

中文核心期刊 CSCD核心期刊 中科双效期刊 中国科技核心期刊 Caj-cd规范获奖期刊

碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展试验与模拟研究

武亚遵,于江浩,林 云,金 毅,刘 源,王雪奇 Experiment and simulation study on dissolution widening of carbonate rock fracture WU Yazun, YU Jianghao, LIN Yun, JIN Yi, LIU Yuan, and WANG Xueqi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302064

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究

Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions 林云, 任华鑫, 武亚遵, 贾方建, 刘朋, 梁家乐 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 15-26

可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述

Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks 郭静芸, 毕鑫涛, 方然可, 李守定 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 24-34

薄层灰岩浅部岩溶发育特征及分布模型

Development characteristics and distribution model of shallow karst in thin-bed limestones 张宽, 唐朝晖, 柴波, 孙巧, 张洁飞 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 167-174

含折线型裂隙砂岩试件翼型裂纹起裂与扩展机制研究

Investigation of the wing crack initiation and propagation mechanism of the sandstone specimen containing a folded fissure 张科,潘哲,刘享华 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 103–111

含孔洞裂隙岩体灌浆后力学特性的物理试验与数值模拟

Experimental and numerical simulation of the mechanical characteristics of rocks containing hole and flaw after grouting 张科, 刘享华, 杨红宣, 范文臣 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 79-79

预制裂隙岩样宏细观力学行为颗粒流数值模拟

Particle flow simulation of macro- and meso-mechanical behavior of the prefabricated fractured rock sample 王星辰, 王志亮, 黄佑鹏, 贾帅龙 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 86-92



关注微信公众号,获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302064

武亚遵, 于江浩, 林云, 等. 碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展试验与模拟研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 41-46. WU Yazun, YU Jianghao, LIN Yun, et al. Experiment and simulation study on dissolution widening of carbonate rock fracture[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 41-46.

碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展试验与模拟研究

武亚遵,于江浩,林 云,金 毅,刘 源,王雪奇 (河南理工大学资源环境学院,河南 焦作 454003)

摘要:研究表明碳酸盐岩的溶蚀过程可用溶解速率方程进行表征,但表征的形式存在较大差别,主要体现在远离平衡的欠 饱和态下。为进一步确定碳酸盐岩在欠饱和态下的溶解特征及溶蚀速率的表征形式,首先开展了碳酸盐岩裂隙溶蚀试验 研究,探讨了 CO₂ 及溶液初始 Ca²⁺浓度对溶蚀过程的影响,并基于试验结果构建了欠饱和态下的溶解速率方程;而后采用碳 酸盐岩裂隙渗流-溶解耦合模型,通过数值模拟对量化模型的参数进行率定和检验。结果表明:(1)CO₂的参与加快了碳酸 盐岩的溶蚀扩展,溶液初始 Ca²⁺浓度越高,对碳酸盐岩的溶解抑制程度就越高;(2)CO₂ 作用下碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展的平 均溶蚀速率增加了 1.82~2.29 倍;(3)溶液不同初始 Ca²⁺浓度在同等区间流量条件下,蒸馏水为溶蚀溶液的样品中 Ca²⁺浓度 差值下降了 0.091 5 mmol/L,溶液初始 Ca²⁺浓度为 0.352, 0.476, 0.581 mmol/L 的溶蚀溶液中, Ca²⁺浓度差值分别下降了 0.074 2, 0.053 6, 0.047 4 mmol/L;(4)在高度欠饱和状态下溶解动力学由线性速率定律控制,随着溶液中 Ca²⁺浓度的升高,溶解动力学 将变为非线性关系,此时 Ca²⁺浓度为 0.4 倍的平衡时 Ca²⁺浓度。研究结果可为定量评价岩溶发育演化提供数据支撑。 关键词:溶蚀扩展;溶解速率;欠饱和;碳酸盐岩;溶解动力学 中图分类号: P642.25 文献标志码: A 文章编号: 1000-3665(2024)01-0041-06

Experiment and simulation study on dissolution widening of carbonate rock fracture

WU Yazun, YU Jianghao, LIN Yun, JIN Yi, LIU Yuan, WANG Xueqi (School of Resources and Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: Previous researches show that the dissolution of carbonate rocks can be characterized by dissolution rate equation, but the form of characterization is quite different, which is mainly reflected in the undersaturated state far from equilibrium. In order to further determine the dissolution characteristics of carbonate rocks in the undersaturated state and the characterization form of dissolution rate, first of all, the fracture dissolution test of carbonate rocks was carried out, and the influence of CO_2 partial pressure and initial concentrations of Ca^{2+} on dissolution was discussed. Based on the test results, the dissolution rate equation in the undersaturated state was constructed. Then, the carbonate rock fracture seepage dissolution coupling model was used, calibrating and verifying the parameters of the quantitative model through numerical simulation. The results indicate that: (1) The participation of CO_2 accelerates the dissolution expansion of carbonate rocks, and the higher the initial Ca^{2+}

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-05-16 投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502224; 42271041);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2019GGJS055);河南省高等学校重点科 研项目(21A170011)

第一作者:武亚遵(1981—),男,博士,副教授,主要从事水文地质工程地质教学研究。E-mail: wuyazun@163.com

通讯作者:金毅(1979—),男,博士,教授,主要从事流体力学、数学地质教学研究。E-mail: jinyi2005@hpu.edu.cn

concentration of the solution, the higher the degree of dissolution inhibition of carbonate rocks. (2) The average dissolution rate of carbonate rock fractures under the action of CO_2 increased by 1.82–2.29 times. (3) Under the same interval flow rate conditions for different initial Ca^{2+} solutions, the difference of Ca^{2+} concentration in distilled water decreased by 0.091 5 mmol/L, and the initial Ca^{2+} concentration of 0.352, 0.476, 0.581 mmol/L decreased by 0.074 2, 0.053 6, 0.047 4 mmol/L, respectively. (4) The dissolution kinetics is controlled by the linear rate law under the highly undersaturated state. With the increase of the concentration of Ca^{2+} in the solution, the dissolution kinetics becomes nonlinear, and the threshold of Ca^{2+} concentration between the two is 0.4 times the saturated of Ca^{2+} concentration. The study provides a reference for quantitative evaluation of karst development and evolution.

Keywords: dissolution widening; dissolution rate; undersaturation; carbonate rock; dissolution kinetics

岩溶作用研究是为分析、解释各种岩溶形态成因 而展开的水-岩相互作用的研究^[1-2]。岩溶过程极其复 杂,其始于水流对岩溶介质的溶蚀演化^[3],而碳酸盐岩 的溶蚀演化主要取决于 CaCO₃-CO₂-H₂O 系统的溶解^[4-5], 即溶解动力学过程。

国内外学者针对碳酸盐岩溶解过程的动力学进 行了一系列研究,取得诸多成果,如White^[6]通过对CaCO₃ 溶解的动力学研究发现,溶蚀作用比较复杂,特别是 趋于平衡状态时,溶蚀作用会显著降低,并在此基础 上提出了岩溶发育的动力控制机制;刘再华等^[7-8]在 Buhmann等^[9-10]研究成果的基础上,通过室内溶蚀试 验及野外沉淀试验,研究了岩溶发育过程中的水文地 球化学特征以及溶蚀的动力学机制,提出溶解和沉淀 的预测速率可以用线性速率来近似;Plummer等^[11] 研究了不同温度、不同 CO₂分压条件下,方解石晶体 在纯 H₂O-CO₂-CaCO₃系统中的溶解作用,并提出了著 名的表面化学反应控制速率方程(PWP方程),上述成 果为进一步研究岩溶作用以及溶解动力学提供了理 论支撑。

研究表明碳酸盐岩的溶解过程可采用溶解速率 方程^[12-14],即用含有 Ca²⁺浓度的函数来进行表征,并先 后出现了单一函数、分段函数^[15-17]。目前受众最广的 溶解速率方程是 Dreybrodt^[16] 和 Palmert^[18]提出的包含 低级次快速溶解反应和高级次缓慢溶解反应的 2 段 式方程。但是实际中岩溶的演化是复杂多变的,在远 离平衡时,由快速线性溶解动力学控制,在接近平衡 时,缓慢高阶速率定律将占主导地位^[19-22]。White^[11] 提出,在更接近平衡的地方,必须存在一个更低的抑 制溶解区域。尤其是岩溶管道的发育以及大型洞穴 系统的形成,这种接近平衡的非线性速率定律对岩溶 发育演化至关重要^[23-24]。此外研究还发现雨水作用 下裸露岩石表面的溶解大部分发生在高度欠饱和状 态下,并提出了欠饱和态时的2种线性溶解动力学机 制^[7]。综上可知溶解速率方程在远离平衡的欠饱和态 下存在较大的差别,究竟采用何种表征形式仍存在不 确定性。鉴于此,本文依据裂隙溶蚀扩展过程的基本 原理,开展碳酸盐岩单裂隙溶蚀扩展试验研究以探讨 Ca²⁺浓度与溶蚀速率的相关关系,以质量守恒为原则, 构建溶解速率方程,并以此为基础,构建碳酸盐岩单 裂隙渗流-溶解耦合模型进行反演,尝试确定溶解速率 与 Ca²⁺浓度的量化表征模型,以期为碳酸盐岩溶蚀演 化研究提供参考。

1 研究方法

1.1 试验样品与设备

试验样品使用野外采集的碳酸盐岩,经过加工制 作成尺寸为110 cm×30 cm×3 cm的试样,并对碳酸盐 岩试样进行烘干处理,在105 °C条件下烘干24 h,随 后将试样置于试验装置内,其边界由有机玻璃圈定。 基于碳酸盐岩溶蚀扩展的相关理论,设计并研制了开 放环境下碳酸盐岩单裂隙溶蚀试验装置(图1),该装 置主要由溶液混合装置(包括 CO₂-N₂气瓶、蒸馏水 瓶、水气混合容器、磁力搅拌器),供水装置(蠕动 泵),岩样溶蚀装置(包括碳酸盐岩石板、有机玻璃 板、湿纸条、角度调节器)3部分组成,水流在碳酸盐 岩试样的流速可通过蠕动泵进行调节。流出液通过 集水容器收集待处理。

1.2 试验方法与工况

操控水气混合装置制备目标溶液,并通过开启蠕动泵使溶液流入岩样溶蚀装置。同时为保证水流的均匀性,在碳酸盐岩试样表面上铺设了尺寸为100 cm× 3.5 cm的纸条,并采用 DDB-12L 笔式电导率仪实时测 定样品的电导率。而溶蚀溶液中的 Ca²⁺浓度 [c(Ca²⁺)] 采用离子分光光度计来测定。按照一定的时间间隔





采集样品,并构建了 Ca²⁺浓度与电导率(*C*ond)之间的相 关关系: *c*(Ca²⁺)=0.008 9*C*ond+0.015 6, *R*²=0.923 7, 为快速 有效获取数据奠定了基础。此外,为消除环境的影 响,每组相同标准的试验进行 5 次,试验结果取平均值。

在溶蚀试验中,控制温度为20°C,并设置岩样距 水平面距离为3.1 cm 来模拟水力梯度(J)为0.031条 件下的裂隙溶蚀过程。为探讨CO₂及溶液初始Ca²⁺浓 度对溶蚀的影响,通过溶液混合装置向蒸馏水中通入 一定配比的CO₂-N₂混合气体,设置了CO₂分压为200Pa 的目标溶蚀溶液,以及采用Ca(HCO₃)2试剂分别配制 3组初始*c*(Ca²⁺)=0.352,0.476,0.581 mmol/L的目标溶 蚀溶液。此外,相同条件下均进行了目标溶蚀溶液为 蒸馏水的空白试验。

2 结果

2.1 CO₂作用下碳酸盐岩溶蚀扩展特征

为清晰表征 CO₂对碳酸盐岩溶蚀的影响程度, 另进行了目标溶蚀溶液为蒸馏水的空白试验,2组 试验在不同流量下溶蚀的 Ca²⁺浓度变化如图 2 所示。 CO₂作用下碳酸盐岩溶蚀样品的 Ca²⁺浓度始终大于 空白试验样品中的 Ca²⁺浓度。对比溶蚀液分别为蒸馏 水与充入 CO₂-N₂ 混合气体时,当流量为 0.1 cm³/s 时, 溶蚀样品中的 Ca²⁺浓度从 0.207 6 mmol/L 上升到 0.376 5 mmol/L; 当流量为 0.5 cm³/s 时, 溶蚀样品中的 Ca²⁺浓度 从 0.116 1 mmol/L 上升到 0.219 8 mmol/L, 经计算可得, 随着裂隙水溶液流量的增加, 平均溶蚀速率变化为 1.82 ~ 2.29 倍。

2.2 溶液不同初始 Ca²⁺浓度下碳酸盐岩溶蚀扩展特征 该组试验溶蚀过程中,由于水溶液中含有 Ca²⁺,因 此统计的 Ca²⁺浓度选择试验前后水流中 Ca²⁺浓度差 值。溶液不同初始 Ca²⁺浓度差值与流量的关系如图 3



Fig. 2 Dissolution characteristics of carbonate rocks under the influence of CO₂

所示,随着流量的变化,溶液中 Ca²⁺浓度差值越来越 小。当蒸馏水作为溶蚀溶液,Ca²⁺浓度差值从 0.1 cm³/s 时的 0.207 6 mmol/L 下降到 0.5 cm³/s 时的 0.116 1 mmol/L, Ca²⁺浓度差值下降了 0.091 5 mmol/L; 而配置的 3 组不 同 Ca²⁺浓度溶蚀溶液,流量为 0.1 ~ 0.5 cm³/s, Ca²⁺浓度 差值分别下降了 0.074 2, 0.053 6, 0.047 4 mmol/L。



图 5 不问初始 Ca 浓度下的咳酸盐石溶蚀特征 Fig. 3 Dissolution characteristics of carbonate rocks under different initial Ca²⁺ concentration

3 分析与讨论

3.1 Ca²⁺浓度与溶蚀速率的相关关系 对单裂隙室内溶蚀试验当中所有参数的试验 数据进行整理归纳,通过测得水流的流量同时参照 Myers^[25]给出的公式计算湿纸条的水膜厚度,依据所 测得 Ca²⁺浓度、流量及水流的溶蚀时间计算碳酸钙 (CaCO₃)的溶蚀质量。再根据溶蚀量与流速的关系 可以得到试验下的溶蚀速率。基于上述计算得到碳 酸盐岩溶蚀扩展试验下 Ca²⁺浓度与溶蚀速率的关系 (图 4),可以看出,溶蚀速率随 Ca²⁺浓度的升高而降 低,这与碳酸盐岩经溶蚀后 Ca²⁺浓度在不同流速时的 发育情况特征基本一致。



Fig. 4 Dissolution test diagram of the relationship between Ca²⁺ concentration and dissolution rate

在溶蚀试验建立的 Ca²⁺浓度-溶蚀速率相关关系基础上,尝试建立了溶解动力学速率方程,并通过拟合确定了溶解动力学速率方程的表征形式如式(1)所示:

$$F_{\rm c} = \begin{cases} k_1 \left(1 - \frac{c\left({\rm Ca}^{2^+}\right)}{m_1 c_{\rm eq}} \right), & c\left({\rm Ca}^{2^+}\right) < 0.4 c_{\rm eq} \\ k_2 \left(1 - \frac{c\left({\rm Ca}^{2^+}\right)}{m_2 c_{\rm eq}} \right)^n, & 0.4 c_{\rm eq} \le c\left({\rm Ca}^{2^+}\right) < 0.9 c_{\rm eq} \end{cases}$$
(1)

式中:F_c——溶蚀速率/(mol·cm⁻²·s⁻¹); c(Ca²⁺)——溶液 Ca²⁺浓度/(mol·L⁻¹);

$$c_{eq}$$
——平衡时 Ca²⁺浓度/(mol·L⁻¹);

- k1——线性溶解速率系数/(mol·cm⁻²·s⁻¹),取值为 9.57×10⁻¹⁰ mol/(cm²·s);
- k2——非线性溶解速率系数/(mol·cm⁻²·s⁻¹),取值 为 1.94×10⁻¹⁰ mol/(cm²·s);
- *m*₁——无量纲限值,取 0.44;
- *m*₂——无量纲限值,取 0.91;

n——幂律指数,取1.4。

3.2 CO₂及溶液初始 Ca²⁺浓度对碳酸盐岩溶蚀的影响 碳酸盐岩的溶蚀速率受 CO₂条件的制约,并且在 CO₂作用下会加快碳酸盐岩的溶蚀扩展。在 H₂O-CO₂-CaCO₃系统中,根据 CaCO₃在纯水中的溶解度随 CO₂

分压变化曲线^[26], CO₂的参与对 CaCO₃的溶蚀具有一定的控制作用,其主要原因是通过影响水中侵蚀性 CO₂的浓度进而来影响 CaCO₃的溶蚀^[27]。

碳酸盐岩的溶解受溶液 Ca²⁺浓度的制约,溶液中 含有一定浓度的 Ca²⁺会对碳酸盐岩的溶蚀扩展有抑制 作用,且溶液中 Ca²⁺浓度越高其抑制作用越明显,其主 要原因是裂隙在起始溶蚀时溶液中的 Ca²⁺浓度较低, 与碳酸盐岩试样之间的浓度差较大,溶液处于远离溶 解平衡的状态,所以碳酸盐岩溶蚀速率较快;随着溶 蚀的持续进行,溶液接近饱和平衡状态,溶液中的 Ca²⁺浓度逐渐增大,浓度差减小,进而导致碳酸盐岩溶 蚀速率趋于平缓。

3.3 模拟反演分析

为确定 Ca²⁺浓度-溶蚀速率关系的可靠性, 耦合裂隙渗流方程和溶解动力学方程构建了单裂隙溶蚀 扩展模拟模型, 其中裂隙渗流方程与裂隙的剖分与文 献 [28-29] 相同, 仅溶解动力学方程在欠饱和态下的表 征形式有所差异。本研究采用公式(1)进行表征, 而文 献 [28-29] 则采用线性溶解速率方程进行表征。据 构建的模型可模拟分析试验条件下 Ca²⁺浓度的变化特 征,并验证溶解速率方程的可靠性。

通过裂隙溶蚀扩展模拟模型,模拟了试验条件下 (*J*=0.031)裂隙溶蚀扩展过程,得出了 Ca²⁺浓度与溶蚀 速率的相关关系,图 5 为数值模拟与室内试验的 Ca²⁺ 浓度-溶蚀速率曲线对比。由图 5 中可以看出: Ca²⁺浓 度与溶蚀速率的相关关系呈现为既有线性关系也有 非线性关系,整条裂隙 Ca²⁺浓度处于 0.046*c*_{eq} ~ 0.9*c*_{eq} 之间。在裂隙的上游由于初始溶液中 Ca²⁺浓度很低, 使得该段裂隙水流中 Ca²⁺的浓度差较大,远离溶解平 衡状态,因此靠近裂隙入口处(源头)的溶蚀扩展速率 最快,裂隙上游段将产生线性溶蚀区,但随着溶蚀扩 展的进行,裂隙水流中 Ca²⁺浓度是沿程增大的,当溶液





中 c(Ca²⁺)=0.4c_{eq}时,裂隙溶蚀扩展速率将由快速的线 性溶蚀阶段转变为以非线性规律变化的缓慢溶蚀阶 段,溶蚀速率呈双曲线关系递减。

通过对碳酸盐岩裂隙溶蚀扩展过程进行数值模 拟研究,认为模拟所得 Ca²⁺浓度与溶蚀速率的相关关 系与室内溶蚀试验的结果基本一致,模拟值与试验值 吻合度较好,表明通过室内试验和数值模拟所构建的 溶解速率方程具有较高的可信度,可用来定量分析碳 酸盐岩的发育演化。

4 结论

(1)欠饱和态时,在 CO₂作用下碳酸盐岩裂隙溶 蚀扩展的平均溶蚀速率增加了 1.82~2.29 倍,水中侵 蚀性 CO₂的浓度上升会加速碳酸盐岩的溶解;溶液 不同初始 Ca²⁺浓度在同等区间流量条件下,蒸馏水为 溶蚀溶液时 Ca²⁺浓度差值下降了 0.0915 mmol/L,3 组 不同初始 Ca²⁺浓度溶蚀溶液的 Ca²⁺浓度差值分别下降了 0.074 2,0.053 6,0.047 4 mmol/L,溶液初始 Ca²⁺浓度越 高对碳酸盐岩溶解抑制程度就越高。

(2)结果表明,模拟值与试验值拟合效果较好,建 立的溶蚀速率方程具有较高的可靠性,揭示了欠饱和 态时的溶解动力学变化,当溶液 c(Ca²⁺)<0.4c_{eq} 时溶解速率方程由线性速率定律控制,当溶液 Ca²⁺浓 度处于 0.4c_{eq}~0.9c_{eq},溶解速率方程将变为非线性关系。

参考文献(References):

- [1] 袁道先,章程.岩溶动力学的理论探索与实践[J].地 球学报,2008,29(3):355-365. [YUAN Daoxian, ZHANG Cheng. Karst dynamics theory in China and its practice[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29(3):355-365. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 李强.流域尺度岩溶碳循环过程——"岩溶作用与碳中和"专栏特邀主编寄语[J].地球学报, 2022, 43(4):
 421 424. [LI Qiang. Karst carbon cycle process at watershed scale: Guest editor's preface to "karst process and carbon neutralization"[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(4): 421 424. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 唐健生,夏日元,邹胜章,等.新疆南天山岩溶系统介 质结构特征及其水文地质效应[J].吉林大学学报(地 球科学版),2005,35(4):481-486. [TANG Jiansheng, XIA Riyuan, ZOU Shengzhang, et al. Characteristics of karst medium system and its hydrogeologic effect in the South Tianshan, Xinjiang[J]. Journal of Jilin University

(Earth Science Edition), 2005, 35(4): 481 – 486. (in Chinese with English abstract)]

- [4] 郭静芸,毕鑫涛,方然可,等.可溶岩化学溶蚀试验方法研究综述[J].水文地质工程地质,2020,47(4):24-34.
 [GUO Jingyun, BI Xintao, FANG Ranke, et al. Advances in the chemical dissolution methods of soluble rocks[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4):24-34. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 林云,任华鑫,武亚遵,等.不同赋存环境下碳酸盐岩溶蚀过程试验模拟研究[J].水文地质工程地质,2021,48(2):15-26. [LIN Yun, REN Huaxin, WU Yazun, et al. Experimental simulation of the carbonate dissolution process under different occurrence conditions [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021,48(2):15-26. (in Chinese with English abstract)]
- [6] WHITE W B. The role of solution kinetics in the development of karst aquifers[J]. Karst hydrogeology International Association of Hydrogeologists, 12th Memoirs, 2011: 503 - 517.
- [7] 刘再华, DREYBRODT W. 流动 CO₂-H₂O 系统中方解 石溶解动力学机制——扩散边界层效应和 CO₂转换 控制 [J]. 地质学报, 1998, 72(4): 340 - 348. [LIU Zaihua, DREYBRODT W. Dissolution kinetics of calcite in CO₂-H₂O solutions in turbulent flow: The role of the diffusion boundary layer and the slow reaction CO₂+H₂O H⁺+HCO₃⁻[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(4): 340 -348. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘再华, DREYBRODT W. 灰岩和白云岩溶解速率控制机理的比较[J]. 地球科学, 2006, 31(3): 411-416.
 [LIU Zaihua, DREYBRODT W, LI Huaju. Comparison of dissolution rate-determining mechanisms between limestone and dolomite[J]. Earth Science, 2006, 31(3): 411-416. (in Chinese with English abstract)]
- [9] BUHMANN D, DREYBRODT W. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 1. Open system[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1/2/3/4): 189 211.
- [10] BUHMANN D, DREYBRODT W. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas: 2. Closed system[J]. Chemical Geology, 1985, 53(1/2/3/4): 109 – 124.
- PLUMMER L N, WIGLEY T M L, PARKHURST D L. The kinetics of calcite dissolution in CO₂-water systems at 5 degrees to 60 degrees C and 0.0 to 1.0 atm CO₂[J]. American Journal of Science, 1978, 278(2): 179 – 216.
- [12] 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 化学), 2001, 31(4): 377 - 384. [LIU Zaihua, DREYBRODT W. Kinetics mechanism of dolomite dissolution under different CO₂ partial pressures[J]. Science in China, SerB, 2001, 31(4): 377 - 384. (in Chinese)]

- [13] KAUFMANN G, DREYBRODT W. Calcite dissolution kinetics in the system CaCO₃-H₂O-CO₂ at high undersaturation[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(6): 1398 – 1410.
- BUHMANN D, DREYBRODT W. The kinetics of calcite dissolution and precipitation in geologically relevant situations of karst areas[J]. Chemical Geology, 1985, 48(1/2/3/4): 189 211.
- [15] KAUFMANN G, BRAUN J. Karst aquifer evolution in fractured rocks[J]. Water Resources Research, 1999, 35(11): 3223 - 3238.
- DREYBRODT W. Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models[J]. Water Resources Research, 1996, 32(9): 2923 - 2935.
- DREYBRODT W, GABROVŠEK F. Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst[J].
 Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 2003, 1(1): 1 - 26.
- [18] PALMER A N. Origin and morphology of limestone caves[J]. Geological Society of America Bulletin, 1991, 103(1): 1-21.
- [19] 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.
- [20] PLUMMER L N, WIGLEY T M L. 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.
- [21] SVENSSON U, DREYBRODT W. Dissolution kinetics of natural calcite minerals in CO₂-water systems approaching calcite equilibrium[J]. Chemical Geology, 1992, 100(1/2): 129 – 145.
- [22] GABROVŠEK F, DREYBRODT W. Role of mixing

corrosion in calcite-aggressive H_2O-CO_2 -CaCO₃ solutions in the early evolution of karst Aquifers in limestone[J]. Water Resources Research, 2000, 36(5): 1179 – 1188.

- [23] KAUFMANN G. Modelling unsaturated flow in an evolving karst aquifer[J]. Journal of Hydrology, 2003, 276(1/2/3/4): 53 - 70.
- [24] BRANTLEY S L, KUBICKI J D, WHITE A F. Kinetics of mineral dissolution[J]. Springer New York, 2008, 10(5): 151 – 210.
- [25] MYERS T G. Modeling laminar sheet flow over rough surfaces[J]. Water Resources Research, 2002, 38(11): 1 – 12.
- [26] 刘再华, DREYBRODT W, 韩军, 等. CaCO₃-CO₂-H₂O 岩溶系统的平衡化学及其分析 [J]. 中国岩溶, 2005, 24(1): 1 - 14. [LIU Zaihua, DREYBRODT W, HAN Jun, et al. Equilibrium chemistry of the CaCO₃-CO₂-H₂O system and discussions[J]. Carsologica Sinica, 2005, 24(1): 1 - 14. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 许模,毛邦燕,张广泽,等.青藏高原东缘梯度带大气CO₂含量与岩溶发育相关性初探[J].成都理工大学学报(自然科学版),2020,47(6):724-732.[XU Mo, MAO Bangyan, ZHANG Guangze, et al. A preliminary study on correlation of atmospheric CO₂ concentration and karst development in the eastern margin of Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, 47(6): 724 732. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 高阳,邱振忠,于青春. 层流一紊流共存流场中岩溶裂隙网络演化过程的数值模拟方法 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 831 838. [GAO Yang, QIU Zhenzhong, YU Qingchun. Numerical simulation method for the karst development of carbonate fracture networks with both laminar and turbulent flow[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 831 838. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 武亚遵, 岑雷, 林云, 等. 河间隐伏型岩溶裂隙含水系 统演化的数值模拟 [J]. 中国岩溶, 2019, 38(6): 839 – 845. [WU Yazun, CEN Lei, LIN Yun, et al. Numerical simulation for the evolution of covered karst fissure system between rivers[J]. Carsologica Sinica, 2019, 38(6): 839 – 845. (in Chinese with English abstract)]

编辑:宗 爽