

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.345>



非达西裂隙流对渗透性基岩中流场及溶质羽的影响

李一鸣, 文章*

中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

摘要: 以基岩渗流方向与裂隙轴向呈 45 度角为例, 探讨了当裂隙轴向与基岩水流斜交时, 裂隙流的非达西程度对流场及溶质运移的影响. 使用 Comsol Multiphysics 多物理场仿真软件构建了一个在中部包含水平单裂隙的正方形多孔介质模型, 裂隙中的非达西流用 Izbash 方程去刻画, 裂隙的上游基岩中存在持续的溶质源. 随着裂隙水流的非达西程度逐渐增强, 流场及污染物分布表现出如下特征: (1) 裂隙中水流流速逐渐增大; 流线在裂隙与基岩界面处的折射逐渐偏离折射定律; (2) 裂隙水流的流向逐渐偏向基岩水流的渗流方向; (3) 溶质羽宽度变宽但对称性逐渐降低; (4) 溶质在水平方向上的浓度峰值逐渐降低, 右侧浓度逐渐升高; (5) 裂隙产生的回弥散对溶质运移作用逐渐增强, 使裂隙中更多的溶质运移到了上层基岩中. 总体而言, 裂隙流的非达西程度对流场及污染物分布有着显著的影响.

关键词: 非均质地层; 优先流; Izbash 方程; 溶质运移; 溶质羽; 环境地质.

中图分类号: P641.69

文章编号: 1000-2383(2020)02-693-08

收稿日期: 2018-12-27

Impacts of Non-Darcian Flow in the Fracture on Flow Field and Solute Plumes in a Fracture-Aquifer System

Li Yiming, Wen Zhang*

School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this study, a mathematical model with the intersection angle between the flow direction and the x axial direction of 45degree was developed to investigate the effect of non-Darcy parameter n on flow field and solute migration when flow is oblique crossing the fracture. The Comsol Multiphysics software was used to do such numerical simulation. The simulation area was assumed to be square with a horizontal fracture embedded in the middle. The flow in the fracture was assumed to be non-Darcian and can be described by the Izbash equation. A constant solute source has been assigned in the upper matrix. The results indicate the following phenomena as the power index in the Izbash equation(n) increases: (1) the fracture flow velocity increases, and the flow line at the matrix-fracture interfaces gradually deviates from the classical fraction law; (2) the flow direction in fracture gradually turns to the direction in the matrix;(3) the width of solute plume increases, while the symmetry of solute plume reduces; (4) the peak solute concentration in the horizontal section diminishes, and the solute concentration on the right sight of the model increases; (5) the effect of back dispersion caused by fracture on solute plume becomes stronger, which results in more solutes in the fracture migrated to the upper matrix. Overall, the non-Darcy flow fracture has a significant impact on the flow field and solute distribution.

Key words: heterogeneous media; preferential flow region; Izbash equation; solute transport; solute plume; environmental geology.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 41772259, 41372253); 中央高校基本科研业务费专项基金项目.

作者简介: 李一鸣(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水流及溶质运移数值模拟工作. ORCID: 0000-0001-5609-5684. E-mail: kidult-lym@qq.com

* **通讯作者:** 文章, ORCID: 0000-0001-9672-3219. E-mail: wenz@cug.edu.cn

引用格式: 李一鸣, 文章, 2020. 非达西裂隙流对渗透性基岩中流场及溶质羽的影响. 地球科学, 45(2):693-700.

0 引言

复杂的地质作用和沉积过程会使地下多孔介质区域具有强烈的非均质性,往往形成如裂隙或喀斯特等具有高于基岩渗透性的区域,这些区域的水流在地下水流场中会表现出优先流特性(Preferential Flow Features, PFF)(Bear *et al.*, 1993; Berkowitz *et al.*, 2002; Sebben and Werner, 2016). 当研究尺度较大时通常采用等效介质来表征非均质地层整体的水文特性(Tsang, 2000; 宋晓晨和徐卫亚, 2004),但是非均质地层中裂隙的渗透性往往大于基岩渗透性几个数量级,这使得用等效介质的方法得到的渗流场往往不能很好的表征真实的流场(Long *et al.*, 1982; Kessler and Hunt, 1994; Vujević *et al.*, 2014; 覃荣高等, 2014; Sebben *et al.*, 2015; 高瑜等, 2016).

在地下岩体中,高渗透性区域的空间延展特性复杂多变,裂隙轴向与基岩水流的渗流方向往往不是简单的平行或垂直的关系,使非均质介质中渗流以及溶质运移的情况更加复杂(程汉鼎等, 2007). 因此高渗透性区域对多孔介质渗透性基岩中水流及溶质运移的影响不可忽视,且对其进行更深入的研究显得尤为必要(Odling and Roden, 1997; Sebben *et al.*, 2015; Sebben and Werner, 2016). 比如, Sebben and Werner (2016) 构建了二维模型来探究当均质基岩中存在持续溶质源,且溶质源下游存在一个主轴方向与基岩流场方向呈 45° 的等宽裂隙时,基岩和裂隙的渗透系数比值和裂隙宽度对溶质羽的影响. 研究中的裂隙相对于基岩会表现出高渗透性优先流(PFF)或低渗透性阻隔流(Barrier Flow Feature, BFF)特性. Robinson and Werner (2017) 求解出了当二维稳定流场中的溶质源下游存在任意轴向裂隙时,溶质在空间分布的解析解. 值得一提的是在他们的研究中渗流场均服从达西定律,但是很多情况下高渗透性裂隙中由于孔隙或流速较大往往发生非达西流现象(钱家忠等, 2003).

本文在 Sebben and Werner (2016) 研究的基础上,考虑了当高渗透性裂隙中水流的渗流规律不符合达西定律时的情况,并用 Izbash 方程来描述裂隙中水流速度与压力的关系,探讨了 Izbash 方程的非达西系数 n 对稳定状态下流场、溶质分布以及回弥散作用强度的影响,并与达西流裂隙的结果进行了对比. 本文的研究成果对于裂隙构造上游出现持续

污染物(如垃圾填埋场或核废料)时污染物时空分布的预测和岩溶区示踪实验解译以及裂隙含水层中污染物迁移规律具有一定指导意义.

1 数值模型建立

1.1 溶质运移模型

1.1.1 概念模型 本文使用多物理场仿真模拟软件 Comsol Multiphysics 来构建数值模型. Comsol Multiphysics 是一款基于有限元法的多物理场数值仿真软件,可以通过不同物理场间相同参数的联系来耦合不同物理场来达到计算数值模型的目的(徐亚等, 2014). 本文的研究中需要进行不同物理场之间的耦合连续和数值调用, Comsol Multiphysics 可以达到这些目的.

如图 1 为概念模型示意图,模型区域概化为一个二维 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的正方形多孔介质地下水区域,模型左下角为坐标原点. 一条隙宽($2b$)为 0.01 m 的水平裂隙贯穿模型,将模型区域分割为上基岩—裂隙—下基岩 3 部分,裂隙上下边界纵坐标分别为 0.50 m 和 0.51 m . 模型假定基岩及裂隙渗透系数分别为 $1 \times 10^{-5}\text{ m/s}$; $1 \times 10^{-4}\text{ m/s}$, 即基岩与裂隙渗透系数比值(K_m/K_f)为定值 0.1 . 基岩水流假定为达西流,裂隙水流由于流速较大所以假定其为非达西流并用 Izbash 方程描述. 模型 4 条边界分别用不同的线性压力去刻画,从顶部顺时针 4 条边界的线性压力分布分别为 $P_1; P_2; P_3; P_4$. 上述的边界条件会使模型水流方向如图 1 中所示,即基岩中水流方向与裂

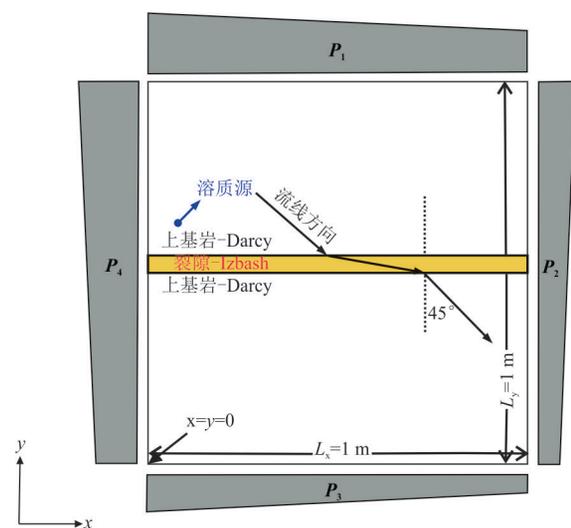


图 1 概念模型及水流流向示意图

Fig.1 Schematic diagram of conceptual model and flow direction

隙轴向呈45°指向右下.由于裂隙的渗透系数大于基岩的渗透系数,裂隙水流流向会在上下边界处发生折射而偏向水平方向.裂隙的左上方有一条宽度极小的定浓度溶质源位于(0.1, 0.560 0)至(0.1, 0.560 1)处.溶质会随着水流运移,经过足够长时间后在模型区域内形成稳定的溶质分布.

裂隙水流流态可以依据雷诺数来判定:

$$R_e = \frac{vD\rho}{\mu}, \quad (1)$$

式中: R_e 为雷诺数(-); v 为水流流速(m/s); ρ 为流体密度(kg/m³); μ 为运动粘滞系数(Pa·s); D 为裂隙特征长度(m).当由于裂隙或孔隙较大,或水力梯度较大,使得水流雷诺数大于1~10之间的某一值时,地下水水力梯度和渗流速度不再呈线性的关系而偏离线性达西定律,本文采用Izbash方程描述非达西现象(Basak, 1977):

$$J = \alpha v^n \quad (1 \leq n \leq 2), \quad (2)$$

式(2)为Izbash方程,其中: J 为水力梯度(-); n 为非达西系数(-), n 值的变化代表了裂隙水流流态从达西流态($n=1$)到非达西流态($n>1$)及紊流流态($n=2$)之间的转换,裂隙水流的非达西程度随着 n 值增大而变强; α 为经验参数(sⁿ/mⁿ),当 $n=1$ 时 α 可以视为渗透系数.

1.1.2 边界条件及控制方程 由于Comsol Multiphysics软件没有内置Izbash方程物理场接口,所以需要在自定义方程中将Izbash方程写入Comsol Multiphysics中构建自定义物理场模块,在不同物理场的交界面处进行耦合来完成模型的建立.本文模型在裂隙-基岩界面处有:

$$P_D = P_1; Q_D = Q_1, \quad (3)$$

式中: P 为压力(Pa); Q 为单位时间通过界面的水量(kg);下标I和D分别代表Izbash非达西区域以及达西区域,这样的边界条件使界面处的压力连续且符合质量守恒定律.整个模型控制方程和边界条件为:

$$\begin{cases} J_1 = -K_1 v_1^n & (1.0 \leq n \leq 1.4) \\ J_D = -K_D v_D^n \\ P(x, 1, t) = P_1 = 2000 - 1000 \cdot x \\ P(1, y, t) = P_2 = 1000 \cdot y \\ P(x, 0, t) = P_3 = 1000 - 1000 \cdot x \\ P(0, y, t) = P_4 = 1000 + 1000 \cdot y \\ \frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(D \cdot \nabla C) - V \cdot \nabla C \\ C(0.1, y, t) = C_s \quad (0.560 0 \leq y \leq 0.560 1) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: J_1, J_D 分别为当流态为非达西和达西时的水力梯度(-); v_1, v_D 分别为裂隙和基岩中的渗流流速(m/s); K_1, K_D 分别为裂隙和基岩的渗透系数(m/s); C 为模型区域溶质浓度(mol/m³), C_s 为溶质源处的浓度值(mol/m³).表1为模型的主要参数符号及默认取值.当 $n \geq 1.4$ 时,溶质羽的结果相差不大,故本文模型中 n 的取值为1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4.

1.2 网格剖分及时间步长

模型使用自由三角形网格来划分整个模型区域.为了在保证正确性的基础上减少计算量,模型细化了在裂隙中和裂隙附近以及溶质源附近的网格,在其他位置使用相对较大的网格.整个模拟区域共划分成209 178个三角形网格,105 028个网络节点,3 219条边.

模型的计算步骤分为两步:(1)先使用稳态求解器求解出稳定状态下模型区域得到流场分布;(2)使用瞬态求解器将步骤1得到的流场耦合入ADE方程计算溶质的运移分布.当每个节点的浓度值不随时间变化时说明整个模型区域溶质分布达到稳定.Comsol Multiphysics使用自适应时间步长来计算有限元数值模型,本文模型模拟的总时长为100 h,时间步长为0.1 h.模型区域每个节点的浓度值在100 h后不再发生改变,可以认为此时模型区域溶质分布达到稳定.

表1 模型参数及默认值

Table 1 Parameters used in this study and default values

参数名称	符号	默认取值
高渗透性裂隙	PFF	
参考等值线浓度	C_0	0.001 (mol/m ³)
溶质源浓度	C_s	1 (mol/m ³)
基岩孔隙度	θ_m	0.1
基岩渗透系数	K_m	1×10^{-5} (m/s)
纵向弥散度	α_l	5×10^{-3} (m)
横向弥散度	α_t	5×10^{-4} (m)
裂隙隙宽	$2b$	0.01 (m)
裂隙孔隙度	θ_f	0.2
裂隙渗透系数	K_f	1×10^{-4} (m/s)
基岩渗流速度	V_m	$\approx 1.44 \times 10^{-6}$ (m/s)
裂隙渗流速度	V	-
非达西系数	n	1.0~1.4
基岩渗流角度	δ	45°
裂隙渗流角度	θ	-
流线位移	D_{fl}	-
裂隙下边界浓度峰值位移	D_c	-

2 结果分析

2.1 数值模型验证

图 2 为裂隙下边界流线位移 D_n 和溶质峰值位移 D_c 示意图. δ, θ 分别为基岩水流和裂隙水流相对于基岩-裂隙交界面的折射角, 由于基岩中水力梯度及水流流态不变, 故 δ 为定值 45° . D_n 代表流线经过裂隙时的横向位移, 其值为 $D_n = 2b \cdot \tan \theta$; D_c 代表了水平方向最大浓度经过裂隙时产生的横向位移, 其值为下边界浓度最大值点的横坐标减去溶质源所在流线与裂隙上边界交点的横坐标 (即 0.15m).

为了验证 Comsol Multiphysics 软件在模拟非均质介质溶质运移时的准确性, 本文将相同参数下 Comsol Multiphysics 软件的数值解与 Robinson and

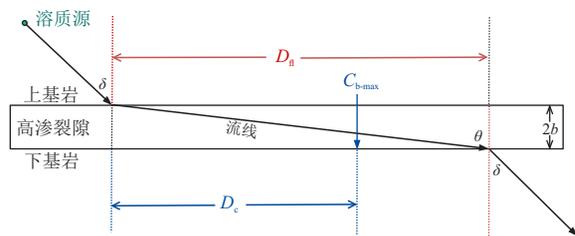


图 2 裂隙下边界流线位移 (D_n) 和溶质峰值位移 (D_c) 示意图

Fig.2 Schematic diagram of flow line displacement (D_n) and peak solute concentration displacement (D_c)

Werner (2017) 的解析解进行了对比并列于如表 2, 可以看出二者的浓度峰值位移 (D_c) 与浓度峰值 (C_{b-max}) 结果吻合较好, 说明 Comsol Multiphysics 软件的结果是可信的.

2.2 对比参数的定义

图 3 为: (a) 当模型不存在裂隙, 即裂隙区域处的渗透系数与基岩渗透系数相同时; (b) 裂隙水流的非达西系数 $n=1$ 时的流场及溶质分布对比图. 图中白色箭头的指向代表渗流速度方向, 基岩水流方向与水平方向呈 45° 角. 绿色线为浓度等于参考浓度 C_0 的等值线. 为了便于分析溶质羽形态, 本文定义裂隙下边界处浓度大于 C_0 的区域长度为溶质羽宽度 W ; 裂隙下边界浓度峰值到左侧参考浓度的距离为左羽宽 (W_l), 到右侧参考浓度的距离为右羽宽 (W_r), 比值 W_l/W_r 表示溶质羽对称性.

2.3 非达西系数对流场的影响

图 4 为不同非达西系数 n 取值时, 裂隙总流速及其在 x 和 y 方向上的分量值 (分别为 V_x 和 V_y) 的大小, 可以看出裂隙水流流速与 n 值呈正相关. 这是因为裂隙水流的非达西现象随着 n 值的增大而增强, 裂隙水流中惯性力相对于粘滞力的比例逐渐增大, 使流速逐渐增大. 但相对于 x 方向分量来说流速的 y 方向分量非常小, 所以速度的水平分量与总流速非常接近. 裂隙水流速及其在 x, y 方向上分量的具体数值列于表 3.

表 2 Comsol Multiphysics 数值解与 Robinson and Werner (2017) 解析解对比

Table 2 Comparison between numerical results of Comsol Multiphysics and analytical solutions of Robinson and Werner(2017)

$2b(\text{cm})$	浓度峰值位移 D_c (m)		浓度峰值 C_{b-max} (mol/m^3)	
	Robinson and Werner (2017)	Comsol Multiphysics	Robinson and Werner (2017)	Comsol Multiphysics
0.25	0.000 95	0.000 95	0.112 88	0.111 44
0.50	0.002 20	0.002 33	0.104 17	0.103 30
1.00	0.040 90	0.041 00	0.028 36	0.028 38
2.00	0.102 86	0.103 00	0.016 46	0.016 46

表 3 不同情况下裂隙流场的结果.

Table 3 Characteristics of flow field in the fracture

n	不存在裂隙	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
V (m/s)	1.44×10^{-6}	1.00×10^{-5}	2.90×10^{-5}	6.98×10^{-5}	1.46×10^{-4}	2.74×10^{-4}
V_x (m/s)	1.02×10^{-6}	9.95×10^{-6}	2.88×10^{-5}	6.93×10^{-5}	1.45×10^{-4}	2.71×10^{-4}
V_y (m/s)	1.02×10^{-6}	9.95×10^{-7}	3.20×10^{-6}	8.40×10^{-6}	1.90×10^{-5}	3.84×10^{-5}
$\tan \theta$	1.00	10.00	9.00	8.25	7.62	7.07
θ ($^\circ$)	45.0	84.2	83.7	83.0	82.3	81.9

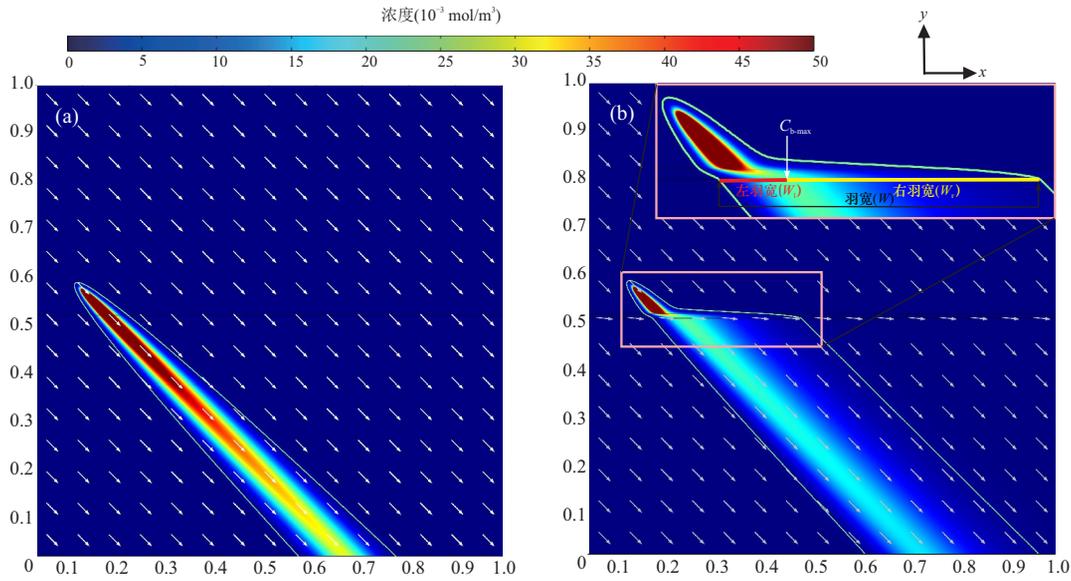


图 3 流场及溶质分布示意图

Fig.3 Schematic diagrams of flow field and solute distribution

a. 模型不存在裂隙;b. 存在裂隙且 $n=1$ 时

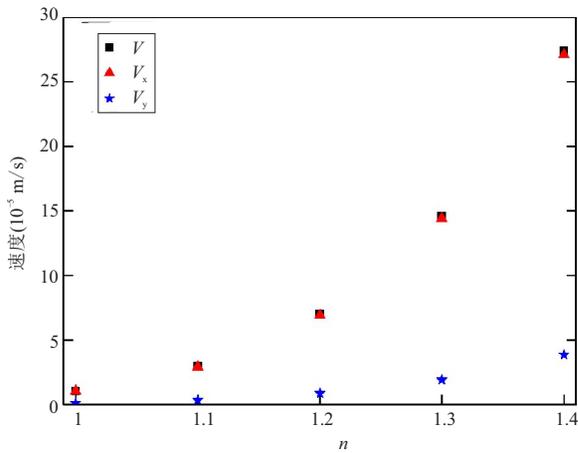


图 4 不同 n 取值时,裂隙中流速(V)及其在 x 和 y 方向上的分量值($V_x; V_y$)

Fig.4 The velocity and the component of velocity on x and y axes in the fracture for different n values

表 3 为当模型不存在裂隙或不同裂隙非达西系数 n 取值时, V 、 V_x 、 V_y 、 $\tan\theta$ 以及 θ 的值. 图 5 为基于表 3 数据的流线在裂隙—基岩界面的折射示意图. 结合表 3 和图 5 可以看出: 由于本文裂隙基岩渗透系数的比值 (K_f/K_m) 为 10, 当 $n=1$ 时 $\tan\theta=10=\tan\delta\times K_f/K_m$, 此时流线在裂隙边界的折射服从 (5) 式的折射定律. 当 n 逐渐增大, 裂隙水流变为非达西流且非达西程度逐渐增加. $\tan\theta$ 值逐渐降低, 即裂隙中水流折射角 θ 与非达西系数 n 呈负相关, 基岩—裂隙界面处流线的折射逐渐偏离折射定律.

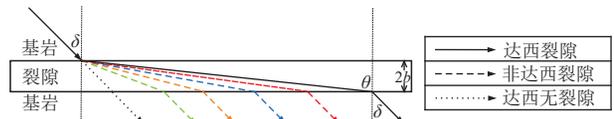


图 5 不同情况下流线在裂隙与基岩界面处的折射示意图

Fig.5 Schematic diagram of flow line refraction at the matrix-fracture interfaces for different conditions

$$\frac{\tan \delta}{\tan \theta} = \frac{K_m}{K_f}, \tag{5}$$

2.4 非达西裂隙流对溶质羽的影响

2.4.1 溶质羽形态随 n 的变化 图 6 为不同参数下溶质羽形态结果, 图中绿色线为溶质浓度为参考浓度 ($C_0=0.001 \text{ mol/m}^3$) 的参考等值线, 参考等值线的形状可以大致表征溶质羽的形态. 可以看出若不存在裂隙, 溶质将会在模型区域中形成规整, 且以溶质源所在的流线为轴对称的溶质羽形态, 如图 6a 所示. 但当高渗裂隙存在时, 由于裂隙流场的变化, 溶质羽在整个模型区域的分布也会受到影响. 当存在裂隙且非达西系数 $n=1.0, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4$ 时溶质羽分布如图 6b~6f 所示. 虽然表 3 中裂隙渗流角度 θ 会随着 n 值的增大而减小, 但可以看到模型右侧区域的溶质浓度却会逐渐增大. 这是由于裂隙流速随着 n 的增加而增大, 使进入裂隙的溶质在 x 正方向上的运移距离增加, 左侧溶质源所在流线附近的溶质浓度值降低, 最终导致溶质羽的中心右移且

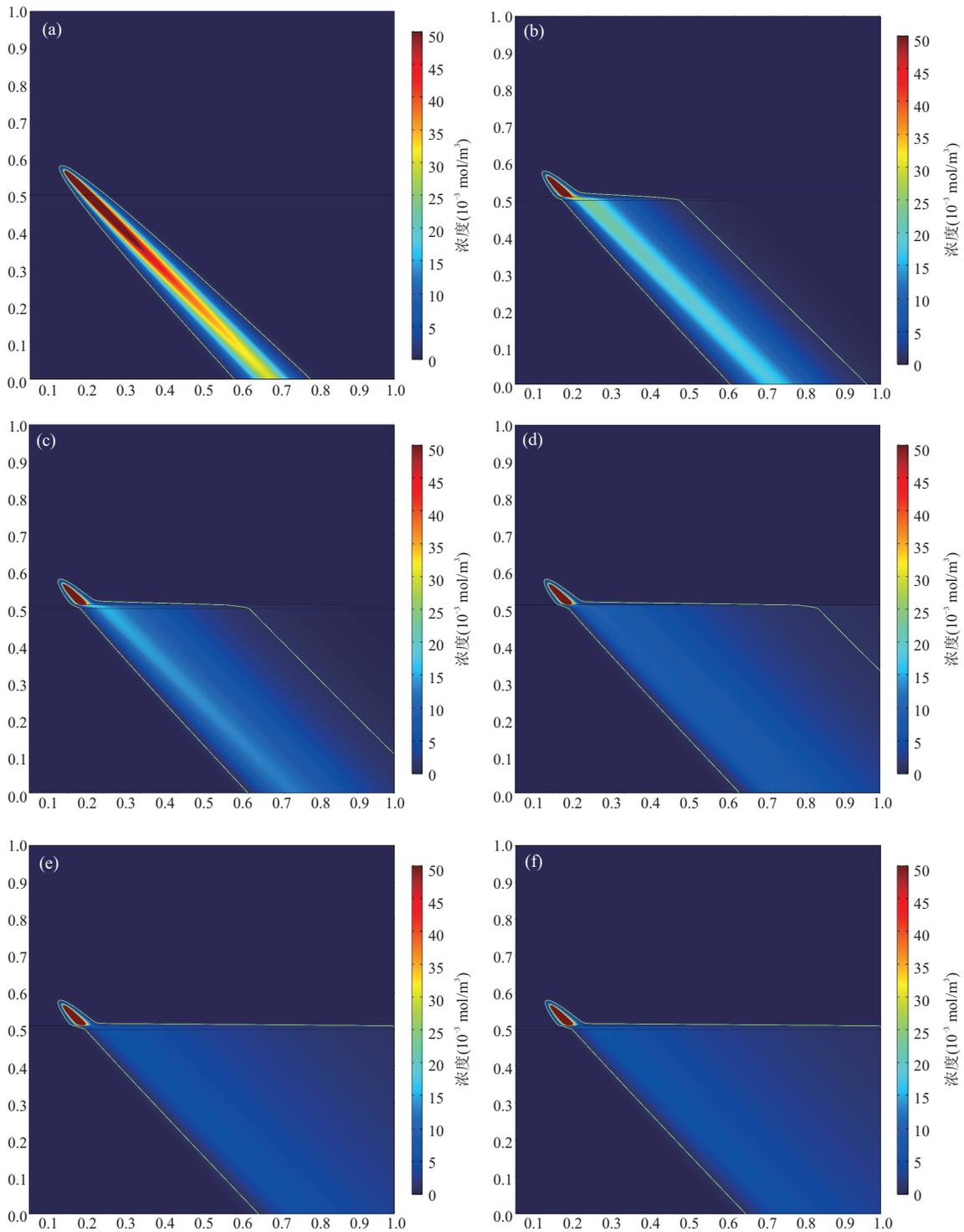


图6 溶质羽的分布

Fig.6 Solute plume distributions

a. 不存在裂隙; b. $n=1.0$; c. $n=1.1$; d. $n=1.2$; e. $n=1.3$; f. $n=1.4$ 时

溶质羽形态逐渐发散。

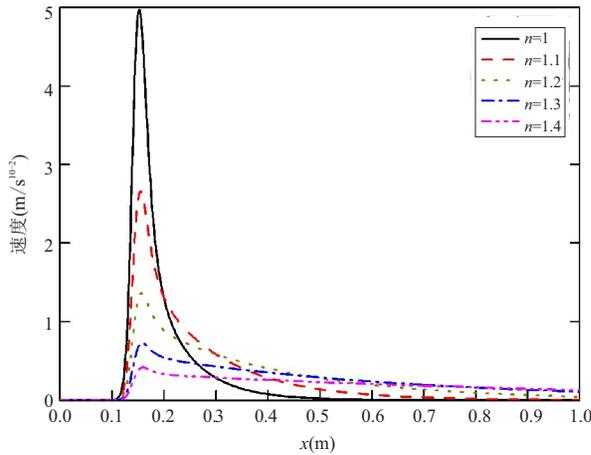
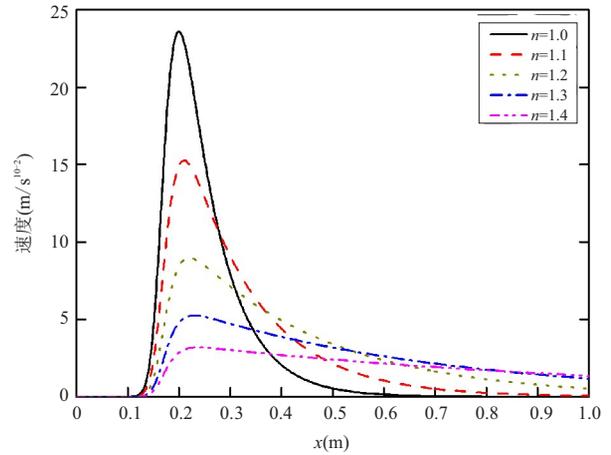
通过分析图6中参考等值线形态可以判断溶质羽的形态。可以看出随着 n 值的增加,溶质羽整体的对称性逐渐变差。当 $n \geq 1.3$ 时等值线与上基岩右边界相交,此时由于模拟区域有限并不能完整的展示

出溶质羽的形态特征。

2.4.2 回弥散作用分析 由模型参数可知上基岩的流场不随裂隙流场变化而变化,所以理论上溶质在上基质中的分布不会随着处在下游的裂隙的流场,即 n 值大小的变化而改变。但从图6中可以看出, n

表 4 不同情况下 C_{b-max} 、 D_c 和 D_n 的值Table 4 Values of C_{b-max} , D_c and D_n for different conditions

n	无裂隙	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4
$C_{b-max}(\text{mol}/\text{m}^3)$	0.089 5	0.023 6	0.015 25	0.009 0	0.005 24	0.003 18
$D_n(\text{m})$	0.010 0	0.110 0	0.100 00	0.092 5	0.086 20	0.080 70
$D_c(\text{m})$	0.010 0	0.050 0	0.060 00	0.070 0	0.078 50	0.086 00

图 7 不同 n 取值时裂隙上边界浓度分布Fig.7 Solute distributions at the upper boundary of the fracture for different n values图 8 不同 n 取值时裂隙下边界浓度分布Fig.8 Solute distributions at the bottom boundary of the fracture for different n values

值的变化造成的裂隙流场的改变会对上游基岩中溶质的分布产生影响.图7为不同 n 取值时裂隙上边界浓度值,可以看出随着 n 值增大,上边界右侧浓度上升.说明由于裂隙与上基岩存在浓度差,使部分裂隙右侧的溶质向上运移进入了上基岩.这种溶质沿着浓度梯度却逆着压力梯度运移的现象被称为回弥散现象:upstream - dispersion (Konikow, 2011) 或 back - dispersion (Sebben and Werner, 2016).当 $n=1.0$ 时回弥散作用对上基岩中溶质分布的影响可以视为最小.相比于 $n=1.0$ 时的结果,随着 n 值的增加,上基岩溶质浓度的变化逐渐增大,回弥散作用对上基岩中溶质分布的影响逐渐增强.

2.4.3 裂隙下边界浓度分析 图8不同 n 取值时裂隙下界面的浓度分布,从图中可以看出随着 n 值增加,裂隙下界面浓度峰值 C_{b-max} 逐渐减小,溶质羽宽度 W 逐渐增加,溶质羽的对称性逐渐降低.这是由于较大 n 值会使裂隙流速增大,产生更强的对流作用导致了浓度峰值的衰减.水平方向流速增大使溶质羽宽度增大,但可以明显看出 W_l/W 逐渐减小,溶质羽对称性降低.

表4为有无裂隙及不同 n 取值时下边界峰值 C_{b-max} ;溶质峰值位移 D_c ;下边流线位移 D_n 的值.可

以看出随着 n 值增大,裂隙中的溶质更多的向右运移使 C_{b-max} 逐渐降低. D_n , D_c 分别与 n 呈负相关和正相关. Robinson and Werner (2017); Sebben and Werner (2016) 分别通过数值和解析的方法证明了在裂隙流为达西流时,裂隙下边界浓度峰值位移值 D_c 会小于流线位移值 D_n ,从表4中可以看出本文在当 n 小于一个特殊值(介于 1.3~1.4)时所得的结果符合这一规律,但当 n 大于这一特殊值时 D_c 会大于 D_n .这一反常现象的出现是由于裂隙流速随着 n 值的增加而变大,使溶质在裂隙下边界浓度曲线拖尾严重,最终导致浓度峰值点右移.

3 结论

本文运用 Comsol Multiphysics 多物理场仿真软件,研究了当嵌于二维达西流基岩中的高渗透性裂隙区域的流态为非达西流时,非达西参数 n 对区域流场及溶质羽分布影响,随着非达西系数 n 的增大,表现出如下特征:

(1) 裂隙流速会逐渐增大呈正相关,界面处的流线折射逐渐偏离的折射定律;

(2) 裂隙水流的随渗流角度 θ 逐渐减小,渗流方向逐渐偏向基岩的渗流方向;

(3) 裂隙及下基岩中溶质羽对称性逐渐降低, 同时溶质羽宽度逐渐增大;

(4) 溶质所在主流线附近的浓度逐渐降低, 但主流线右侧区域浓度则会升高;

(5) 回弥散作用的强度逐渐增强, 使得裂隙中更多的溶质从运移到上基岩导致上基岩右侧浓度升高.

References

- Basak, P., 1977. Non-Darcy Flow and Its Implications to Seepage Problems. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103(4): 459–473.
- Bear, J., Tsang, C.F., Marsily, G.D., 1993. Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. *Journal of the American Mosquito Control Association*, 23(3): 330–400.
- Berkowitz, B., Miller, C.T., Parlange, M.B., et al., 2002. Characterizing Flow and Transport in Fractured Geological Media: A Review. *Advances in Water Resources*, 25(8/9/10/11/12): 861–884. [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(02\)00042-8](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(02)00042-8)
- Cheng, H.D., Chai, J.R., Li, Y.M., 2007. Brief Overview on Solute Transport in Fractured Rock Masses. *Water Resources and Power*, (03): 33–37 (in Chinese with English abstract).
- Gao, Y., Ye, X., Xia, Q., 2016. Numerical Simulation of Single Fracture Seepage Flow Based on the Equivalent Continuous Medium Model. *Groundwater*, 38(5): 40–43(in Chinese).
- Kessler, J. H., Hunt, J. R., 1994. Dissolved and Colloidal Contaminant Transport in a Partially Clogged Fracture. *Water Resources Research*, 30(4): 1195–1206. <https://doi.org/10.1029/93wr03555>
- Konikow, L. F., 2011. The Secret to Successful Solute Transport Modeling. *Ground Water*, 49(2): 144–159. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00764.x>
- Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R., et al., 1982. Porous Media Equivalents for Networks of Discontinuous Fractures. *Water Resources Research*, 18(3): 645–658. <https://doi.org/10.1029/wr018i003p00645>
- Odling, N. E., Roden, J. E., 1997. Contaminant Transport in Fractured Rocks with Significant Matrix Permeability, Using Natural Fracture Geometries. *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3/4): 263–283. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(96\)00096-4](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00096-4)
- Qian, J.Z., Wang, J.Q., Ge, X.G., et al., 2002. Advances in Research for Numerical Simulation of Contaminant

Transport and Flow in North China Type Fracture-Karst Media. *Advance in Water Science*, (4): 409–412 (in Chinese with English abstract).

- Qin, R.G., Cao, G.Z., Wu, Y.Q., 2014. Review of the Study of Groundwater Flow and Solute Transport in Heterogeneous Aquifer. *Advances in Earth Science*, 29(1): 30–41(in Chinese with English abstract).
- Robinson, N. I., Werner, A. D., 2017. On Concentrated Solute Sources in Faulted Aquifers. *Advances in Water Resources*, 104: 255–270. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.04.008>
- Sebben, M. L., Werner, A. D., 2016. On the Effects of Preferential or Barrier Flow Features on Solute Plumes in Permeable Porous Media. *Advances in Water Resources*, 98: 32–46.
- Sebben, M. L., Werner, A. D., Graf, T., 2015. Seawater Intrusion in Fractured Coastal Aquifers: A Preliminary Numerical Investigation Using a Fractured Henry Problem. *Advances in Water Resources*, 85: 93–108.
- Song, X.C., Xu, W.Y., 2004. A Study on Conceptual Models of Fluid Flow in Fractured Rock. *Rock and Soil Mechanics*, (2): 226–232 (in Chinese with English abstract).
- Tsang, C., 2000. Modeling Groundwater Flow and Mass Transport in Heterogeneous Media: Issues and Challenges. *Earth Science*, 25(5): 443–453 (in Chinese with English abstract).
- Vujević, K., Graf, T., Simmons, C. T., et al., 2014. Impact of Fracture Network Geometry on Free Convective Flow Patterns. *Advances in Water Resources*, 71:65–80.
- Xu, Y., Xue, X.S., Liu, Y.Q., et al., 2014. A Coupled Darcy-Brinkman-NS Simulation Model of Well Bore Effect of an Monitor Well. *Earth Science*, 39(09): 1349–1356 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程汉鼎, 柴军瑞, 李亚盟, 2007. 裂隙岩体溶质运移研究简述. *水电能源科学*, (3): 33–37.
- 高瑜, 叶咸, 夏强, 2016. 基于等效连续介质模型的单裂隙渗流数值模拟研究. *地下水*, 38(5): 40–43.
- 钱家忠, 汪家权, 葛晓光, 等, 2003. 我国北方型裂隙岩溶水流及污染物运移数值模拟研究进展. *水科学进展*, (4): 409–412.
- 覃荣高, 曹广祝, 仵彦卿, 2014. 非均质含水层中渗流与溶质运移研究进展. *地球科学进展*, 29(1): 30–41.
- 宋晓晨, 徐卫亚, 2004. 裂隙岩体渗流概念模型研究. *岩土力学*, (2): 226–232.
- 徐亚, 薛祥山, 刘玉强, 等, 2014. 地下水观测井井筒效应的多场耦合数值模拟. *地球科学*, 39(9): 1349–1356.