第35卷 第1期
2016年2月

中 国 岩 溶
CARSOLOGICA SINICA

Vol. 35 No. 1
Feb. 2016

武亚遵,林 云,万军伟,等.碳酸盐岩单裂隙渗流—溶蚀耦合模型及其参数敏感性分析[J].中国岩溶,2016,35(1):81—86.
DOI:10.11932/karst201601012

碳酸盐岩单裂隙渗流—溶蚀耦合模型及其参数敏感性分析

武亚遵[1],林 云[1],万军伟[2],王子杰[1]

(1.河南理工大学资源环境学院,河南 焦作 454000;2.中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430074)

摘 要:岩溶地下水系统是由碳酸盐岩裂隙含水介质演化形成的,系统初始的裂隙网络介质特征及边界条件决定了其演化过程。为揭示岩溶系统演化过程中裂隙介质特征和边界条件的影响程度,建立了裂隙溶蚀扩展的渗流—溶蚀耦合模型,并对不同边界条件下不同隙宽的单裂隙溶蚀扩展特征进行了模拟分析。结果表明:裂隙溶蚀扩展受水的侵蚀性(CO_2分压)、水动力条件(水力梯度)、裂隙介质特征(裂隙初始隙宽)等综合作用影响,Ca^{2+}的平衡浓度、水力梯度以及裂隙初始隙宽等参数的增加均能促进裂隙的快速扩展。在这些参数中,初始隙宽B_0对岩溶发育的影响最为敏感,水力梯度J和Ca^{2+}平衡浓度C_{eq}对岩溶发育具有相同的敏感性;此外,随着各参数值的不断增大,参数变化对岩溶发育的敏感程度越来越低。

关键词:渗流—溶蚀耦合模型;水头边界;流量边界;敏感因子

中图分类号:P641 **文献标识码**:A **文章编号**:1001—4810(2016)01—0081—06

0 引 言

我国岩溶分布面积广,受特殊的地质环境影响,岩溶地区资源环境问题突出,干旱缺水、洪涝和岩溶地面塌陷灾害频发,严重制约着当地经济、社会的发展[1-3]。这些问题的产生多与岩溶系统的结构特征有关,而岩溶系统的结构特征、规模和状态与其演化过程密切相关[4]。岩溶系统的规模和现今状态(以地下管道、溶穴为主的岩溶系统或以裂隙、溶蚀裂隙为主的岩溶系统)之所以千差万别,是因为其经历了不同的演化过程或处于不同的演化阶段,因此,岩溶演化过程的恢复重现有助于辨别岩溶含水系统的结构特征,为此,国内外学者进行了诸多的尝试。薛亮等再现了裂隙含水系统发育至岩溶含水系统过程中含水结构变化所诱发的河间地块分水岭消失这一现象[5],王云、王喆等模拟再现了裂隙岩溶含水系统演化过程中泉流量的变化特征[6-7],Gabrovšek等通过模拟模型,探讨了岩溶发育过程中水位变化与岩溶作用强度之间的关系以及地表水和地下水的混合作用对岩溶演化的影响[8-9]。尽管这些研究考虑了初始的裂隙介质特征对岩溶系统发育的影响,然而岩溶系统的演化过程是由系统初始的裂隙网络介质特征及边界条件共同决定的,初始的裂隙网络介质特征对后期岩溶地下水系统的规模和形态影响程度究竟有多大?边界条件的贡献又如何?尚无明确的结论。

单裂隙溶蚀扩展特征及规律研究是岩溶发育演化研究的前提和基础,尽管其与实际的岩溶发育演化有一定的差别,但其却能够揭示裂隙网络地下水系统向岩溶网络地下水系统演化过程中裂隙扩溶的时空变化规律以及地下水的侵蚀性(CO_2分压)、水动力条件(水力梯度)、裂隙介质特征(初始隙宽)等各因素的贡献。将具有不同裂隙特征的裂隙置于不同边界条件下进行模拟,并将其结果与现今的岩溶发育特征进行对比分析,可对岩溶发育过程中的介质条件和古地下水动力场有初步的了解,有助于更进一步认识岩溶发育演化规律,揭示岩溶演化机理,以便为岩溶环境演化和岩溶区自然资源的开发利用提供保障。为此,本研究建立了耦合渗流及隙面溶蚀动力学模型的裂隙溶蚀扩展模型,模拟了不同边界条件下不同隙宽的裂隙溶蚀扩展特征,并对其影响因素的敏感程度进行

基金项目:国家自然基金资助项目(41502224);河南理工大学博士基金资助项目(B2012—080)
第一作者简介:武亚遵(1981—)男,博士,讲师,主要从事水文地质工程地质的教学研究工作。E-mail:wuyazun@163.com。
收稿日期:2015—11—04

万方数据

了分析。

1 渗流—溶蚀耦合模型及其求解

1.1 数学模型

首先，做出如下假设：(1)裂隙为单一平板光滑裂隙，其开度 B_0 沿裂隙延伸方向处处相等；(2)裂隙内水流为稳定流；(3)碳酸盐岩的溶蚀速率主要由表面反应控制。

裂隙溶蚀扩展的渗流—溶蚀耦合模型主要由裂隙渗流模型和隙面溶蚀动力学模型两部分组成。

1.1.1 裂隙渗流模型

在光滑平板裂隙中，当水流为层流时，其符合“立方定律”，即通过光滑缝隙的单宽流量与裂隙隙宽的三次方成正比[10]。

$$q=\frac{\rho g B^3}{12\mu}\cdot J \tag{1}$$

式中，q —单宽流量(cm^2/s)；g —重力加速度(cm/s^2)；μ —水的动力粘滞系数(g/(cm·s))；J —水力梯度；ρ —水的密度(g/cm^3)；B —裂隙隙宽(cm)。

当水流呈紊流状态时，其不再符合“立方定律”。Ломмзе 和 Louis 等人对单裂隙水流的运动特征进行了大量的实验研究，提出了水流为紊流时($Re>600$)的计算公式为[11]：

$$q=4.7B\left[\frac{\rho g^4 J^4 B^5}{\mu}\right]^{\frac{1}{7}} \tag{2}$$

式中各参数同上。

1.1.2 隙面溶蚀动力学模型

在一定的假设条件下，矿物的反应速率可用数学模型进行刻画。当碳酸盐岩的溶蚀速率主要由表面反应控制时，其可用下式进行表征[12-14]：

$$F_{Ca^{2+}}=\begin{cases}K_1\left(1-\dfrac{C}{C_{eq}}\right), C<0.9C_{eq}\\ K_4\left(1-\dfrac{C}{C_{eq}}\right)^4, C\geqslant 0.9C_{eq}\end{cases} \tag{3}$$

式中，$F_{Ca^{2+}}$ —溶蚀速率($mol/(cm^2\cdot s)$)；K_1、K_4—溶蚀速率常数($mol/(cm^2\cdot s)$)；C_{eq} —钙离子平衡浓度(mol/cm^3)；C —某一时刻钙离子浓度(mol/cm^3)。

1.2 模型求解

为准确地刻画裂隙随时间的变化，需将裂隙划分成若干段，并认为每段内裂隙隙面溶蚀过程相同，然后进行求解。具体步骤如下：

(1)将裂隙分成若干段，并计算通过裂隙段的流量 Q；

(2)根据 i 段裂隙入口端的 Ca^{2+} 依据式(3)计算溶蚀速率 $F^i_{Ca^{2+}}$；

(3)利用公式 $d(Ca^{2+})=\frac{F^i_{Ca^{2+}}}{Q}\cdot 2B$ 计算第 i 段裂隙 Ca^{2+} 的增量。

(4)利用下式计算 i 段裂隙的溶蚀扩展速率：

$$\frac{dB_i}{dt}=\frac{F^i_{Ca^{2+}}M_r}{\rho_c}$$

式中，M_r 为碳酸盐岩的摩尔质量；ρ_c 为其密度；

(5)更新时间步长 $\triangle t$ 下第 i 段裂隙的宽度：$B_i=B_i+\frac{dB_i}{dt}\Delta t$

(6)回到第(1)步，计算下一时刻流量等，并不断进行(1)—(5)的循环，可计算任何时间任何一段的裂隙宽度，由此可形成一个完整的模拟单个裂隙溶蚀发展的数学模型。

2 不同条件下单裂隙溶蚀扩展特征

在裂隙发育演化过程中，不同初始介质条件和边界条件下，裂隙溶蚀扩展的特征不同，为探讨其差异性，本研究对长度为 1 000 m 的裂隙在第一类边界条件(水头边界)及第二类边界条件(流量边界)下的裂隙溶蚀扩展进行模拟计算，模型参数如表 1 所示。

表 1 单裂隙溶蚀扩展模型参数特征值

Table 1 Parameters used for the single fracture evolution model

参数名称	单位	取值	参数名称	单位	取值
Ca^{2+} 初始浓度 C_0	mol/cm^3	0	重力加速度 g	cm/s^2	9.81×10^2
Ca^{2+} 平衡浓度 C_{eq}	mol/cm^3	2×10^{-6}	水的动力粘滞系数 μ	g/(cm·s)	1.14×10^{-2}
线性溶蚀速率常数 K_1	$mol/(cm^2\cdot s)$	4×10^{-11}	时间步长 $\triangle t$	s	$3.153\,6\times10^7$
非线性溶蚀速率常数 K_4	$mol/(cm^2\cdot s)$	4×10^{-8}	水的密度 ρ	g/cm^3	1
碳酸盐岩的密度 ρ_c	g/cm^3	2.66	碳酸钙的摩尔质量数 M_r	g/mol	100

注：文中参数来源于文献[15,16]。

万方数据

2.1　第一类边界条件下单裂隙溶蚀扩展特征

图 1、2 分别为一定初始裂隙宽度，不同水力梯度下裂隙隙宽随水流方向和时间的扩展过程。从图中可以看出，在裂隙初始隙宽相同时，水力梯度越大，裂隙溶蚀加宽幅度越大，岩溶越发育。当裂隙初始宽度 $B_0=0.01$ cm 时，无论是水动力条件多好，经过 15 ka 的溶蚀后，尽管在裂隙段的源头处，裂隙溶蚀加宽的幅度较大，裂隙较宽，可达到数十厘米，但在裂隙段末端排泄口处，裂隙的溶蚀扩展幅度却很微小，尚不足 0.005 cm，此情况下，岩溶不易发育；同样，即便初始裂隙足够大（$B_0=0.06$ cm），但在微弱的水动力条件下（$J=0.005$），裂隙经过 10 ka 的溶蚀扩展后，裂隙后半段的宽度也仅增加了 0.01 cm，此情形下，裂隙也很难被溶蚀成大型的洞穴管道。

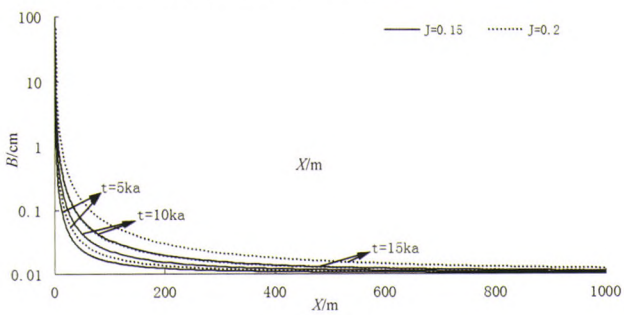

图 1　初始隙宽 $B_0=0.01$ cm 时，不同水力梯度下单裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 1　The dissolution widening curve of a single fissure on different hydraulic gradients when the initial fracture aperture is 0.01 cm

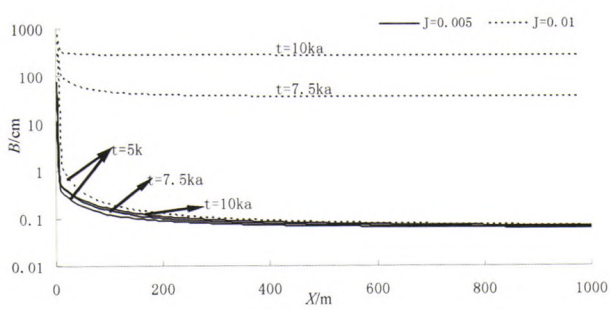

图 2　初始隙宽 $B_0=0.06$ cm 时，不同水力梯度下单裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 2　The dissolution widening curve of a single fissure on different hydraulic gradients when the initial fracture aperture is 0.06 cm

图 3、4 分别为一定水力梯度下，不同隙宽的裂隙其隙宽随水流方向和时间的扩展过程。从图中可以看出，在水力梯度一定的情况下，随着裂隙初始宽度的增加，裂隙溶蚀加宽幅度增大，裂隙将更容易发育成大型的管道。在水动力较弱时（$J=0.01$），闭合型（$B_0=0.05$ cm）的裂隙经过 10 ka 溶蚀后，尽管裂隙源头处的宽度较大，达到数米，但裂隙后半段的宽度仅为 0.075 cm，溶蚀扩宽量很小，在此情形下，岩溶不易发育，而裂开型（$B_0=0.06$ cm）裂隙则较易被溶蚀扩宽（图 3）。在水力梯度的足够大时，即便是闭合型裂隙在经历一定时间后也能发育成大型管道（图 4）。

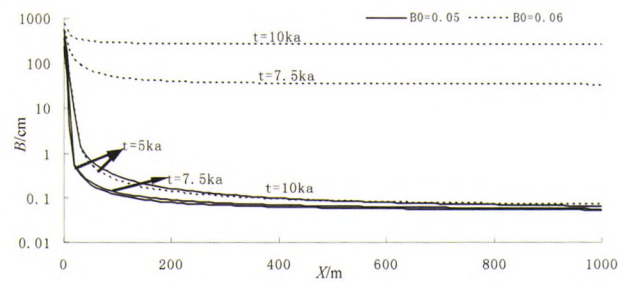

图 3　水力梯度 $J=0.01$ 时、不同初始隙宽下单裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 3　The dissolution widening curve of a single fissure on different initial apertures when the hydraulic gradient is 0.01

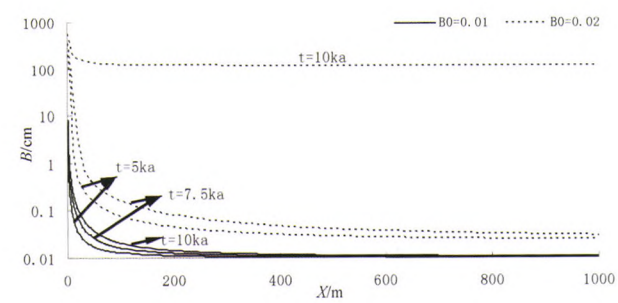

图 4　水力梯度 $J=0.1$ 时、不同初始隙宽下单裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 4　The dissolution widening curve of a single fissure on different initial apertures when the hydraulic gradient is 0.1

由以上分析可知：裂隙溶蚀扩展受裂隙几何形态（初始隙宽）和水动力条件（水力梯度）的共同影响。即便水动力条件很强（$J=0.2$），当初始隙宽小于0.01 cm 时，裂隙很难被溶蚀扩宽，即当岩体中裂隙较闭合时，岩溶不易发育；同样即便初始隙宽较大（$B_0=0.05$ cm），当水力梯度较小时，即使经过 10 ka 溶蚀后，裂隙也很难被溶蚀扩宽，即在岩体中水体流动滞缓的条件下，岩溶也不易发育。

2.2　第二类边界条件下单裂隙溶蚀扩展特征

利用耦合模型对第二类边界条件下裂隙的溶蚀扩展情况进行了模拟研究，发现：单裂隙中所通过的水量数量是裂隙溶蚀扩展的首要因素。从图 5 可以看出，当裂隙得到的补给流量较小时（$Q=1\ cm^3/s$），

万方数据

即使在裂隙初始隙宽较大($B_0=0.1$ cm)的情况下，经过 10 ka 后，尽管裂隙源头处具有较大的溶蚀宽度，但在裂隙后半段，裂隙基本上没被溶蚀扩展，在此情况下，裂隙很难发育成岩溶管道。同样，当裂隙得到的补给流量较大时($Q=100$ cm^3/s)，即使在裂隙较闭合($B_0=0.01$ cm)的情况下，经过 10 ka 后，裂隙也很容易被溶蚀扩宽(图 6)。

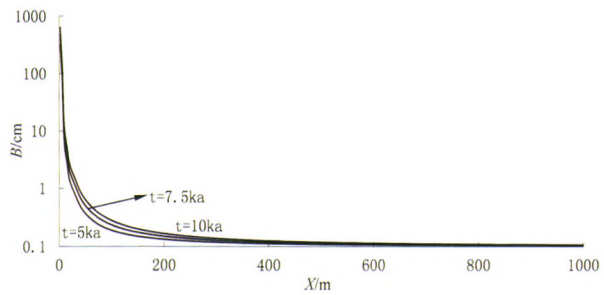

图 5 流量为 1 cm^3/s，隙宽为 0.1 cm 时裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 5 The dissolution widening curve when the flow rate is 1 cm^3/s and the fracture aperture is 0.1 cm

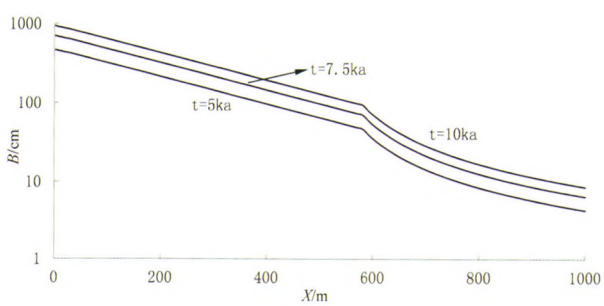

图 6 流量为 100 cm^3/s，隙宽为 0.01 cm 时裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 6 The dissolution widening curve when the flow rate is 100 cm^3/s and the fracture aperture is 0.01 cm

当裂隙隙宽相等时，通过的流量是控制裂隙溶蚀扩展的主要因素，流量越大，裂隙溶蚀扩展量就越大(图 7)；不同位置，裂隙溶蚀宽度的差异程度不同，在裂隙的初始端(源头处)，裂隙宽度相差不大，但在裂隙末端(排泄口出)裂隙的宽度差 1～2 个数量级。此外，裂隙溶蚀加宽速率$\triangle B/\triangle t$ 亦表现出与流量呈正比关系的特点(图 8)，在裂隙的源头处，当流量增大到原来的 10 倍，裂隙溶蚀加宽速率$\triangle B/\triangle t$ 增大到原来的 1.04～1.4 倍；而在排泄口处，当流量增大到原来的 10 倍，裂隙溶蚀加宽速率$\triangle B/\triangle t$ 增大到原来的 23～50 倍。

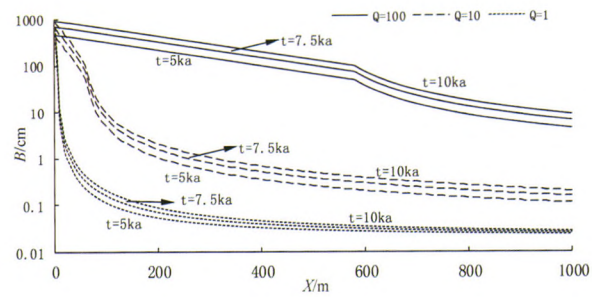

图 7 初始隙宽 $B_0=0.02$ cm 时，不同补给流量条件下裂隙溶蚀扩展曲线

Fig. 7 The dissolution widening curve on different flow rates when the initial aperture is 0.02 cm

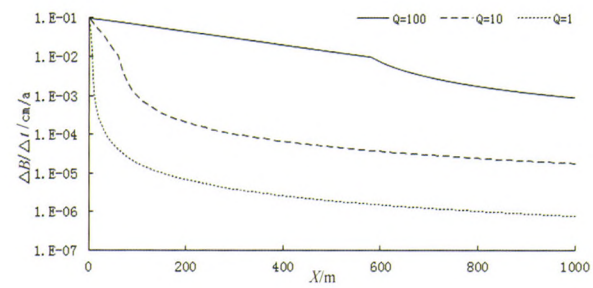

图 8 不同补给流量条件下裂隙溶蚀加宽速率曲线

Fig. 8 The dissolution rate curve on different flow rates

3 裂隙溶蚀扩展参数敏感性分析

从不同补给边界条件下裂隙溶蚀扩展特征和时空变化规律分析可知，裂隙的溶蚀扩展是水动力条件和裂隙介质特征共同作用的结果。此外裂隙的溶蚀扩展还与 Ca^{2+} 的平衡浓度有关。在裂隙溶蚀扩展过程中，当裂隙水流由层流变为紊流后，裂隙溶蚀速率增大，裂隙发育将进入活跃期[17]。因此，以裂隙溶蚀扩展中水流状态由层流变为紊流所需的时间(T_0)为量，来探讨水动力条件(水力梯度 J)、裂隙介质特征(初始隙宽 B_0)以及 Ca^{2+} 的平衡浓度等参数对裂隙溶蚀扩展的影响程度。

3.1 水力梯度 J 的影响

图 9 为 Ca^{2+} 平衡浓度一定(2×10^{-6} mol/cm^3)时，不同水力梯度(J)下，初始隙宽(B)与岩溶裂隙发育进入活跃期所需时间的关系图。从图中可以得知：B_0越大，T_0越小。说明初始隙宽越大，地下水由层流变为紊流所需的时间就越短，裂隙越易溶蚀加宽。J 越大，T_0越小。说明水交替条件越好，地下水由层流变为紊流所需的时间就越短，裂隙越易溶蚀加宽。

万方数据

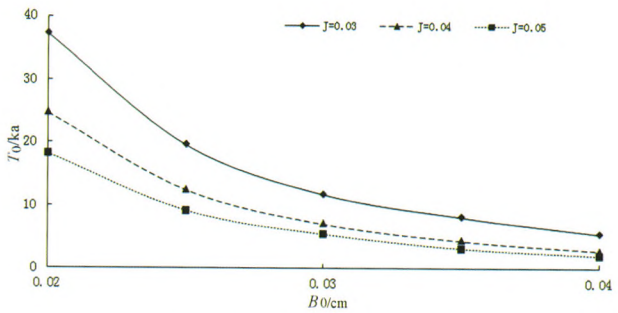

图 9　不同水力梯度下，初始隙宽与裂隙发育进入活跃期所需时间的关系

Fig. 9　The relationship between initial facture aperture and time length for the fracture starting to develop under different hydraulic gradients

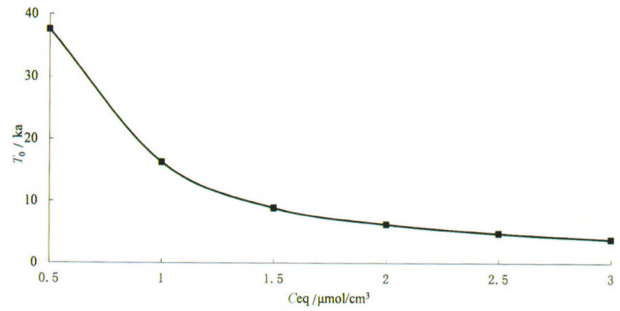

图 10　Ca^{2+} 平衡浓度与裂隙发育进入活跃期所需时间的关系

Fig. 10　The relationship between Ca^{2+} equilibrium concentration and time length to active development of the fracture

3.2　Ca^{2+} 平衡浓度的影响

图 10 为初始隙宽为 0.03 cm，水力梯度为 0.05 时，Ca^{2+} 平衡浓度与岩溶裂隙发育进入活跃期所需时间的关系图。从图中可以看出，C_{eq} 越大，T_0 越小，说明在初始隙宽和水力梯度一定时，Ca^{2+} 平衡浓度越大，地下水由层流变为紊流所需的时间就越短，裂隙越易被溶蚀加宽。

由以上分析可知：初始隙宽 B_0、水力梯度 J 以及 Ca^{2+} 的平衡浓度 C_{eq} 的增大，均可加快岩溶发育演化进程，但各参数究竟对岩溶发育的影响程度如何尚不清晰，为此，以第一类边界条件下初始隙宽 $B_0=0.04$ cm的裂隙，在水力梯度 $J=0.04$，Ca^{2+} 的平衡浓度 C_{eq} 为 2×10^{-6} mol/cm³ 条件下的裂隙中地下水由层流变为紊流所需的时间为基准，来探讨各参数变化对岩溶发育的影响程度（表 2）。

表 2　参数变化对岩溶发育的影响

Table 2　The influence of parameter variation on karst development

J	J 变化率 /%	T_0 /ka	T_0 变化率 /%	B_0 /cm	B_0 变化率 /%	T_0 /ka	T_0 变化率 /%	C_{eq} /μmol/cm³	C_{eq} 变化率 /%	T_0 /ka	T_0 变化率 /%
0.02	−50	9.41	6.59	0.02	−50	24.64	21.82	1	−50	9.41	6.59
0.03	−25	5.51	2.69	0.03	−25	7.07	4.25	1.5	−25	5.51	2.69
0.04	0	2.82	0	0.04	0	2.82	0	2	0	2.82	0
0.05	25	2.11	−0.71	0.05	25	1.33	−1.49	2.5	25	2.11	−0.71
0.06	50	1.61	−1.21	0.06	50	0.7	−2.12	3	50	1.61	−1.21

由表 2 可知，裂隙介质特征—初始隙宽 B_0 对岩溶发育的影响程度最大，其敏感性最强，这是因为在一类边界条件下，通过裂隙流量的大小与隙宽呈多次方关系；水动力条件—水力梯度 J 和水化学条件—Ca^{2+} 平衡浓度 C_{eq} 对岩溶发育具有相同的敏感性。随着各参数值的不断增大，参数变化对岩溶发育的敏感程度越来越低。

4　结　论

将裂隙渗流模型和隙面溶蚀动力学模型耦合，建立裂隙溶蚀扩展的渗流－溶蚀耦合模拟模型，并对不同补给边界条件下单裂隙扩展的特征以及裂隙溶蚀扩展过程中各参数对岩溶发育的敏感程度进行了分析研究，得出了如下结论：

（1）在第一类边界条件下，裂隙初始隙宽相同时，水力梯度越大，裂隙溶蚀加宽幅度越大，岩溶越发育；水力梯度相同时，裂隙初始隙宽越大，裂隙溶蚀加宽幅度越大，岩溶越发育。当岩体中裂隙较闭合时，岩溶不易发育；在岩体中水体流动滞缓的条件下，岩溶也不易发育。

（2）在第二类边界条件下，单裂隙中所通过的流量大小是裂隙溶蚀扩展的首要因素；当单裂隙中所通过的流量相等时，初始裂隙隙宽是控制裂隙溶蚀扩展的主要因素，初始裂隙隙宽越大，裂隙溶蚀扩展的量越大，但在同一位置处溶蚀加宽速率 $\triangle B/\triangle t$ 相等。

万方数据

(3)岩溶裂隙溶蚀扩展是裂隙介质特征－初始隙宽，水动力条件－水力梯度和水化学条件－Ca^{2+}的平衡浓度等相互间共同作用的结果。在这些参数中，初始隙宽 B_0 对岩溶发育的影响最为敏感，水力梯度 J 和 Ca^{2+} 平衡浓度 C_{eq} 对岩溶发育具有相同的敏感性；此外，随着各参数值的不断增大，参数变化对岩溶发育的敏感程度越来越低。

参考文献

[1] 袁道先. 我国岩溶资源环境领域的创新问题[J]. 中国岩溶，2015，34(2)：98－100.

[2] 袁道先. 新形势下我国岩溶研究面临的机遇和挑战[J]. 中国岩溶，2009，28(4)：329－331.

[3] 梁永平，王维泰，赵春红，等. 中国北方岩溶水变化特征及其环境问题[J]. 中国岩溶，2013，32(1)：34－42.

[4] 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，2002：100－108.

[5] 薛亮，于青春. 岩溶水系统演化中河间地块分水岭消失过程的数值模拟分析[J]. 水文地质工程地质，2009，36(2)：7－12.

[6] 王云，于青春，薛亮，等. 裂隙岩溶含水系统溢流泉演化过程的数值模拟[J]. 中国岩溶，2010，29(4)：378－384.

[7] 王喆，卢丽，夏日元，等. 岩溶地下水系统演化的数值模拟[J]. 长江科学院院报，2013，30(4)：201－206.

[8] Dreybrodt W, Romanov D, Kaufmann G. Evolution of isolated caves in porous limestone by mixing corrosion: A model approach[J]. Geologia Croatica, 2010, 63(2):129－135.

[9] Gabrovšek F, Dreybrodt W. Karstification in unconfined limestone aquifers by mixing of phreatic water with surface water from a local input: a model [J]. Journal of Hydrology, 2010, 386(1): 130－141.

[10] Snow D T. A parallel plate model of fractured permeable media [D]: University of California, Berkeley, 1965.

[11] 速宝玉，詹美礼. 光滑裂隙水流模型实验及其机理初探[J]. 水利学报，1994，(5)：19－24.

[12] Gabrovšek F, Dreybrodt W. A model of the early evolution of karst aquifers in limestone in the dimensions of length and depth[J]. Journal of Hydrology, 2001, 240(3－4): 206－224.

[13] Dreybrodt W, Gabrovšek F. Basic processes and mechanisms governing the evolution of karst[J]. Evolution of karst: from prekarst to cessation Postojna-Ljubljana: Zalozba ZRC, 2002: 115－154.

[14] Gabrovšek F, Romanov D, Dreybrodt W. Early karstification in a dual-fracture aquifer: the role of exchange flow between prominent fractures and a dense net of fissures[J]. Journal of Hydrology, 2004, 299(1－2): 45－66.

[15] Gabrovšek F, Menne B, Dreybrodt W. A model of early evolution of karst conduits affected by subterranean CO_2 sources [J]. Environmental Geology, 2000, 39(6): 531－543.

[16] 速宝玉，张文捷，盛金昌，等. 渗流－化学溶解耦合作用下岩石单裂隙渗透特性研究[J]. 岩土力学，2010，31(11)：3361－3366.

[17] 武亚遵，万军伟，林云，等. 岩溶演化过程中含水介质的时空变化特征研究[J]. 河南理工大学学报：自然科学版，2015，34(2)：216－221.

Coupled fluid flow and dissolution model and associated parameter sensitivity analysis in a single carbonate rock fracture

WU Ya-zun[1], LIN Yun[1], WAN Jun-wei[2], WANG Zi-jie[1]

(1. *Institute of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan* 454003, *China*;
2. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei* 430074, *China*)

Abstract Karst groundwater system is evolved from fracture water bearing medium of carbonate rock; the evolution process of this system is determined by the initial fracture network characters and boundary conditions. In order to reveal the influence degree of fracture medium and boundary conditions on the evolution of karst system, the fracture dissolution model which coupled fluid flow and dissolution was established, and the characteristics of single fracture propagation under different boundary conditions were simulated and analyzed. The results show that the increase of fracture aperture due to karst water dissolution process, rise of hydraulic gradient, initial fracture aperture and equilibrium calcium concentration will accelerate the karst evolution. Among these parameters the initial fracture aperture influences the process most significantly, while hydraulic gradient and equilibrium calcium concentration have the same remarkable impact. Moreover, with the increase of the parameter values, the parameter sensitivity gets much smaller.

Key words fluid flow and dissolution model, water head boundary, flow boundary, sensitive factor

（编辑　吴华英）

万方数据