

# 单裂隙介质中核素迁移模型的解析解及其应用

李 寻<sup>1,2</sup>, 张土乔<sup>1</sup>, 李金轩<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 建工学院, 杭州 310058, xli@ecit.edu.cn; 2. 东华理工大学 土木与环境工程学院 江西 抚州 344000)

**摘要:** 为了解核素在裂隙介质中的迁移规律,应用双重介质理论,分别建立描述核素在裂隙域和基质域中迁移的基本微分方程,通过二者在裂隙域与基质域交接处流量和溶质的连续性,利用拉普拉斯变换推导出描述单裂隙中一端具有指数衰减注入源的解析解.以 Th-229、Cs-135 及 Se-79 为研究对象,利用该解析解预测了这些核素的相对浓度在裂隙域与基质域中随时间和空间的变化结果,模拟结果表明,该解析解可应用于裂隙介质中的核素迁移、地下水污染等研究.

**关键词:** 裂隙介质;核素迁移;双重介质;拉普拉斯变换

**中图分类号:** TL942 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2010)12-1990-05

## Analytical solution and its application of modeling nuclide transport model in single fractured media

LI Xun<sup>1,2</sup>, ZHANG Tu-qiao<sup>1</sup>, LI Jin-xuan<sup>2</sup>

(1. College of Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China, xli@ecit.edu.cn; 2. College of Civil & Environment Engineering, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, China)

**Abstract:** To know the law of nuclide transport in fractured media, the basic differential equations of nuclide transport in fracture and matrix were obtained, which were coupled at the interface between the fracture and matrix, and the general analytic solutions of nuclide transport in single fractured media with exponential attenuation source in fracture were deduced by Laplace transform. Moreover, the transport of Th-229, Cs-135 and Se-79 were simulated with the analytic solutions, and the relative concentration of these nuclide in fracture and matrix were predicted. These simulation results show that the analytic solutions can be used to solve the problems of nuclide transport, groundwater contamination in fractured media, etc.

**Key words:** fractured media; nuclide transport; dual media theory; Laplace transform

近 30 多年来,裂隙介质中的水流及溶质运移问题已成为一个热门的研究领域<sup>[1]</sup>. 裂隙介质中的渗流研究主要关注于水利、公路、铁路及国防等工程建设;而对裂隙介质中的溶质运移问题研究主要集中在裂隙介质中地下水的污染问题,如垃圾填埋场的污水下渗、核废物的地质处置以及海水入侵等<sup>[2]</sup>. 相对孔隙介质而言,由于裂隙介质中的发育情况和空间分布特征都非常复杂,使得不同的裂隙或者同一裂隙的不同位置运动状态都

各不相同,因此想精确描述地下水和溶质在裂隙介质中的运移几乎是不可能的. 所以,在实际研究过程中,为了达到解决问题的目的,常常对实际问题做一些简化. 通常情况下,对于复杂裂隙中水分及溶质运移主要通过单裂隙尺度、二维裂隙网络尺度和裂隙面与裂隙面相交成的三维裂隙网络尺度来研究<sup>[3-4]</sup>,其中单裂隙是构成裂隙网络的基础,因此对单裂隙中的水流和溶质运移的模拟研究显得尤为重要. 对于单裂隙中溶质运移问题,Moreno 和 Rasmuson<sup>[5]</sup>在一端为定物质通量连续注入源条件下,得到了描述单裂隙中溶质运移的解析解, Maloszewski 和 Zuber<sup>[6]</sup>给出了瞬时注入和可逆瞬时吸附条件下单裂隙中溶质运移的解

收稿日期: 2009-03-25.

基金项目: 国防科技工业局资助项目(科工二司[2008]62号).

作者简介: 李 寻(1974—),女,副教授,博士研究生;

张土乔(1963—),男,教授,博士生导师.

析解,刘金英和王岩等<sup>[7-8]</sup>得到了一端具有分时注入源的溶质运移的解析解,Cormenzana<sup>[9]</sup>、Shih D. C. F<sup>[10]</sup>及 Neretnieks<sup>[11]</sup>对于放射性核素在单裂隙中的迁移进行了探讨.而对于注入源为指数衰变条件下的溶质运移问题,还有待解决.为此,本文以双重介质理论为基础,建立了一端具有指数衰变注入源的基质域-裂隙域中溶质运移随地下水迁移的数学模型,利用拉普拉斯变换<sup>[12]</sup>得到了相应的解析解,并通过具体的算例模拟了单裂隙介质中核素 Th-229、Cs-135 及 Se-79 的运移过程,预测了这些核素在裂隙域和基质域中的相对质量浓度分布和发展趋势,这些研究对于核废物的地质处置及控制地下水污染和治理等有着重要的意义.

## 1 单裂隙介质中核素迁移数学模型

### 1.1 物理模型

如图1所示,在研究中,考虑核素在饱和多孔岩石中1条细长裂隙中迁移并满足以下假设条件:1)裂隙中水流流速为常数;2)裂隙宽度 $2b$ 为常数且远小于裂隙的长度 $L$ ;3)裂隙中的横向扩散和弥散在整个裂隙宽度上瞬时完全混合,并忽略裂隙壁本身对核素的阻滞作用;4)核素沿着裂隙的运移比在基质中的运移快得多;5)发生于岩块中的核素扩散沿垂直于裂隙的方向进行.

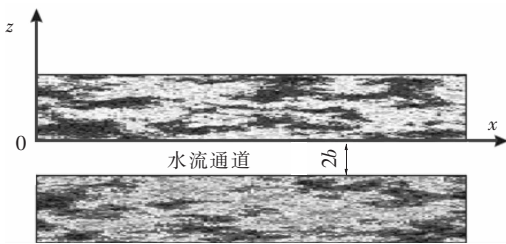


图1 单裂隙介质中核素迁移示意图

在模拟过程中,考虑以下过程:1)在裂隙中,核素沿着裂隙轴向的对流迁移和分子扩散、纵向的机械弥散;2)核素从裂隙向裂隙两侧岩块的分子扩散;3)在基质域中,岩块表面和岩块本身对核素的吸附作用;4)核素的放射性衰变.

### 1.2 数学模型的建立

图1所示的运移过程可以通过两个耦合的一维方程来描述,分别为核素在裂隙域中和基质域中迁移的方程,二者通过在交界面处流量和质量浓度的连续性来耦合<sup>[5,7-8]</sup>.根据质量守恒,考虑溶质为放射性物质,并假定基质域中的吸附为线性等温吸附,可分别得到裂隙域及溶质在基质域

中的基本迁移方程<sup>[13]</sup>,即

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_L}{R} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \frac{u}{R} \frac{\partial c}{\partial x} - \lambda c + \frac{FD_j}{bR} \frac{\partial c_j}{\partial z} \Big|_{z=b}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_j}{\partial t} = \frac{D_j}{R_j} \frac{\partial^2 c_j}{\partial z^2} - \lambda c_j, b \leq z \leq \infty. \quad (2)$$

式中: $c[ML^{-3}]$ 为裂隙中溶质质量浓度,等于 $c(x,t)$ ;  $c_j[ML^{-3}]$ 为基质域中溶质质量浓度,等于 $c_j(x,z,t)$ ;  $t[T]$ 为时间; $x[L]$ 为裂隙轴向方向的坐标; $z[L]$ 为与裂隙轴向垂直方向的坐标; $u[LT^{-1}]$ 为裂隙中溶质运移的平均速率; $D_L[L^2T^{-1}]$ 为裂隙中的纵向弥散系数, $D_L = \alpha_L v + D_m$ ,其中 $D_m[L^2 \cdot T^{-1}]$ 为在自由水中溶质的分子扩散系数, $\alpha_L[L]$ 为裂隙轴向方向上的弥散度, $\alpha_L = 0.017x^{1.5}$  ( $x = 0.01 \sim 3500 \text{ m}$ )<sup>[14]</sup>;  $D_j[L^2T^{-1}]$ 为基质域中的有效扩散系数; $\lambda[T^{-1}]$ 为放射性核素的衰变常数; $\theta[-]$ 为基质域多孔岩体的孔隙率; $F[-]$ 为能允许溶质扩散到岩石中去的裂隙壁表面积占裂隙壁总面积的比例; $R[-]$ 为裂隙域中的迟滞系数, $R = 1 + \frac{K_f}{b}$ ,其中 $K_f[L]$ 为裂隙域中的分配系数; $R_j[-]$ 为基质域中的迟滞系数, $R_j = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\theta}$ ,其中 $K_d[M^{-1}L^3]$ 为基质域中的分配系数, $\rho_b[ML^{-3}]$ 为岩石的干密度.

式(1)和式(2)的初始条件为

$$c(x,t) \Big|_{t=0} = 0; c_j(x,z,t) \Big|_{t=0} = 0.$$

裂隙的上、下游边界分别记为

$$c(x,t) \Big|_{x=0} = c_0 e^{-kt}; c(x,t) \Big|_{x=L} = 0.$$

式中: $c_0[ML^{-3}]$ 为上游边界处输入质量浓度初始值; $k[T^{-1}]$ 为上游边界处输入质量浓度的源衰减常数.

而在基质域中,其边界条件写为

$$c_j(x,z,t) \Big|_{z=b} = c(x,t); c_j(x,z,t) \Big|_{z=\infty} = 0.$$

其中: $c_j(x,z,t) \Big|_{z=\infty} = 0$ 表示在裂隙壁处,多孔基质域中的溶质质量浓度与裂隙域中溶质质量浓度相等.

## 2 模型的解析解

求解由式(1)、式(2)耦合得到的裂隙域和基质域中的数学模型,可以得到该数学模型的通用解析解.

$$\bar{c}_j(x,z,p) = \int_0^\infty c_j(x,z,t) e^{-pt} dt,$$

$$\bar{c}(x,p) = \int_0^\infty c(x,t) e^{-pt} dt.$$

式中： $\bar{c}_j(x, z, p)$  和  $\bar{c}(x, p)$  分别为基质域质量浓度  $c_j(x, z, t)$  和裂隙域质量浓度  $c(x, t)$  的 Laplace 变换。

对式(2)进行 Laplace 变换, 得

$$\frac{\partial^2 \bar{c}_j}{\partial z^2} - \frac{R_j}{D_j}(p + \lambda) \bar{c}_j = 0, b \leq z \leq \infty. \quad (3)$$

式(3)是一个二阶常系数齐次线性微分方程, 利用边界条件的拉普拉斯变换及式(3)的通解, 可以得到式(3)的解为

$$\bar{c}_j = \bar{c} \exp\left[-\sqrt{\frac{R_j}{D_j}(p + \lambda)}(z - b)\right]. \quad (4)$$

令  $A = \sqrt{\frac{R_j}{D_j}}$ ,  $B = p + \lambda$ , 则式(4)可写为

$$\bar{c}_j = \bar{c} \exp\left[-AB^{\frac{1}{2}}(z - b)\right]. \quad (5)$$

根据式(5)得到裂隙域与基质域交接面上, 即  $z = b$  处  $\bar{c}_j$  的质量浓度梯度为

$$\left.\frac{d\bar{c}_j}{dz}\right|_{z=b} = \bar{c}\left(-\sqrt{\frac{D_j}{R_j}(p + \lambda)}\right) = -AB^{\frac{1}{2}}\bar{c}. \quad (6)$$

对式(1)进行 Laplace 变换, 并将式(6)代入, 合并整理, 得

$$\frac{d^2\bar{c}}{dx^2} - \frac{u}{D_L} \frac{d\bar{c}}{dx} - \frac{R}{D_L}\left(B + \frac{B^{\frac{1}{2}}}{G}\right)\bar{c} = 0. \quad (7)$$

其中： $G = \frac{bR}{F(R_j D_j)^{\frac{1}{2}}}$ . 式(7)也是一个二阶常系数齐次线性微分方程, 同理可求得解为

$$\bar{c} = \frac{c_0}{(B - \lambda + k)} \exp\left\{\alpha x - \alpha x \left[1 + \beta^2\left(B + \frac{B^{\frac{1}{2}}}{G}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\}. \quad (8)$$

其中： $\alpha = \frac{u}{2D_L}$ ,  $\beta = \sqrt{\frac{4RD_L}{u^2}}$ .

对式(8)进行 Laplace 逆变换, 由于  $B$  和  $B^{\frac{1}{2}}$  都需要开方, 直接求逆变换比较困难. 为此, 引入文献[7]

中等式  $\int_0^\infty \exp\left(-\xi^2 - \frac{a^2}{\xi^2}\right) d\xi = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{-2a}$ , 因此有

$$\begin{aligned} & \exp\left\{-\alpha x \left[1 + \beta^2\left(B + \frac{B^{\frac{1}{2}}}{G}\right)\right]^{\frac{1}{2}}\right\} = \\ & \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp\left(-\xi^2 - \frac{\alpha^2 x^2}{4\xi^2} \left[1 + \beta^2\left(B + \frac{B^{\frac{1}{2}}}{G}\right)\right]\right) d\xi. \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得

$$\begin{aligned} \frac{\bar{c}}{c_0} = & \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{(B - \lambda + k)} \exp(\alpha x) \int_0^\infty \exp\left(-\xi^2 - \right. \\ & \left. \frac{\alpha^2 x^2}{4\xi^2} \left[1 + \beta^2\left(B + \frac{B^{\frac{1}{2}}}{G}\right)\right]\right) d\xi. \end{aligned} \quad (10)$$

令  $Y = \frac{\alpha^2 \beta^2 x^2}{4\xi^2 G}$ , 经 Laplace 逆变换(记为  $L^{-1}$ )得

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} = & \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(\alpha x) \int_0^\infty \exp\left(-\xi^2 - \frac{\alpha^2 x^2}{4\xi^2}\right) L^{-1} \\ & \left(\exp(-YGB) \frac{\exp(-YB^{\frac{1}{2}})}{(B - \lambda + k)}\right) d\xi. \end{aligned} \quad (11)$$

令  $\frac{\exp(-YB^{\frac{1}{2}})}{(B - \lambda + k)} = F(p)$ , 记  $f(t) = L^{-1}[F(p)]$ ,

根据 Laplace 逆变换的延迟性质有

$$L^{-1}\left(\exp(-YGB) \frac{\exp(-YB^{\frac{1}{2}})}{(B - \lambda + k)}\right) = f(t - \tau)H(t - \tau). \quad (12)$$

式中： $\tau = YG = \frac{\alpha^2 \beta^2 x^2}{4\xi^2} = \frac{Rx^2}{4D_L \xi^2}$ ;  $H(t - \tau)$  为

Heaviside 函数, 即  $H(t - \tau) = \begin{cases} 1, & t \geq \tau \\ 0, & t < \tau \end{cases}$ .

利用 Laplace 变换中的卷积定理<sup>[12]</sup>可得

$$\begin{aligned} f(t) = & L^{-1}[F(p)] = L^{-1}\left[\frac{\exp(-YB^{\frac{1}{2}})}{(B - \lambda + k)}\right] = \\ & \frac{1}{2} \exp[(\lambda - k)\tau] \left\{ \exp[(\lambda - k)^{\frac{1}{2}} Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2t^{\frac{1}{2}}} + \right. \right. \\ & \left. \left. [(\lambda - k)t]^{\frac{1}{2}}\right] + \exp[-(\lambda - k)^{\frac{1}{2}} Y] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2t^{\frac{1}{2}}} - \right. \right. \\ & \left. \left. [(\lambda - k)t]^{\frac{1}{2}}\right] \right\}. \end{aligned} \quad (13)$$

根据 Heaviside 函数的性质, 裂隙域中质量浓度解析解存在以下 2 种情况:

1) 当  $t \geq \tau = \frac{Rx^2}{4D_L \xi^2}$ , 或  $\xi > \frac{x}{2} \left(\frac{R}{D_L t}\right)^{\frac{1}{2}}$  时,

$H(t - \tau) = 1$ , 将式(13)代入式(12), 并将结果代入式(11)得

$$\begin{aligned} \frac{c}{c_0} = & \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(\alpha x) \int_a^\infty \exp\left(-\xi^2 - \frac{\alpha^2 x^2}{4\xi^2}\right) \exp\left[(\lambda - \right. \\ & \left. k)\tau\right] \left\{ \exp\left[(\lambda - k)^{\frac{1}{2}} Y\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} + (\lambda - k)^{\frac{1}{2}} T\right] + \right. \\ & \left. \exp\left[-(\lambda - k)^{\frac{1}{2}} Y\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{Y}{2T} - (\lambda - k)^{\frac{1}{2}} T\right] \right\} d\xi. \end{aligned} \quad (14)$$

式中： $T = (t - \tau)^{\frac{1}{2}} = \left(t - \frac{\alpha^2 \beta^2 x^2}{4\xi^2}\right)^{\frac{1}{2}} = \left(t - \frac{Rx^2}{4D_L \xi^2}\right)^{\frac{1}{2}}$ ;  $a = \frac{x}{2} \left(\frac{R}{D_L t}\right)^{\frac{1}{2}}$  为积分下限。

式(14)即为裂隙域中质量浓度  $c$  在  $t \geq \tau = \frac{Rx^2}{4D_L \xi^2}$  时的解析表达式, 可以用以预测核素在裂隙域中任意点任何时刻的相对质量浓度分布。

2) 当  $t < \tau = \frac{Rx^2}{4D_L\xi^2}$  时, 或  $\xi < \frac{x}{2} \left( \frac{R}{D_L t} \right)^{\frac{1}{2}}$  时,

$H(t - \tau) = 0$ , 则有

$$L^{-1} \left[ \exp(-YGB) \frac{\exp(-YB^{\frac{1}{2}})}{(B - \lambda + k)} \right] = 0. \quad (15)$$

将式(15)代入式(11)得:  $c = 0$ .

同理, 根据裂隙域中质量浓度在拉氏域与原域中的解来求基质域中质量浓度  $c_j$  的解. 可以用来预测核素在单裂隙及其两侧的基质域中任意点任何时刻的相对质量浓度分布.

### 3 算 例

据日本核燃料开发机构对高放废物深地质处置库中核素迁移的研究成果, Th-229、Cs-135 及 Se-79 这 3 种核素对最终释放的放射性总剂量起控制作用<sup>[13]</sup>, 因此选用这 3 种核素作为模拟对象, 来预测分析它们在单裂隙及两侧岩体中的相对质量浓度分布. 裂隙系统的物理参数<sup>[13]</sup>: 裂隙隙宽 ( $2b$ ) 为  $5.89 \times 10^{-4}$  m, 地下水流速为  $46.4 \text{ m} \cdot \text{y}^{-1}$ , 岩石的孔隙度为 0.02, 岩石的有效扩散系数为  $9.46 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{y}^{-1}$ , 岩石密度为  $2.64 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 允许核素扩散到岩石中去的裂隙壁占裂隙壁总面积的比例为 0.5. 3 种核素相应参数见表 1.

表 1 所考虑核素的相应参数

核素	衰变常数/ $\text{y}^{-1}$	迟滞系数
Th-229	$9.443 \times 10^{-5}$	132 001
Cs-135	$3.010 \times 10^{-7}$	6 601
Se-79	$1.066 \times 10^{-5}$	1 321

首先, 利用方程(14)模拟  $1 \times 10^4$  a、 $1 \times 10^5$  a 和  $1 \times 10^6$  a 时, 3 种核素在裂隙域中相对质量浓度随迁移距离的变化, 模拟结果见图 2, 从图中可以看出, 在模拟时间相同的条件下, 3 种核素的相对质量浓度都是随着迁移距离的增加而不断减小的. 对比图 2(a)、2(b)和 2(c)可知, Se-79 的迁移最快, 且迁移距离最大, 达到了 2 000 m, Th-229 的迁移距离最小, 仅 100 m 左右, 而 Cs-135 的迁移距离居中, 为 500 m. 这主要是由于 3 种核素中 Th-229 的半衰期是最短的, 且基质域对它的阻滞作用最强; 而对 Se-79 的阻滞作用是最弱的(如图 2 所示). 从图还可以看出, 在同一迁移距离处, 各核素的相对质量浓度随着时间的增加而增加.

同理可以利用基质域中的质量浓度的解析表达式模拟在  $t = 1 \times 10^6$  a 时, 在各自最大迁移距离的 0.025、0.08 和 0.125 倍处, 基质域中各核素的相对质量浓度随扩散深度的变化. 从模拟结果可知, 当迁移距离不变时, 各种核素的相对质量浓度都随着扩散距离的增大而减小; 比较 Th-229、Cs-135 及 Se-79 这 3 种核素的扩散深度可知, Se-79 在基质域中的扩散深度最大, 最深可达到 1 m, 而 Th-229 在基质域中的扩散深度仅为 0.06 m, 这主要是由于基质域对各核素的阻滞作用不同而造成的, 阻滞作用越强, 在基质域与裂隙中的迁移距离就越小, 反之越大.

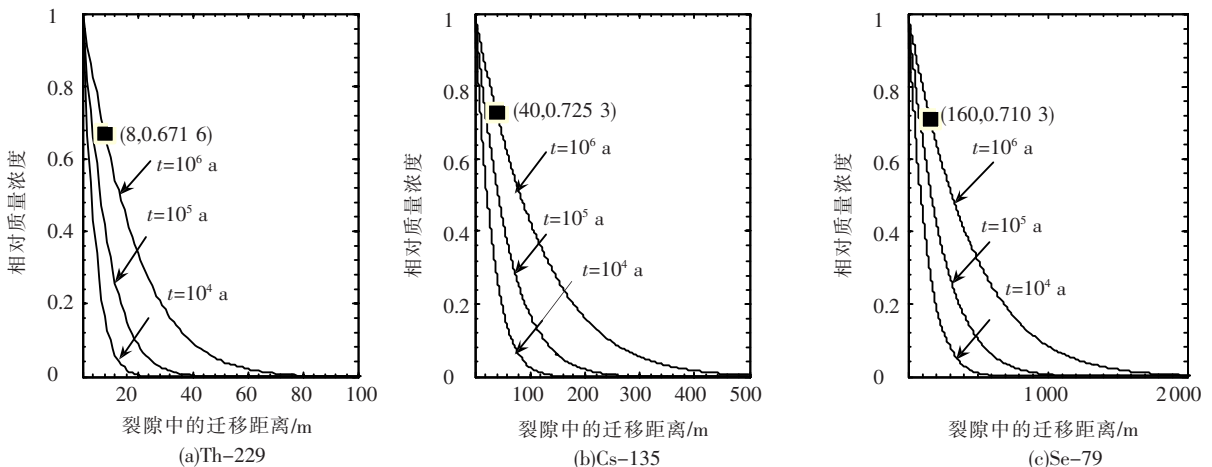


图 2 裂隙域中核素相对浓度与距离的关系

### 4 结 论

1) 根据双重介质理论, 针对单裂隙介质中裂隙入口处具有指数衰变注入源条件下的核素迁移问题, 分别建立了核素在裂隙域和基质域中的迁

移模型, 并利用拉普拉斯变换推导出其解析解.

2) 利用模型的解析解, 选取 Th-229、Cs-135 及 Se-79 这 3 种核素, 分别计算了其在低渗透岩体中裂隙域与基质域中的相对质量浓度分布, 并对它们在裂隙域中的迁移距离与基质域中

的扩散深度进行了比较,发现放射性核素在沿着裂隙迁移的过程中会不断向两侧的基质域中扩散,发生在基质中的这种扩散作用阻滞了放射性核素沿着裂隙的迁移。

3)所导出的解析解,可用于预估单裂隙介质中核素在裂隙域和基质域中的分布范围和发展趋势,还可以用以研究该模型条件下的各参数,如流速、弥散系数及裂隙隙宽等,对核素迁移的影响,对深入了解各种因素对核素迁移的影响提供了有力的支持。

### 参考文献:

- [1] BODIN J, DELAY F, DE MARSILY G. Solute transport in a single fracture with negligible matrix permeability: fundamental mechanisms [J]. *Hydrogeology Journal*, 2003, 11(4): 418 - 433.
- [2] WILLIAMS M M R. Radionuclide transport in fractured rock: an analogy with neutron transport[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 1996, 30(3): 243 - 253.
- [3] 周志芳,王锦国. 裂隙介质水动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [4] MORENO L, CRAWFORD J, NERETNIEKS I. Modeling radionuclide transport for time varying flow in a channel network[J]. *Contaminant Hydrology*, 2006, 86(3): 215 - 238.
- [5] MORENO L, RASMUSON A. Contaminant transport through a fractured porous rock: impact of the inlet boundary condition on the concentration profile in the rock matrix[J]. *Water Resour Res*, 1985, 21(7): 951 - 958.
- [6] MALOSZEESKI P, ZUBER A. Mathematical modeling of tracer behavior in short-term experiments in fissured rocks[J]. *Water Resour Res*, 1990, 26(7): 1517 - 1528.
- [7] 刘金英,王新民,彭泽州. 双重介质中核素迁移模型的解析解及其应用[J]. *世界地质*, 1996, 15(1): 68 - 73.
- [8] 王岩,梁冰. 裂隙岩体地下水溶质运移规律的研究[C]//段祥宝,谢兴华,速宝玉. 水工渗流研究与应用进展——第五届全国水力工程渗流学术研讨会. 郑州:黄河水利出版社,2006:455 - 461.
- [9] CORMENZANA J. Transport of a two-member decay chain in a single fracture: simplified analytical solution for two radio-nuclides with the same transport properties [J]. *Water Resour Res*, 2000, 36(5): 1339 - 1346.
- [10] SHIH D C F. Contaminant transport in one-dimensional single fractured media: semi-analytical solution for three-member decay chain with pulse and heaviside input sources[J]. *Hydrol Process*, 2007, 21(16): 2135 - 2143.
- [11] NERETNIEKS I. Fast method for simulation of radionuclide chain migration in dual porosity fracture rocks [J]. *Contaminant Hydrology*, 2006, 88(4): 269 - 288.
- [12] 董祖引. 复变函数与积分变换[M]. 南京:河海大学出版社,2001.
- [13] Japan Nuclear Cycle Development Institute. Project to establish the scientific and technical basis for h/w disposal in japan (supporting report 3), JNC TN1410 2000 - 004[R]. Tokai: JNC, 2000.
- [14] NEUMAN S P. On advection transport in fractal permeability and velocity fields [J]. *Water Resour Res*, 1995, 31(6): 1455 - 1460.

(编辑 魏希柱)