

文章编号:1000-2472(2007)05-0078-05

宏观弥散度和阻滞系数对地下水中核素 迁移模拟的影响*

谢水波^{1,2†}, 陈泽昂², 张晓健¹, 何少华², 吕俊文²

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 南华大学 城市建设学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:对宏观弥散度和阻滞系数的取值进行了理论分析, 运用 PHREEQC-II 软件, 以我国南方某铀水冶尾矿库为例, 探讨了宏观弥散度和阻滞系数对地下水中核素迁移模拟的影响. 研究表明: 宏观弥散度和阻滞系数对大时空的核素迁移模拟影响显著. 在其他条件相同的情况下, 弥散度增大, 受污染地下水中总 U 浓度开始降低的距离将缩短, 但反而迁移得更远; 随着阻滞系数的增大, 同距离处 ^{234}U 的浓度将显著下降, 但其迁移距离变短. 要得到可靠的宏观弥散度和阻滞系数, 可利用宏观参数与介质统计特性的关系求解介质宏观弥散参数, 阻滞系数可由现场实验或实验室土柱实验直接测得.

关键词:核素迁移; 宏观弥散度; 阻滞系数; 模拟

中图分类号:X837

文献标识码:A

Effect of Macrodispersivity and Retardation Coefficient on Radionuclide Migration Simulation

XIE Shui-bo^{1,2†}, CHEN Ze-ang², ZHANG Xiao-jian¹, HE Shao-hua², LU Jun-wen²

(1. Department of Environmental Science & Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Urban Construction, Nanhua University, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Based on the theoretical analysis of the values of the macrodispersivity and retardation coefficient, the radionuclide migration in groundwater at an uranium mill-tailing site in southern China was simulated with hydrogeochemical program PHREEQC-II. In the simulation, the effect of macrodispersivity and retardation coefficient was especially taken into account. The results showed that the effect of the macrodispersivity and retardation coefficient in radionuclide migration was remarkable. Under the same conditions, the distance of total U concentration reduction was shorter when the macrodispersivity coefficient increased, and its transport distance was longer. As the retardation coefficient increased, the ^{234}U concentration decreased visibly, but its transport distance was shorter. The relationship between the macroparameters and the statistical characteristic of the medium and the acquisitive statistical parameters of the medium could be used to analyze and solve the macroscopical dispersivity parameter. Moreover, the retardation coefficient R_d should be set by in-site experiments or direct measurement through soil column experiment in the laboratory.

Key words: radionuclide migration; macrodispersivity; retardation coefficient; simulation

弥散度是描述空隙介质骨架结构的特征长度. 对于理想的均匀介质, 弥散度为常数, 但实际含水层

中不存在绝对的均质. 微观水平分析能够了解机械弥散机理, 要解决实际地下水溶质迁移问题, 必须

* 收稿日期: 2006-09-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10475038)

作者简介: 谢水波(1964-), 男, 湖南岳阳人, 清华大学博士研究生, 南华大学教授

† 通讯联系人, E-mail: xiesbmr@263.net

回到宏观水平来分析. 现有地下水溶质迁移模拟方程中的宏观参数要预先给定, 通过野外试验确定宏观参数又相当困难, 探讨确定宏观参数的方法及其对模拟结果的影响是急待解决的课题. 阻滞系数 R_d 是描述核素在地质介质中迁移特征的另一重要参数. 在较大时空的核素迁移模拟中, 地质介质实质为非均质介质, 必须慎重选择阻滞系数以提高模拟结果的可靠性. 本文对宏观弥散度和阻滞系数在核素迁移模拟中的影响进行了理论分析并通过案例进行了验证.

1 核素迁移动力学方程

向含水层注入核素浓度为 C_0 的水, 根据陈家军等的研究成果^[1], 以室内静态实验测得的分配系数 K_d 来表征核素的非线性均衡等温吸附, 核素的溶质迁移水动力弥散方程^[2,3]为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{D_{ij}}{R_d} \cdot \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(C \frac{u_i}{R_d} \right) - \lambda C + \frac{W}{n} (C_0 - C), \quad (i, j = 1, 2, 3), \quad (1)$$

$$R_d = 1 + \frac{\rho_b}{n} K_d. \quad (2)$$

式中: C 为地下水中核素的浓度; C_0 为注入水中的核素浓度; D_{ij} 为孔隙尺度弥散系; R_d 为阻滞系数; u_i 为地下水孔隙流速; λ 为核素的衰变系数; W 为单位时间内向单位体积含水层中注水量; n 为多孔介质的有效孔隙率; ρ_b 为多孔介质的骨架密度; K_d 为实验测得的分配系数. 对于饱水多孔介质中的一维流动的水动力弥散核素迁移情况, 式(1)简化为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{D_{xx}}{R_d} \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{u}{R_d} \right) - \lambda C + \frac{W}{n} (C_0 - C). \quad (3)$$

2 宏观弥散系数的计算

假设在局部尺度范围内, 核素的溶质运动满足对流-弥散方程(1). 鉴于多孔介质的随机性, 则地下水流速是随机的, 可将流速 u_i 和浓度 C 表示为

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i, \quad C = \bar{C} + C'. \quad (4)$$

代入式(1)得到

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial C'}{\partial t} &= \frac{D_{ij}}{R_d} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_i \partial x_j} + \frac{D_{ij}}{R_d} \frac{\partial^2 C'}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\bar{u}_i \partial \bar{C}}{R_d \partial x_i} - \\ &\frac{\bar{C} \partial \bar{u}_i}{R_d \partial x_i} - \frac{\bar{C} \partial u'_i}{R_d \partial x_i} - \frac{u'_i \partial \bar{C}}{R_d \partial x_i} - \frac{\bar{C} \partial u'_i}{R_d \partial x_i} - \\ &\frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i} - \frac{C' \partial \bar{u}_i}{R_d \partial x_i} - \frac{u'_i \partial C'}{R_d \partial x_i} - \lambda \bar{C} - \lambda C' + \\ &\frac{W}{n} (C_0 - \bar{C}) - \frac{W}{n} C'. \end{aligned} \quad (5)$$

因, $\bar{u}_i = 0$, $\bar{C}' = 0$ 和 $\bar{C} u'_i = \bar{C} \bar{u}_i = 0$, $\bar{C}' \bar{u}_i = \bar{C}' u_i = 0$, 取均值可得平均方程(6)和扰动方程(7)^[4]

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{D_{ij}}{R_d} \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\bar{u}_i \partial \bar{C}}{R_d \partial x_i} - \frac{\bar{C} \partial \bar{u}_i}{R_d \partial x_i} - \frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i} - \frac{C' \partial \bar{u}_i}{R_d \partial x_i} - \frac{C' \partial u'_i}{R_d \partial x_i} - \lambda \bar{C} + \frac{W}{n} (C_0 - \bar{C}), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial C'}{\partial t} &= \frac{D_{ij}}{R_d} \frac{\partial^2 C'}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{u'_i \partial \bar{C}}{R_d \partial x_i} - \\ &\frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i} - \frac{\bar{C} \partial u'_i}{R_d \partial x_i} - \frac{C' \partial \bar{u}_i}{R_d \partial x_i} - \frac{C' \partial u'_i}{R_d \partial x_i} - \\ &\frac{u'_i \partial C'}{R_d \partial x_i} + \frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i} - \lambda C' - \frac{W}{n} C'. \end{aligned} \quad (7)$$

式(6)中 $\frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i}$ 为流速扰动和浓度扰动乘积的均值, 它代表由于流速的空间变异性而引起的溶质宏观弥散通量, 表示为

$$\frac{\bar{u}_i \partial C'}{R_d \partial x_i} = \frac{1}{R_d} \frac{\partial \bar{u}_i C'}{\partial x_i}. \quad (8)$$

设 f 为随机函数, 则有

$$f(r) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(ik_i r_i) dZ_f(k). \quad (9)$$

式中: k_i ($i = 1, 2, 3$) 为波数向量分量; r_i 为位置向量; $Z_f(k_i)$ 为 f 的谱函数, 其具有以下特征

$$\overline{dZ_f(k) dZ_f^*(k')} = \begin{cases} S_{ff}(k) dk, & (k = k'), \\ 0, & (k \neq k'). \end{cases} \quad (10)$$

$S_{ff}(k)$ 为 f 的谱密度函数. 应用谱分析方法可得

$$\begin{aligned} \overline{u'_i C'} &= - \int_k \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \cdot \frac{1 - \exp[(-k_i \bar{u}_i + u a_{ij} k_p k_q) t]}{ik_p \bar{u}_p + u a_{pq} k_p k_q} \times \\ &S_{u_i u_j}(k) dk. \end{aligned} \quad (11)$$

令 $\overline{u'_i C'} = -D'_{ij} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} = -a'_{ij} u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i}$, 式中 D'_{ij} 为宏观弥散系数; a'_{ij} 为宏观弥散度; u 为水流在宏观区域的平均流速. 由式(11) 得到宏观弥散系数和宏观弥散度的表达式

$$\begin{aligned} D'_{ij} &= \int_k \frac{1 - \exp[(-k_p \bar{u}_p + u a_{pq} k_p k_q) t]}{ik_p \bar{u}_p + u a_{pq} k_p k_q} \times \\ &S_{u_i u_j}(k) dk, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\alpha'_{ij} = \int_k \frac{1 - \exp[(-k_p \bar{u}_p + u \alpha_{pq} k_p k_q) t]}{(ik_p \bar{u}_p + u \alpha_{pq} k_p k_q) u} \times S_{u_i, u_j}(k) dk. \quad (13)$$

将 $\overline{u_i C'} = -D'_{ij} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j}$ 代入式(6)得到平均浓度满足以下宏观对流-弥散方程

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{1}{R_d} \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(D_{ij} + D'_{ij}) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right] - \frac{1}{R_d} \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{C} \bar{u}_i) - \lambda \bar{C} + \frac{W}{n} (C_0 - \bar{C}). \quad (14)$$

式中: D_{ij} 为孔隙尺度弥散系数; D'_{ij} 为宏观弥散系数, 由介质的统计性质确定; $\bar{u}_i$ 为平均溶质迁移速度; 其余符号同前。

以上分析表明: 核素在非均匀介质中迁移, 平均浓度受宏观对流-弥散控制, 其中弥散作用是宏观弥散和孔隙尺度弥散作用的叠加, 而对流速度为水流在宏观区域的平均流速。

若含水层属于层状含水层, 如饱和渗透系数 K 在水平方向的相关尺度远大于垂直方向, K 仅为垂直坐标 z 的函数, 水力坡度近似为常数. 通过对(13)式分析可得到宏观纵向弥散度^[5-7]

$$\alpha'_{11} = \frac{\sigma_k^2}{\bar{K}^2} \bar{u} t, \quad t \rightarrow 0, \quad (15)$$

$$\alpha'_{11} = \frac{\sigma_k^2}{\bar{K}^2} \frac{\gamma^2}{3\alpha_T}, \quad t \rightarrow \infty.$$

式中: α'_{11} 为纵向弥散度; $\sigma_k^2, \bar{K}$ 分别为渗透系数的方差和均值; α_T 为孔隙尺度横向弥散度; $\bar{u}$ 为沿水平方向的地下水平均流速; $\gamma = 3.16\gamma_e$, γ_e 表示 K 的相关函数为 $1/e$ 时的相关距离. 如在上式中取 $\sigma_k^2 = 1$, $\gamma = 1$ m, $\alpha_T = 0.003$ m, $\bar{u} t = 2$ m, 可得到 $\alpha'_{11} = 3.44$ m, $t \rightarrow 0$, 和 $\alpha'_{11} = 191$ m, $t \rightarrow \infty$, 此宏观弥散度值要远大于孔隙尺度的弥散度。

如果核素在三维非均匀含水层中迁移, 渗透系数符合对数正态分布随机场, 其相关函数满足负指数形式, 忽略孔隙弥散作用, 水流沿 x_1 方向, 对核素三维溶质迁移问题, 宏观弥散系数可按照下式计

算^[8]

$$\alpha'_{11} = \sigma_f^2 \gamma_f \left[1 - \frac{4}{\tau^2} + \frac{24}{\tau^4} - \frac{8}{\tau^2} \left(1 + \frac{3}{\tau} + \frac{3}{\tau^2} \right) e^{-\tau} \right],$$

$$\alpha'_{22} = \alpha'_{33} = \sigma_f^2 \gamma_f \left[\frac{1}{\tau^2} - \frac{12}{\tau^4} + \left(\frac{12}{\tau^4} + \frac{12}{\tau^3} + \frac{5}{\tau^2} + \frac{1}{\tau} \right) e^{-\tau} \right],$$

$$\tau = \bar{u} t / \gamma_f. \quad (16)$$

当核素迁移时间较短和时间很长时, 弥散度可表示为

$$\alpha'_{11} = \frac{8}{15} \sigma_f^2 \bar{u} t, \quad \alpha'_{22} = \alpha'_{33} = \frac{1}{15} \sigma_f^2 \bar{u} t, \quad t \rightarrow 0,$$

$$\alpha'_{11} = \sigma_f^2 \gamma_f, \quad \alpha'_{22} = \alpha'_{33} = 0, \quad t \rightarrow \infty. \quad (17)$$

上式表明: 在核素迁移初期, 宏观弥散度随核素迁移时间或核素迁移距离呈线性关系, 对于三维和二维核素迁移问题, 横向弥散度与纵向弥散度之比为 $1/8$ 和 $1/3$. 随着时间推移, 纵向弥散度趋于常数, 横向弥散度趋于零. 通过对数变换后的渗透系数的方差和相关距离在确定宏观弥散度时起了重要作用, 因而, 此统计参数对讨论大空间核素迁移是非常重要的。

3 宏观弥散度对模拟结果的影响

考虑饱水多孔介质中的一维流动水动力弥散核素迁移的情况, 可得到宏观对流-弥散方程

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = \frac{D_{xx} + D'_{xx} \partial^2 \bar{C}}{R_d} - \frac{\bar{u}}{R_d} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \lambda \bar{C} + \frac{W}{n} (C_0 - \bar{C}). \quad (18)$$

下面以我国南方 S 铀水冶矿尾矿库为例, 运用由美国地质调查研究所开发的模拟软件 PHREE-QC- II^[9] 给出了研究区铀在浅层地下水中的模拟结果, 该软件几乎能解决水、气、岩土相互作用系统中所有平衡热力学和化学动力学问题, 模拟中侧重考虑宏观弥散度对模拟结果的影响, 相关参数见表 1, 表 2, 模拟结果如图 1 所示。

表 1 S 尾矿库地下水及库水参数

Tab.1 The parameters about the groundwater and repertory water at S uranium mill-tailing site

项目	pH	Ca ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ /(mg·L ⁻¹)	Na ⁺ /(mg·L ⁻¹)	K ⁺ /(mg·L ⁻¹)	F ⁻ /(mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ /(mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ /(mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ /(mg·L ⁻¹)	NH ₄ ⁺ /(mg·L ⁻¹)	总 U /(mg·L ⁻¹)
地下水	6.58	134.35	34.14	30.00	30.00	1.47	73.53	366.01	102.27	164.66	16.40	0.029
库水	6.73	882	92	130	130	6.05	524	2 990	41.5	502	0.12	0.403

表 2 S 尾矿库地下水中核素迁移模拟参数

Tab.2 The parameters in the radionuclide migration simulation at S uranium mill-tailing site

参数	距离 L/km	时间 t/a	混合比 MR	渗透系数 $K/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	宏观弥散度 α'/m	阻滞系数 R_d	地下水流速 $u/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	^{238}U 衰变系数 $/\text{s}^{-1}$	^{234}U 衰变系数 $/\text{s}^{-1}$
值	10	1 000	1:9	$1.98\text{e}-8$	40	428	$8.10\text{e}-6$	$4.88\text{e}-18$	$3.33\text{e}-7$

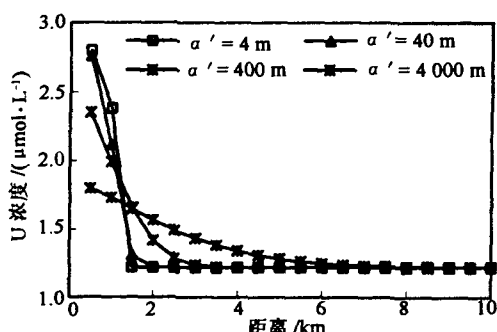


图 1 S 尾矿库不同弥散度的比较

($t = 1\,000\text{ a}$, $\text{MR} = 1:9$, $K = 1.98\text{e}-8\text{ m/s}$, $R_d = 428$)

Fig.1 Compare of the different macrodispersivity at S uranium mill-tailing site($t = 1\,000\text{ a}$, $\text{MR} = 1:9$, $K = 1.98\text{e}-8\text{ m/s}$, $R_d = 428$)

可见,当迁移时间很长时,宏观弥散度值要远大于孔隙尺度的弥散度,模拟中采用的(18)式可忽略孔隙尺度弥散度 α_{xx} ,侧重考虑宏观弥散度 α'_{xx} 对核素迁移模拟的影响.由图 1 和图 2 可看出,宏观弥散度对核素迁移的影响是显著的.弥散度的增大,核素迁移得更远,且源头附近地域进入地下水中的核素浓度更低,当弥散度相差 3 个数量级以上时,曲线变化很明显.宏观弥散度值通常是在实验室测得的,其值一般比实际值小几个数量级^[10],若将其用于核素迁移模拟过程,可能导致不可靠甚至错误的结论.利用宏观参数与介质统计特性的关系,通过野外实验获得介质统计参数,分析和求解介质宏观弥散度是大时空核素迁移模拟结果可靠的基础.

4 阻滞系数的影响

根据方程(2)和(3),不考虑抽注水,即 $W = 0$,初始和边界条件为

$$\begin{aligned} C(x, t)|_{t=0} &= C_0(x=0), \\ C(x, t)|_{t \rightarrow \infty} &= 0 \quad (t > 0). \end{aligned} \quad (19)$$

一维弥散方程的解析解^[11]可写为

$$C = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_{xx}t/R_d}} \exp\left[-\frac{(x - ut/R_d)^2}{4D_{xx}t/R_d} - \lambda t\right]. \quad (20)$$

对结构相同阻滞系数 R_d 不同的两地域同一核

素迁移到等距离点的浓度分别为

$$C_1 = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_{xx}t_1/R_{d1}}} \exp[-\lambda t_1], \quad (21)$$

$$C_2 = \frac{C_0}{\sqrt{4\pi D_{xx}t_2/R_{d2}}} \exp[-\lambda t_2].$$

$$\frac{C_1}{C_2} = [\exp(-\lambda x/u)]^{(R_{d1} - R_{d2})}. \quad (22)$$

式中: C_1 和 C_2 分别为同一核素到达下游同一地点处的浓度(mol/L); $x = ut_1/R_{d1} = ut_2/R_{d2}$,或者 $t_1/R_{d1} = t_2/R_{d2}$; t_1 和 t_2 分别对应于阻滞系数 R_{d1} 和 R_{d2} 时该核素到达 x 处的时间.

为研究阻滞系数对模拟结果的影响,同样以 S 矿尾矿库为例,研究不同的阻滞系数,运用软件 PHREEQC-II 对研究区 ^{234}U (衰变系数 $\lambda = 3.33 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1}$) 在浅层地下水中的迁移行为,部分模拟结果如图 2.

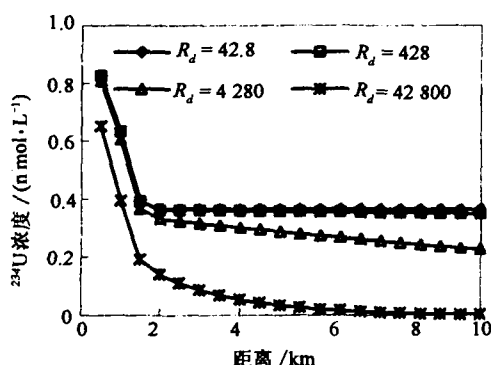


图 2 S 尾矿库不同阻滞系数的比较

($t = 1\,000\text{ a}$, $\text{MR} = 1:9$, $K = 1.98\text{e}-8\text{ m/s}$, $D'_{xx} = 40\text{ m}$)

Fig.2 Compare of the different retardation coefficient at S uranium mill-tailing site ($t = 1\,000\text{ a}$, $\text{MR} = 1:9$, $K = 1.98\text{e}-8\text{ m/s}$, $D'_{xx} = 40\text{ m}$)

由图 2 可看出,阻滞系数对衰变系数较大的核素的迁移影响是显著的.随着阻滞系数的增大,核素迁移距离变短,且同一距离处核素浓度更低;当阻滞系数相差 3 个数量级时,曲线变化很明显.一般核素在地质介质迁移模式方程中所采用的阻滞系数 R_d 是由实验室测定的分配系数 K_d 按公式(2)求得的,通常实验得到的阻滞系数低于或远低于由式(2)计

算的阻滞系数. 如果将其结果用于核素迁移模拟, 预测同一地点处核素浓度将偏低. 主要原因是采用了阻滞系数的计算式(2), 由此计算的结果不仅大于实测值, 还可能由于土壤含水量的变化趋势与实测结果相反. 建议模拟核素在地质介质中迁移时, 阻滞系数 R_d 由现场实验或实验室土柱实验直接测量方法得到.

5 结 论

通过理论上对宏观弥散度和阻滞系数取值的分析, 并运用 PHREEQC- II 软件以南方某铀水冶尾矿库和西南某矿为例, 验证了理论分析的结果. 在模拟过程中, 特别是在进行大时空范围的核素迁移模拟时, 宏观弥散度和阻滞系数的合理取值是模拟结果可靠的基础. 对于宏观参数, 可借助宏观参数与介质统计特性的关系, 通过求介质统计参数, 分析和求解介质宏观渗透系数和弥散参数. 在区域非饱和水分运动和溶质迁移问题的分析和预测中, 可以通过现场条件求得的非饱和土壤统计参数, 根据宏观非饱和介质的水力传导率和宏观弥散度的计算表达式求得介质的宏观参数. 计算核素在地质介质中迁移时, 所采用的阻滞系数 R_d 应由现场实验或实验室土柱实验直接测得. 对大时空范围的核素迁移模拟, 由于结论的难以验证, 只能从模型的拟合、参数的取值方面来修正并保证结果的有效.

参考文献

- [1] 陈家军, 王金生, 李合莲. 非平衡吸附对核素迁移的影响及平衡速率参数的确定[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 73-76.
CHEN J J, WANG J S, LI H L. Influence on radionuclide migration by non-equilibrium sorption and identification of rate coefficient[J]. China Environmental Science, 2000, 20(1): 73-76. (In Chinese)
- [2] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
CHEN C X, LI G M. Groundwater solute-transport theory and model[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996. (In Chinese)
- [3] 徐敏, 曾光明, 谢更新, 等. 基于实码遗传算法的河流水质模型的参数估计[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(5): 41-45.
XU M, ZENG G M, XIE G X, *et al.* Parameter estimation of river water quality model based on real-code genetic algorithm[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(5): 41-45. (In Chinese)
- [4] 杨金忠, 蔡树英, 叶自桐. 区域地下水溶质运移随机理论的研究与进展[J]. 水科学进展, 1998, 9(1): 84-98.
YANG J Z, CAI S Y, YE Z T. A review of stochastic analysis for solute transport at regional scale[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(1): 84-98. (In Chinese)
- [5] DAGAN G. Flow and transport in porous formations[M]. New York: Springer-Verlag, 1989.
- [6] GELHAR L W, GUTJAHR A L, NAFF R L. Stochastic analysis of macrodispersion in a stratified aquifer[J]. Water Resour Res, 1979, 15: 1387-1397.
- [7] MARTHERON G, MARSILY G D. Is transportation in porous media always diffusive? a counter example[J]. Water Resour Res, 1980, 16(5): 901-917.
- [8] YANG J Z, ZHANG R, WU J. A analytical solution of macrodispersivity for adsorbing solute transport in unsaturated soils[J]. Water Resour Res, 1996, 32(2): 355-362.
- [9] PARKHURST D L, APPELO C A J. User's guide to PHREEQC (Version 2) — A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations[G]. Denver: Geological Survey, 1999.
- [10] KLOTZ D, SEILER K P, MOSER H, *et al.* Dispersion and velocity relationship from laboratory and field experiments[J]. J Hydrol, 1980, 45(3/4): 169-184.
- [11] 王志明. 核素迁移延迟系数对环境评价结果的影响[J]. 辐射防护, 2004, 24(5): 314-317.
WANG Z M. Effect of retardation coefficient for radionuclide migration on assessment results of environmental impact[J]. Radiation Protection, 2004, 24(5): 314-317. (In Chinese)