地 球 学 报
第 21 卷 第 1 期 ACTA GEOSCIENTIA SINICA Vol. 21 No. 1
2 0 0 0 年 2 月 Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences Feb. 2 0 0 0

南方典型溶蚀丘陵系统现代岩溶作用强度研究*

章 程

(中国地质科学院岩溶地质研究所,桂林)

摘 要 我国典型溶蚀丘陵系统分布于湖南中西部雪峰山地区的新化 – 涟源县一带。主要宏观岩溶地貌类型有丛丘谷地、峰丘谷地、峰丛洼(谷)地、丘岭谷地。它们之间岩溶发育程度、形态组合特征差异明显。本文在论述不同地貌系统岩溶水水化学特征及其溶蚀能力的基础上,用水化学平衡法对不同地貌区的溶蚀速度进行了计算,并分析了现代岩溶作用强度趋异的原因。溶蚀丘陵区平均溶蚀速度为 25.19 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,决定了该区宏观地貌以半岩溶形态为主导特征。

关键词 溶蚀丘陵 岩溶作用强度 地貌趋异

我国溶蚀丘陵系统主要分布于湘中西部雪峰山地区的新化-涟源县一带,属亚热带季风气候,多年平均降雨量 1450 mm 左右,多年日均气温在 17℃ 左右,总面积达 6993.1 km^2,其中岩溶面积为 5738.1 km^2,占总面积的 82%。雪峰山地区地处云贵高原至湘中盆地大地貌过渡区,水动力作用由垂直作用向水平作用过渡[1]。研究区位于新化县桑梓镇辖区,面积 151.0 km^2,除局部地段出露碎屑岩外,大部分地区都为碳酸盐岩,主要为石炭系下统泥晶灰岩(C_1d),中统细晶白云岩(C_2d),上统厚层块状灰岩及生物灰岩(C_3c);二叠系下统泥高晶生物灰岩、上统硅质灰岩;三叠系薄层泥灰岩。比溶解度(K_{cv})依次为泥亮晶生物灰岩(1.25)、泥晶灰岩(1.11)、泥灰岩(0.86)、硅质灰岩(0.73)❶。因众多岩溶层组类型(6 个)和区域性隔水层的分布,在剖面上本区可以划分为 5 个含水层系和 10 个含水层组,加之褶皱断裂构造发育,致使本区岩溶系统具'多层多块'特点。结合宏观岩溶发育程度、分布高程及其形态特征,区内岩溶水文地貌类型可划分为丛丘谷地、峰丘谷地、峰丛洼(谷)地、丘岭谷地(图 1)。反映了岩溶发育趋异作用明显,岩溶形态组合也显示一定的规律性。总体上仍以半岩溶形态为特征。

1 区域岩溶地球化学特征

1.1 不同水文地貌系统的水化学特征

各系统水化学资料统计(表 1)表明,区内岩溶水中主要碳酸盐成分 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 的质量浓度变化是比较稳定的,分别为 71.94~91.21 $mg \cdot L^{-1}$ 和 222.63~270.01 $mg \cdot L^{-1}$;矿化

* 本文为国家计委专项项目'滇黔桂湘岩溶贫困区岩溶水有效开发规划建议与开发示范'部分成果之一
作者:章程,男,1965 年生,理学硕士,从事岩溶地质研究,邮编:541004
万方数据
❶ 熊顺聪,王立春等编.涟源幅区域水文地质普查报告,1978

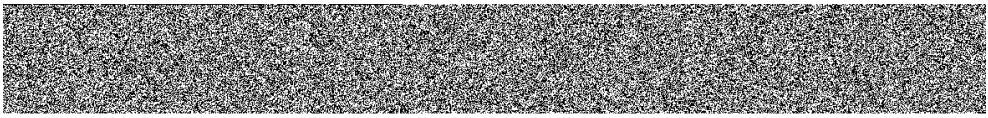

图 1　地貌分区及岩溶水文地质图

Fig. 1　Geomorphology type division and karst hydrogeology map

度为 234.57～336.62 mg·L^{-1};总硬度为 202.02～306.67 mg·L^{-1};暂时硬度为 182.59～218.19 mg·L^{-1};pH 值在 7.47～8.02 之间,属弱碱性水。水质类型多为重碳酸钙镁型(78%),少量为重碳酸－硫酸型。Mg^{2+} 含量在平面上分布则变化较大,在峰丛洼地谷地系统(Ⅲ)中的 Mg^{2+} 含量明显高于在丛丘谷地(Ⅰ)系统和丘岭谷地(Ⅱ)系统中的含量,这主要与它们所处的不同岩石地球化学背景有关。高坝岭向斜北端亚系统($Ⅲ_1$)和大冲－桑梓单斜谷地亚系统($Ⅲ_2$)主要发育于富镁的中石炭统黄龙组白云岩内,而鹧鸪塘向斜系统(Ⅰ)和坪烟背斜亚系统(Ⅱ)主要发育于少镁的灰岩、硅质条带灰岩、泥灰岩地层内,说明岩性是

万方数据

影响水中 Mg^{2+} 含量的关键因素。

从不同系统内主要水点的丰、枯水季节水化学特征对比看，枯水期的矿化度和 Ca^{2+}、Mg^{2+} 含量均较丰水期大，这是由于枯水期地下水径流量相对较小，且流速缓慢，能吸收较多的 CO_2，溶蚀能力较强的缘故。

表 1 岩溶地下水水化学特征值一览表

Table 1 Hydrochemical characteristic values of karst water

岩溶系统名称及代号		矿化度/mg·L^{-1}	暂时硬度/mg·L^{-1}	pH 值	主要离子含量/mg·L^{-1}							样品/个
					Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	
鹧鸪塘向斜丛丘谷地(Ⅰ)		239.78	218.19	7.56	86.25	2.54	0.73	1.42	266.23	5.30	8.28	10
坪烟背斜丘岭谷地(Ⅱ)		234.57	182.59	7.76	76.79	2.49	0.36	1.82	222.63	4.42	21.98	4
峰丛洼地谷地系统(Ⅲ)	高坝岭向斜(Ⅲ$_1$)	336.62	202.45	7.47	91.21	19.16	1.23	2.27	270.01	6.62	79.84	9
	云霄洞单斜(Ⅲ$_2$)	257.36	185.02	8.02	71.94	13.29	1.22	1.85	224.71	3.27	50.42	3

注：表内数据均为平均值

1.2 岩溶水的溶蚀能力分析

水对碳酸盐岩的溶蚀能力采用方解石和白云石在岩溶水中的饱和指数 *SIC* 和 *SID* 表示。考虑到岩溶动力系统对环境的敏感性，水温、pH、硬度、电导率等指标均在现场测定，以确保饱和指数计算的正确性。各区水样的相对饱和情况如表 2。

表 2 各系统岩溶水的矿物饱和指数

Table 2 Mineral saturation index of karst water in different hydrogeomorphology system

水文地貌系统	pH	*SIC*	*SID*	P_{CO_2}
峰丛洼地谷地	7.12～7.63 / 7.4	−0.17～0.45 / 0.19	−1.11～0.5 / −0.081	1.91～2.18 / 2.021
丛丘谷地	7.23～7.90 / 7.56	−0.03～0.71 / 0.367	−1.08～0.21 / −0.574	1.89～2.53 / 2.188
丘岭谷地	7.33～8.03 / 7.51	−0.1～0.76 / 0.445	−1.0～0.1 / −0.380	1.98～2.78 / 2.465

注：分式中分子代表 min. ～max.，分母代表 ave

从表中可以看出，全区方解石基本上都已处于饱和状态；白云石约有一半处于不饱和状态，多分布于灰岩区。总体上岩溶水具有开放系统的特点：低 pH(<8.0)、高 P_{CO_2}(<2.5)、低 *SIC*、*SID*(<0.6)。同一系统从补给区到排泄区岩溶水的溶蚀能力逐渐减弱，如在高坝岭向斜北端岩溶水系统中，越接近排泄区(沿地表河谷)泉水的饱和指数越高(图 2)，且上游泉水因较短的径流途径仍有溶蚀能力。不同系统的 *SIC*(*SID*) − P_{CO_2} 如图 3 所示，可见如下规律：丛峰丛洼地谷地→丛丘谷地→丘岭谷地，*SIC*(*SID*)逐渐增强，P_{CO_2} 逐渐减小，pH 逐渐增大，表明从峰丛区到丘岭区岩溶水的溶蚀能力是逐渐减弱的，塑造岩溶地貌的能力也逐渐减小，这是本区岩溶地貌分异明显的重要原因之一。另一方面丛丘和丘岭区岩溶泉水表现出相近的地球化学性质：P_{CO_2} 较高，方解石都已达到饱和或过饱和，说明这两类地貌区岩溶水具扩散的特征，不存在岩溶管道。因管道水流动较快、扰动强烈，会导致水中 CO_2 逸出，从而降低了其溶蚀碳酸盐矿物的能力，使水中矿物具较小饱和指数值，且往往为不饱

万方数据

图 2　栗溪河沿岸岩溶水矿物饱和指数

Fig. 2　Mineral saturation index near the bank of Lixi River

1-泉水点编号$\frac{SIC}{SID}$;2-地表水点编号$\frac{SIC}{SID}$;3-地下水流向

图 3　不同地貌区岩溶水 $SIC(SID)$-P_{CO_2} 关系图

Fig. 3　Scatter diagram between $SIC(SID)-P_{CO_2}$ in various geomorphology area

A-峰丛洼(谷)地区;B-丛丘谷地区;C-丘岭谷地区

万方数据

和[2]。

2 碳酸盐岩溶蚀速度与地貌趋异分析

溶蚀速度或溶蚀量是系统(流域)岩溶化的强度指标之一,与系统的介质性质及分布和水的补径排运移特征有关。溶蚀速度(量)的计算方法主要有水化学平衡法、化学溶蚀动力学法及野外溶蚀试验法,前两种方法计算结果在数量级上相似,后者因岩溶作用尺度效应,数据往往小得多[3]。在了解岩溶地质和水文地球化学特征的基础上,本文用水化学平衡法分别对不同地貌区的溶蚀速度进行了计算(表 3)。公式如下:

$$X=\frac{(Mc+Md)R}{1000\cdot\rho\cdot n}$$

式中:X——溶蚀速度($m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$);$Mc$,$Md$——方解石、白云石的溶蚀模量($mg\cdot L^{-1}$);$R$——系统岩溶水径流深度(mm);$\rho$——碳酸盐岩密度($g\cdot cm^{-3}$),取 2.7 $g\cdot cm^{-3}$;η——系统中碳酸盐岩面积于计算区流域面积之比值,无量纲值。

表 3 的结果反映溶蚀丘陵地貌区的现代溶蚀速度较低,平均值为 25.19 $m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$,低于南方湿热峰林峰丛区,接近于温带半湿润区,略高于半干旱区(表 4)。说明在本区的地貌外动力作用中,溶蚀作用并不占主导地位,总体上侵蚀作用似乎大于溶蚀作用,以半岩溶形态为主导特征。

表 3 各系统溶蚀速度计算结果

Table 3 Denudation rate in various karst geomorphology system

系统		面积/km^2	η/%	径流深度/mm	Md/$mg\cdot L^{-1}$	Mc/$mg\cdot L^{-1}$	V/$m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	平均 V
丛丘	峰脊	17.68	90	191.7	21.17	213.9	18.54	10.26
	谷地	25.27	100	55.0	16.8	202.39	4.46	
丘岭		25.43	50	94.9	19.09	181.6	14.11	14.11
峰丛	Ⅲ$_1$	12.15	100	329.6	146.89	148.19	36.02	30.04
	Ⅲ$_2$	30.14	100	329.6	101.89	124.88	27.63	

表 4 湘中溶蚀丘陵区与我国几个重要岩溶区溶蚀速度对比

Table 4 Denudation rate in study area and comparision with other karst areas in China

岩溶地区	湘 中	广西桂林	贵州普定	鲁中南	北京西山
年降雨量/mm	1445~1460	1936	1398	650~900	600~650
年均气温/℃	16~17	18.3	15.1	13.0~15.0	10.0~12.0
溶蚀速度/$m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	10.26~36.02	93.56~200.0	27.07~93.96	22.23~41.27	9.58~29.7

不同岩溶地貌系统或同一系统的不同子系统,其溶蚀速率(反映岩溶化程度)差异较明显。从岩性角度看,溶蚀速度从大到小依次为细晶白云岩、厚层块状灰岩峰丛区、泥亮晶生物灰岩峰脊区、泥(晶)灰岩丘岭区及泥灰岩向斜谷地区,与前述溶蚀试验比溶解度(Kcv)结果一致。从地层、构造及水文地质组合条件看,宽缓穹状向斜与细晶白云岩结合(Ⅲ$_1$)含水层厚度大,为408~580m,成片分布,降水直接进入含水层,径流条件好,枯季径流量达 9 02.63$m^3\cdot km^{-2}d^{-1}$,有利于溶蚀作用进行,溶蚀速度为本区之最(36.02$m^3\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$),从而塑造了较典型的峰丛洼地(谷地)岩溶地貌;单斜构造与白云岩及泥晶灰岩结合区(Ⅲ$_2$)

万方数据

其次,该区横跨于相对构造抬升的深切割区与区域排泄基准面之间,由于受隔水层及岩性界面限制,地下水只能沿层顺势而流动,加之较好的水动力条件(水力坡度在 25‰～47.4‰之间),枯季径流量亦达 902.52 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot d^{-1}$。故沿构造线方向塑造出条状宽谷及串珠状洼地和地下河。Ⅰ系统位于区域基准面附近的宽缓向斜区,两侧为泥亮晶生物灰岩分布区,含水空间大、地层倾角与地形一致,有利于地下水径流,且横向裂隙发育(110°与 150°两组,平均间距 3.1 m),溶蚀速率居中(18.54 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$),从而塑造出纵向成脊叠加横向沟谷的半岩溶状态;核部岩性条件差,导致径流条件较差,枯季径流量只有 276.9 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,因而溶蚀速率极低,仅为 4.46$m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,但因岩层极薄有利于风化剥蚀和地表河流的侵蚀作用,仍发育成条状向斜谷地。Ⅱ为背斜构造与泥晶灰岩结合区,属构造抬升的深切割区(切割深度达200～350m),岩性和径流条件与Ⅰ区核部相似,枯季径流量为260.06 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot d^{-1}$。由于能接受四周具强溶蚀能力非碳酸盐岩区裂隙水的补给,溶蚀速度比后者高出 3 倍多,在背斜核部泥灰岩区发育成多边形岩溶盆地。但总体上仍以渗入岩溶作用为主,为丘岭谷地地貌。

因此,在现代气候环境下,特殊的地质、水文地质结构差异是本区地貌及水系统区域分布的主要因素。也正是这个原因,导致典型岩溶地貌仅分布于局部区域,全区总体上仍以半岩溶形态——溶蚀丘陵为主。

参 考 文 献

1　何宇彬等著.中国喀斯特水研究.上海:同济大学出版社,1997.
2　翁金桃,王俊彪等著.天津市岩溶水的形成条件和运移规律.南宁:广西师范大学出版社,1992,66～71.
3　张永祥,董　英等.北方半干旱区不同岩溶系统的碳循环研究.中国岩溶,1997,16(4):25～31.

A Study on Modern Karstification Intensity of Typical Corrosional Hill System in South China

Zhang Cheng
(*Institute of Karst Geology*, *CAGS*, *Guilin*)

Abstract　The typical corrosional hill system is mainly distributed in Lianyuan-Xinhua County, around Xuefeng mountain area. There are four karst landform types, namely clustered-hill valley, ridged-hill valley, peak-cluster depression and gentle-hill valley, which have quite different karst development histories and complex features.

Based on the discussion of hydrochemical features of karst water in various geomorphological systems and its corrosion capacity, the author calculated the corrosion velocity by using hydrochemical equilibrium method and analysed varied causes of modern karstification intensity. The average corrosion velocity in corrosional hill is 25.19 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, ranging form 10.26 to 30.04 $m^3 \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$, which led the semi-karst formation to the prominent macro-geomorphologhical pattern in the study area.

Key words　corrosional hill　modern karstification intensity　macro-geomorphological differentiation

万方数据