

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

碳酸岩* 系的溶蚀与岩溶的发育

以湖北、四川、广西等省(区)为例

张 寿 越

(中国科学院地质研究所)

大陆壳约 75% 的地区是沉积岩,沉积岩的 15% 是由碳酸盐矿物含量超过 50% 的碳酸岩所构成。

碳酸岩与碳酸岩系是岩溶作用的物质基础。水对碳酸岩的溶蚀是使岩体产生各种地表和地下的岩溶现象的主要作用过程。本文将通过碳酸岩的溶蚀试验及溶解试验的成果来进一步说明不同类型碳酸岩的相对溶解速度及在各种水地球化学环境中的溶度,并讨论它们与岩溶发育的关系。

一、碳酸岩的溶蚀及其影响因素

溶蚀试验是一种地质模拟试验,是将碳酸岩粉碎到一定粒度^[1]或是制成一定体积的块体,使流动的高浓度 CO_2 的蒸馏水持续地与试样作用一段时间,测定试样的溶解量或是溶蚀量(重量的变化),将其与标准试样(有轻微大理岩化的亮晶灰岩)的溶解量或溶蚀量相比得出试样的溶蚀指标称为比溶解度(K_{cv})或比溶蚀度(K_v)。

试验不反映溶度的大小,而是反映溶解速度值。

(一) 碳酸岩成分与溶蚀指标的关系

碳酸岩成分以岩石的碳酸盐矿物中白云石含量百分数($D_c\%$)来表示。从广西纯碳酸岩成分与比溶解度关系(图 1)的分析得知,这两个变量的关系为:随着岩石的碳酸盐矿物中白云石百分含量的增加而降低比溶解度值^[2]。 D_c 值为零时, K_{cv} 等于 1.07; D_c 值为 100 时,则 K_{cv} 为 0.59,灰岩的比溶解度约比白云岩高 0.5—1 倍。鄂西及其他一些地区的碳酸岩成分与比溶蚀度关系的分析与广西类似。

不溶物在岩石中的含量对溶蚀指标的影响见图 2,在 D_c 值为 0—30 的岩石中,其影响不明显;但在 D_c 值高于 30 的岩石中则显示出随着不溶物含量增高而比溶蚀度逐渐降低的趋势。

尽管由于样品制备及试验条件的影响及岩石结构-成因类型的差异使得成分相近的岩石在溶蚀指标上具有一定的变动幅度,但是影响该指标的主要因素显然是碳酸岩的成分。表 1 及表 2 中表现在碳酸岩的灰岩—白云岩序列中不同矿物组成的岩石溶蚀指标均有其一定的范围。

* 本文所论述的碳酸岩实指通常所称的沉积碳酸盐类岩石。——编者注

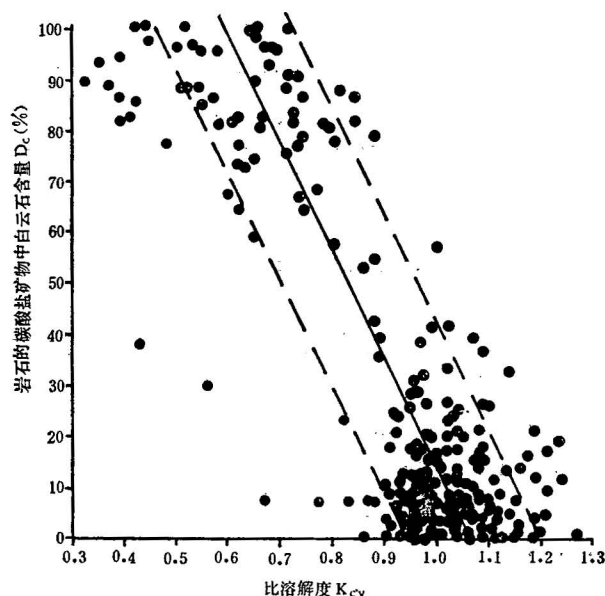


图 1 广西纯碳酸岩成分与比溶解度的关系

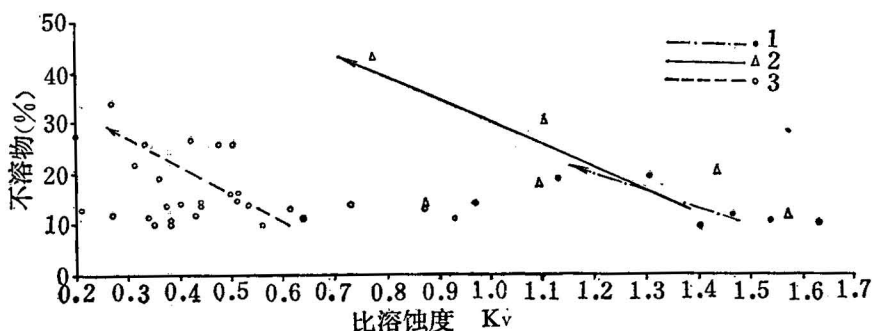


图 2 碳酸岩中不溶物含量与比溶蚀度的关系

1. $D_c 100-70\%$; 2. $D_c 70-30\%$; 3. $D_c 30-0\%$.

(二) 碳酸岩的结构-成因类型与溶蚀指标的关系

在碳酸岩成分这一起主导作用的因素控制下,各种结构-成因类型碳酸岩的溶蚀指标之间有着差异。

碳酸岩类岩石根据各个结构要素的百分数、颗粒的种类、矿物的结晶粒度及变质作用程度等方面划分出岩石的结构-成因类型。因此,碳酸岩结构-成因类型对溶蚀指标的影响综合反映出上述各因素所起的作用(表 1、2、3)。

亮晶粒屑碳酸岩及泥晶粒屑碳酸岩由于颗粒的百分含量、亮晶含量与泥晶含量的比值变幅较宽,还因为颗粒的种类不相同,溶蚀指标的变幅比较大。一般说来,颗粒的百分含量较高时,该指标一般为低值。亮晶与泥晶含量的比值对溶蚀指标的影响反映不明显。非碎屑成因的颗粒一般要比由碎屑成因颗粒所组成的碳酸岩溶蚀指标高一些。颗粒种类

表 1 各种成分、结构-成因类型碳酸岩的比溶解度 (广西)

岩石成分 岩石结构-成因类型	灰 岩	云 灰 岩	灰 云 岩	白 云 岩
骸粒碳酸岩	0.97(2)			
粒屑微亮晶碳酸岩	0.96(4)			
粒屑细-粗亮晶碳酸岩	0.99(20)	0.96(5)	0.88(1)	
中-细亮晶粒屑碳酸岩	1.03(3)	0.98(1)		
微亮晶粒屑碳酸岩	0.97(6)			
粒屑泥晶碳酸岩	0.99(4)			
泥晶粒屑碳酸岩	1.00(11)	1.04(1)		0.80(1)
泥晶碳酸岩	0.99(18)	0.98(2)	0.78(2)	
微亮晶碳酸岩	1.01(16)	0.95(1)	0.73(5)	0.64(6)
细亮晶碳酸岩	0.83(1)		0.76(3)	0.61(13)
细-粗亮晶碳酸岩	0.97(2)		0.55(2)	0.52(10)
扰动泥晶碳酸岩	1.01(14)			

注: 括弧内为平均值的试样数。

表 2 各种成分、结构-成因类型碳酸岩的比溶蚀度 (鄂西)

岩石成分 岩石结构-成因类型	灰 岩	云 灰 岩	灰 云 岩	白 云 岩	泥质灰岩	泥 质 白云岩	泥 灰 岩	泥 云 岩
粒屑碳酸岩	0.94(8)				1.13(1)	0.87(1)		
粒屑微亮晶碳酸岩	1.01(2)	0.83(2)	0.54(1)	0.42(2)				
粒屑微-细亮晶碳酸岩	1.25(5)	1.29(1)						
粒屑细-粗亮晶碳酸岩	1.16(4)			0.31(1)		0.37(2)		
细亮晶粒屑碳酸岩				0.25(2)				
微亮晶粒屑碳酸岩	1.20(2)			0.42(2)		0.20(1)		
微亮晶-泥晶骸粒碳酸岩					0.98(1)			
粒屑泥晶碳酸岩	1.03(4)	1.15(1)			0.64(1)			
泥晶骸粒碳酸岩					1.52(3)			
泥晶碳酸岩	1.06(3)		0.57(1)	0.49(4)	1.46(1)	0.53(10)		
泥晶-微亮晶碳酸岩	0.97(11)	0.83(2)	0.86(1)	0.42(3)	1.54(1)	0.52(7)	0.93(2)	0.60(1)
微亮晶碳酸岩	0.94(6)		0.47(6)	0.31(13)		0.34(3)		0.27(1)
微-细亮晶碳酸岩			0.55(2)	0.32(8)		0.28(2)		
细-粗亮晶碳酸岩	1.02(1)		0.49(4)	0.32(6)		0.32(2)		
扰动泥晶碳酸岩	0.91(2)							
原地生物礁碳酸岩	1.37(2)							

注: 括弧内为平均值的试样数。

表 3 各种成分、结构-成因类型碳酸岩比溶蚀度平均值 (鄂西及川西)

岩石成分 岩石结构-成因类型	灰岩	云灰岩	灰云岩	白云岩	泥质 灰岩	泥质 白云岩	泥灰岩	泥云岩
亮晶粒屑碳酸岩	1.09	0.98	0.54	0.35	1.05	0.45		
泥晶粒屑碳酸岩	1.03	1.15						
泥晶碳酸岩	1.06		0.57	0.49	1.46	0.53		
原地生物礁岩及化学岩	1.37							
成岩交代或重结晶亮晶碳酸岩	0.96	0.83	0.52	0.33		0.42	0.93	0.43
变质碳酸岩	0.56	0.51	0.39					

的影响还不十分清楚。

泥晶碳酸岩的溶蚀指标是各种结构-成因类型碳酸岩中最高的,这与碳酸岩在受到溶蚀作用时与碳酸水流接触过程中以泥晶碳酸岩的表面积为最大有关,也因其不曾遭受重结晶作用的影响所致。

原地生物礁岩试样很少,但从仅有的几块叠层藻灰岩试验的结果看来,具有比泥晶灰岩还要高的比溶蚀度值。

成岩交代或重结晶亮晶碳酸岩的交代作用或重结晶作用程度不同,致使亮晶碳酸岩的结晶粒度有着很大的差异,故溶蚀指标的变化幅度也比较宽,但是总的趋势仍是较泥晶碳酸岩为低,且粗大结晶粒度者较细微结晶粒度者溶蚀指标要低。

变质作用不仅使碳酸岩的溶度降低,在溶蚀试验中也反映出它的影响而降低了岩石的溶蚀指标。除去因变质作用使岩石重结晶而增大粒度这一因素影响以外,其它方面的原因还不十分清楚。

根据上述不同成分、各种结构-成因类型的碳酸岩溶蚀指标的试验研究结果可以归纳如下:

- 1.碳酸岩的成分是比溶蚀度大小的主要控制因素,灰岩类皆比白云岩类的比溶蚀度要高。不溶物含量较低时,影响不明显。
- 2.泥晶碳酸岩的比溶蚀度一般具有较高的值;成岩交代或重结晶亮晶碳酸岩普遍具较低值。
- 3.变质碳酸岩比溶蚀度是最低的,尤以灰岩类岩石中更为明显,可比非变质碳酸岩低一倍左右,白云岩类中没有这样明显。

碳酸岩溶蚀量包括化学溶解及物理破坏两部分的量。为了对这个问题深入了解曾进行了专门试验,将 $1 \times 2 \times 0.5$ 立方厘米的碳酸岩块置于 CO_2 含量达 1400—1600 毫克/升的封闭系统中浸泡 30 昼夜,每一昼夜更换一次碳酸水,并对溶蚀液作若干项离子测定,最后分别得到各试样的溶解量和破坏量及其占溶蚀量的百分数。

各种类型的碳酸岩中,破坏量占溶蚀量的百分数与岩石的 D_c 值间关系见图 3。据此认为:溶蚀作用中化学溶解及物理破坏两种作用相比,乃以前者为主,物理破坏量占溶蚀量的比例绝大多数在 40% 以下。这一比例数的大小主要取决于碳酸岩的结构-成因类

型,与岩石的 D_c 值关系有时不明显。泥晶碳酸岩类该比例一般均低于 10%, 且大部分趋近于零,与岩石成分无关。泥晶粒屑碳酸岩类的试样比较少,但大部分该比例在 20% 以上。亮晶粒屑碳酸岩类破坏量所占比例在灰岩类中为 5—30% 左右,在白云岩类中达 30—50%。成岩交代或重结晶亮晶碳酸岩类这一比例变动范围较宽,在灰岩类中为 0—30%, 白云岩类中则为 0—40%。

上述资料表明,对不同结构-成因类型的岩石说来,溶蚀作用的意义,并不是相同的,原因是物理破坏量所占溶蚀量的比例有着较大的差异。

溶蚀作用的差异通过试验从两个方面反映出来,一方面是矿物成分的不同导致溶解速度的差异;另一方面是岩石结构-成因类型的差异导致不同的物理破坏量。在静水和缓慢流动的水中试验情况是这样,在自然界,碳酸岩岩体长期为地下水所浸润或为迅速流动的岩溶水所通过就更加剧其物理破坏作用的程度。

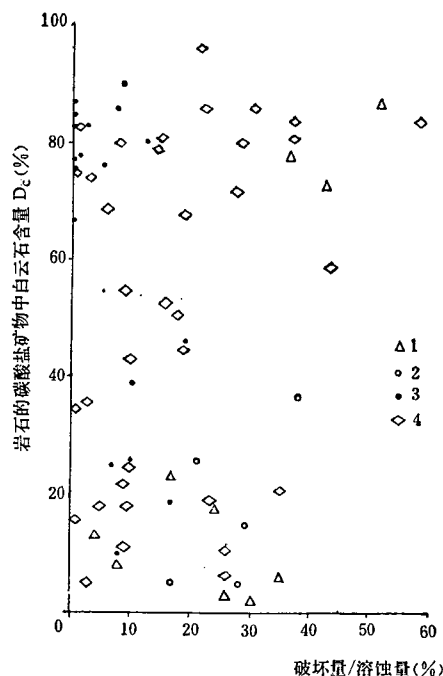


图3 不同结构-成因类型碳酸岩破坏量占溶蚀量的百分数与碳酸盐矿物中白云石含量间关系

1. 亮晶粒屑碳酸岩; 2. 泥晶粒屑碳酸岩; 3. 泥晶碳酸岩; 4. 成岩交代或重结晶碳酸岩。

二、不同水地球化学环境中碳酸岩的溶解与岩溶发育

碳酸岩在不同水地球化学环境中其岩溶发育因岩石成分及天然水化学类型的不同而不同。鉴于钙、镁碳酸岩溶度资料众说纷纭,尤其是在各种水化学类型天然水中的溶度资料更不系统。我们对溶度进行了一系列测定。溶解试验是将固体物质粉末置于处在封闭系统的静水中浸泡,总的试验持续时间较长,定期地测定溶液的电导度。试验居于正常室温及压力条件下,试验前曾对钙、镁碳酸岩的组成予以测定,对天然水也作了化学分析。试验以后,对溶液的测定曾用干涸残渣予以检验,也测定了部分碳酸岩的组成。溶质有钙、镁碳酸盐的试剂,主要是纯碳酸岩类的白云岩—灰岩序列中不同成分的岩石。溶剂包括了各种水化学类型的地下水,如氯化物水、硫酸盐水以及重碳酸盐水,还有蒸馏水及人工制备的高浓度碳酸水。

(一) 不同水地球化学环境中碳酸岩的溶解

溶解试验的溶质与溶剂的成分列于表4、5。

溶解试验中电导度测定结果可以得出下述的结论:

1. 电导度反映了天然水中离解成分的总浓度与总矿化度密切相关,随着天然水总矿化度的增高而增加其电导度,大致呈一线性关系。

表 4 溶解试验中溶质的成分 (%)

试样编号	试样名称	CaO	MgO	CO ₂	不溶物	CaCO ₃	CaMg(CO ₃) ₂
试剂 1	碳酸镁	0.00	42.91	45.66	0.00		
试剂 2	碳酸钙	55.59	0.00	43.76	0.00	99.35	0.00
71724	大理岩	55.07	0.63	43.42	0.21	99.04	0.75
70S03	灰 岩	55.80	0.43	43.92	0.12	99.51	0.57
71054	灰 岩	54.70	0.42	43.39	1.20	96.79	1.84
71060	灰 岩	53.53	0.85	42.69	2.46	94.19	2.76
72017	灰 岩	54.39	1.71	44.05	0.38	94.18	5.73
71007	云灰岩	49.59	5.47	44.90	0.24	74.91	25.06
71093	灰云岩	36.42	15.43	46.08	0.24	25.42	73.26
70053	白云岩	34.12	17.33	45.55	2.66	18.42	78.60
71076	白云岩	33.78	18.08	46.08	0.63	15.99	81.91
71033	白云岩	31.33	21.81	47.27	0.11	4.34	95.04
70024	泥灰岩	38.22	0.00	27.96	29.50	72.82	0.00
70054	泥云岩	24.41	16.49	36.29	20.62	4.77	71.75

注：岩石试样采自四川省。

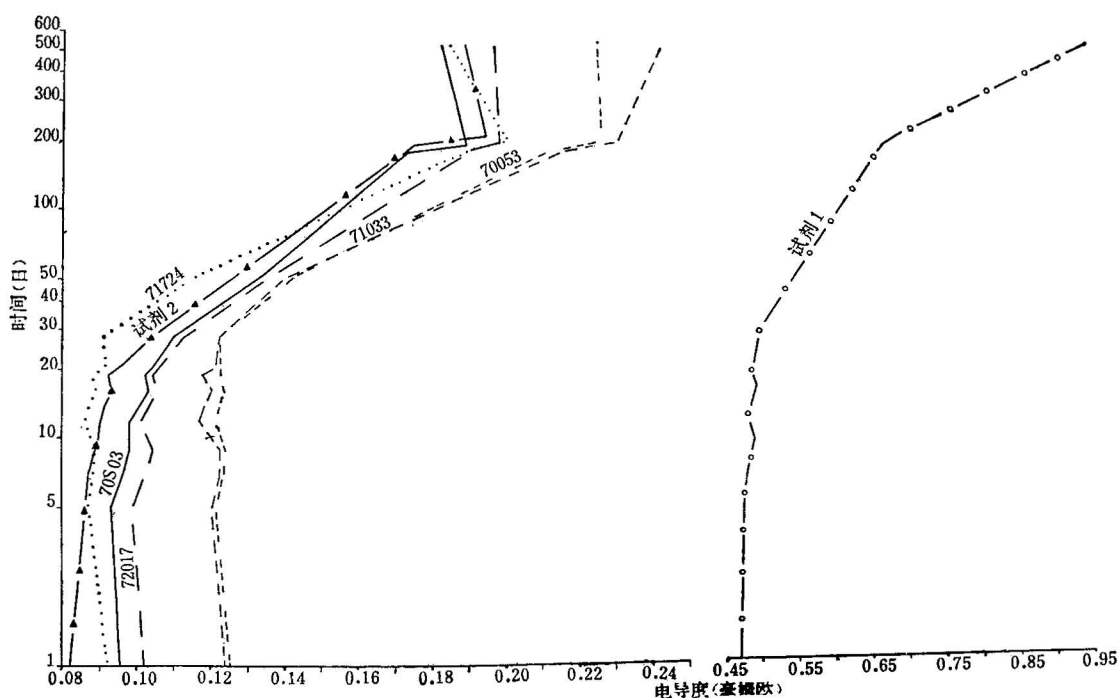
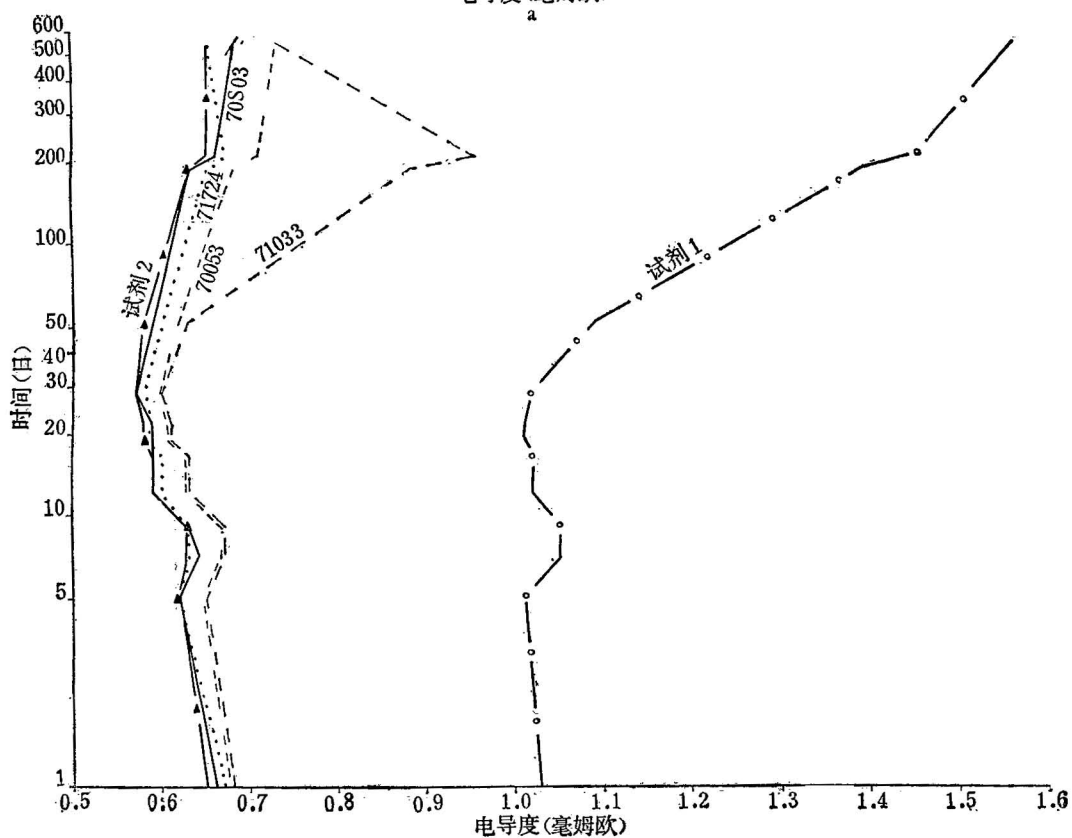
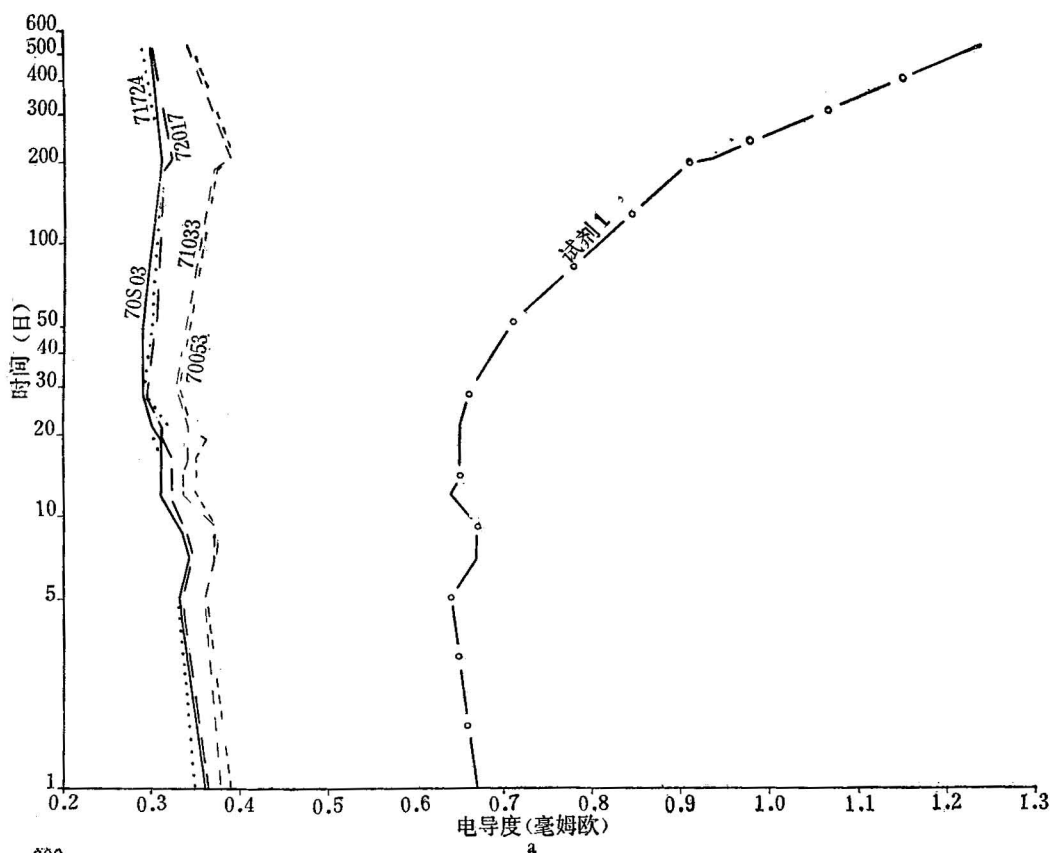


图 4 蒸馏水中各类碳酸岩溶解试验的溶液电导度曲线

2. 对于不同溶剂的溶解试验来说, 蒸馏水的电导度是最低的 (图 4)。含白云岩的溶液其电导度始终较含灰岩的溶液的电导度为高, 试剂 CaCO_3 、大理岩与灰岩近似。

3. 低矿化度重碳酸盐溶液的电导度较低 (图 5), 矿化度高于重碳酸盐溶液约 10 倍的硫酸盐溶液电导度较其高数倍 (图 6), 矿化度又高一个数量级的氯化物水溶液电



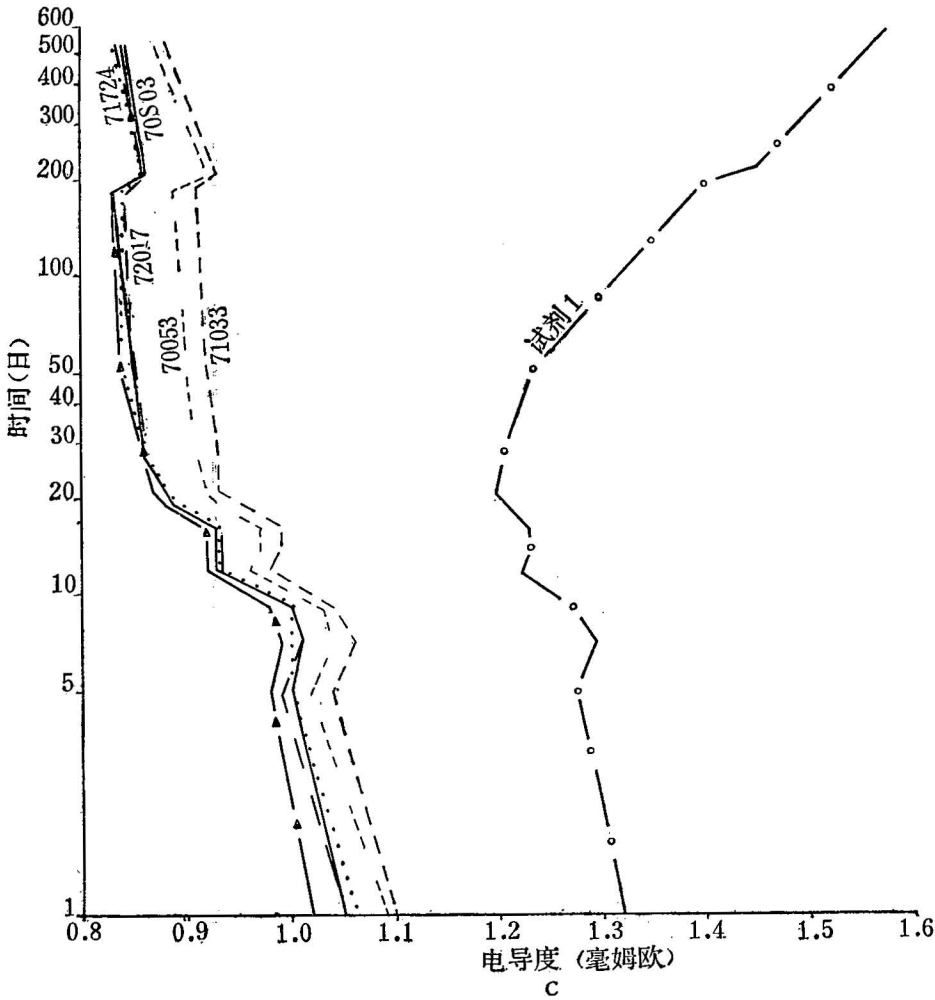


图 5 重碳酸盐地下水中各类碳酸岩溶解试验的溶液电导度曲线
a. KH 温泉水; b. Y₇ 凝析水; c. PH 热井水。

表 5 溶解试验中溶剂的成分

水样编号	水样名称	pH	总矿化度 (克/升)	水的盐类组分表示式 (毫克当量%)	总硬度 (德国度)
KH	温泉水	8.10	0.23	$\frac{\text{HCO}_{33.9}\text{CO}_{32.2}\text{SO}_{16.7}}{\text{Ca}_{75.7}\text{Mg}_{15.8}}$	8.78
PH	热井水	7.00	0.51	$\frac{\text{HCO}_{51.3}\text{SO}_{30.7}\text{Cl}_{18.0}}{\text{Na}_{52.7}\text{Ca}_{27.3}\text{Mg}_{20.0}}$	11.30
Y ₇	凝析水	7.90	0.32	$\frac{\text{HCO}_{56.7}\text{Cl}_{34.9}}{\text{Na}_{91.4}}$	1.04
CH	温泉水	6.80	2.96	$\frac{\text{SO}_{91.2}}{\text{Ca}_{62.7}\text{Mg}_{20.7}\text{Na}_{16.6}}$	102.40
N ₀	深层水	7.80	25.95	$\frac{\text{Cl}_{96.6}}{\text{Na}_{95.3}}$	57.97
T ₇	深层水	7.50	37.07	$\frac{\text{Cl}_{98.2}}{\text{Na}_{90.5}}$	169.70

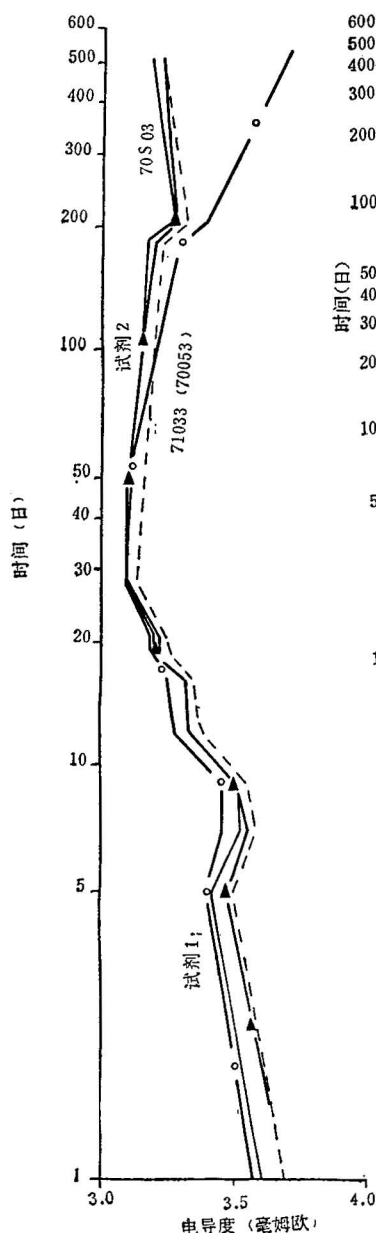


图 6 硫酸盐水 (CH 温泉水) 中各类碳酸岩溶解试验的溶液电导度曲线

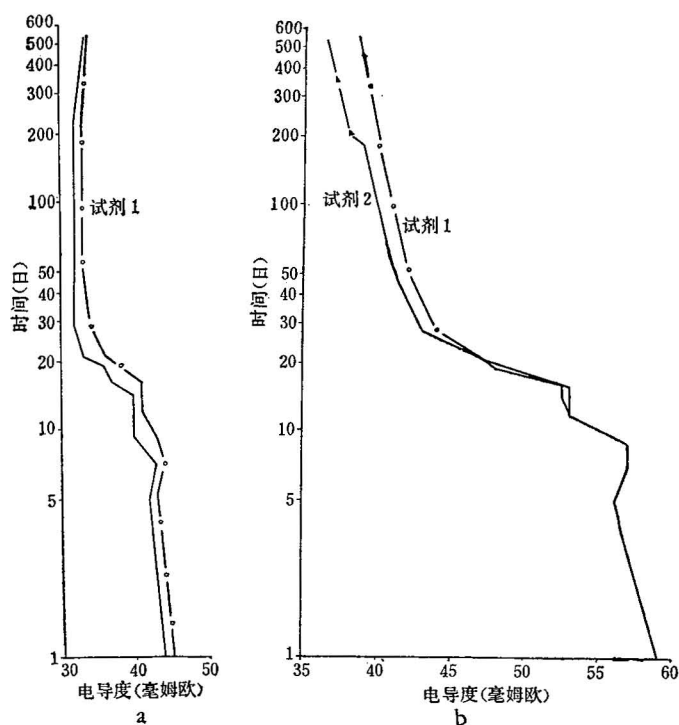


图 7 氯化物地下水中各类碳酸岩溶解试验的溶液电导度曲线
a. N_2 深层水; b. T_2 深层水。

导度可达数十毫姆欧 (图 7)。

4. 在 CO_2 含量高的人工制备的碳酸水中, 含灰岩类溶液的电导度要比含白云岩类者偏高。

5. 各类水溶液中含有碳酸镁时, 其电导度一般明显地反映出偏高的趋势。

在蒸馏水中溶解试验以后, 据溶度原则及当量原则将溶液中离子含量换算为碳酸岩含量。蒸馏水中钙、镁碳酸岩的溶解组分列于表 6。

从表 6 得悉, 在蒸馏水中当正常室温及压力条件下, 碳酸镁、碳酸钙、白云石的溶度分别是 426.93、57.29 及 74.28 毫克/升, 溶液中白云石所占碳酸盐矿物的百分数除去个别试样外, 均与原

试样相近或高于原试样数倍至数十倍, 这表明白云石与方解石相比较易溶解, 白云石含量不同的碳酸岩通过溶解使镁离子的含量得以在溶液中富集。

从试验前后试样成分对比 (表 7) 可以看出, 试剂碳酸钙与碳酸镁基本无变化。不溶物含量除不纯碳酸岩经过试验后减少 4—5% 外, 也没有什么变化。纯碳酸岩试验后, 岩

表 6 蒸馏水中钙、镁碳酸岩溶解组分

溶解组分 试样编号	CaMg(CO ₃) ₂		CaCO ₃		MgCO ₃	
	毫克/升	%	毫克/升	%	毫克/升	%
MgCO ₃					426.93	100
CaCO ₃			57.29	100		
71724	35.27	46	41.66	54		
70S03	7.44	13	51.74	87		
71054	13.00	23	42.69	77		
72017	23.21	32	48.21	68		
71007	24.13	46	28.61	54		
71093	25.07	43	33.63	57		
70053	48.29	63	28.56	37		
71076	55.71	79	14.48	21		
71033	74.28	100				
70054	59.43	84	11.45	16		

表 7 蒸馏水中溶解试验前后钙、镁碳酸岩成分 (%) 对比

试样成分 试样编号	CaCO ₃		CaMg(CO ₃) ₂		不溶物		MgCO ₃		H ₂ O	
	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后	试验前	试验后
MgCO ₃							88.57	88.91	11.43	11.09
CaCO ₃	99.35	99.73								
71724	99.04	97.63	0.75	1.27	0.21	0.75				
70S03	99.51	97.17	0.57	1.70	0.12	0.05				
71054	96.79	97.62	1.84	0.29	1.20	1.40				
71060	94.19	95.53	2.76	0.29	2.46	2.95				
71007	74.91	97.47	25.06	1.57	0.24	0.30				
71093	25.42	53.65	73.26	45.55	0.24	0.65				
71076	15.99	15.16	81.94	83.61	0.63	0.70				
71033	4.34	18.24	95.04	81.82	0.11	0.10				
70024	72.82	76.26			29.50	24.10				
70054	4.77	6.30	71.75	68.65	20.62	16.55				

石组成的变化或是有百分之几的增减,或是白云石含量降低,方解石含量增高。相反的情况却没有见到。反映出在这样的条件下,白云石的溶度高于方解石。

在三个低矿化度的重碳酸盐地下水中钙、镁碳酸岩的溶解组分列于表 8。

其共同点是碳酸镁溶液的 Mg^{+2} 及 HCO_3^{-1} 比原水样有着成倍地增加,表明碳酸镁仍是大量地溶解。灰岩—白云岩序列各试样的溶液中均反映出当岩石中白云石含量增加时钙含量的减少与镁含量的增加。

灰岩类岩石在重碳酸盐地下水中,其溶度比白云岩类要低些,白云岩溶解后一方面有部分 $CaCO_3$ 析出(表 9)。另一方面由于白云岩的加入也使原来水样中的离子呈 $CaCO_3$ 析出。表中自溶液中析出 $CaCO_3$ 的量包括了所述这两个部分的量。

表 8 重碳酸盐地下水中钙、镁碳酸岩的溶解组分 (毫克/升)

水样编号	岩样编号及水样组分 离子	MgCO ₃	CaCO ₃	71724	70S03	71007	71093	71033	70024	70054	水样组分
Y ₇	Ca ⁺²	6.01	14.63	24.65	56.31	45.68	48.86	31.86	63.55	39.72	5.81
	Mg ⁺²	130.11	—	5.47	3.65	9.61	10.58	21.64	10.82	20.55	0.97
	HCO ₃ ⁻¹	1136.19	194.65	164.75	119.60	119.60	119.60	104.95	119.60	119.60	148.88
	SO ₄ ⁻²	12.01	6.24	12.01	18.25	18.25	18.25	12.01	24.50	24.50	17.29
KH	Ca ⁺²	5.96	31.78	25.82	23.83	21.85	25.02	24.85	25.82	17.87	51.90
	Mg ⁺²	154.19	5.96	10.82	8.39	9.61	8.88	15.08	12.04	16.90	6.57
	HCO ₃ ⁻¹	867.09	89.70	113.62	113.62	119.60	134.55	126.92	134.55	119.60	91.53
PH	Ca ⁺²	29.79	14.90	16.88	18.87	17.87	14.90	17.87	25.82	17.28	32.67
	Mg ⁺²	140.93	18.12	18.73	18.73	20.55	26.51	22.86	15.08	21.28	16.54
	HCO ₃ ⁻¹	822.24	149.50	164.45	164.45	149.50	179.40	194.35	164.45	194.35	186.72

表 9 重碳酸盐地下水中碳酸岩的溶解与沉淀

水样编号	岩样编号	CaMg(CO ₃) ₂ (毫克/升)	CaCO ₃ (毫克/升)	自溶液中析出 CaCO ₃ (毫克/升)	MgCO ₃ (毫克/升)
KH 水溶液	MgCO ₃			115.08	515.20
	CaCO ₃			50.26	
	70S03	13.92		77.91	
	71033	82.64		117.24	
Y ₇ 水溶液	MgCO ₃				450.70
	CaCO ₃		22.11		
	70S03	20.41	115.56		
	71033	157.84		20.37	

表 10 硫酸盐地下水(CH 样)中钙、镁碳酸岩的溶解组分 (毫克/升)

水样编号	岩样编号及水样组分 离子	MgCO ₃	CaCO ₃	71724	70S03	71007	71093	71076	71033	70024	70054	水样组分
CH	Ca ⁺²	4.01	504.61	516.43	516.43	516.36	506.43	506.43	500.40	506.41	476.64	550.30
	Mg ⁺²	553.28	110.90	120.51	114.43	120.63	156.99	120.51	118.20	124.15	138.62	110.17
	HCO ₃ ⁻¹	732.85	47.60	83.60	89.70	89.70	89.70	89.70	75.05	89.70	89.70	179.40

SO₄⁻² 含量达 1917.84 毫克/升的硫酸盐型地下水中的钙、镁碳酸岩溶解组分示于表 10。

所有的溶液中 Ca⁺² 含量均略有减少，惟有含碳酸镁的溶液急剧减少达百余倍。

Mg⁺² 含量除碳酸镁溶液中明显增加外, 碳酸钙及灰岩类溶液中均不变或略有增加, 白云岩类溶液中均略有增加。因此碳酸镁在硫酸盐地下水中仍然是溶度最高的, 由于它的溶解而几乎使水样的全部 Ca⁺² 析出(表 11)。碳酸钙在硫酸盐地下水中不仅没有被溶解而是在水样中析出 CaCO₃, 而白云岩在这样的水溶液中溶解, 且溶解以后已溶部分 CaCO₃ 又自溶液中沉淀出来。

表 11 硫酸盐地下水(CH 样)中碳酸岩的溶解与沉淀

试 样 编 号	CaMg(CO ₃) ₂ (毫克/升)	自溶液中析出 CaCO ₃ (毫克/升)	MgCO ₃ (毫克/升)
MgCO ₃		1369.97	1504.01
CaCO ₃		114.58	
70S03	32.49	102.57	
71033	61.26	158.40	

氯化物地下水对于钙、镁碳酸岩都是不溶解的, 仅碳酸镁仍然具有极高的溶度, 并且由于碳酸镁的溶解致使大量的 CaCO₃ 析出, 因而溶液中离子的总含量变化不大, 从电导度上也反映出这一特征, 例如 T₅ 深层水中碳酸镁的溶度为 1675.47 毫克/升, 析出 CaCO₃ 的量为 1888.11 毫克/升。钙镁碳酸岩加入到氯化物地下水中以后普遍使钙、镁离子从溶液中析出(表 12), 所析出的除去碳酸盐外, 还应该有钙、镁的硫酸盐甚至氯化物。

表 12 T₅ 深层水加入碳酸岩后溶液组分 (毫克/升)

岩样编号及水样组分 离子	MgCO ₃	CaCO ₃	71724	70S03	71007	71093	71076	71033	70024	70054	水样组分
Ca ⁺²	49.65	645.45	625.59	615.66	685.17	625.59	635.52	635.52	655.38	621.62	802.60
Mg ⁺²	728.99	174.74	198.82	210.85	186.78	210.85	204.90	198.22	204.90	215.60	248.92
HCO ₃ ⁻¹	911.94	134.55	143.52	149.50	134.55	149.50	149.50	179.40	128.57	149.50	584.57

表 13 鄂西地下水的水化学资料之一

水 样	矿化度 (毫克/升)	CaCO ₃ (毫克/升)	MgCO ₃ (毫克/升)	总硬度 (德国度)	pH 值	游离 CO ₂ (毫克/升)	侵蚀 CO ₂ (毫克/升)	白云石/方解石 (毫克/升)
白云岩分布区的泉水		136.19	115.00		7.40	16.5	0	251.19/0
白云岩分布区的钻孔水		176.90	148.96		7.40	28.8	0	325.86/0
白云岩分布区的泉及钻孔水	150—420	154.27	98.67	6—21.7	7.0—8.2	0—45.1		215.89/ 37.05
灰岩分布区的泉水	374—762	216.60— 333.20	0—13.16	12.94— 29.46	7.12—7.54	4.23— 21.14	0	0—28.79/ 200.97— 333.20

此外,从鄂西和广西两个地区岩溶地下水的水化学资料(表 13、14、15)可以知道,从同样季节、类型相近的下降泉与暗河所取的水样相比较,白云岩中泉水所含的碳酸盐比灰岩中的泉水要高,同样,白云岩中的地下水总矿化度一般也是较高的。说明实验资料与实际观测的结果是一致的,这就澄清了认为白云岩溶度低于灰岩溶度这一通常流行的、不明确的概念。

表 14 鄂西地下水的水化学资料之二

水 样	矿化度 (毫克/升)	CaCO ₃ (毫克/升)	MgCO ₃ (毫克/升)	总硬度 (德国度)	pH 值	游离 CO ₂ (毫克/升)	侵蚀 CO ₂ (毫克/升)	白云石/方解石 (毫克/升)
灰岩中的溶洞下降泉	204.56	124.13	0	7.14	7.65	1.08	1.92	0/124.13
灰岩中的溶洞下降泉	208.03	138.20	0	8.18	8.35	0	0	0/138.20
白云岩中的裂隙下降泉	371.35	122.12	89.97	14.69	8.23	0	0	196.85/15.24
白云岩中的裂隙下降泉	483.03	176.90	111.61	17.22	7.41	4.23	0	244.12/44.39
灰岩中的上升泉	762	333.20	0	29.46	7.12	21.14	0	0/333.20
灰岩中的暗河	373.78	216.60	13.16	12.94	7.54	4.23	0	28.79/200.97

表 15 广西柳城大埔地下水的水化学资料

水 样	矿化度 (毫克/升)	CaCO ₃ (毫克/升)	MgCO ₃ (毫克/升)	总硬度 (德国度)	白云石/方解石 (毫克/升)
白云岩中裂隙下降泉	0.42	161.33	82.33	15.88	180.14/63.52
灰岩中溶洞下降泉	0.28	154.80	7.21	8.99	15.78/146.23
灰岩中的暗河	0.31	179.42	5.94	10.60	13.00/172.36

(二) 不同水地球化学环境中岩溶的发育与演变

岩溶岩体渗流带为天然水周期地并迅速地通过,在渗流过程中未全部失去其溶蚀能力的天然水也属于重碳酸盐型。因此,在讨论对渗流带岩溶发育的影响时,碳酸岩的溶解速度与其溶度相比,显然前者更为重要。

在饱水带上部的重碳酸盐水环境中白云岩与灰岩都将发育岩溶。灰岩类中不均一的溶蚀作用产生岩溶管道网,交代的亮晶白云岩类中则属均一的溶蚀作用而产生整体岩溶化。由于白云石的溶度较方解石要高,尽管白云岩岩溶发育性质不同于灰岩,但岩溶仍然是十分发育的,常常是良好的裂隙水含水层。据云南省地质局统计结果,在下二叠统灰岩中综合 106 个钻孔抽水资料,平均单位涌水量 2.47 升/秒·米,最大值 49.7 升/秒·米,最小值 0.0002 升/秒·米;震旦系和中寒武统白云岩 22 个抽水钻孔资料,平均单位涌水量 1.63 升/秒·米,最大值 13.2 升/秒·米,最小值 0.00012 升/秒·米。据贵州北部中上寒武统白云岩分布区的调查,从溶盆内 90 个钻孔统计,近 72% 的涌水量在 500 吨/昼夜以上,其中 35% 的涌水量达到 1000—2000 吨/昼夜,甚至更大,属于钻探成井率比较高的、丰富而

均一的裂隙含水层。

白云岩遭受溶蚀的同时方解石不断地析出使白云岩方解石化的现象在野外地质观察及溶解试验中均已得到了证实。

在硫酸盐水环境中通常属于硫酸钙型的天然水,白云石与方解石在这样的水溶液里其溶解性质恰好相反。灰岩中的既成洞穴当处于硫酸盐水化学环境时,可为从地下水中析出的方解石晶体所封存或充填起来。例如四川重庆江北县中三叠统内巷道揭露一个体积约 8—10 万米³的洞穴,突水时流量极大,水混浊并夹有泥沙及灰岩、砂岩碎块,属硫酸钙型地下水,洞壁满布黄色网格状方解石沉积,无钟乳石,流量动态反映出具有静储量补给特征。这可以视为一个逐渐被封存洞穴的例子。

处于硫酸盐水环境的白云岩将使岩溶进一步发展,产生方解石交代白云石的去白云化作用。

氯化物水环境中由于白云岩及灰岩类岩石都是不溶解的。在这样的水地球化学环境逐渐形成的过程中,由于复杂组分的天然水混合而以沉淀告终时会有碳酸钙或其他钙、镁的盐类析出使既有的洞穴封存。

本文从岩溶发育的水文地质观点出发讨论了岩溶发育内因的一个方面。碳酸岩之所以受到岩溶作用而形成富有空隙的岩溶化岩体,主要决定于其具可溶性及其溶蚀作用的差异性。这使得各类碳酸岩在岩溶发育的性质、规模上均有其特点。各类碳酸岩处在不同的水地球化学环境中时,其岩溶的发育与演变也不同。

参 考 文 献

- [1] 金玉璋, 1962, 广西碳酸盐类岩石的试验室研究。全国喀斯特研究会议论文选集。科学出版社。
- [2] 李粹中、张寿越、何宇彬、张汝惠, 1962, 广西喀斯特发育的基本规律。全国喀斯特研究会议论文选集。科学出版社。
- [3] Соколов, Д. С., 1962, Основные условия развития карста. Госгеолтехиздат, Москва.
- [4] Chilingar, G.V.; Bissell, H. J. and Fairbridge, R. W., 1967, Carbonate rocks. Physical and Chemical Aspects. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York.

THE CORROSION OF CARBONATE ROCKS AND DEVELOPMENT OF KARST (*WITH HUBEI, SICHUAN, GUANGXI AS EXAMPLES*)

Zhang Shouyue

(Institute of Geology, Academia Sinica)

Abstract

All surface and subsurface karstic features are made by the corrosion of carbonate rocks by natural waters.

First, results of corrosion tests made on the relative soluble velocity or relative corrosivity of carbonate rocks show that relative corrosivity is mainly controlled by the composition of carbonate rocks and that the amount of relative corrosivity of limestone is higher than that of dolomite. The corrosional amount of carbonate rocks including both dissolution and disintegration depends on the texture and genesis of carbonate rocks.

Next, the solubility tests of carbonate rocks by the natural waters of different hydrogeochemical types generally show that dolomite has a higher solubility than limestone. Dolomite is more soluble in the natural water of sulphate type, but both dolomite and limestone are not soluble in the natural water of chloride type. These results show that development of karst varies with different types of carbonate rocks under different hydrogeochemical environments.