

# 湘中禾青地区中上泥盆统碳酸盐 岩的成岩作用及其与成矿的关系\*

李成生

(长沙有色冶金设计研究院)

丁传谱 杨楚雄 易诗军

(中南工业大学)

**提要.** 本文研究了湘中禾青地区中上泥盆统碳酸盐岩的成岩作用及其与成矿的关系。根据野外工作、镜下观察、C、O 同位素特征和痕量元素特征的研究, 区内碳酸盐岩成岩作用方式主要有压实作用、胶结作用、新生变形和白云岩化作用 4 种。它们经历了淡水渗流、淡水潜流、海水和埋藏地下混合水 4 种成岩环境。由于含矿层以上成岩环境的开放性和其下成岩环境的闭塞, 埋藏地下混合水成岩作用使矿质富集而形成工业矿体。

**主题词** 成岩作用 成矿 中上泥盆统 湘中禾青

**第一作者简介** 李成生 男 25 岁 硕士 沉积学

## 前 言

湘中禾青地区广泛发育一套中泥盆统碳酸盐岩, 在碳酸盐中分布有大量的层控矿床, 其中以禾青铅锌矿最为典型。对该矿床, 前人已作过较详细的研究, 但这些研究仅限于矿床本身, 而很少涉及到矿床的形成与区内碳酸盐岩成岩作用的关系。本文着重探讨碳酸盐岩的成岩作用及与铅锌矿的成因关系, 并据此推断该矿的形成过程。

## 一、区内地层及划分

湘中禾青地区地层研究程度较高, 根据前人资料和本文实测结果, 可划分出中泥盆统棋梓桥组, 上泥盆统余田桥组和锡矿山组。依据岩性特征, 棋梓桥组又分为 3 个岩性段, 余田桥组和锡矿山组各为分 2 个岩性段, 各岩性段的特征见图 1。

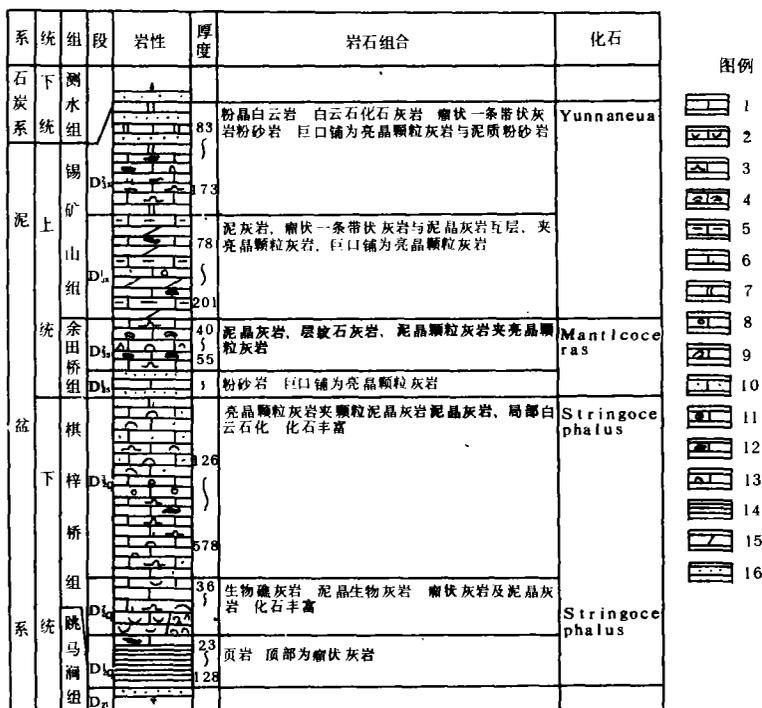
## 二、岩石特征与沉积相简述\*\*

### (一) 岩石特征

\* 国家自然科学基金资助项目

\*\* 李成生 1987, 湘中禾青地区中、上泥盆统碳酸盐岩沉积相、成岩作用及与成矿关系之研究, 硕士学位论文。

由图 1 可知，禾青地区中、上泥盆统由一套陆源沉积岩——内源沉积岩系列的岩石组成。按曾允孚等(1986)的分类,陆源沉积岩有粉砂岩和页岩,内源沉积岩有石灰岩和白云岩。



- 1、泥晶灰岩 2、泥晶生物屑灰岩 3、藻团粒 4、层纹石 5、条带状灰岩 6、白云石化 7、白云岩 8、砾屑 9、竹叶状砾屑、10、砂屑 11、核形石 12、状灰岩 13、亮晶生物屑灰岩 14、页岩 15、泥灰岩 16、粉砂岩

图 1 禾青地区中、上泥盆统地层综合柱状图

Fig.1 Stratigraphic colum of the Middle–Upper Devonian series in Heqing district

根据结构-成因分类法，并注重粒屑、亮晶和泥晶 3 者的比例以及酸不溶物含量（以 10%、25%和 50%为界）石灰岩又可分为 9 种（表 1）。

表 1 禾青地区中、上泥盆统岩石分类表

Table 1 Rock classificaton of the Middle–Upper Devonian series in Heqing district

陆 原 沉 积 岩		内 源 沉 积 岩	
细 碎 屑 岩 类	泥 质 岩 类	碳 酸 盐 岩 类	
粉 砂 岩	页 岩	石 灰 岩	白 云 岩
泥 质 粉 砂 岩	粉 砂 质 页 岩	泥 灰 岩 含 泥 灰 岩 瘤 状 灰 岩 或 条 带 状 灰 岩 泥 晶 灰 岩 颗 粒 泥 晶 灰 岩 泥 晶 颗 粒 灰 岩 层 纹 石 灰 岩 亮 晶 颗 粒 灰 岩 生 物 礁 灰 岩	糖 粒 状 白 云 岩 灰 质 粉 晶 白 云 岩

## (二) 沉积相

大量的野外与室内研究证明, 禾青地区中、上泥盆统碳酸盐岩属于台地相区, 并可细分为5个微相, 各微相特征见表2。

表2 禾青地区中、上泥盆统碳酸盐岩沉积相划分表

Table 2 Sedimentary facies classification of the Middle–Upper Devonian carbonate rocks in Heqing district

微相	代号	分布	岩石特征	化石特征	原生沉积构造
潮坪 浑水潮坪亚相 清水潮坪亚相	I I-1 I-2	$D_{2q}^1$ 、 $D_{2q}^2$ $D_{3s}^1$ $D_{3s}^2$	陆源沉积岩、白云岩、层纹石灰岩、含泥灰岩、泥晶灰岩类 IR = 14.5%	生物少而破碎	泥裂、层纹 鸟眼 粒序层理 水平层理
粒屑滩	II	$D_{2q}^3$ 、 $D_{3s}^2$ $D_{3x}^2$	亮晶颗粒灰岩 IR = 3%	生物丰富 且种类多	波状冲刷面
生物礁	III	$D_{2q}^2$	生物礁灰岩 IR = 10.4%	生物特多	生物骨架构造
局限海湾	IV	$D_{3x}^2$ (禾青)	灰质粉晶白云岩、白云化石灰岩类、粉砂岩	生物小而少且 破碎	
潮下风暴岩	V	$D_{3x}^2$ (巨口铺)	泥晶颗粒灰岩 IR = 7.3%	生物少而小	箱状冲刷面

## 三、成岩作用

### (一) 成岩组构

**1、泥晶套** 泥晶套是生物屑边缘的一圈不透明泥晶, 区内主要存在于粒屑滩、生物礁和潮下风暴岩微相中。它是由藻类与真菌类在生物遗体上向心钻孔并沉积泥晶而成, R.M.lloyd 用电子显微镜在其中发现有文石针。因而, 这些泥晶套应是海水成岩环境中形成的。

**2、缝合线** 主要分布于潮坪和局限海湾等微相的泥晶灰岩和颗粒泥晶灰岩中, 有显微缝合线和宏观缝合线两种。显微缝合线主要见于锡矿山组, 其方向杂乱、规模小, 在显微镜下方可见, 一般是较小压力的局部压溶的结果。宏观缝合线(习惯上所称为缝合线)主要存在于棋梓桥组和余田桥组, 平行层面, 规模大, 纵切面呈锯齿状, 缝合线内堆积有泥质物或白云石。此外, 在禾青锡矿山组上部还见有波状似缝合线有机层与显微缝合线共生, E.A.Shinn (1983) 认为它是机械压实的产物, 是显微缝合线的雏形。缝合线在泥质物多的灰岩中更发育, 在剖面底部, 规模和频率均大于上部。说明它是埋藏成岩环境中压实作用的产物。

**3、胶结物向中心变粗组构** 在粒屑滩、生物礁和潮下风暴岩微相中, 亮晶颗粒灰岩中的颗粒之间或介壳内腔中, 亮晶方解石由边缘向中心变粗。它反映了淡水潜流和地下混合水成岩作用。

**4、示底构造** 仅见于潮坪相中, 表现为在空洞的下半部为泥晶方解石, 而上部为粗粒亮晶方解石或单晶。它是淡水渗流成岩环境的标志。

## (二) 成岩作用方式

禾青地区中、上泥盆统碳酸盐岩共出现4种成岩作用方式, 现分述如下:

**1、压实作用** 区内广泛发育各种缝合线, 镜下可见颗粒间的溶蚀接触, 在剖面上, 从下(D<sub>2q</sub>)到上(D<sub>3x</sub>)缝合线的规模和频率减小, 说明区内广泛存在压实作用。压实作用导致灰泥的压紧、颗粒的紧密接触、孔隙度的减少和各种缝合线的形成。它不仅是晚期成岩的主要成岩作用方式, 而且在早期成岩过程中也起重要作用。

**2、胶结作用** 胶结作用主要指矿物在孔隙中的沉淀。本区主要出现于粒屑滩、生物礁和潮下风暴岩微相中。胶结物为等轴粒状, 具向中心变粗组构的亮晶方解石, 经电子探针分析, 其Mg<sup>2+</sup>含量仅0.338%, 即MgCO<sub>3</sub>为1.41摩尔%, 它反映了低Mg<sup>2+</sup>低Na<sup>+</sup>的淡水潜流或地下混合水成岩环境。

**3、新生变形作用** 禾青地区潮坪、生物礁和局限海湾微相中的泥晶强烈重结晶为微亮晶和假亮晶。它们具有如下特征: ①发育广泛, 不限时空, 也不限于某一微相, 只是其强弱不同; ②颗粒未重结晶; ③溶孔旁侧、矿体周围较强烈; ④重结晶程度与白云石化程度成正比; ⑤重结晶程度与酸不溶物含量成正比; ⑥区内未见岩浆热液活动的痕迹。故区内重结晶不是岩浆热液所致, 而是长期缓慢的新生变形的结果。

一般认为Mg<sup>2+</sup>控制着方解石的晶形和大小(Folk, 1974)。在海水环境中Mg<sup>2+</sup>以“罩”的形式包围方解石泥晶而使之不能形成亮晶。当Mg<sup>2+</sup>离子浓度降到足够低时, 由于“罩”效应消失, 这些泥晶将通过泥晶的溶解和微亮晶的(或假亮晶)的沉淀两个步骤新生变形。在早期成岩阶段, Mg<sup>2+</sup>的移去可有两个途径: 一是粘土吸附, 区内主要粘土矿物伊利石和绿泥石均可吸附大量的Mg<sup>2+</sup>。曾允孚(1986)也认为粘土含量少于20%对新生变形作用不利。区内酸不溶物(主要为石英与粘土)多的岩石中新生变形作用较强烈也佐证了这一点。另一途径是淡水的加入, 它可导致Mg<sup>2+</sup>离子浓度的显著降低。在晚期(埋藏)成岩作用阶段, 主要是白云石化移去了大量的Mg<sup>2+</sup>。由此可见, 新生变形作用是淡水潜流和埋藏地下混合水成岩环境中泥晶的自发过程。

**4、白云石化作用** 禾青地区中、上泥盆统白云石化可分为两种: 一种以自形粉晶为特征, 主要发生于禾青锡矿山组上部局限海湾微相中, 它常与粉砂岩伴生或沿显微缝合线产出; 另一种为糖粒状白云岩, 主要发育于廉桥棋梓桥组中、上部, 沿缝合线产出或沉淀于礁间孔隙中。两者量均少, 其总厚度仅为中、上泥盆统厚度的0.5~1%, 空间上延续性也差。

白云石的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为-7.95‰到-9.22‰。明显不同于蒸发泵、渗透回流白云石。白云石的X-射线粉晶衍射图上〔015〕峰很强, 具明显有序反射, 其有序度为0.7, 这是缓慢结晶的结果, 它说明白云石化需要一个非常长的时间。

区内白云岩与Land(1985)描述的混合水成因块状白云石明显有异, 但却与英格兰Derbyshire下石炭系Woo Dale灰岩中的埋藏白云岩非常相似。因而, 区内白云岩应属埋藏白云石化成因。埋藏成岩环境在如下方面为白云石化准备了条件:

(1) 埋藏成岩作用使区内较多泥质物中所吸附的Mg<sup>2+</sup>析出而为白云石化准备了Mg<sup>2+</sup>来源。区内白云石丰度与酸不溶物含量的正相关佐证了此点。

(2) 区内埋藏成岩时混有莫罗认为的自然界中3种高CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>天然碱性溶液, 使介质的CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>/Ca<sup>2+</sup>比不断升高, 当此比值大于1时, 这些CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>将有足够的能量来破坏Mg<sup>2+</sup>的水

化膜;从而使  $Mg^{2+}$  易与  $Ca^{2+}$ 、 $CO_3^{2-}$  结合而形成白云石。

(3) 区内其它成岩环境持续时间短,只有埋藏地下混合水成岩环境持续时间长,它能提供白云石缓慢结晶所需的时间。

### (三) 成岩作用地球化学特征

**1、同位素特征** 成岩作用将导致碳酸盐岩的同位素总体变化,因为它在成岩过程中将与介质重新达到平衡。由于海水与淡水之间的同位素差异,碳酸盐岩的碳、氧同位素特征将显示出成岩介质特征。由于海水同位素在地史过程中是渐变弱,因而泥盆系纪海水的同位素值应介于石炭纪与志留纪之间,这基本上与 Keith 等的研究结果相吻合。他们认为泥盆系灰岩的氧同位素  $\delta^{18}O_{PDB}$  为 +7.35‰。

从图 2 可见,区内碳酸盐岩氧同位素明显小于泥盆纪海水的氧同位素,它可有两个方面的原因,一是与含有较轻同位素的介质重新平衡;二是温度升高导致的氧同位素减小。前者反映了淡水参与成岩作用,后者说明了埋藏成岩作用。区内碳同位素总体与海水偏差不大,仅 B 区较 A 区明显,它反映了下列 3 方面的信息:① A 区偏差小可能说明无生物分馏,而含有较多生物的 B 区及生物礁微相由于生物分馏作用而明显偏负;② 碳同位素总体偏离海水较小,可能反映了埋藏成岩过程中温度的升高,Emirth 等认为碳同位素随温度升高的增率为  $0.035\% / ^\circ C$  (PDB);③ 也可能反映了区内胶结物(包括脉石方解石)来自于原始沉积组份而无外部来源。

**2、痕量元素** 碳酸盐岩中以类质同象形式存在的痕量元素含量符合分配原则,其含量主要受溶液中痕量元素含量和分配系数的控制。在成岩过程中,则是成岩介质、分配系数和环境开放性的直接结果。故其特征可直接反映成岩环境的介质特征和开放性。

禾青地区中、上泥盆统碳酸盐岩中混有少量非碳酸盐岩组分中,其 Sr、Mn 含量很低。Sr、Mn 在碳酸盐岩主要以类质同像替代方式存在于碳酸盐矿物中,其含量基本上反映了成岩作用特征。碳酸盐的 Sr、Mn 含量特征见表 3,现分述如下:

**1、Sr** Sr 在方解石中的分配系数随环境的不同而有差异。25°C 时,停滞水体中,  $K_{cal}^{Sr^{2+}}$  为 0.14;而在活跃水体中,由文石转变为方解石的过程中,  $K_{cal}^{Sr^{2+}}$  为 0.05。因而,不仅淡水的注入将导致 Sr 含量的变化,而且介质的活动性也会影响 Sr 含量(表 4)。

从表 4 可知,活跃水环境最高 Sr 含量为 390.3ppm,区内实测剖面的碳酸盐 Sr 含量有 80% 低于此值,且大多数少于 227.5ppm(停滞水体中的最低值)。可见区内成岩介质是一种海水与淡水的混合溶液,成岩介质较活跃,成岩环境较开放。但区内实测剖面还有相当一部分碳酸盐 Sr 含量高于活跃水成岩环境最高值 390.2ppm,说明有些环境较闭塞,成岩介质有时较停滞。由表 3 可知,区内以清水潮坪亚微相与粒屑滩微相介质最活跃,而浑水潮坪、局限海湾和生物礁相介质最停滞。

**2、 $Mn^{2+}$**   $Mn^{2+}$  在方解石中的分配系数为 15。因而,成岩方解石将趋于富  $Mn^{2+}$ ,又由于淡水  $Mn^{2+}$  含量是海水的 17.5 倍,淡水成岩也会增加方解石中的  $Mn^{2+}$  含量。

剖面碳酸盐  $Mn^{2+}$  含量为 24—1266ppm,介于淡水方解石(2802ppm)和海水方解石(1.46ppm)之间,说明成岩溶液是一种淡水与海水的混合溶液。表 3 显示了从生物礁→浑水潮坪→清水潮坪→局限海湾→粒屑滩→潮下风暴岩,  $Mn^{2+}$  含量渐减,说明淡水影响渐少。

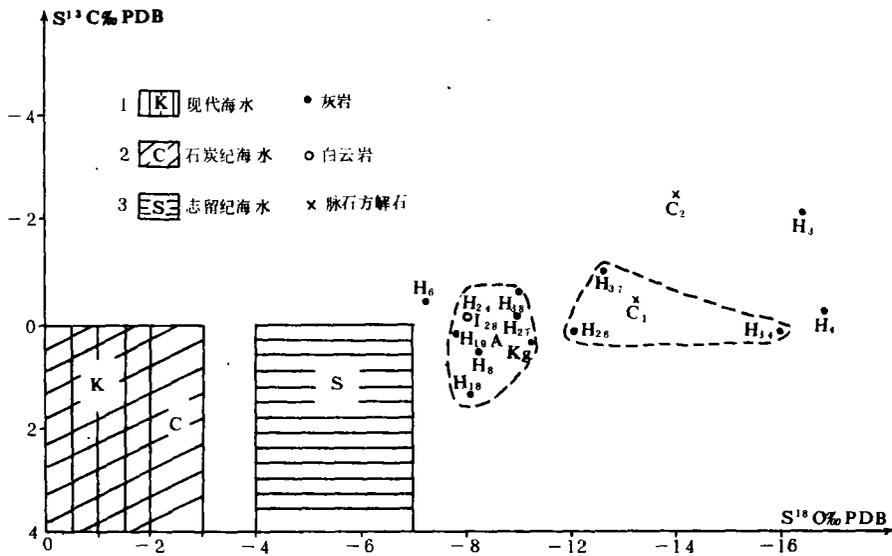


图 2 禾青地区碳酸盐岩与各时代海水氧、碳同位素

Fig. 2 Stable isotopic composition of Carbon and oxygen between the Middle-Upper Devonian carbonate rocks in Heqing and several Periodic

表 3 各相纯碳酸盐的 Sr<sup>2+</sup>、Mn<sup>2+</sup>含量 (ppm)

Table 3 Sr and Mn contents in every microfacies carbonate rocks

微相		I-1	I-2	II	III	IV	V	平均
禾	Sr <sup>2+</sup>	363	209	204	431	552		279
	Mn <sup>2+</sup>	911	124	74	1148	192		270
青	样数	2	7	5	1	2		17
巨口铺	Sr <sup>2+</sup>	268	202	171	617		161	284
	Mn <sup>2+</sup>	855	87	291	877		72	494
	样数	3	2	3	2		1	11

综合 Sr、Mn 含量特征可知，禾青比巨口铺 Sr 低，且 Mn<sup>2+</sup>少，说明禾青淡水混入量多于巨口铺，但巨口铺更开放。整个禾青地区成岩介质较活跃，其中以清水潮坪、粒屑滩和潮下风暴岩微相成岩介质最活跃，环境最开放；浑水潮坪和局限海湾微相成岩环境最闭塞，介质最停滞。

表 4 成岩方解石的理论 Sr<sup>2+</sup>含量 (据赖健清, 1985)

Table 4 Therotic Sr content in diagenetic calcite

成岩方式	胶结		新生变形			
	海水	淡水	活跃水		停滞水	
			74%海水 26%淡水	淡水	74%海水 26%淡水	淡水
Sr <sup>2+</sup> (ppm)	1103.6	386.7	390.2	66.1	1092.6	227.5

注：淡水 Sr<sup>2+</sup> = 0.05ppm 海水 Sr<sup>2+</sup> = 8.1ppm

#### (四) 成岩环境

根据区内成岩组构、成岩作用方式和成岩地球化学特可知区内中、上泥盆统碳酸盐经历了海水、淡水渗流、淡水潜流和埋藏地下混合水4种成岩环境,其中以埋藏地下混合水成岩环境影响最大,持续时间最长,该环境出现广泛的白云石化和压实作用。参加成岩的淡水主要来源于:大乘山隆起上的大气水;潮坪接收的大气降水。

### 四、成岩作用与成矿的关系

根据本文研究结果,生物礁微相是成矿最有利的微相,但其最高Pb+Zn也不过0.2%,因而,要形成禾青这样的工业矿床还需一个活化、富集成矿过程。而禾青矿床地质特征表明区内未发生强烈的高温迭加改造活动,禾青矿是碳酸盐埋藏地下混合水溶液活化、富集矿质的结果。具体表现在以下3个方面:

**1、成岩作用活化、富集矿质** 禾青矿床特征表明其矿质主要来源于区内的粘土组份和生物。在早期成岩过程中,由于处于近地表环境中,大量酸性氧化水的加入,成岩介质可能为酸—弱酸性氧化溶液,矿质被活化于成岩介质中。随介质的下移,埋藏成岩作用的进行,大气雨水的影响愈来愈小,最后形成弱酸—碱性还原介质,尤其是生物礁相,大量生物成因 $H_2S$ 的加入使介质更有利于矿质沉淀成硫化矿物。这一活化再沉淀过程使矿质不断地向下迁移而富集于其下部生物礁中成矿。

**2、成岩作用形成足够的容矿空间** 该矿脉石矿物的碳同位素特征表明有大量的方解石溶解。硫化矿物沉淀后形成的过剩 $H^+$ 有利于方解石的溶解,而后者又促进了硫化矿物的沉淀,这一循环过程形成了足够的溶矿空间和矿质的富集。

**3、成岩溶液的活跃与停滞决定了成矿位置** 禾青矿的硫同位素特征偏轻,它是开放系统的结果,这与区内成岩环境的开放性是相吻合的。由于禾青生物礁微相之上的粒屑滩和潮坪微相中活跃的成岩介质(成岩环境较开放)下流到生物礁微相中,受到其下浑水潮坪页岩及本身泥质物的阻碍而停滞,使上部矿质迁移到生物礁微相中长时间缓慢堆积成矿。

### 五、结 论

综上所述,可得如下几点结论:

1、区内主要有压实、胶结、新生变形和白云石化4种成岩作用方式并经历了海水、淡水渗流、淡水潜流和埋藏地下混合水4种成岩环境,但以后者影响最大。

2、根据成岩作用地球化学特征可知区内成岩环境较开放,成岩介质较活跃。但浑水潮坪和局限海湾微相成岩环境较闭塞,生物礁相成岩介质具一定的停滞性。

3、埋藏地下混合水成岩作用使矿质富集成工业矿体。成岩环境的开放、成岩介质的活跃、成岩溶液在生物礁中的还原性以及浑水潮坪页岩的阻塞,均是成矿极有利的因素。

收稿日期:1988年2月11日

### 参 考 文 献

- (1) 曾允孚等, 1986, 沉积岩石学, 地质出版社。
- (2) 罗宾·巴塞斯特, 1974, 碳酸盐沉积物及其成岩作用, 科学出版社。
- (3) 卢武长, 1986, 稳定同位素地球化学, 成都地质学院出版社。
- (4) Shinn, E.A. and Robvin, D.M., 1983, Jour.sed.petrology, Vol.53, No.1, p.595-617.
- (5) Folk, R.L., 1974, Jour.Sed.Petrology, Vol.44, No.1, p.40-52.
- (6) Schofield, K. and Adams, A.E., 1986, Sedimentology, Vol.33, No.2, p.207-219.

## THE DIAGENESIS OF CARBONATE ROCKS IN THE MIDDLE-UPPER DEVONIAN SERIES AND ITS RELATION TO THE FORMATION OF Pb-Zn ORE DEPOSIT IN HEQING DISTRICT, CENTRAL CHINA

Li Cheng Sheng

(Changsha Nonferrous Metallurgy Design and Research Academy)

Ding Chuangpu Yang Chuxing Yi Shijun

(Central South University of Technology)

### Abstract

On the basis of geology, petrology and geochemistry, the diagenesis of carbonate rocks in the Middle-Upper Devonian series in Heqing district and its relation to the formation of Pb-Zn ore deposit are studied by means of field investigation and various techniques in laboratory in this paper.

In the studied area the outcropped strata are mainly three formation: the Middle Devonian Qiziqiao Formation ( $D_{2q}$ ), the Upper Devonian Shetianqiao Formation ( $D_{3s}$ ) and Xikuangshan Formation ( $D_{3x}$ ). According to the differences in lithologic characters, Qiziqiao Formation can be subdivided into three members, Shetianqiao Formation and Xikuangshan Formation both into two members. All of them are mainly composed of limestone with few of terrigenous sedimentary rocks. Sedimentary characteristics show that the Middle-Upper Devonian series may be classified into five microfacies (1) intertidal mud flat (including tidal-flat in clear water and tidal-flat in muddy water), (2) grain beach, (3) bioreef, (4) restricted bulf, (5) subtidal tempestite.

The field investigation, observation under microscope and distribution characteristics of carbon and oxygen stable isotopes and the trace elements show that the Middle-Upper Devonian carbonate rocks have four principal diagenetic manners i. e. : compaction, cementation, neomorphism and dolomization. Compaction is one of the most common diagenetic manners, causing decrease of porosity and compact of lime. Neomorphism make micrite enlarge into microsparry and pseudosparry, and considered as the second one.

The Middle– Upper Devonian carbonate rocks in studied area experienced four diagenetic environments. They are: (1) Vadose zone of freshwater, (2) Phreatic zone of freshwater, (3) Seawater and (4) Burial–underface storage zone, among which the influence of burial–underface storage zone diagenetic environment is the largest to carbonate rocks in the area. The properties of carbon–oxygen stable isotopes and trace elements suggest that the diagenetic environments of bioreef, grain beach, tidal–flat in clear and subtidal tempestite are open relatively and the diagenetic fluid are active and fresh water flow in. But the diagenetic fluid of tidal–flat in muddy water and restricted gulf are stagnant relatively. As the result of the the open diagenetic environment over ore–bearing strata and the stagnant of diagenetic fluid beneath it, burial–underface storage diagenesis made mineral elements to be enriched into industrial deposit.