

贵州施秉白云岩溶蚀特性及孔隙特征实验研究

刘 琦^{1, 2)}, 顾展飞^{1, 2)}, 卢耀如^{1, 2)}, 刘之葵³⁾

1) 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2) 教育部城市环境与可持续发展联合研究中心, 上海 200092;
3) 桂林理工大学土木与建筑工程学院, 广西桂林 541004

摘 要: 以贵州施秉白云岩为研究对象, 从宏观和微观角度分析白云岩的溶蚀特性及孔隙特征, 结果显示: (1) 在众多影响施秉喀斯特发育的因素中, 矿物成分是最基本的内因, 水是最关键的外因, 孔隙结构起辅助作用。(2) 极细晶白云岩的单位表面积溶蚀量一般大于细晶白云岩的, 在晶粒相同的情况下, 白云岩的溶蚀量与 CaO 和 MgO 的含量分别成正比, 且 MgO 的含量影响较 CaO 大。(3) 施秉白云岩溶蚀速率不仅受岩石矿物颗粒粒径大小的控制, 还受岩石内部孔隙结构特征的影响, 颗粒粒径越大, 孔隙度越高, 连通性越好, 越有利于水溶液进入, 溶蚀量也就越大。(4) 施秉白云岩的溶蚀特性是多种因素综合作用的结果, 必须把各个因素分离开来, 从宏观和微观角度逐个作详细的分析研究, 然后综合起来, 才能对喀斯特发育规律有更深入的了解。

关键词: 贵州施秉; 白云岩; 溶蚀实验; 压汞实验; 孔隙特征

中图分类号: P578.61; P512.12 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2015.04.04

The Experimental Study of Dolomite Dissolution and Pore Characteristics in Shibing, Guizhou

LIU Qi^{1, 2)}, GU Zhan-fei^{1, 2)}, LU Yao-ru^{1, 2)}, LIU Zhi-kui³⁾

1) Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;
2) Joint Research Center of Urban Environment and Sustainable Development, Ministry of Education, Shanghai 200092;
3) College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004

Abstract: With dolomite in Shibing of Guizhou Province as the study object, the authors analyzed its dissolution characteristics and pore characteristics macroscopically and microscopically. Some conclusions have been reached: (1) In many factors that influence the development of Shibing karst, the most fundamental factor is mineral composition, the most critical factor is water, and pore characteristics play a supporting role; (2) The dissolution amount on per unit surface area of superfine grain Shibing dolomite is generally greater than the amount of fine-grained dolomite rock sample. Under the same circumstances of grain dissolution principle, the dissolution amount of dolomite is in positive proportion with CaO and MgO content and the influence of MgO content is larger than that of CaO content. (3) The dissolution rate of Shibing dolomite is not only controlled by particle size of the mineral particles, but also by the internal pore structure characteristics of the rock. The larger the particle size, the higher the porosity, the better the connectivity, the more the beneficial solution seeps into pore, and the greater the amount of dissolution; (4) Dissolution of dolomite is the result of many factors, and all factors must be separated one by one to make a detailed analysis from the macroscopic and microscopic view. On such a basis, more information about the regularity of the karst development can be obtained through a comprehensive study.

Key words: Shibing in Guizhou; dolomite; dissolution experiment; mercury experiment; pore characteristics

本文由国家十二五科技支撑计划重大课题“喀斯特高原峡谷石漠化综合治理技术与示范”(编号: 2011BAC09B01)、国家自然科学基金资助项目(编号: 41302220; 41201565)、高等学校博士学科点专项科研基金(编号: 20120072120032)和广西自然科学基金创新研究团队项目(编号: 2012GXNSFGA060001)联合资助。

收稿日期: 2014-12-19; 改回日期: 2015-04-27。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 刘琦, 女, 1980 年生。副研究员。主要从事水文地质工程地质方面的教学和研究。通讯地址: 200092, 上海市杨浦区四平路 1239 号。E-mail: liuqi472@163.com。

世界上卓越的喀斯特地貌多是发育在石灰岩地区或白云质灰岩地区,在相对不可溶的白云岩地区,喀斯特发育程度总体比较微弱。而贵州施秉白云岩喀斯特却是一个特例,不仅孕育了茂密的森林植被,还发育了独特而壮观的脊状山峰与树枝状水系组合而成的白云岩峰丛峡谷喀斯特地貌。施秉白云岩例证了在特定的自然地理背景及构造基础上亦能发育典型、壮观的喀斯特地貌,是世界白云岩喀斯特地貌的杰出代表。目前,对于施秉白云岩喀斯特的研究,多是从地理学角度入手,如熊康宁等(2009)、李世奇等(2012)、李高聪等(2013)先后从气候、岩性纯度、地层构造特征、地貌演化历史、地貌演化规律,与石灰岩地貌差异等方面,对施秉喀斯特世界遗产地貌价值方面作过一些研究。但还没有学者对施秉白云岩进行溶蚀机理和喀斯特发育规律方面的研究,特别是溶蚀特性、岩性与孔隙结构特征之间关系作过相关的研究。

喀斯特的研究主要分为溶蚀机理理论研究和喀斯特探测方法研究两个方面,碳酸盐的溶蚀实验属于理论研究的一项重要内容。以往的学者对于碳酸盐的溶蚀特性做了大量的实验,并取得了较多成果。何宇彬等(1984)研究了碳酸盐岩岩体结构对比溶蚀度、比溶解度的影响。朱真(1999)通过对广西碳酸盐溶蚀实验研究,分析了岩性对比溶蚀度、比溶解度的影响因素。肖林萍等(2002)通过建立溶蚀作用的热力学模型方程,在实验室模拟研究碳酸盐岩溶蚀作用过程。结果表明白云岩的溶解速率随温压的升高而增大。黄思静等(1996)通过实验模拟研究石膏对白云岩溶解的影响,发现白云岩中石膏可加速白云石的溶解,随着温度和压力的升高,石膏对白云岩溶解的积极作用逐渐降低。黄尚瑜等(1987)研究表明白云岩有利溶蚀温度较石灰岩高,白云岩岩溶发育受高温影响较大。刘琦等(2010)曾研究不同时期、不同动水压力条件下,碳酸盐岩的渗透溶蚀变化过程。结果表明对于溶蚀速率有重要影响的是沿岩石内部孔隙的渗透溶蚀。翁金桃(1984, 1985)

在室内模拟了白云岩溶蚀过程,认为白云岩主要沿晶间孔隙或晶体结合面溶蚀。张良喜等(2012)通过白云岩室内溶蚀试验及微观溶蚀机理研究,表明在水化学作用下白云石晶体内部各类节理裂隙首先溶蚀。Dreybrodt 等(1996), Gautelier 等(1999), Kaufmann(2003), Arvidson 等(2003)在室内研究发现,碳酸盐岩的溶蚀速率与岩石矿物组成、结构特征、溶蚀试验介质的浓度、溶液反应温度以及 CO_2 分压等有着密切关系。

现有的研究多是从溶蚀速率的研究进行入手,基于碳酸盐所处的温度、湿度、pH 等原始环境,改进实验方法和装置等方面进行研究。而对岩石的孔隙特征及连通情况考虑较少,因而有必要从宏观和微观的角度分析岩石的溶蚀性与微观孔隙发育特征、孔隙连通情况的关系。本文以贵州施秉白云岩为研究对象,先分析其矿物成分和化学成分,然后进行溶蚀实验和压汞实验。根据岩石的物质成分和孔隙特征,探讨和分析白云岩的溶蚀特性跟孔隙特征之间的关系,以期为该地区独特地貌的成因提供理论依据。

施秉喀斯特位于贵州省东部施秉县北部,地处云贵高原东部边缘向湘西低山丘陵过渡的山原斜坡地带。地势北高南低,海拔 600~1250 m,属中亚热带季风湿润气候区,年均温 16°C ,年均降水 1220 mm,森林覆盖率 93.95%。施秉喀斯特发育的地层岩性主要是寒武系高台组灰色、质纯、致密的薄层细粒白云岩,岩石整体破碎。地下水主要为岩溶裂隙水,白云岩以溶孔和溶隙为主,含水性较均一,主要靠大气降水垂直分散渗入和外源水补给。该地区的主体景观是峡谷喀斯特,分布面积最大的地貌类型是峰丛峡谷。

1 实验样品的鉴定

在研究区内取岩样 8 组,岩样取回后做切片,先在光学显微镜下进行岩石矿物成分分析,得出岩石的岩性及名称。然后送实验室进行化学成分分析,

表 1 施秉地区岩样岩性及化学成分分析表
Table 1 Chemical composition and mineral structure characteristics of rock specimens

编号	岩性	CaO/%	MgO/%	CO ₂ /%	SiO ₂ /%	酸不溶物/%	烧失量/%
GSB-1	细晶白云岩	29.40	21.68	45.63	0.64	1.08	45.77
GSB-4	细晶白云岩	28.62	20.42	43.57	3.74	5.22	43.94
GHJ-1	细晶白云岩	32.11	19.22	44.81	0.70	1.38	45.49
GHJ-7	细晶白云岩	32.63	17.83	43.57	2.86	3.35	44.16
GSB-5	极细晶白云岩	29.39	20.94	44.62	1.92	3.24	44.71
GSB-6	极细晶白云岩	28.04	19.73	42.04	5.06	7.46	43.27
GSB-10	极细晶白云岩	33.53	16.02	42.99	3.45	5.01	43.21
GSB-11	极细晶白云岩	28.78	20.70	43.42	1.92	3.16	45.06

得出各化学成分的含量, 鉴定结果见表 1。

2 溶蚀实验

2.1 溶蚀实验设计

施秉白云岩以溶孔和溶隙为主, 含水性较均一, 主要靠大气降水和外源水补给。外源水是指从岩溶水文系统之外非碳酸盐地区的地表集中性的水流, 其具有以下两方面的特征: ①向岩溶水文系统输入大量物质和能量, 外源水水流集中、能量大, 还携带可溶物质和非可溶物质。②外源水侵蚀能力强, 水中还含有有机酸、无机酸, CO₂ 含量也高(郭纯青, 2007)。碳酸溶蚀在自然界分布十分普遍, 它发生在 CO₂-H₂O-CaCO₃-MgCO₃ 体系中。

为模拟外源水对白云岩的溶蚀特性, 采用室内静态溶蚀的实验方法。本实验排除碳酸中 CO₂ 易于挥发的影响, 以及硫酸中 SO₄²⁻ 的混合溶蚀效应, 并且为了加快反应速度, 采用了较稳定的盐酸进行溶蚀实验。将所取岩样制成 2 cm×1 cm×0.5 cm 的长方体, 然后进行溶蚀实验, 具体实验步骤如下:

①岩样用游标卡尺测量和蒸馏水冲洗后, 置于烘箱内烘干 12 小时, 在干燥器内冷却至室温, 称重, 记为 m₁;

②在干净的烧杯中加入 pH=2 的盐酸溶液 50 ml, 依次放入岩样;

③在室温条件下静置 48 小时后, 取出试样, 用蒸馏水洗净后烘干, 称重, 记为 m₂;

④m₁-m₂ 即为岩样的溶蚀量, 为消除岩样体积差异的影响, 本实验特求出单位面积的溶蚀量。

2.2 溶蚀实验结果及数据分析

由试验样品的矿物成分和化学成分分析可知, 实验所用样品的化学成分主要为 CaO、MgO 和 CO₂, 矿物成分主要为白云岩和方解石, 两者含量总和占样品矿物的 98% 以上。因此溶液中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 均应出自样品中方解石和白云石的溶解。具体化学反应如方程式(1)和(2)所示。

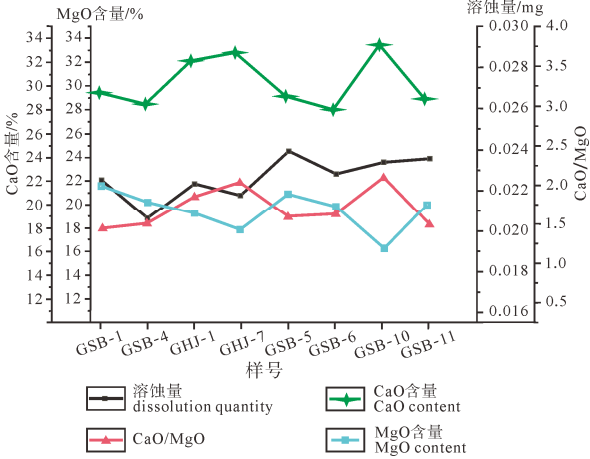
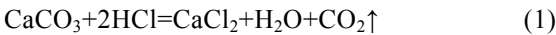
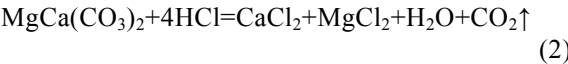


图 1 溶蚀量与 CaO 和 MgO 含量的关系
Fig. 1 The relationship between dissolution quantity and CaO and MgO content



实验后的溶液分别用 0.025N EDTA 溶液进行滴定, 测出溶液中 Ca²⁺ 和 Mg²⁺ 的浓度, 结果见表 2。

由表 2 知: 细晶白云岩岩样单位表面积溶蚀量的大小顺序为: GSB-1 > GHJ-1 > GHJ-7 > GSB-4; 极细晶白云岩岩样单位表面积溶蚀量的大小顺序为: GSB-5 > GSB-11 > GSB-10 > GSB-6。且极细晶白云岩的单位表面积溶蚀量普遍要大于细晶白云岩岩样单位表面积溶蚀量, 即白云岩岩样晶粒越细, 单位表面积溶蚀量越大。在晶粒相同的情况下, 白云岩的溶蚀量主要与 CaO 和 MgO 的含量成正比, 且 MgO 的含量影响较 CaO 大, 因为两者比值的走势跟单独时相反(见图 1)。

但也存在个别例外, 如极细晶白云岩中的 GSB-10 跟 CaO 和 MgO 的含量均不成比例关系, GSB-4 跟 MgO 的含量也出现偏差, 这就说明白云岩的溶蚀量不仅跟 CaO、MgO 的含量有关, 还有其他的影响因素。

根据表 2 知: 岩样的干密度大小顺序为: GSB-11 > GSB-5 > GSB-10。岩石的干密度, 除与矿物组成有关外, 还与岩石的孔隙性密切相关, 孔

表 2 施秉地区岩样溶蚀实验成果统计表
Table 2 Erosion quality of the sampling rocks in Shibing karst

编号	表面积/cm ²	体积/cm ³	干重(m ₁ /mg)	干密度/(g/cm ³)	单位表面积溶蚀量/mg	单位表面积溶蚀比
GSB-1	7.544	1.145	3.164	2.763	0.0226	0.1221
GSB-4	7.384	1.068	3.061	2.866	0.0206	0.1113
GHJ-1	7.787	1.203	3.404	2.830	0.0224	0.1210
GHJ-7	7.635	1.182	3.371	2.852	0.0217	0.1174
GSB-5	7.310	1.092	3.026	2.771	0.0240	0.1294
GSB-6	7.528	1.140	3.064	2.688	0.0228	0.1249
GSB-10	7.615	1.149	2.945	2.563	0.0234	0.1275
GSB-11	7.445	1.116	3.115	2.791	0.0236	0.1292

隙、裂隙越大,密度越小;反之,密度越大,孔隙、裂隙就应该越小。一般来说,孔隙越大,单位面积的溶蚀量就应该越大。以此说法,根据干密度确定的岩样单位表面积溶蚀量的大小顺序应为:细晶白云岩中 GSB-1 > GHJ-1 > GHJ-7 > GSB-4, 与实际情况相符。极细晶白云岩中 GSB-10 > GSB-5 > GSB-11, 此顺序与实际溶蚀量略有差异。

一般研究认为,岩样矿物颗粒越细,比表面积越大,单位面积的溶蚀量越大;孔隙越大,单位面积的溶蚀量也越大。韩宝平(1988)研究认为:白云岩的溶蚀速度与结晶颗粒的增大呈反比,泥晶结构白云岩的 Kv(比溶蚀度)、Kcv(比溶解度)值要大于结晶白云岩。何宇彬(1997)统计资料表明:从岩石微结构来看,随着晶粒的增大,溶蚀速度递减。朱真(1999)通过白云岩室内溶蚀实验得出:晶粒愈细,其比溶蚀度和比溶解度越大。本论文的大部分实验数据也符合该规律,但也存在个别特例。这是因为白云岩溶蚀速率不仅受岩石矿物颗粒粒径大小的控制,还受岩石内部孔隙结构特征的影响,颗粒粒径越大,孔隙度越高,连通性越好,越有利于岩溶水进入,溶蚀量也就越大。为验证溶蚀性与孔隙之间的关系,以及孔隙类型和孔隙连通情况,特对以上岩样进行了压汞实验。

3 压汞实验及孔隙特征分析

实验利用美国麦克仪器公司生产的全自动型压汞仪,最大压力 228 MPa,孔径分析范围 5.5~360 μm。试验结果见表 3。

门槛压力是孔隙系统中最大连通孔隙相对应的毛管压力,主要反映岩石的孔隙结构特征,同时也反映岩石的渗透能力。门槛压力越小,表明连通孔隙半径越大,孔隙连通性越好,岩石孔隙的集中程度越高。以此说法,细晶白云岩岩样单位表面积溶蚀量的大小顺序应为 GSB-4 > GHJ-1 > GHJ-7 > GSB-1, 该顺序与实际情况不符;极细晶白云岩岩样单位表面积溶蚀量的大小顺序应为 GSB-11 > GSB-5 > GSB-6 > GSB-10, 该顺序与实际情况也不

符。但由于除 GSB-10 号岩样外,其他岩样门槛压力数值相差不是太大,故可认为孔隙结构特征及孔隙连通虽对白云岩溶蚀有一定影响,但不是主要因素。GSB-10 号岩样门槛压力远大于其他岩样,导致其孔隙特征的影响占据了主要地位,这也就解释了该岩样为什么会出现特殊情况(图 2)。而 GSB-4 号岩样由于 SiO₂ 和酸不溶物的含量较其他岩样大,虽然不是太明显,但也出现了特殊情况。

4 讨论

喀斯特发育首先需要一定的物质基础,其次则与环境,如地质、气候、水文、生态等有密切的关系(卢耀如, 1986; 袁道先等, 1994)。碳酸盐岩在喀斯特发育中所显示的差异性主要取决于其化学成分 CaO 和 MgO 的含量比,酸不溶物超过 20%才会对溶蚀量有明显影响(聂跃平, 1994)。大量的实验分析表明,白云岩的溶蚀主要受岩石的化学成分、岩石和矿物的结构、不同矿物成分的配比关系、渗流条件等多种因素共同控制。某一地区的喀斯特地貌及喀斯特发育程度是多种因素综合作用的结果(任美镔, 1982)。

施秉白云岩表面孔隙较多,多具有层理构造,易在表面形成溶蚀膜和溶蚀孔隙,晶间溶孔分布密

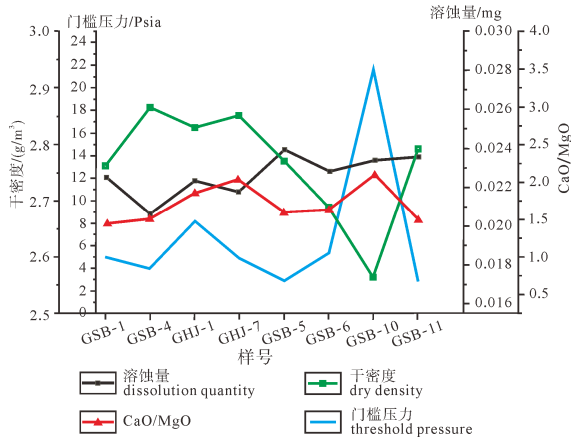


图 2 溶蚀量跟干密度和门槛压力的关系
Fig. 2 The relationship of dissolution quantity to the dry density and threshold pressure

表 3 施秉地区岩样压汞实验成果统计表
Table 3 Mercury experiment of the sampling rocks in Shibing karst

编号	总进汞量/(ml/g)	总孔面积/(m ² /g)	平均孔径/mm	骨架密度/(g/ml)	孔隙率/%	门槛压力/Psia
GSB-1	0.0053	0.167	127.4	2.3320	1.2218	4.99
GSB-4	0.0073	0.117	249.2	2.3236	1.6637	3.98
GHJ-1	0.0049	0.104	189.3	2.3239	1.1337	8.24
GHJ-7	0.0147	0.535	109.7	2.3275	3.3050	4.87
GSB-5	0.0015	0.011	540.7	3.3206	0.3420	2.91
GSB-6	0.0135	1.471	36.6	2.3303	3.0412	5.36
GSB-10	0.0424	0.326	520.2	2.2986	8.8859	21.89
GSB-11	0.0066	0.325	80.9	2.3192	1.4997	2.88

集均匀。属于微孔隙、小孔隙多喉道溶孔型白云岩,同时粒间胶结较差,属于中等风化-强风化的较软岩。白云岩岩体节理裂隙发育,其风化过程主要以物理崩解为主,物理崩解提供的岩石碎块易于发生化学溶蚀和机械破坏,更有利于化学风化的进行,再加上白云岩中晶间孔隙均匀,在地下水的渗流和化学作用下有利于整体化学溶蚀作用的进行。另外,白云岩的表面粗糙,与溶液的接触面积大,使溶蚀更容易进行,这也是MgO的影响较大的原因。

白云岩主要由菱形或不规则粒状白云石($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)构成,一个CaO、MgO对应一个 CO_2 ,其中MgO(MgCO_3)含量越高,白云岩越纯。许多专家和学者研究都发现石灰岩(CaCO_3)的溶蚀能力比白云岩强(翁金桃, 1984; 何宇彬, 1997; 王尚彦, 2009),也即是CaO的含量越高,碳酸盐岩的溶蚀能力就应该越强。本文中施秉白云岩与酸反应时, CaCO_3 和 MgCO_3 是同时进行的,虽然氧化钙先反应(因为钙比镁活性强,钙的金属性强),但最终二者都会反应,实际溶蚀量是二者反应之和。

在研究过程中发现施秉白云岩溶蚀与其他地方的碳酸盐岩类溶蚀实验虽有一定的相似性,但也存在差异性。这是因为施秉白云岩的溶蚀特性是多种因素综合作用的结果,不仅跟矿物成分有关,还跟孔隙特征,外部条件等有关。在分析原因时,我们必须把各个因素分离开来,从宏观和微观角度逐个作详细的分析研究,分别得出结论,然后综合起来,才能对该地区的岩溶发育规律有更深入的认识。

5 结论

(1)在众多影响施秉喀斯特发育的因素中,矿物成分是最基本的内因,水是最关键的外因,孔隙结构起辅助作用,各种因素综合作用。

(2)极细晶施秉白云岩的单位表面积溶蚀量一般大于细晶白云岩单位表面积溶蚀量,即白云岩岩样晶粒越细,单位表面积溶蚀量越大。在晶粒相同的情况下,白云岩的溶蚀量主要与CaO和MgO的含量成正比,且MgO的含量影响较CaO大。

(3)施秉白云岩溶蚀速率不仅受岩石矿物颗粒粒径大小的控制,还受岩石内部孔隙结构特征的影响,颗粒粒径越大,孔隙度越高,连通性越好,越有利于水溶液进入,溶蚀量也就越大。

(4)施秉白云岩的溶蚀特性是多种因素综合作用的结果,必须把各个因素分离开来,从宏观和微观角度逐个作详细的分析研究,然后综合起来,才能对岩溶发育规律有更深入的认识。

参考文献:

郭纯青. 2007. 中国岩溶生态水文学[M]. 北京: 地质出版社:

- 107.
- 韩宝平. 1988. 任丘油田碳酸盐岩溶蚀实验研究[J]. 中国岩溶, 7(1): 81-88.
- 何宇彬, 金玉璋, 李康. 1984. 碳酸盐岩溶蚀机理研究[J]. 中国岩溶, 2: 12-18.
- 何宇彬. 1997. 中国喀斯特水研究[M]. 上海: 同济大学出版社: 55-56.
- 黄尚瑜, 宋焕荣. 1987. 碳酸盐岩的溶蚀与环境温度[J]. 中国岩溶: 6(4): 287-295.
- 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 黄月明, 刘桂霞, 肖林萍. 1996. 石膏对白云岩溶解影响的实验模拟研究[J]. 沉积学报, 14(1): 103-109.
- 李世奇, 熊康宁, 苏孝良, 罗井升, 张乾柱. 2012. 世界自然遗产提名地施秉喀斯特地貌及其演化[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 30(3): 12-17.
- 李高聪, 熊康宁, 肖时, 周明忠. 2013. 施秉喀斯特地貌世界遗产价值研究[J]. 热带地理, 33(5): 562-569.
- 刘琦, 卢耀如, 张凤娥, 熊康宁. 2010. 动水压力作用下碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. 岩土力学, 31(增刊 1): 96-100.
- 卢耀如. 1986. 中国喀斯特地貌的演化模式[J]. 地理研究, 5(4): 25-35.
- 聂跃平. 1994. 碳酸盐岩性因素控制下喀斯特发育特征——以黔中南为例[J]. 中国岩溶, 13(1): 31-36.
- 任美镔. 1982. 中国岩溶发育规律初步研究[C]//中国地质学会第二届岩溶学术会议论文选集. 北京: 科学出版社: 1-4.
- 王尚彦. 2009. 白云岩和石灰岩山区石漠化速度差异原因分析[J]. 贵州地质, 26(1): 49-51.
- 翁金桃. 1984. 方解石和白云石的差异溶蚀作用[J]. 中国岩溶, (1): 29-37.
- 翁金桃. 1985. 桂林碳酸盐岩与岩溶发育的关系[J]. 中国科学(B) 辑, (8): 741-749.
- 熊康宁, 刘子琦, 陈品冬. 2009. 施秉喀斯特发育的世界自然遗产价值全球对比分析[C]//全国第十五届洞穴学术会议论文集. 广西: 中国地质科学院岩溶地质研究所: 282-300.
- 肖林萍, 黄思静. 2002. 碳酸盐岩溶蚀实验热力学模型及工程地质意义[J]. 西南交通大学学报, 37(3): 250-251.
- 袁道先, 朱德浩, 翁金桃, 朱学稳, 韩行瑞, 汪训一, 蔡桂鸿, 朱远峰, 崔光中, 邓自强. 1994. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社: 9-10.
- 张良喜, 赵其华, 胡相波, 韩刚, 赵幸. 2012. 某地区白云岩室内溶蚀试验及微观溶蚀机理研究[J]. 工程地质学报, 20(4): 576-584.
- 朱真. 1999. 影响碳酸盐岩比溶蚀度、比溶解度因素探讨[J]. 广西地质, 10(3): 37-44.

References:

- ARVIDSON R S, ERTAN I E, AMONETTE J E, ETAL, LUTTGE A. 2003. Variation in calcite dissolution rates: a fundamental problem?[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(9):

- 1623-1634.
- DREYBRODT W, LAUCKNER J, LIU Zai-hua, SVENSSON U, BUHMANN D. 1996. The kinetics of the reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} - \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the rate limiting steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$ [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 18: 3375-3381.
- GUO Chun-qing. 2007. China Karst ecohydrology[M]. Beijing: Geological Publishing House: 107(in Chinese).
- HAN Bao-ping. 1988. Study on the simulation of carbonate rock's corrosion in Renqiu oilfield[J]. *Carsologica Sinica*, 7(1): 81-88(in Chinese with English abstract).
- HE Yu-bin, JIN Yu-zhang, LI Kang. 1984. An experimental study of carbonate rock corrosion mechanism[J]. *Carsologica Sinica*, 2: 12-18(in Chinese with English abstract).
- HE Yu-bin. 1997. Study of karstic-water of china[M]. Shanghai: Tongji University Publishing House: 55-56(in Chinese).
- HUANG Shang-yu, SONG huan-rong. 1987. The corrosion of carbonates and environment temperature[J]. *Carsologica Sinica*, 6(4): 287-295(in Chinese with English abstract).
- HUANG Si-jing, YANG Jun-jie, ZHANG Wen-zheng, HUANG Yue-ming, LIU gui-xia, XIAO Lin-ping. 1996. Effects of Gypsum (or Anhydrite) on Dissolution of Dolomite under Different Temperatures and Pressures of Epigenesis and Burial Diagenesis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 14(1): 103-109(in Chinese with English abstract).
- KAUFMANN G, DREYBRODT W. 2003. Calcite dissolution kinetics in the system $\text{CaCO}_3-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ at high undersaturation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 1398-1410.
- LI Shi-qi, XIONG Kang-ning, SU Xiao-liang, LUO Jing-sheng, ZHANG Qian-zhu. 2012. Geomorphic evolution of Shibing karst—The world natural heritage nomination site[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 30(3): 12-17(in Chinese with English abstract).
- LI Gao-cong, XIONG Kang-ning, XIAO Shi-zhen, ZHOU Ming-zhong. 2013. Research on World Heritage Geomorphologic Value of the Shibing Karst[J]. *Tropical Geography*, 33(5): 562-569(in Chinese with English abstract).
- LIU Qi, LU Yao-ru, ZHANG Feng-e, XIONG kang-ning. 2010. Study of simulation experiment for carbonate rocks dissolution under hydrodynamic pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 31(Supp. 1): 96-100(in Chinese with English abstract).
- LU Yao-ru. 1986. Models of karst geomorphological evolutions in china[J]. *Geographical Research*, 5(4): 25-35(in Chinese with English abstract).
- GAUTELIER M, OELKERS E H, SCHOTT J. 1999. An experimental study of dolomite dissolution rates as a function of pH from -0.5 to 5 and temperature from 25 to 80°C[J]. *Chemical Geology*, 157: 13-26.
- NIE Yue-ping. 1994. Karst development characteristics under the lithologic control of carbonate rocks—A case study in south-central GuiZhou[J]. *Carsologica Sinica*, 13(1): 31-36(in Chinese with English abstract).
- REN Mei-e. 1982. A preliminary study on China karst development law[C]//The geological society of chinese second karst academic conference papers collection. Beijing: Science Publishing House: 1-4(in Chinese).
- WANG Shang-yan. 2009. Analyses on the reason of rocky desertification speed difference of dolomite and limestone in mountain area[J]. *Guizhou Geology*, 26(1): 49-51(in Chinese with English abstract).
- WENG Jin-tao. 1984. The differential corrosion of calcites and dolomites[J]. *Carsologica Sinica*, (1): 29-37(in Chinese with English abstract).
- WENG Jin-tao. 1985. The relationship between carbonate rock and karst development in Guilin[J]. *China Science (B) Series*, (8): 741-749(in Chinese).
- XIONG Kang-ning, LIU Zi-qi, CHEN Pin-dong. 2009. An universal comparison on karst development of the Shibing for the World Natural Heritage value[C]//The Fifteenth National Symposium on the Cave. Guangxi: Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geology Sciences: 282-300(in Chinese with English abstract).
- XIAO Lin-ping, HUANG Si-jing. 2002. A Thermodynamic Dissolution Model of Carbonate Rocks and Its Engineering Geological Significance[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 37(3): 250-251(in Chinese with English abstract).
- YUAN Dao-xian, ZHU De-hao, WENG Jin-tao, ZHU Xue-wen, HAN Xing-rui, WANG Xun-yi, CAI Gui-hong, ZHU Yuan-feng, CUI Guang-zhong, DENG Zi-qiang. 1994. Karst of China[M]. Beijing: Geological Publishing House: 9-10(in Chinese).
- ZHANG Liang-xi, ZHAO Qi-hua, HU Xiang-bo, HAN Gang, Zhao-xing. 2012. Laboratory dissolution test on dolomite and its micro-dissolution mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 20(4): 576-584(in Chinese with English abstract).
- ZHU Zhen. 1999. Discussion on influencing factors upon specific corrodibility and specific solubility of carbonate rock[J]. *Guangxi Geology*, 10(3): 37-44(in Chinese with English abstract).