

碳酸盐岩相与岩溶地貌发育的初步研究

——以贵州三叠系为例

赵吉发

(贵州省环境保护科学研究所)

提 要 本文以地层发育、相变明显、地貌类型齐全的贵州三叠系为例,从分析岩相和发育在各相带上的岩溶地貌入手,应用岩石薄片鉴定、溶蚀试验和化学成分分析等资料,结合野外考察,对非碳酸盐岩夹层、碳酸盐岩的孔隙度、颗粒含量、比溶蚀度、 SiO_2 和酸不溶物5个影响岩溶发育的主要岩性因素进行岩相与岩溶发育相关分析,基本上查明了岩溶地貌随相带变化的控制规律。

关键词 三叠系;岩相;岩溶地貌;相关关系,贵州。

贵州三叠系出露面积4.87万 km^2 ,占全省总面积的28.5%。除凯里—施秉以东的黔东南缺失和黔北赤水一隅被覆盖外,其余地区都有不同程度出露。中统碳酸盐岩最发育,下统次之,上统受印支运动影响,发育不全,以碎屑岩为主。总的来看,三叠系以碳酸盐岩沉积为主,岩溶发育区达3.25万 km^2 ,占出露面积的66.7%。

1 碳酸盐岩相与岩溶地貌

1.1 沉积相带及沉积相模式

由于受古构造的影响,贵州早、中三叠世由一“S”形的相变带分隔成两大岩石类型完全不同的沉积相区。相变带从马场坪开始,经贵阳青岩—安顺码头—贞丰坝桥—册亨冗渡—兴义泥函入广西罗平,贵州境内长440km,以发育生物礁碳酸盐岩为特征,习称“青岩大堤礁”。堤礁南为华南区,以盆地相碎屑岩沉积为主;堤礁北为扬子区,以碳酸盐岩沉积为主。早三叠世,非碳酸盐岩从西向东、向北减少,碳酸盐岩逐渐增加;中三叠世,非碳酸盐岩从东、西向中部、北部逐渐减少,碳酸盐岩相应增加。根据沉积建造的差异,扬子区又分为陆地边缘相区、台地相区和台地边缘相区。台地、台地边缘和盆地三相区又可各分为两个沉积相带。这样,三叠系就分成了4个相区7个相带,构成了一个由南而北、从盆地至陆地边缘的古地理沉积模式(图1)。根

作者简介:赵吉发,男,45岁,1985年贵州师范大学岩溶专业硕士研究生毕业,工程师。550002 贵阳市新华路148号。

据三叠系地层及沉积相和有关碳酸盐岩相研究专著,建立早、中三叠世沉积相模式(图 2),以便探讨各相带的岩溶发育规律。上三叠统发育不全,主要由碎屑岩组成,基本属流水常态地貌,本文不予讨论。

1.2 各相带岩溶地貌特征

对地貌形态及其组合类型的分析,除实地考察、采样分析外,室内用地形图对形态指数^①、山坡坡度、洼地大小、深浅、形状及正负地形发育率、正负地形之比等统计计算。统计资料和野外考察都表明,地貌随相带的变化十分明显。从高能带到低能带,岩溶发育随相带能量的降低而减弱。

1.2.1 盆地相区

盆地相碎屑岩发育了低、中山常态地貌,陆棚相带以溶丘洼地为主。溶丘高 50~60m,山坡 35°以下,多呈馒头状;洼地小而浅,多呈碟状。

1.2.2 台地边缘相区

礁相带岩溶极其发育,以峰林、峰丛为主。礁前斜坡相带岩溶发育较差,以溶丘为主,以青岩出露面积最大,地貌最典型。溶丘高 50m 左右,山坡 25°,形态指数 0.23,谷地穿插其间。正地形发育率 6 个/km²,正负地形之比 2.85;洼地偶见,小而浅,呈碟状。礁相带以坡陡、洼地深、正负地形相对高差大、山峰呈锥状、洼地呈漏斗状、岩溶管道极其发育、地表河缺乏为特征,和礁前、礁后的地貌界线也很明显。峰林、峰丛的个体和相对高度都比礁后相大,密度稀。礁前,常形成 300m 以上大斜坡与相邻的溶丘地貌或低、中山常态地貌相接(图 3)。这种地貌的差异是由于组成岩相带的岩层抗蚀能力不同造成的。峰丛洼地以册亨冗渡—贞丰坝桥—镇宁一带及罗甸板庚发育较好。板庚环礁,正负地形最大相对高差 440m,山坡 54°;洼地发育率 4.8 个/km²,最深 169m。两个大洼地间是多个锥峰组成的峰丛体,锥峰间又有小洼地,地表河缺乏。峰林洼地以兴义泥凼—册亨冗渡一带发育较好。冗渡一带,正负地形最大相对高差 240m,山坡 48°,形态指数 0.56;洼地发育率 2.25 个/km²,最深 90m,正负地形之比 3.98。

1.2.3 台地相区

分为礁后泻湖相带和蒸发台地相带。礁后泻湖相带的岩溶发育介于礁相带和蒸发台地相

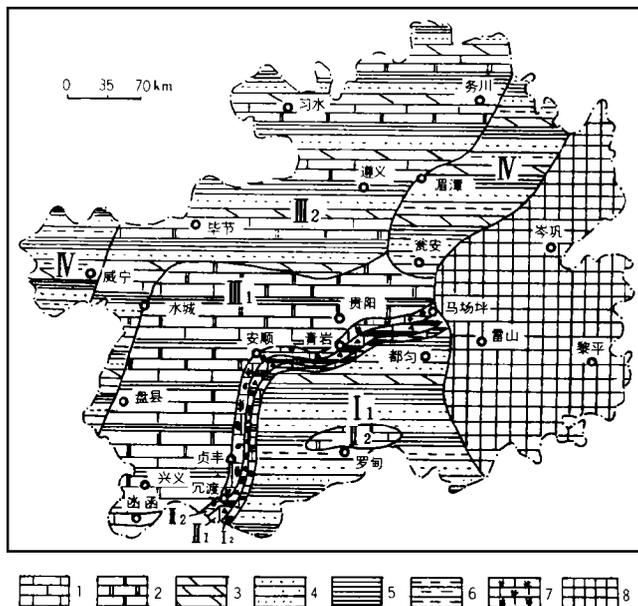


图 1 贵州早、中三叠世岩相图

Fig.1 Guizhou Triassic rock facies

I₁ 盆地相带; I₂ 陆棚相带; II₁ 礁前斜坡相带; II₂ 礁相带; III 礁后泻湖相带; IV 蒸发台地相带; V 滨岸陆屑滩相带; 1. 石灰岩; 2. 白云岩; 3. 泥灰岩; 4. 砂岩; 5. 页岩; 6. 泥岩; 7. 礁灰岩; 8. 江南古陆区。

① 形态指数 = $\frac{h}{d}$, h——山高, d——山根直径。

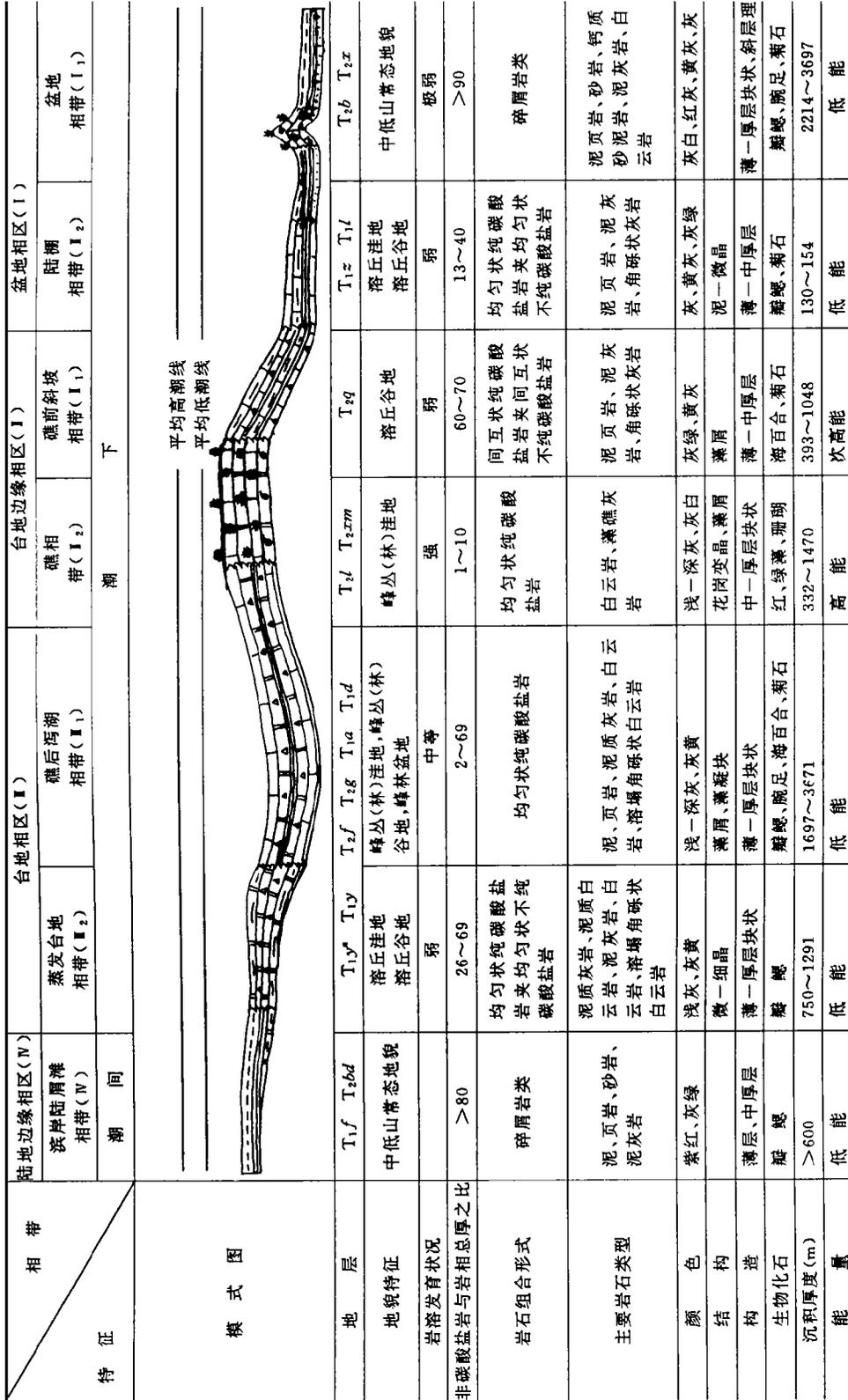


图2 贵州早、中三叠世岩相模式图

Fig. 2 Guizhou Triassic rock facies model

注：盆地相带中的罗甸板庚环礁，以生物礁碳酸盐岩沉积为主，归入台地边缘相区。

带间,由礁相带的峰丛、峰林向蒸发台地相带的溶丘过渡。不同地貌发育阶段常见的地貌类型有峰丛洼地、峰丛谷地、峰林洼地和峰林盆地。峰丛、峰林洼地以兴义—镇宁一带发育较好。兴义下午屯,正负地形最大相对高差 220m,山坡 45°,山峰呈锥状;洼地发育率 11 个/km²,最深 30m,正负地形之比 14.08。峰丛谷地以安龙、平坝一带较典型。平坝一带,正负地形相对高差 200~300m,谷地宽 200~300m,夹于两链状峰丛体之间;安龙一带,峰体为丛聚状,相对高度 200m 左右,谷地穿插其间。峰林盆地也以安顺一带较典型。锥峰呈星点状或条带状展布于岩溶盆地之中或两侧,相对高差 150m 左右;盆地开阔,地面波状起伏,上覆 1~5m 亚粘土。蒸发台地相带以溶丘地貌为特色,常见的地貌有溶丘洼地和溶丘谷地,正负地形相对高差 50~60m,山坡平缓,呈浑圆状小丘;洼地小而浅,呈碟状,谷地穿插于溶丘间,多为耕地。

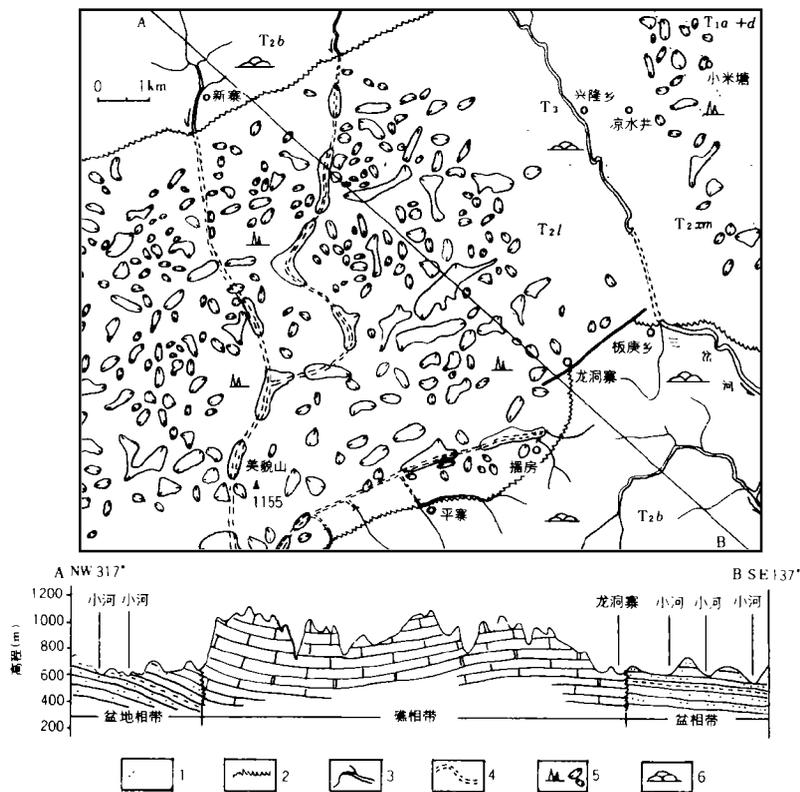


图 3 罗甸板庚峰丛洼地及中山常态地貌

Fig. 3 Fengcong depression and low and middle mountains of erosional landforms in Luodian County

1. 地层界线; 2. 相交线; 3. 地表河; 4. 地下河; 5. 峰丛洼地; 6. 低中山常态地貌。

1.2.4 陆地边缘相区

岩溶极不发育,基本属流水低、中山常态地貌。

综上所述,礁相带岩溶最发育;礁后泻湖相带介于礁相带和蒸发台地相带之间,愈接近前者,岩溶愈发育,地貌愈类似礁相带;愈接近后者,岩溶发育愈差,以丘峰向蒸发台地相带的溶丘过渡。陆棚相带、礁前斜坡相带、蒸发台地相带岩溶发育较差,以溶丘地貌为主;盆地相带和陆地边缘相区,岩溶极不发育,基本属低、中山常态地貌。

地貌随相带的变化规律是：从礁相带往盆地或往陆地边缘，岩溶作用逐渐减弱，地貌由岩溶地貌向常态地貌过渡。

2 碳酸盐岩相与岩溶地貌发育规律初探

影响岩溶地貌发育的因素很多，如岩性、构造、气候、生物等。就岩相而言，主要有以下几方面：

2.1 非碳酸盐岩与岩相总厚之比

从礁相带往盆地或往陆地边缘，非碳酸岩逐渐增加，碳酸盐岩相应减少以至几乎全变为非碳酸盐岩。三叠系的四个沉积期，非碳酸盐岩与总厚之比都以礁相带最小，陆地边缘相区和盆地相区最高(表1)。根据统计数据回归分析，得比值随相带变化的相关曲线为 $y=98.61-44.87x+5.58x^2$ (表2)。地貌与比值的对应关系为：低、中山常态地貌($>90\%$ ，盆地相带和陆地边缘相区)→溶丘地貌($<70\%$ ，陆棚相带和礁前斜坡相带)→峰林、峰丛地貌($<30\%$ ，礁相带和礁后泻湖相带)→溶丘地貌($<69\%$ ，蒸发台地相带)。可见，当比值大于30%时，对岩溶地貌的控制作用很明显。主要是碳酸盐岩与非碳酸盐岩成互层，制约地下水的循环和谷坡的形成。当谷坡为二者共同组成时，在接触带，或是下伏非碳酸盐岩谷坡被掏空，使上覆碳酸盐岩垮塌，或是上覆非碳酸盐岩的坡积物覆盖下伏碳酸盐岩坡麓，减弱岩溶作用。当岩层水平时，常形成馒头状山丘；当岩层倾角较大时，常形成单面山。比值宏观上反映了岩层的组合特征及岩溶作用的差异性^[3]。当比值大于70%时，基本上不反映岩溶地貌景观特征，在30%~70%之间，是影响岩溶发育的重要因素；小于30%时，岩溶发育状况主要取决于碳酸盐岩本身的特性。

表1 影响岩溶发育主要岩性因素平均数据表

Tab.1 Mean data of major rocky factors to influencing karst development

岩性因素	相带	I ₁		I ₂		II ₁		II ₂		IV	
		T _{2x+b}	T _{1t+z}	T _{2q}	T _{2xm}	T _{2l}	T _{2g+f}	T _{1a+d}	T _{1yⁿ}	T _{1y}	T _{2bd}
非碳酸盐岩层与总厚之比(%)	中 晚期	>90				1	3				>90
	统 早期	>90		60~70	<10		30				>80
	下 晚期		13					2	26		
	统 早期		40					69	69		>90
生物颗粒含量(%)		5	60	70	75	40	25	20	5		
孔隙度(%)		0.84	2.58	7.50	9.40	6.62	3.89	0.85	0.48		
比溶蚀度		1.34	0.97	1.14	1.05	1.06	1.01	1.15	1.21		
SiO ₂ 和酸不溶物含量(%)		5.04	4.35	2.24	0.47	2.16	2.80	3.61	3.27		

注：相带号和地层同图1、图2。

2.2 岩相与孔隙度

指大于0.01mm，能在岩石薄片观察到的粒间孔、晶间孔、粒内溶孔和铸模孔等有效孔

隙。依岩石薄片鉴定和石油钻孔岩芯试验数据进行回归分析,得有效孔隙度随相带变化的相关曲线为 $y=90.31\exp[-(x-3.96)^2/5.96]$ 。有效孔隙度与沉积环境能级、生物繁盛程度和碳酸盐岩的矿物成分、结晶程度和结构—成因有关。总的趋势是随白云石含量的增高增大,以白云石含量高于90%的纯白云岩孔隙度变动范围最广,极端值均见于这类岩石,极小值出现于泥晶白云岩;灰岩中具有粒屑者孔隙度较高;白云岩以成岩交代的亮晶白云岩孔隙度最高,结晶程度好的比差的高;晶粒粒度相当时,白云岩较灰岩高;生物颗粒含量高的比低的高。礁相带能量高,生物繁盛,礁灰岩发育,白云岩重结晶好,孔隙度高;生物繁盛较差,结晶程度较好的礁后泻湖相带次之;生物既不繁盛,碳酸盐岩重结晶程度又差的陆棚相带和蒸发台地相带,有效孔隙度最低。

表2 影响岩溶发育主要岩性因素与相带的相关性表

Tab. 2 Relationship between major rocky factors influencing karst development and facies

相关曲线 岩性因素	项目	相带 I ₂ II ₁ II ₂ III ₂ III ₃	相关 系数	相关 水平	回归 方程	置信方程
非碳酸盐岩层 与总厚之比			0.99	极显著	$y=98.61-44.87x+5.58x^2$	$y'=y\pm 8.56$
颗粒含量			0.87	显著	$y=82.27e^{-\frac{(x-3.93)^2}{6.23}}$	$y'=y\pm 29.48$
孔隙度			0.99	极显著	$y=90.31e^{-\frac{(x-3.96)^2}{5.96}}$	$y'=y\pm 11.43$
比溶蚀度			-0.82	显著	$y=1.304-0.128x+0.015x^2$	$y'=y\pm 0.147$
SiO ₂ 和酸不 溶物含量			0.87	显著	$y=5.44-2.65x+0.54x^2$	$y'=y\pm 1.645$

有效孔隙度对岩溶的影响,是通过水在孔隙中的渗透、溶蚀、扩大孔隙实现的。礁相带有效孔隙度最高,地面水容易渗入转为地下水,并在其中运动溶蚀围岩,随即将溶蚀下来的物质带走,使水能不断更新,始终保持较强的溶蚀能力,岩溶作用能在地表和地下同时进行,岩溶最发育;礁后泻湖相带孔隙发育,岩溶作用仅次于礁相带;陆棚相带和蒸发台地相带有效孔隙度小于1%,水几乎不能在孔隙中运移,对岩溶作用的影响甚微。

2.3 岩相与碳酸盐岩的颗粒含量

这里指的颗粒,各相带以藻屑、藻团块、藻凝块和生物碎屑为主。依岩石薄片统计数进行回归分析,得颗粒含量随相带变化的相关曲线为 $y=82.27\exp[-(x-3.93)^2/6.23]$ 。颗粒含量取决于生物繁盛程度。礁相带生物最繁盛,颗粒含量最高,陆棚相带生物最少,颗粒含量最低。相关曲线与有效孔隙度类似,有颗粒含量高、孔隙度也大的对应关系^[4]。颗粒对岩溶发育的影响是通过水在孔隙中的渗透进行差异性溶蚀实现的。溶蚀时,亮晶颗粒灰岩中的亮晶溶蚀慢而突起,颗粒溶蚀快而下凹。抗蚀性的差异,是由亮晶的有序度比颗粒的有序度更高引起的^[5]。差异溶蚀的结果,使原有孔隙扩大,同时形成新的粒内溶孔和铸模孔等,渗透性进一步加强,促进

岩溶发育。礁相带颗粒含量70%以上,对岩溶发育的影响最显著;礁后泻湖相带在25%~40%之间,影响次于礁相带;蒸发台地相带小于20%,陆棚相带小于5%,加之岩石致密,透水性差,影响甚微;礁前斜坡相带含量虽高达60%,但该相带与泥页岩、不纯碳酸盐岩互层,孔隙、裂隙易被酸不溶物充填使之失效,因此,颗粒和孔隙对岩溶作用的影响都不大。

2.4 SiO₂ 和酸不溶物含量

依岩样的化学成分分析统计数进行回归分析,得SiO₂和酸不溶物随相带变化的相关曲线 $y=5.44-2.65x+0.54x^2$ 。变化规律是:高能带含量低,低能带含量高,与各相带的水动力能级相反。对岩溶发育的影响主要是控制比溶蚀度和增加差异性溶蚀。当含量小于30%时,对比溶蚀度的影响较小,大于30%时明显降低,随SiO₂和酸不溶物的增加,从纯灰岩的0.96减为0.52。除陆棚相碳酸盐岩局部地带含较高的SiO₂和酸不溶物外,其余相带多在10%以下,对岩溶发育的影响不大。

2.5 岩相与比溶蚀度

2.5.1 矿物成分、晶粒粒度与比溶蚀度

各相带的溶蚀试验与岩石薄片鉴定属同一块标本。依试验、鉴定统计数进行回归分析,得方解石含量、晶粒粒度与比溶蚀度的相关方程分别为 $y=68.15+145.79x$ 和 $y=1.1866-0.352x$ 。方程表明:碳酸盐岩的比溶蚀度随方解石含量的增加增大,随晶粒粒度的增大降低。根据晶体化学晶格能越大的矿物其稳定性越大的理论,白云石的晶格能(1385.5kcal)大于方解石的晶格能(647.93kcal),是灰岩比溶蚀度大于白云岩的内在原因。白云岩的比溶蚀度在0.4~0.6之间,灰岩在0.9~1.4之间,灰岩近似于白云岩的两倍。因此,灰岩的岩溶一般比白云岩强。但是,若岩溶作用仅取决于比溶蚀度的话,当原始地面等高时,同一地区的白云岩地层地势必然要比灰岩高出一倍,但实际中却没有这种实例存在。表明碳酸盐岩的岩溶作用除了溶蚀外,还伴随着机械的破坏过程。贵州地质研究所103块标本溶蚀试验统计,纯灰岩机械破坏量最小(0.5mg/cm³),含硅质泥质灰岩最大(2.37mg/cm³),后者是前者的4.74倍,白云岩中等(0.815mg/cm³),为纯灰岩的1.6倍。在灰岩→白云质灰岩→灰质白云岩和灰岩→含泥灰岩→泥灰岩及白云岩→含泥白云岩→泥云岩三个系列中,每个系列后面岩石的比溶蚀度均较前面的小,机械破坏量相对增大。随比溶蚀度降低,机械破坏作用增强,地貌形态由纯灰岩的溶蚀地貌向溶蚀—侵蚀地貌过渡,岩溶作用由强变弱。

碳酸盐岩的重结晶作用使晶体有序长大,是亮晶灰岩比溶蚀度较泥晶灰岩低的内在原因。重结晶作用虽然使矿物的晶体长大,有序度增加,抗蚀能力加强,比溶蚀度降低,但岩石和化学成分没有改变,岩溶作用的方式不变。因此,由重结晶作用引起的比溶蚀度降低,并不导致岩溶地貌类型的显著变化。

2.5.2 岩相与比溶蚀度

白云岩类的比溶蚀度较稳定,其数值在0.4~0.6之间,随相带变化的规律不明显;而灰岩类则呈二次曲线变化趋势。用各相带试验平均值进行回归分析,得灰岩比溶蚀度随相带变化的相关曲线 $y=1.304-0.128x+0.015x^2$ 。比溶蚀度的降低主要由晶粒增大引起。礁相带和礁前斜坡相带以亮晶颗粒灰岩为主,礁后泻湖相带以微晶为主,晶粒都比陆棚相带和蒸发台地相带的泥晶灰岩大,有序度更高,晶格更加稳定,比溶蚀度较低。前已述及,由晶粒增大降低的比溶蚀度不改变岩溶作用的方式,和这些相带的岩溶发育并不矛盾。

3 结 论

(1)碳酸盐岩的矿物成分和化学成分,是岩溶发育的首要因素,它决定岩石的钙镁比, SiO_2 和酸不溶物含量,控制岩溶发育的速度、强度和溶蚀方式。在灰岩→灰质白云岩和灰岩→泥灰岩及白云岩→泥云岩三个系列中,随白云石或 SiO_2 、酸不溶物含量的增加,差异性溶蚀作用增强,比溶蚀度减小,机械破坏量增大,岩溶形态由纯灰岩的溶蚀形态向溶蚀—侵蚀形态过渡,岩溶作用由强变弱。

(2)颗粒含量和孔隙度,是碳酸盐岩结构—成因分类的主要指标,它控制水在岩石中的渗透率及运移情况,直接影响地表水转入地下及地下水的交替强度和溶蚀能力,是岩溶发育的微观基础及重要因素。

(3)非碳酸盐岩与岩相总厚之比,是进行层组划分的依据。影响地下水的循环和谷坡的形成,是岩溶发育的宏观因素。

(4)相带不同,各因素对岩溶的影响程度不同,有的强,有的弱,有的甚至不明显。礁相带,颗粒含量和孔隙度是主要因素;礁后泻湖相带,各因素都有影响。愈靠近礁相带,颗粒和孔隙的影响愈强,愈靠近蒸发台地相带,非碳酸盐岩夹层的影响愈强;陆棚相带,非碳酸盐岩夹层、 SiO_2 和酸不溶物是主要因素;礁前斜坡相带和蒸发台地相带,影响岩溶发育的主要因素是非碳酸盐岩夹层。

(5)与相带的相关方程有两个:颗粒含量和孔隙度为 $y=b_0 \exp[-(x-b_1)^2/b_2]$;非碳酸盐岩与总厚之比、比溶蚀度、 SiO_2 和酸不溶物含量为 $y=b_0+b_1x+b_2x^2$ 。 b_0 、 b_1 、 b_2 为系数,可根据各相带的统计或分析数据计算。

参 考 文 献

- 1 杨明德. 贵州高原喀斯特地貌结构及其演化规律. 见: 喀斯特地貌与洞穴. 科学出版社, 1985
- 2 H. Lehmann, Morphological studies in Java, Karst Geomorphology, Hutchinson Ross Publishing Company, 1982
- 3 中国科学院地质研究所岩溶研究组. 中国岩溶研究. 1979
- 4 曹以临等. 鲁中地区下古生界碳酸盐岩的结构及其对岩溶发育的影响. 科学出版社, 1982
- 5 龚自珍等. 碳酸盐岩岩块野外溶蚀速度试验. 中国岩溶, 1984, 3(2)

A PRELIMINARY RESEARCH ON CARBONATE FACIES AND
KARST GEOMORPHOLOGY DEVELOPMENT
—A CASE STUDY OF THE TRIASSIC STRATA OF GUIZHOU

Zhao Jifa

(*Environmental Protective Institute of Guizhou Province*)

Abstract

Examples presented in this paper are taken from the Triassic strata of Guizhou that are widely distributed with distinctive changes of facies and geomorphology types. Rock facies and karst geomorphology developed on different facies are analysed. Data on analysis of rock piece, corrosion test, chemical composition of carbonate rocks and field view of karst geomorphology are used. The research on relationship between carbonate facies and karst landforms has been attempted. Five factors influencing karst development, i. e. (1) porosity; (2) grain-content; (3) content of SiO₂ and undissoluble materials by acid; (4) specific solubility of carbonate rock and (5) ratio of non-carbonate rock thickness to total one in different facies are investigated by regression analysis to seek the relationship between rock facies and karst geomorphology. The change of five factors with different facies and the control on karst landforms are ascertained.

Key words Triassic, rock facies, karst geomorphology, correlativity, Guizhou.

《应用岩溶地质学》

这本书是由 Barry Beck 编辑的,它包括了 1993 年 1 月在佛罗里达州巴拿马城召开的有关岩溶区落水洞以及工程和环境影响的第四届多学科讨论会的内容。来自 8 个国家的不同学科的科学工作者及工程师参加了会议。他们的论文几乎涉及了在岩溶景观资源开发中人们所感兴趣的、有价值的,而且是经常遇到的难题,并致力于解决这些问题。书中许多实例研究具有重要的参考价值。

该书有 36 篇论文,主要涉及了岩溶区的地质问题、岩溶区的地下水污染问题、岩溶的地球物理调查、岩溶水文学、岩溶区的工程设计以及岩溶区的处理工程等问题。会议围绕很多应用岩溶地质学课题进行了讨论。科学家们在自己的工作中所运用的策略、方法,以及所积累的工作经验,对那些正在研究、管理、保护奇特的岩溶景观的人员是有益的。

前三届会议的会议文献早已出版。该书对从事岩溶开发应用问题的科学工作者及工程师来说是必读之作。

王濯凝译