54～59.