

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202003054

可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述

郭静芸^{1,2,3}, 毕鑫涛^{1,4}, 方然可^{1,5}, 李守定^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; 2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029;
3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 中国地质大学(北京)工程技术学院土木
工程系, 北京 100083; 5. 华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 可溶岩中存在大量的溶洞、溶隙、溶孔、管道等溶蚀现象, 易造成山体崩滑、地面塌陷、洪涝等灾害, 因此研究可溶岩的化学溶蚀速率可以预测岩溶的发展趋势, 为岩溶地质灾害早期识别与安全评价提供保障。文章在大量文献调研的基础上, 综合分析国内外学者围绕可溶岩化学溶蚀试验方法取得的成果, 得到以下认识: (1) 可溶岩化学溶蚀试验方法不断成熟和完善, 研究深度和应用范围逐步拓展。(2) 可溶岩化学溶蚀的测定方法很多, 根据试验开展的条件主要分为室内溶蚀试验和野外溶蚀试验, 其中标准溶蚀试片法以其操作简单被广泛采用。(3) 现有的可溶岩化学溶蚀测定方法的原理及适用性不同, 需要综合运用多种试验手段得出相对可靠的试验结果。根据这一科学问题的研究现状, 下一步应着重开展大尺寸可溶岩室内溶蚀试验研究, 建立模型试验系统真实模拟野外可溶岩的溶蚀过程, 并加强从微观角度刻画可溶岩的溶蚀过程。另外需要综合运用多种野外试验方法开展研究, 避免或降低单一试验方法可能带来的较大误差, 建立野外溶蚀试验和室内溶蚀试验的关联, 以期通过室内短期的试验研究推测野外长时间尺度下的溶蚀状态。

关键词: 可溶岩; 溶蚀试片; 水化学径流法; 灰岩基座; 微侵蚀计

中图分类号: P642.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)04-0024-11

Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks

GUO Jingyun^{1,2,3}, BI Xintao^{1,4}, FANG Ranke^{1,5}, LI Shouding^{1,2,3}

(1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Department of Civil Engineering, School of Engineering and Technology, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 5. School of Resources and Environment, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

Abstract: A large number of people live in areas with soluble rocks in China. Due to the existence of caves, fissures, holes, pipes and other erosion phenomena in soluble rocks, geological disasters such as mountain landslides and collapse, ground collapse, floods, etc., are often induced in the soluble rocks. It is important to study the chemical dissolution rate of soluble rocks to predict the development of karst and to guarantee the early identification and safety evaluation of karst geological disasters. Based on a large number of literature surveys, this paper comprehensively analyzes chemical dissolution methods obtained by scholars at home and abroad. (1) Chemical dissolution methods of soluble rocks are constantly maturing and improving, and the

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-05-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504800); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-422; ZDBS-LY-DQC003; XDA14040401; YJKYYQ20190043); 第二次青藏高原科考项目(2019QZKK0904)

第一作者: 郭静芸(1987-), 女, 博士, 工程师, 主要从事工程地质与岩石力学研究。E-mail: jingyunguo@mail.iggcas.ac.cn

通讯作者: 李守定(1979-), 男, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事工程地质力学研究。E-mail: lsdlyh@mail.iggcas.ac.cn

depth of research and the scope of application are continuously expanding. (2) There are various methods to study rock dissolution, which are mainly divided into indoor dissolution tests and field dissolution tests. Among them, the standard dissolution test strip method is widely used. (3) The principles and applicability of existing methods are different. It is necessary to use multiple test methods to gain relatively reliable test results. According to the research status of this scientific issue, the next step will focus on large-scale dissolution indoor test, establish model test systems to truly simulate the dissolution process of the soluble rock and further describe the dissolution process of soluble rocks in microscopic perspective. In addition, it is necessary to comprehensively use a variety of field test methods to carry out research to avoid or reduce the large errors that may be caused by a single test method, and establish correlations between field dissolution tests and indoor corrosion tests, so as to inferring results of large time scale tests in field through short-term indoor tests.

Keywords: soluble rocks; dissolution test strip; hydrochemical runoff method; limestone pedestals; micro erosion meter

水对可溶岩进行化学溶蚀,不断扩大岩石中的孔隙,形成溶隙、管道,而携带泥沙的急速水流不断冲蚀拓宽管道形成洞穴,部分管道和洞穴因为冲蚀作用而导致崩塌,有时直达地表。上述一系列地质作用及其所产生的现象统称为岩溶^[1]。岩溶在世界范围内广泛分布,大面积的无冰区存在碳酸盐岩发育的岩溶地貌,全球 20% ~ 25% 的人生活在碳酸盐岩地区。我国西南岩溶山区裸露型岩溶面积达 $6.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。而且由于中国岩溶发育完好、类型多样,从而成为国际研究的范例^[1-4]。

国内外的科学家针对岩溶问题展开了大量的研究。在岩溶学基本理论的指导下,学者们通过国际合作对可溶岩地区的地面塌陷、洪涝灾害、山体崩滑等地质灾害进行了系统研究^[5-11],研究群体在可溶岩化学溶蚀对岩溶地质灾害形成方面获得了大量的新认识,得出了化学溶蚀对岩溶地质灾害发生的重要作用。大量学者在全球不同的国家和地区对可溶岩进行了详细的调查,取得了数以万计的可溶岩样品,在对样品成分详细研究的基础上,采用不同的室内外溶蚀试验方法估算了可溶岩的溶蚀速率。这些试验方法涉及 CO_2 溶液流动法^[12]、旋转碟片法^[13]、标准溶蚀试片法^[14-15]、水化学径流法^[12,16]、微侵蚀计法以及灰岩基座法等^[12,17-19]。由于每个试验方法的原理和适用条件均不同,针对同一种可溶岩,不同的试验方法得出的结果也有差异。而大多学者均采用单一的试验方法进行研究,那么难免由于试验方法本身的缺陷而造成试验结果的不准确。可溶岩化学溶蚀是地质条件、气候条件、水文条件、生物条件综合作用的过程。针对可溶岩化学溶蚀发生的四个基本条件,学者们研究了岩性^[20-21]、构造^[22]、温度^[22]、气候^[23-25]、植被^[26]、微生

物^[26]等对溶蚀过程和溶蚀结果的影响。这对指导今后可溶岩化学溶蚀试验的实施提供了条件。另外更多的学者分别从不同角度对岩溶展开了研究,极大地丰富了全球研究的内容^[27-30]。

纵观以上针对岩溶问题进行的大量研究,可见岩溶作用是以化学溶蚀为主的过程。前人采用一系列方法对岩溶的溶蚀进行了定量计算和定性评价。本文在此基础上,对可溶岩化学溶蚀的试验方法进行总结和展望,这将有助于更好地理解岩溶区地貌演化的过程,在一定程度上确定岩溶发育的年代,并且对预测岩溶的未来发展趋势具有重要的意义。

1 可溶岩化学溶蚀过程和机理

可溶岩包含碳酸盐岩、硫酸盐岩和卤化物岩类,其中碳酸盐岩在世界范围内分布最多、最广。碳酸盐岩主要包含石灰岩、白云质灰岩、白云岩以及其间的过渡性岩石。可溶岩的化学溶蚀过程和岩溶作用过程是密不可分的。为了深度了解可溶岩的化学溶蚀过程,很有必要对岩溶的作用过程有个清楚的认识。研究表明^[4]:岩溶作用过程主要分为三个阶段:(1)以化学溶蚀作用为主的初始阶段,这一阶段侵蚀性的水沿着可溶性岩石的初始孔隙、裂隙流动;(2)通过溶蚀作用,并在水流的机械冲蚀的协助下,水流通道不断扩展,从而形成溶隙-管道;(3)在水流的机械侵蚀、崩塌、坍塌等物理作用下,形成高度管道化-通道化。纵观岩溶发展的全过程,化学溶蚀作用是岩溶的起因,并且贯穿在岩溶发展的整个过程中。

碳酸盐岩溶蚀的本质就是溶于水的 CO_2 在水的参与下与难溶于水的 CaCO_3 电离出的微量 Ca^{2+} 反应生成易溶于水的 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$,促使反应正向进行。当

然溶液中还会发生 H_2O 和 CaCO_3 自身的电离,但电离量较为微弱。流水相对静止的地方,受溶蚀的碳酸盐岩量相对较少就可以使反应达到平衡, CaCO_3 溶蚀与析出速率相等,表观上表现为溶蚀停止。在水分蒸发、 CO_2 逸出或者温度等外界条件发生变化时,反应还可能逆向移动,析出 CaCO_3 。一般情况下,随着流水的冲蚀,生成的 Ca^{2+} 和 HCO_3^- 不断被带走,造成局部水流中的生成物浓度减小,使反应正向移动, CO_2 和 CaCO_3 进一步溶解,即可溶性岩石如碳酸盐岩的化学溶蚀过程在分子学角度体现为 CaCO_3 的溶解过程(图 1)。

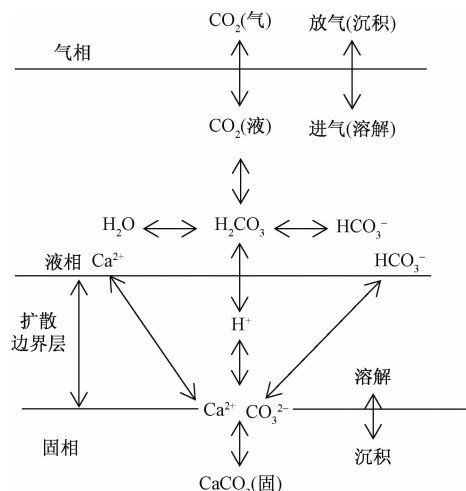


图 1 碳酸盐岩的化学溶蚀过程^[4]

Fig. 1 Chemical dissolution process of carbonate rocks^[4]

2 可溶岩溶蚀测定试验方法

通过测定可溶岩溶蚀量和溶蚀速率可以获得当前气候条件下可溶岩的溶解情况。可以比较不同条件下的侵蚀速率,更好地理解岩溶地貌的发展演化过程。Weyl^[31]于 1985 年发现方解石的溶解速率与 CO_2 水溶液的喷淋速率有关。Nancollas 等^[32]使用方解石对碳酸盐岩的溶解与沉淀的过程进行了系统研究。Berner 等^[33]对富含 CaCO_3 的深海沉积物进行溶解动力学实验,探索了溶解反应中 CaCO_3 表面反应机理。Plummer 等^[34]研究了在一定条件下方解石在饱和 CO_2 水溶液中表面溶解的现象和规律。Plummer 等^[35]总结了碳酸盐岩溶解的动力学原理,对碳酸盐岩的溶解原理有了更深的认识,得出了闻名的 PWP 方程。Ford^[12]研究了外源水补给量与碳酸盐岩溶蚀量之间的关系。何宇彬等^[22]探究了温度对碳酸盐岩溶蚀的影响。王洪涛等^[36]通过碳酸盐岩模拟实验,为碳酸盐岩的溶蚀定量研究提供了一个新思路。刘再华等^[37]

研究了不同 CO_2 分压下白云石的溶解速率及其溶解机理。闫志为等^[38]对方解石、白云石分别在无 CO_2 和大气 CO_2 条件下 NaCl 、 KCl 、 CaCl_2 和 MgCl_2 溶液中的溶解度进行了模拟计算。邵东梅^[39]通过对室内碳酸盐岩的溶蚀实验,发现了在地下水的补给区和排泄区,温度对溶蚀速度的影响相对较小。另外邵东梅^[40]也研究了在不同流速下温度对碳酸盐岩的溶蚀速率的影响。徐飞高等^[41]、陈卫昌等^[42]通过分析酸雨淋蚀对碳酸盐岩的溶蚀作用,研究了其对力学性质和形态变化的影响。苏悦^[43]通过在野外对外源水与岩溶水对碳酸盐岩溶蚀速率的研究,揭示了外源水对碳酸盐岩溶蚀的促进作用大大高于岩溶水。陈晓鹏等^[21]通过纯净水模拟降雨冲刷桂林鲕粒灰岩试块,测试了试块在淋雨中的表面形态变化、质量损失、弹性波传播速度变化,分析了在淋雨中碳酸盐岩的表面与内部溶蚀变化。

通过梳理国内外的研究成果,总结出测定可溶岩溶蚀的试验方法主要分为室内溶蚀试验和室外溶蚀试验。

2.1 室内溶蚀试验方法

国内外科学家对方解石和冰洲石等可溶岩进行了大量室内溶蚀试验研究。前面论述中提到,岩溶形成的因素需要可溶岩,以及有侵蚀性的流动的水,也就是说溶液和岩石需要处于动力变化的环境中。以往大部分的研究采用的是 CO_2 溶液流动法。该方法是指将碳酸盐岩置于流动的 CO_2 水溶液中,通过测定溶液出口 Ca^{2+} 的浓度计算溶蚀量。实验中可以根据试验需要设定不同的 CO_2 浓度,实验装置基本如图 2 所示。试验装置大都由水气混合装置和溶蚀装置两部分组成。水气混合装置是将压缩的 CO_2 气瓶与纯水的装置连接,通过 CO_2 和水的混合产生碳酸水溶液,并且该装置通常还连有气泵、恒温水浴等装置促进其溶解,同时 pH 计可以监测溶液的 pH 值。溶蚀装置通常由恒温水浴装置和反应室组成。碳酸水溶液流入到反应室并被均分淋滤在各个样品上。为了加速溶蚀的进行,可以同时让岩样进行旋转,即旋转碟片法,使岩盘在酸性溶液中旋转,旋转可以加速可溶岩的溶解,同样通过测定溶液出口的 Ca^{2+} 的浓度计算溶蚀量。

经过大量的室内溶蚀试验研究,取得了以下重要认识:(1)岩性不同,溶蚀速率差异很大,例如白云岩的溶解速率低于灰岩的溶解速率,这和岩石的孔隙度、渗透率、力学强度、化学性质和所含矿物关系密切。(2) CO_2 分压越高,在水中 HCO_3^- 达到饱和之前, CO_2 与水结合后就可电离出更多的 H^+ ,从而导致碳酸盐

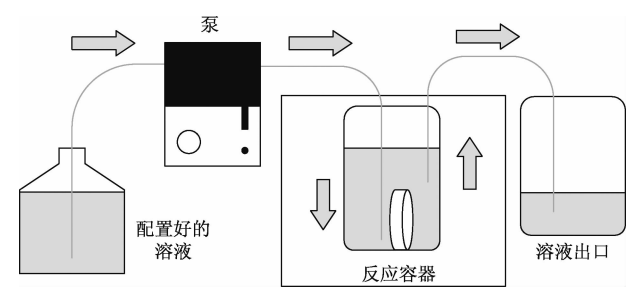


图 2 直接溶蚀试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of the direct dissolution test

岩的溶蚀量增加。(3)溶液的流速越快或者试样的旋转速度越快,溶质的弥散迁移越显著,即水岩界面处密集离子层和局部饱和层被水流携带冲走,从而使得溶质的局部浓度被冲淡,从而促进溶蚀反应的正向进行。(4)不同的酸溶液,例如草酸、盐酸、硫酸等对可溶岩的溶蚀作用都是通过 H^+ 来起作用。一般情况下,水溶液的 pH 越小,可溶岩的溶解度越大。表 1 显示,pH 升高, Ca^{2+} 浓度和饱和 CaCO_3 浓度降低,即溶解度降低。(5)在 CO_2 分压相同的情况下,温度越低,水中溶解的 CO_2 浓度越高,从而导致可溶岩的溶解度增大;温度相同的条件下, CO_2 分压越高,水中溶解 CO_2 越多,溶解度则越高,如图 3 所示。

表 1 pH 和饱和 CaCO_3 浓度关系 (据文献[1]修改)
Table 1 Relationship between pH and saturated CaCO_3
(modified by reference[1])

pH	饱和 CaCO_3 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	饱和 Ca^{2+} 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
6.48	577.3	231.2
6.58	528.2	211.5
6.62	422.1	177.0
6.71	410.1	164.2
6.80	406.4	162.7
6.82	370.8	148.5
6.87	342.8	137.3
6.92	316.2	126.6
7.18	241.5	96.7
7.27	212.9	85.2
7.83	92.9	37.2
7.95	76.9	30.8
8.27	52.2	20.9

2.2 室外溶蚀试验方法

可溶岩室外溶蚀试验可以在不同时间尺度下,获得降水量、气候、植被、地下水位、酸碱度等环境因子对溶蚀的影响。在真实的水-岩-气相互作用下,得到可溶岩溶蚀的空间分布和速率。

2.2.1 水化学径流法

水化学径流法的原理是通过测量流域出口(如泉

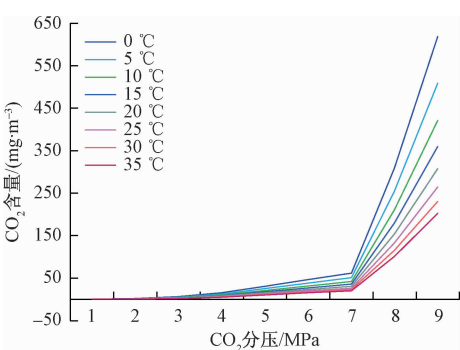


图 3 不同温度和 CO_2 分压条件下水中 CO_2 含量

(据文献[1]修改)

Fig.3 CO_2 content in water under different temperatures and partial pressures (modified by reference[1])

口或地下河出口)的流量(Q)及水中所携带的溶质量(浓度 T),计算岩溶流域的总溶出量:

$$X = Q \cdot T \tag{1}$$

即从径流中所含溶质浓度测算一个区域的总溶出量,进而间接推算该区域的平均溶蚀强度^[44]。

水化学径流法最早由 Corbel 于 1959 年提出,即著名的 Corbel 公式^[45-47]:

$$X = \frac{4ET}{100} \tag{2}$$

式中: X ——碳酸盐岩的溶解速率值/($\text{mm}\cdot\text{ka}^{-1}$);
 E ——径流量/dm;
 T ——水中碳酸钙的平均含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

后人针对 Corbel 公式的缺陷,进行了一些修正,但是进步很小。例如,Williams^[48]指出 Corbel 公式有一定的局限性,因为它假定所有碳酸盐岩的密度都是 2.5 g/cm^3 ,但是纯石灰岩的密度是 2.72 g/cm^3 ,而且此公式只计入了碳酸钙的含量,而忽视了其他碳酸盐的存在。鉴于此,Williams 对 Corbel 公式进行了修正,在修正的公式(3)中将分别计算碳酸钙和碳酸镁的含量,而且灰岩和白云岩的密度计入确切数值。

$$X = \frac{E(Tc + Tm)}{10S} \tag{3}$$

式中: X ——碳酸盐岩的溶解速率值/($\text{mm}\cdot\text{ka}^{-1}$);
 E ——径流量/dm;
 Tc ——水中碳酸钙的平均含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);
 Tm ——水中碳酸镁的平均含量/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$);
 S ——石灰石或者白云石的密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)。

如果流域仅有 $1/n$ 被可溶岩覆盖,那么式(3)则变为:

$$X = \frac{E(Tc + Tm) \cdot n}{10S} \tag{4}$$

式(3)和式(4)虽然在 Corbel 公式的基础上做了修订,但本质上没有改变。

曾成等^[49]以改进的公式(5)对陈旗岩溶泉的碳汇强度进行了计算。

$$CSF = 0.5 \times Q \times [\text{HCO}_3^-] \times \frac{M_{\text{CO}_2}}{A} = 0.5 \times M \times [\text{HCO}_3^-] \times M_{\text{CO}_2} \quad (5)$$

式中: CSF ——碳酸盐岩岩溶作用碳汇强度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);

Q ——岩溶水系统径流排泄量/($\text{L} \cdot \text{a}^{-1}$);

$[\text{HCO}_3^-]$ ——排泄岩溶水中的摩尔浓度/($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$);

M_{CO_2} —— CO_2 的分子量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$);

A ——岩溶水系统的汇水面积/ m^2 ;

M ——岩溶水系统的径流模数/($\text{m} \cdot \text{ka}^{-1}$)。

由以上研究可见,水化学径流法只能用于碳酸盐岩的溶蚀研究。要计算某地区碳酸盐岩的溶蚀速率,必须准确得知该地区的流域面积、径流的流量和径流水中的 CaCO_3 或者 MgCO_3 含量。然而对于岩溶发育的地区,流域面积和径流流量需要进行大量且重复的观测与试验才能得到尽可能精确的数值。对于水中 CaCO_3 或 MgCO_3 的含量来说,其值并不是一成不变的,在同一地方随时间会有一些的变化;在同一时间不同的地方其含量也不会完全相同,因此要得到尽量精确的径流水中的 CaCO_3 或 MgCO_3 含量,需要的时间跨度相对较长,需要大量人力物力监测,或者使用相关的自动监测仪器。自动化设备目前可以得到瞬时溶质浓度和流量数据,因此溶质的年变化量可以通过归纳一个自然年的数据得出,但是为了降低潜在的误差,需要监测整个自然流域的数据。

由于水化学径流法计算出的是碳酸盐岩溶蚀量的估算值,而不是实际的溶蚀量,同时由于地下与地表集水区域不完全一致,公式中各参数难以准确确定。故水化学径流法只能反映溶蚀的总体趋势,也有异常数据存在的可能性。

2.2.2 标准溶蚀试片法

标准溶蚀试片法由 Gams^[14]于 1959 年首先提出,然后由袁道先等在 20 世纪 80 年代末引入国内。标准溶蚀试片法是指通过测定标准尺寸和标准岩性的溶蚀试片在野外放置一定时间之后的重量损失来评估灰岩的剥蚀速率:

$$ER = \frac{(W_1 - W_2) \cdot T}{365 \cdot S} \quad (6)$$

式中: ER ——试片每年单位面积溶蚀量/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);

W_1 ——试片初始质量/ mg ;

W_2 ——试片取回后烘干质量/ mg ;

T ——埋放时间/ d ;

S ——试片表面积/ cm^2 。

溶蚀试片的野外布置基本如图 4 所示,分别将不同类型的溶蚀试片和标准溶蚀试片放置在空中、地面以及地下不同深度处,以此来测定以下溶蚀内容:(1)悬挂在空中的可溶岩试片,可以测定不同气候条件对溶蚀的影响作用;(2)放置于岩石或者草上的可溶岩试片可以测定裸露可溶岩试片的溶蚀速率;(3)将可溶岩试片埋入不同深度的土中,测定可溶岩在土中的溶蚀速率;(4)将可溶岩试片放置于同一区域的不同地方,测定同一个岩溶地区的剥蚀变化。

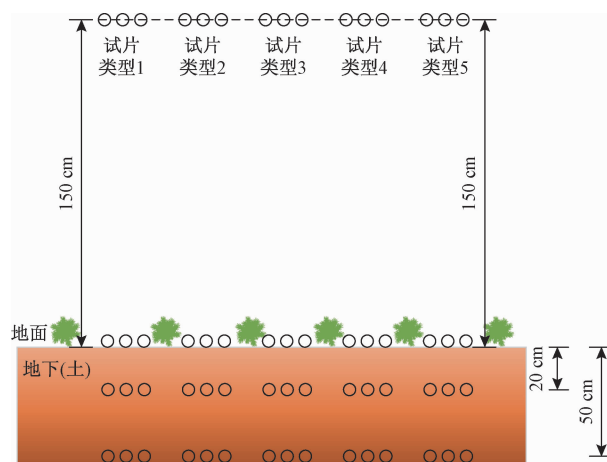


图 4 标准溶蚀试片法野外布置(据文献[50]修改)

Fig. 4 Deployment of the carbonate rock tablets in field test sites (modified by reference[50])

目前有多达上万个灰岩片被放置于全球各地。其中 Gams^[13]发表了 9 个国家调查的结果;Day^[19]发表了关于美国威斯康星州 5 a 内数据的详细分析;Urushibara-Yoshino 等^[51]发表了日本不同地点、不同时间暴露之后的重量损失;Plan^[20]通过将 70 个标准试片放在奥地利阿尔卑斯山地区的 13 个试验场地 1 a, 得出了控制灰岩溶蚀的影响因素。很多学者自 20 世纪 80 年代开始,在中国的多个区域进行了野外溶蚀试片测试,所得结果如表 2 所示。通过分析得到的试验数据得出:(1)降水量是造成试片溶蚀的最直接和最活跃的因素,降水量大的地区溶蚀速率较快,以 800 mm 年降水线为界,南方地区溶蚀速率明显大于北方。(2)很难看出温度对溶蚀速率明显的规律性影

响,这是因为温度升高可以加快溶蚀作用的同时也会降低水中 CO₂ 的溶解度;另外气温主要是通过植被、土壤来影响溶蚀作用的。(3)南方碳酸盐岩的地下溶蚀速率大于地表溶蚀速率,华北地区则相反。因为南方气候湿润,降水与地下浓度较高的 CO₂ 结合生成碳酸,故对试片的溶蚀很强烈,而北方地区相对干燥,降

水难以向地下渗透,无法形成碳酸。(4)部分地区的溶蚀速率出现了负值,这应该和土壤中碳酸盐的存在有关。因为雨水进入土壤,首先会与试片上部的碳酸盐反应,到达试片位置时,溶蚀能力已经很弱,如果过饱则会导致碳酸钙析出,所以产生负值。

表 2 中国各地碳酸盐岩溶蚀速率
Table 2 Dissolution rates at different field sites

编号	测试点	地区	地表溶蚀速率/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	地下溶蚀速率/ ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)	测试年平均 降水量/mm	测试年 平均温度/℃	测试年份
A	青海格尔木	西北	-0.064	-0.056	16.1	9.00	2003—2004
B	宁夏同心	西北	0.805	-0.162	192.9	9.54	2003—2004
C	内蒙古乌海	西北	0.443	0.273	159.0	10.14	2003—2004
D	山西神池	华北	1.280	-0.149	535.3	5.13	2003—2004
E	山西离石	华北	1.580	0.410	441.8	8.99	2003—2004
F	山西万荣	华北	1.179	0.202	404.6	12.66	2003—2004
G	甘肃平凉	华北	1.356	1.103	421.9	9.71	2003—2004
H	陕西岐山	华北	1.945	0.367	647.1	12.59	2003—2004
I	陕西蒲城	华北	2.282	0.313	427.8	14.23	2003—2004
J	陕西彬县	华北	1.175	0.055	666.5	10.70	-
K	陕西镇安	华北	0.140	-	800.0	-	1994
L1	北京十渡	华北	0.834	0.061	383.6	12.00	1984—1985
L2	北京十渡	华北	1.162	0.067	600.0	13.69	1994
M	山东济南	华北	1.175	0.109	561.0	13.90	-
N	辽宁本溪太子河	东北	0.318	0.048	800.0	8.59	-
O	吉林长春	东北	1.039	4.223	821.9	4.78	-
P	黑龙江伊春	东北	5.722	5.306	892.3	0.37	-
Q1	湖北兴山孟家陵	华中	1.816	1.242	1 394.0	9.66	2014—2017
Q2	湖北兴山黄粮	华中	1.245	0.635	1 021.9	13.56	2014—2017
Q3	湖北兴山青华	华中	1.942	0.250	1 007.0	15.31	2014—2017
Q4	湖北兴山峡口	华中	1.242	3.079	989.1	18.04	2014—2017
R	贵州贵阳	南方	2.309	1.055	1 034.0	15.18	-
S1	贵州荔枝茂兰	南方	1.159	3.788	1 752.5	18.50	1994
S2	贵州荔枝茂兰	南方	1.513	6.648	-	-	-
T1	四川黄龙	南方	0.555	6.244	759.0	6.45	1994
T2	四川黄龙	南方	0.677	6.728	-	-	-
U1	云南昆明	南方	1.949	4.167	1 100.0	12.70	-
U2	云南昆明	南方	2.101	4.934	-	-	-
V1	云南蒙自东山	南方	0.280	0.760	-	-	-
V2	云南蒙自名鹭	南方	0.444	2.366	-	-	-
V3	云南蒙自五里冲	南方	0.438	4.302	-	-	-
W	云南石林	南方	0.637	11.951	-	-	-
X1	广西桂林	南方	3.469	10.209	1 865.1	19.70	1982—1983
X2	广西桂林	南方	4.085	4.253	-	18.58	1993
X3	广西桂林	南方	5.036	8.438	1 897.5	18.90	1994
X4	广西桂林	南方	4.901	10.835	-	19.07	1995
X5	广西桂林	南方	2.227	10.258	-	-	-
Y1	广西环江	南方	0.794	4.070	1 773.3	20.20	-
Y2	广西环江	南方	0.914	3.596	-	-	-
Z	广西龙州弄岗	南方	2.052	9.355	-	-	-
AA	广西柳州	南方	2.575	1.647	1 400.0	20.00	-
AB	广东广州	南方	1.572	0.473	1 374.8	23.40	-

注:A、J、L1、M、O、P、R、U1、X1、Y1、AA、AB 资料来源于文献[52];K、L2、N、S1、T1、X2、X3、X4、资料来源于文献[53];B、C、D、E、F、G、H、I、S2、T2、U2、V1、V2、V3、X5、Y2、Z 资料来源于文献[54];Q1、Q2、Q3、Q4 资料来源于文献[50]。

一般情况下,由于试验地岩石与标准溶蚀试片中的碳酸盐岩的含量有一定的差异,得到的溶蚀速率与当地真实的溶蚀速率有一定的差异,使得直接采用标准溶蚀试片会造成得出的结果不准确,因此在实际中我们可以用当地地层的岩石样品制作溶蚀试片,得到更加准确的数据。但对于埋放地地层岩性种类多的地区,使用当地岩溶溶蚀试片操作起来会变得繁琐复杂。不过溶蚀试片法由于简单易行而被广泛使用,使用过程中应当避开土壤中含有碳酸盐的地区,并在大范围尺度内埋放大量试片来减少误差。

2.2.3 通过灰岩基座来推测溶蚀速率

在有些地区,非碳酸盐岩砾石盖层保护着其下的灰岩基座,从而使其不受侵蚀(图5),裸露岩石表面的溶蚀速率可以利用灰岩基座来推测计算(式7),此方法同样可以用于灰岩表面由于溶蚀差异而出露石英脉和硅质结核的情况。

$$v = \frac{h}{t} \quad (7)$$

式中: v ——溶蚀速率/($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$);

h ——平均基座高度/mm;

t ——距冰期时间/a。

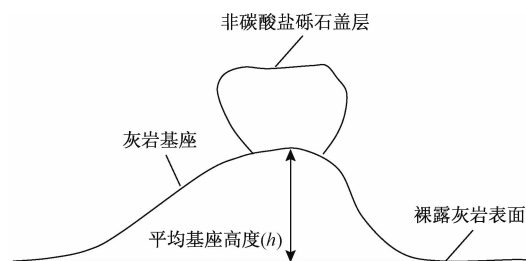


图5 灰岩基座示意图

Fig. 5 Schematic diagram of limestone pedestal

此种方法需要知道确切的距离冰期的时间,所以多用于高寒地区灰岩溶蚀速率的计算。例如 Bögli^[55]采用这种方法估计了瑞士阿尔卑斯山地区的溶蚀速率为 1.51 cm/ka (误差为 10%)。Peterson^[56]通过测定得出伊朗西部基础高程为 $4\,300 \text{ m}$ 的雪山的溶蚀速率几乎是阿尔卑斯山的 2 倍。通过灰岩基座来推测溶蚀速率需假定灰岩基座不受侵蚀,实际情况则不是如此,从而导致将灰岩底座平均高度扩大,造成计算结果低于实际的溶蚀速率。

2.2.4 微侵蚀计(MEM)测定法

微侵蚀计是用来测定地壳表面岩石侵蚀速率的装置。它由一个等边三角形钢基座、三条位于三角形顶点的基架和位于三角形中心的千分表组成。这个装置

包含与千分表相连的探针,通过将其固定在耐腐蚀不锈钢螺杆上,置于岩石内部,从而来测定岩石表面测试点的沉降即溶蚀量(图6)。它的测量精度可达 10^{-4} mm 。微侵蚀计最初由 Hanna^[57]于 1966 年发明,用来测量灰岩洞穴的溶蚀量。后来大量学者利用微侵蚀计对岩石表面的侵蚀量进行量测^[58-62]。



图6 测试现场的微侵蚀仪

Fig. 6 Microerosion meter at the test site

微侵蚀计可以用于任何水平出露基岩溶蚀量的测定,并且可以在短时间内获得溶蚀量数值^[63]。但是已有的研究表明以下几个方面会影响微侵蚀计的测量精度,在使用过程中要特别注意:(1)随着温度升高,岩石会产生膨胀,导致岩石表面产生明显的降低;(2)仪器在使用过程中会产生磨损,所以要对结果进行相应修正;(3)不同仪器的温度修正系数存在差异。随着激光扫描技术的发展,可以在大范围尺度内对岩石的侵蚀进行测量,但却达不到微侵蚀计的测量精度。在今后的研究工作中,可以将微侵蚀计、激光扫描、摄影测量融合来进行溶蚀量的测量。

3 可溶岩化学溶蚀试验研究讨论

上文详细阐述了可溶岩化学溶蚀研究的方法,现有的方法可以很好地得到岩溶的溶蚀量等数据和特征,但是作为正在发展中的一项科学研究,可溶岩溶蚀还存在很多科学问题有待探索。

3.1 室内溶蚀试验研究讨论

可溶岩溶蚀室内试验由于其容易开展而被学者大量采用。但是现有的室内试验方法存在一些瑕疵:(1)现有的可溶岩室内溶蚀研究大多针对的是纯粹完整的方解石和冰洲石,而不是化学成分复杂的岩石,那

么这样得出的结果会有一定的差异。野外的岩溶条件复杂,岩石的结构和物理力学性质都会影响岩溶的发育^[64]。(2)为了加快室内溶蚀试验的进程,所采用的样品尺寸普遍较小,有的甚至为小颗粒和粉末,这样得出的溶蚀结论和真实的岩溶溶蚀存在一定差异,不能正确表征可溶岩溶蚀量的实际数值。(3)可溶岩的野外存在形式复杂,其中可溶岩和水溶液的作用方式多变。但是目前室内试验主要采用溶液连续流过试样的方法或者旋转碟片法,显然不能对野外复杂的岩溶组合形态统一进行研究。

作者认为,针对岩溶溶蚀室内研究下一步的发展方向为:(1)采用野外采集回来的可溶岩替代纯粹的方解石和冰洲石展开室内溶蚀试验研究,亟需解决的问题是要有效控制酸不溶物对试验结果的影响。(2)开展大尺寸的可溶岩室内溶蚀试验研究,将孔隙度、力学强度、矿物成分等因素考虑进去,从尺度上更接近野外真实的岩溶状态。(3)由于物理溶解 CO_2 转变为具有侵蚀性的碳酸的过程是缓慢的,未来可以考虑用有效的其他酸溶液代替碳酸来加快试验过程。(4)建立模型试验系统真实模拟野外可溶岩的溶蚀过程,例如为了模拟三峡库区可溶岩与库水的作用过程,可以建立水位波动条件下的可溶岩溶蚀试验系统进行室内试验研究。(5)进一步开展岩溶岩石微观溶蚀机理的研究,未来结合 SEM、微米 CT 等室内试验手段从微观角度刻画可溶岩的溶蚀过程。

3.2 野外溶蚀试验研究讨论

一般认为野外岩溶溶蚀研究更接近于实际状态,从而可以得出相对有意义的结论。但是目前的岩溶溶蚀野外研究方法,还是存在一定的不足:(1)Corbel 公式法中假定所有的碳酸盐岩密度为 2.5 g/cm^3 ,这显然是不对的;另外忽略了碳酸镁和大气降水增加的溶质;忽略了硫酸盐岩可能对钙离子浓度做出贡献;以平均值归纳碳酸盐的硬度,忽略了径流量的变化。(2)标准溶蚀试片法由于试片的体积较小,容易受外界环境的影响。一些学者发现标准溶蚀试片法得出的结果要比从水的硬度和径流数据得出的结果小2个数量级,所以标准试片法的数据需要谨慎解译。(3)微侵蚀计的使用过程中会存在一定的误差。(4)因为不是每个岩溶地区都存在灰岩基座,所以灰岩基座方法的使用存在一定的地域限制。

针对以上不足,下一步的研究重点为:(1)综合运用多种野外试验方法开展研究,避免或降低单一试验方法可能带来的较大误差。(2)建立野外溶蚀试验和

室内溶蚀试验的关联,以期通过室内短期的试验研究推测野外大时间尺度下的溶蚀状态。

4 结论

可溶岩化学溶蚀的测定可以获得当前气候条件下可溶岩的溶解情况和比较不同条件下的溶蚀速率,从而更好地理解岩溶地貌的发展演化过程,进一步预测岩溶未来的发展趋势。本文在分类总结可溶性岩石化学溶蚀试验方法的基础上,得出如下结论和建议:

(1)可溶岩化学溶蚀试验方法可以归纳为两大类:室内溶蚀试验方法(CO_2 溶液流动法或旋转碟片法)和室外溶蚀试验方法(水化学径流法、标准溶蚀试片法、灰岩基座法、微侵蚀计测定法等)。

(2)可溶岩化学溶蚀试验方法的原理和适用条件存在差别,所以对可溶岩化学溶蚀的研究可将不同试验方法相结合,以便优势互补,综合测定可溶岩的溶蚀程度。

(3)加强室外溶蚀试验和室内溶蚀试验的关联研究,以期通过室内短期的试验研究推测野外大时间尺度下可溶岩的溶蚀状态。

(4)开发可溶岩溶蚀大型模型试验系统,综合考虑岩溶水的运动方式、渗透介质性质等方面,真实模拟可溶岩溶蚀的发展过程。

参考文献 (References):

- [1] 袁道先,蒋勇军,沈立成,等.现代岩溶学[M].北京:科学出版社,2016:13-45. [YUAN D X, JIANG Y J, SHEN L C, et al. Modern karstology [M]. Beijing: Science Press, 2016: 13-45. (in Chinese)]
- [2] 李大通,罗雁.中国碳酸盐岩分布面积测量[J].中国岩溶,1983,2(2): 147-150. [LI D T, LUO Y. Measurement of the distribution area of carbonate rocks in China [J]. Carsologica Sinica, 1983, 2(2): 147-150. (in Chinese)]
- [3] 袁道先.中国岩溶[M].北京:地质出版社,1993: 1-20. [YUAN D X. Karst in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 1-20. (in Chinese)]
- [4] 韩行瑞.岩溶水文地质学[M].北京:科学出版社,2015: 13-20. [HAN X R. Karst hydrogeology [M]. Beijing: Science Press, 2015: 13-20. (in Chinese)]
- [5] 李滨,冯振,张勤,等.岩溶山区特大崩滑灾害成灾模式与早期识别研究[M].北京:科学出版社,2016:23-46. [LI B, FENG Z, ZHANG Q, et al. Study on the disaster model and early identification of

- the mega-avalanche disaster in karst mountain area [M]. Beijing: Science Press, 2016: 23 - 46. (in Chinese)]
- [6] 卢耀如. 喀斯特发育机理与发展工程建设效应研究方向[J]. 地球学报, 2016, 37(4): 419 - 432. [LU Y R. Karst development mechanism and research directions of developing engineering construction effect [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2016, 37(4): 419 - 432. (in Chinese)]
- [7] 张少波, 简文彬, 洪儒宝, 等. 水位波动条件下覆盖型岩溶塌陷试验研究[J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 659 - 667. [ZHANG S B, JIAN W B, HONG R B, et al. Experimental study on collapse of covered karst under water-level fluctuation [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 659 - 667. (in Chinese)]
- [8] 刘琦, 白友恩, 顾展飞, 等. 石漠化地区石灰岩和白云岩的溶蚀-蠕变特性试验研究——以贵州贞丰-关岭花江岩溶区为例[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(3): 399 - 404. [LIU Q, BAI Y E, GU Z F, et al. Experiment on dissolution-creep characteristics of limestone and dolomite in rocky desertification: a case study of Zhenfeng-Guanling Huajiang karst region in Guizhou [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(3): 399 - 404. (in Chinese)]
- [9] 曹贤发, 刘之葵, 李海玲. 西南岩溶区建筑地基溶蚀程度深度分布规律[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 253 - 259. [CAO X F, LIU Z K, LI H L. Dissolution distribution rules with depth at building ground in southwestern karst area, China [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2016, 36(2): 253 - 259. (in Chinese)]
- [10] DELLE ROSE M, FEDERICO A, PARISE M. Sinkhole genesis and evolution in Apulia, and their interrelations with the anthropogenic environment [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2004, 4(5/6): 747 - 755.
- [11] JOHNSON K S. Subsidence hazards due to evaporite dissolution in the United States [J]. Environmental Geology, 2005, 48(3): 395 - 409.
- [12] FORD D, WILLIAMS P. Karst hydrogeology and geomorphology [M]. England: John Wiley & Sons Ltd., 2007: 1 - 50.
- [13] TSYKIN R A. Karst sibir [M]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk University Publishing House, 1990: 2 - 10.
- [14] GAMS I. International comparative measurement of surface solution by means of standard limestone tablets [J]. Zbornik Ivana Rakovica, 1985, 4(26): 361 - 386.
- [15] GAMS I. Systems of adapting the littoral Dinaric Karst to agrarian land use [J]. Actageographica, 1991, 31: 5 - 106.
- [16] GAMS I. Origin of the term "karst," and the transformation of the classical karst (kras) [J]. Environmental Geology, 1993, 21: 110 - 114.
- [17] GAMS I. Types of contact karst [J]. Geografia Fisica e Dinamica Quateraria, 1994, 17: 37 - 46.
- [18] 罗明明, 周宏, 陈植华. 香溪河流域岩溶水循环规律 [M]. 北京: 科学出版社, 2018: 11 - 26. [LUO M M, ZHOU H, CHEN Z H. Regularity of karst water cycle in Xiangxi River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2018: 11 - 26. (in Chinese)]
- [19] DAY M. Carbonate erosion rates in Southwestern Wisconsin [J]. Physical Geography, 1984, 5(2): 142 - 149.
- [20] PLAN L. Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps [J]. Geomorphology, 2005, 68: 201 - 212
- [21] 陈如冰, 罗明明, 罗朝晖, 等. 三峡地区碳酸盐岩化学组分与溶蚀速率的响应关系 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 258 - 264. [CHEN R B, LUO M M, LUO Z H, et al. Response relationship between chemical composition and dissolution rate of carbonate rocks in the Three Gorges Area [J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(2): 258 - 264. (in Chinese)]
- [22] 何宇彬, 金玉璋, 李康. 碳酸盐岩溶蚀机理研究 [J]. 中国岩溶, 1984, 3(2): 12 - 16. [HE Y B, JIN Y Z, LI K. An experimental study of carbonate rock corrosion mechanism [J]. Carsologica Sinica, 1984, 3(2): 12 - 16. (in Chinese)]
- [23] 陈晓鹏, 张中俭, 张彬. 淋雨对桂林鲕粒灰岩溶蚀机理的实验研究 [J]. 工程地质学报, 2019, 27(3): 516 - 524. [CHEN X P, ZHANG Z J, ZHANG B. Experimental study on dissolution mechanism of oolitic limestone in Guilin under attack of simulated rain [J]. Journal of Engineering Geology, 2019, 27(3): 516 - 524. (in Chinese)]
- [24] 孙平安, 李秀存, 于爽, 等. 酸雨溶蚀碳酸盐岩的源汇效应分析——以广西典型岩溶区为例 [J]. 中国岩溶, 2017, 36(1): 101 - 108. [SUN P A, LI X C, YU S, et al. Study on source-sink effect in the process of carbonate rock dissolved by acid rain: An example of typical karst regions in Guangxi [J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(1): 101 - 108. (in Chinese)]
- [25] 黄奇波, 覃小群, 程瑞瑞, 等. 硫酸型酸雨参与碳酸盐岩溶蚀的研究进展 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(2): 149 - 156. [HUANG Q B, QIN X Q, CHENG R R,

- et al. Research progress of sulfuric acid rain participating in the dissolution of carbonate rocks[J]. *Carsologica Sinica*, 2019, 38(2): 149 – 156. (in Chinese)]
- [26] 范周周, 卢舒瑜, 李志茹, 等. 岩溶与非岩溶地区不同林分根际土壤微生物对碳酸盐岩的溶蚀作用[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(4): 751 – 757. [FAN Z Z, LU S Y, LI Z R, et al. Roles of rhizospheric soil microbes of different forest stands in karst and non-karst areas in the dissolution of calcium carbonate [J]. *Chinese Journal of Applied Environmental Biology*, 2018, 24(4): 751 – 757. (in Chinese)]
- [27] 郭纯青, 田西昭. 岩溶隧道涌水量综合预测——以朱家岩岩溶隧道为例[J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(3): 1 – 8. [GUO C Q, TIAN X Z. A comprehensive forecast of water inflow in karst tunnels——Exemplified by the Zhujiayan karst tunnel [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(3): 1 – 8. (in Chinese)]
- [28] 莫阳春, 周晓军. 侧部岩溶隧道围岩变形特征数值模拟分析[J]. *水文地质工程地质*, 2008, 35(2): 30 – 34. [MO Y C, ZHOU X J. Numerical simulation analysis on surrounding rock deformation characteristic of tunnel with karst cave beside[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(2): 30 – 34. (in Chinese)]
- [29] 罗明明, 陈植华, 周宏, 等. 岩溶流域地下水调蓄资源量评价[J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(6): 14 – 20. [LUO M M, CHEN Z H, ZHOU H, et al. Assessment of regulating groundwater resources in karst watersheds [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(6): 14 – 20. (in Chinese)]
- [30] 罗明明, 肖天昀, 陈植华, 等. 香溪河岩溶流域几种岩溶水系统的地质结构特征[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 13 – 19. [LUO M M, XIAO T Y, CHEN Z H, et al. Geological structure characteristics of several karst water systems in the Xiangxi River Karst Basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 13 – 19. (in Chinese)]
- [31] WEYL P. The solution kinetics of calcite[J]. *Journal of Geology*, 1958, 66(2): 163 – 176.
- [32] NANCOLLAS G H, REDDY M M. The crystallization of calcium carbonate [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1971, 37(4): 166 – 172.
- [33] BERNER R A, MORSE J W. Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water: IV. Theory of calcite dissolution[J]. *American Journal of Science*, 1974, 274(2): 108 – 134.
- [34] PLUMMER L N, WIGLEY T L M. The dissolution of calcite in CO₂-saturated solutions at 25 °C and 1 atmosphere total pressure [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 1976, 40(2): 191 – 202.
- [35] PLUMMER L N, WIGLEY T M L, PARKHURST D L. The kinetics of calcite dissolution in CO₂ – water systems at 5 deg to 60 deg c and 0.0 to 1.0 atm CO₂ [J]. *American Journal of Science*, 1978, 278(2): 179 – 216.
- [36] 王洪涛, 曹以临. 碳酸盐岩溶蚀动力学模拟实验[J]. *中国岩溶*, 1988, 7(1): 63. [WANG H T, CAO Y L. Simulation experiment of carbonate rock dissolution kinetics [J]. *Carsologica Sinica*, 1988, 7(1): 63. (in Chinese)]
- [37] 刘再华, DREYBRODT W. 不同 CO₂ 分压条件下的白云岩溶解动力学机理[J]. *中国科学 (B 辑)*, 2001, 31(4): 377 – 384. [LIU Z H, DREYBRODT W. Kinetic mechanism of dolomite dissolution under different CO₂ partial pressure conditions [J]. *Science in China (Series B)*, 2001, 31(4): 377 – 384. (in Chinese)]
- [38] 闫志为, 张志卫. 氯化物对方解石和白云石矿物溶解度的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(1): 113 – 118. [YAN Z W, ZHANG Z W. Effect of chloride on the solubility of calcite and dolomite minerals [J]. *Hydrogeological & Engineering Geology*, 2009, 36(1): 113 – 118. (in Chinese)]
- [39] 邵东梅. 华北典型煤矿区奥陶系碳酸盐岩溶蚀试验研究[D]. 西安: 煤炭科学研究总院, 2009. [SHAO D M. Experimental study on dissolution test of Ordovician carbonate rock in North-China typical coalfields [D]. Xi'an: China Coal Research Institute, 2009. (in Chinese)]
- [40] 邵东梅. 不同水流速度下温度对奥陶系碳酸盐岩溶蚀速度的影响[J]. *煤田地质与勘探*, 2012, 40(3): 65 – 68. [SHAO D M. Influence of temperature on the dissolution rate in Ordovician carbonate rock in different water flow rate [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2012, 40(3): 65 – 68. (in Chinese)]
- [41] 徐飞高, 汤剑, 高士祥. 模拟酸雨对石灰岩的破坏和表面腐蚀[J]. *生态环境*, 2008, 17(6): 331 – 335. [XU F G, TANG J, GAO S X. Simulated acid rain damage to limestone and surface corrosion [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6): 331 – 335. (in Chinese)]
- [42] 陈卫昌, 李黎, 邵明申, 等. 酸雨作用下碳酸盐岩类文物的溶蚀过程与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(11): 116 – 125. [CHEN W C, LI L, SHAO M S, et al. Experimental study on carbonate dissolution

- and erosion effect under attack of simulated sulphuric acid rain [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39 (11): 116 - 125. (in Chinese)]
- [43] 苏悦. 桂林市毛村流域碳酸盐岩溶蚀实验研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018. [SU Y. Experimental research on carbonate rock erosion by the Maocun in Guilin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018. (in Chinese)]
- [44] 李钜章,林钧枢,房金福. 喀斯特溶蚀强度分析与估算[J]. 地理研究,1994,13(3):90-97. [LI J Z, LIN J S, FANG J F. Analysis and estimation of the karst solutional intensity[J]. Geographical Research, 1994,13(3):90-97. (in Chinese)]
- [45] CORBEL J. A new method for the study of limestone regions[J]. Revue Canadienne de Géographie, 1956, 10:240-242.
- [46] CORBEL J. Les karsts du nord-ouest de l'Europe [Thèse de doctorate slettres, 5 juillet 1955][J]. L'information Géographique, 1956, 20(4):164-165.
- [47] CORBEL J. Erosion en terrain calcaire[J]. Annales de Géographie, 1959, 68: 97-120.
- [48] WILLIAMSPW. An initial estimate of the speed of limestone solution in County Clare [J]. Irish Geography, 1963, 4(6):432-441.
- [49] 曾成,赵敏,杨睿,等. 岩溶作用碳汇强度计算的溶蚀试片法和水化学径流法比较——以陈旗岩溶泉域为例[J]. 水文地质工程地质,2014,41(1):106-111. [ZENG C, ZHAO M, YANG R, et al. Comparison of karst processes-related carbon sink intensity calculated by carbonate rock tablet test and solute load method: a case study in the Chenqi karst spring system [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014,41(1):106-111. (in Chinese)]
- [50] LUO M M, ZHOU H, LIANG Y P, et al. Horizontal and vertical zoning of carbonate dissolution in China [J]. Geomorphology, 2018, 322:66-75.
- [51] URUSHIBARA-YOSHINO K, MIOTKE F D, KASHIMA N, et al. Solution rate of limestone in Japan[J]. Physics and Chemistry of the Earth, Series A, 1999,24(10):899-903.
- [52] 袁道先,蔡桂鸿. 岩溶环境学[M]. 重庆:重庆出版社,1988:5-18. [YUAN D X, CAI G H. Karst environmental science [M]. Chongqing: Chongqing Publishing House, 1988:5-18. (in Chinese)]
- [53] 袁道先,刘再华,林玉石,等. 中国岩溶动力系统[M]. 北京:地质出版社,2002:20-35. [YUAN D X, LIU Z H, LIN Y S, et al. Karst dynamic system of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:20-35. (in Chinese)]
- [54] 梁永平,王维泰,段光武. 鄂尔多斯盆地周边地区野外溶蚀试验结果讨论[J]. 中国岩溶,2007,26(4):315-320. [LIANG Y P, WANG W T, DUAN G W. Discussion on the result of field corrosion test around Erdos Basin[J]. Carsologica Sinica, 2007, 26(4):315-320 (in Chinese)]
- [55] BÖGLI A. Karrentische, ein Beitragsur Karst morphologie [J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1961(5):185-193.
- [56] PETERSON J A. Limestone pedestals and denudation estimates from Mt. Jaya, Irian Jaya [J]. Australian Geographer, 1982(15):170-173.
- [57] HANNA F K. A technique for measuring the rate of erosion of cave passages[J]. Proceedings University of Bristol Speleology Society, 1966,11:83-86.
- [58] STEPHENSON W J. The micro and traversing erosion meter [J]. Treatise on Geomorphology, 2013:164-169.
- [59] STEPHENSON W J, FINLAYSON B L. Measuring erosion with the micro-erosion meter—Contributions to understanding landform evolution [J]. Earth-Science Reviews, 2009,95(1/2):53-62.
- [60] STEPHENSON W J, KIRK R M. Surface swelling of coastal bedrock on inter-tidal shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand[J]. Geomorphology, 2001, 41:5-21.
- [61] STEPHENSON W J, TAYLOR A J, HEMMINGSEN M A, et al. Short-term microscale topographic changes of coastal bedrock on shore platforms [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29:1663-1673.
- [62] TRENHAILE A. Tidal wetting and drying on shore platforms: An experimental study of surface expansion and contraction [J]. Geomorphology, 2006, 76:316-331.
- [63] NICOD J. Karst et mines en France et en Europe[J]. Karstologia, 1996, 27(1):1-20.
- [64] 但新球,贺东北,吴协保,等. 中国岩溶地区生态特征与石漠化危害探讨[J]. 中南林业调查规划, 2018, 37(1):62-66. [DAN X Q, HE D B, WU X B, et al. Ecological characteristics of karst areas in China and the hazard of rocky desertification [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2018, 37(1):62-66. (in Chinese)]

编辑:汪美华