

# 不同 CDE 模型对硒在黄绵土中运移特性的模拟研究

丛 伟<sup>1</sup>, 张兴昌<sup>1,2</sup>, 封 晔<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部  
水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学林学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 污染物在土体运移是影响土体和地下水污染的一个重要的因素。为了研究不同因素对亚硒酸根离子在土体中运移的影响, 在室内不同实验条件下, 采用垂直土柱易混置换法对亚硒酸根离子在黄绵土土柱中的运移进行了研究, 获得了不同容重及不同土柱高度条件下亚硒酸根离子的穿透曲线, 通过 STANMOD 软件, 应用确定性平衡 CDE 数学模型和确定性非平衡两区模型对穿透曲线进行拟合, 研究结果表明: 容重增大, 阻滞因子  $R$  值减小, 弥散系数  $D$  值则是先增大后减小; 随着土柱高度的增加, 弥散系数  $D$  值减小, 而阻滞因子  $R$  变化不大。非平衡两区模型对于亚硒酸根离子运移参数的拟合优于平衡模型。穿透曲线能较好地反映出离子在土壤中运移的参数值, 曲线越靠近  $y$  轴、初始穿透时间越小则弥散系数  $D$  越大; 曲线越平缓则  $R$  值越大。

**关键词:** 土柱; 黄绵土; CDE 模型; STANMOD; 容重; 土柱高度; 穿透曲线

中图分类号: S153.5 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2011)03-0220-05

## Characteristics of Selenium Transport in the Loessal Soil Fitted with Deterministic Equilibrium and Nonequilibrium CDE Models

CONG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xing-chang<sup>1,2</sup>, FENG Ye<sup>3</sup>

(1. College of Resource and Environment, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3. College of Forestry, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** The transport of pollutants in soil was an important factor in affecting the pollution of the soil and groundwater. The object of this paper was to study the effect of different factors on selenite ion transport in loessial soil. The miscible displacement technique under different experiment conditions was used to obtain the breakthrough curves (BTCs) of selenite ion transport in loessial soil columns. By studio of analytical models (STANMOD) software, the BTCs of selenite ion were fitted with deterministic equilibrium CDE model and non-equilibrium two-region model. The results showed that the retardation factor ( $R$ ) increased with bulk density, but the dispersion coefficient ( $D$ ) was firstly increased and then decreased. With the soil column height increased,  $D$  decreased while  $R$  changed little. Nonequilibrium two-region model was more suited in fitting the transport of selenite ion than equilibrium model.  $D$  was larger if the inflection point of the BTCs occurred earlier or the curve was closed to the  $y$ -axis.  $R$  was larger if the curve was more flat.

**Key words:** soil column; loessial soil; CDE model; STANMOD; bulk density; soil column height; breakthrough curves

溶质在多孔介质中运移是一个复杂的物理、化学过程, 自 20 世纪 70~80 年代以来, 国外许多学者对该现象进行了较多研究, 随着研究的深入, 土壤由于不均一性引起的溶质以及污染物的迁移等问题被众多学者关注, 成为热点问题<sup>[1,2]</sup>。上世纪 60 年代初, Nielson 和 Biggar<sup>[3]</sup> 针对土壤溶质在运移过程中存在的质流、扩散以及化学反应的耦合性质进行了深入研究说明, 确立对流-弥散方程 (Convection Dispersion Equation, 简称 CDE) 来说明和解释土壤中的溶质运移过程。在一定环境条件下, 土壤中存在的重金属等污染物会随水的移动而发生迁移, 影响地表水及地下水的质量, 因此人们对于土壤中重金属的移动性产生广泛的关注。近年来, 国

收稿日期: 2010-11-14

基金项目: 中科院知识创新工程重要方向 (KZCX2-YW-441); 国家“973”计划 (2007CB106803)

作者简介: 丛伟 (1981-), 男, 山东威海人, 博士生, 主要从事土壤污染方面的研究。E-mail: sky\_5765538@163.com

通讯作者: 张兴昌 (1965-), 男, 陕西武功人, 博士生导师, 研究员, 主要从事环境工程方面的研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn

外许多学者针对重金属在土壤中的运移进行了大量的研究,取得了一些进展,其中大量的研究都是针对重金属阳离子进行的<sup>[4,5]</sup>,对于重金属阴离子和类重金属如铬酸盐和硝酸盐在土壤中的运移研究也有报道<sup>[6,7]</sup>,对于  $\text{SeO}_3^{2-}$  离子在土壤中的运移研究相对较少。在数据处理上,许多研究都是采用美国盐渍土实验室(U. S. Salinity Laboratory)研制的软件 CXTFIT2.1<sup>[8]</sup> 软件。本文以  $\text{SeO}_3^{2-}$  为对象,以陕西省神木县六道沟流域黄绵土为例,采用室内混合置换实验,应用美国盐渍土实验室开发的软件 STANMOD(Studio of Analytical Models)<sup>[9]</sup>,通过平衡 CDE 模型及非平衡两区模型,研究不同实验条件下  $\text{SeO}_3^{2-}$  在黄绵土土柱中的运移特性。

## 1 研究材料与方法

表 1 混合置换实验条件

### 1.1 供试土壤

供试土壤于 2008 年 5 月采自陕西省神木县六道沟流域。土壤类型为沙质黄绵土,表层主要植被为沙蒿。土壤基本性质:pH 为 8.19;有机质含量为 8.95 g/kg;土壤颗粒组成为:粘粒 1.96%,粉粒 46.71%,砂粒 51.34%;阳离子交换量为 26.68 cmol/kg。

### 1.2 土柱运移实验

实验中供试溶液为  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 。将黄绵土风干过 2 mm

| 编号 | 土柱规格/<br>(mm×mm) | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 水头高度/<br>cm | 平均孔隙水流<br>速/(cm·h <sup>-1</sup> ) |
|----|------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 1  | 100×40           | 1.31                         | 5           | 4.37                              |
| 2  | 100×40           | 1.35                         | 5           | 4.12                              |
| 3  | 100×40           | 1.39                         | 5           | 3.54                              |
| 4  | 80×40            | 1.31                         | 5           | 4.45                              |
| 5  | 100×40           | 1.31                         | 5           | 4.37                              |
| 6  | 120×40           | 1.31                         | 5           | 4.33                              |
| 7  | 140×40           | 1.31                         | 5           | 3.82                              |

筛,采用分层填装法将供试土壤均匀装入有机玻璃柱中,柱底部包一层滤纸,再用带孔的有机玻璃板固定。先将土柱置入蒸馏水中 24 h,控制土柱中土壤上部无明显水层,使蒸馏水自土柱由下而上饱和土柱中的土壤。将土柱固定后,通过马氏瓶控制土柱中水头高度,先用去离子水对土样进行稳定,待土柱出流液达稳定状态后,切换加入配制好的  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  溶液,开始计时,并用 20 ml 容量瓶收集出流溶液,记录对应时间,当出流液浓度与入流液浓度相当后停止实验。出流液中  $\text{SeO}_3^{2-}$  浓度采用 AFS930 原子荧光光度计测定。试验共进行了 7 次,3 个不同装土容重,4 个不同土柱高度,实验条件见表 1。

### 1.3 应用模型

表征出流液相对浓度( $C/C_0$ )随孔隙体积的变化曲线称为穿透曲线(Breakthrough Curve,简称 BTC),BTC 可以反映溶质在介质中混合置换和运移的特征。应用美国盐渍土实验室(U. S. Salinity Laboratory)研制的软件 STANMOD 通过求解一维溶质运移对流弥散方程的逆问题估算出阻滞因子  $R$ (retardation factor)。

CDE 数学模型是研究土壤介质中污染物迁移转化和环境归趋定量关系的数学表达式,本文采用确定性平衡模型和确定性非平衡模型<sup>[8]</sup>来研究亚硒酸钠在稳定流场饱和均质土壤中的运移。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CDE 模型拟合不同条件对亚硒酸根离子运移参数的影响

获得反映土壤对 Se 运移时间延迟的吸附参数—阻滞因子  $R$  值通常有 2 个途径:批量平衡法和求解对流—弥散方程逆问题的方法。批量平衡实验方法存在对土壤的扰动造成土壤团粒的破坏较大、土壤组分流动及土/液比小于自然土体等缺点<sup>[10]</sup>,胡俊栋等<sup>[11]</sup>也认为批量平衡实验不能完全揭示溶质在流动载体的存在下与土壤颗粒间的吸附分配、垂直迁移过程,所得的  $k$  值不足以反映实际淋溶情况。因此,本实验分别用平衡 CDE 模型与非平衡 CDE 模型拟合亚硒酸根离子在不同条件下运移的穿透曲线,通过求解对流—弥散方程的逆问题求解  $R$  值和其他参数(表 2、表 3),分析不同实验条件对  $\text{SeO}_3^{2-}$  运移的影响。

分别用平衡 CDE 模型和非平衡 CDE 模型中的两区物理非平衡模型对 Se 在不同容重条件下运移的穿透曲线通过 STANMOD 软件进行拟合(表 2)。从表中可见,2 种模型拟合的决定系数( $R^2$ )都接近于 1,残差平方和(RSS)接近于 0,且相差不大, $R^2$  表征了拟合 BTC 与实测 BTC 之间的接近程度, $R^2$  越接近 1,表明拟合结果越可靠;RSS 是拟合值与实测值的残差平方和,值越小,表明拟合效果越好。上述 2 点都表明拟合结果较为可靠。随着容重增加,平均孔隙水流速减小,2 种模型拟合的阻滞因子增大,这符合批量平衡试验( $1+\rho k/\theta$ )公式中容重与  $R$  值正相关的结果,与李志明等<sup>[12]</sup>研究结果一致;而 2 种模型拟合的弥散系数( $D$ )则是先增大后减小,在容重为 1.39 g/cm<sup>3</sup> 时,出现最小值,可见并非容重越大, $D$  值越大。温以华<sup>[1]</sup>、李志明等<sup>[12]</sup>研究容重对非反应性离子( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ )在土壤中的运移的影响,发现容重增加,在减小土壤大孔隙的同时小孔隙相对增加,使得  $D$  值增加。吕殿青等<sup>[13]</sup>研究  $\text{Cl}^-$  在不同容重的红壤和壤土运移特性,发现红壤中  $D$  值随容重增大而增大,壤土则是先减小后增大。Al-Salamah<sup>[14]</sup>研究了尿素在不同容重下的沙质土和壤质砂土中的运移特性,发

现随着容重增加,弥散系数  $D$  值减小,尿素的移动减弱。Chen Xiaomin 等<sup>[15]</sup>研究硝酸盐在水稻土中的垂直运移,发现低容重会加快硝酸盐的运移。可见容重对弥散系数的影响会随着土壤类型、运移离子的变化而改变,分析其原因可能是由于土壤类型的差异,使得容重的大小不能真实反映出土壤中的孔隙状况,同时由于运移离子所带电荷的电性及电荷数的差异,进一步影响了待测离子在土壤中的运移,进而影响到运移参数的拟合结果。

表 2 中,2 种模型拟合的结果差距不大,平衡模型拟合穿透曲线得到的  $D$  值高于两区模型,而  $R$  值则是两区模型拟合结果较大。Van Genuchten M T 等<sup>[16]</sup>指出, $\beta$ 、 $\omega$  表征非平衡程度,其值越低,非平衡程度越大。表 2 中在容重为  $1.39 \text{ g/cm}^3$  时, $\omega$  接近于 0,非平衡程度增大,此时两种模型拟合的  $D$  值约为相等,而  $R$  值则相差较大,变异系数为  $10.69\%$ ,说明在非平衡程度增大的条件下,平衡模型仍能较好的拟合  $D$  值,但对  $R$  值的拟合较差。当容重为  $1.35 \text{ g/cm}^3$  时,两区模型拟合的  $\beta$  值接近于 1,王代长等<sup>[17]</sup>认为当  $\beta > 0.93$  时,推荐用平衡模型进行拟合,此时两区模型拟合的  $D$  值、 $R$  值与平衡模型约为相等,说明在非平衡程度较小的情况下,两区模型仍能较好地拟合亚硒酸根离子的运移。与平衡模型相比,非平衡模型在不同的非平衡程度时都表现出了对亚硒酸根离子运移参数较高精度的拟合,更能准确反映出亚硒酸根离子在土壤中的实际运移状况。

表 2 用不同模型拟合亚硒酸根离子在不同容重条件下的 BTC 得到的参数值

| 模型   | $\rho/$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | $v/$<br>( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $D/$<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $R$   | $\beta$ | $\omega$             | $R^2$  | RSS      |
|------|--|---|---|-------|---------|----------------------|--------|----------|
| 平衡模型 | 1.31   | 4.37  | 0.6697  | 4.706 | —       | —                    | 0.9978 | 0.000402 |
|      | 1.35   | 4.12  | 0.7045  | 4.840 | —       | —                    | 0.9970 | 0.000454 |
|      | 1.39   | 3.54  | 0.2667  | 5.131 | —       | —                    | 0.9937 | 0.001283 |
| 两区模型 | 1.31   | 4.37  | 0.4703  | 4.769 | 0.5639  | 84.65                | 0.9978 | 0.000390 |
|      | 1.35   | 4.12  | 0.6989  | 4.922 | 0.9976  | 50                   | 0.9968 | 0.000466 |
|      | 1.39   | 3.54  | 0.2658  | 5.968 | 0.8421  | $1.0 \times 10^{-7}$ | 0.9930 | 0.001377 |

注: $\rho$ 为容重; $v$ 为平均孔隙水流速; $D$ 为弥散系数; $R$ 为阻滞因子; $\beta$ 为分配系数; $\omega$ 为传质系数; $R^2$ 为决定系数;RSS为残差平方和。下同。

分别用平衡 CDE 模型和非平衡 CDE 模型中的两区物理非平衡模型对 Se 在不同土柱高度条件下运移的穿透曲线通过 STANMOD 软件进行拟合(表 3)。2 种模型拟合的决定系数( $R^2$ )都接近于 1,残差平方和(RSS)接近于 0,说明拟合结果较为可靠。从表 3 中可见,随着土柱高度的增加,平均孔隙水流速( $v$ )减小,2 种模型拟合的  $D$  值减小, $R$  值变化不大,变异系数为  $2.26\%$ ,可见土柱高度的增加会使弥散系数减小,但对于  $R$  值的影响不大,这与 Khan 和 Jury<sup>[18]</sup>研究结果一致,同时批量平衡试验( $1 + \rho k/\theta$ )的公式也说明  $R$  值与土柱高度没有相关性。表 3 中平衡模型拟合的  $D$  值总体上大于两区模型,而  $R$  值则是两区模型拟合的结果较大,这与表 2 结果一致,说明两区模型在求解  $\beta$ 、 $\omega$  过程中会对  $D$  值、 $R$  值的拟合产生一定影响。刘庆玲等<sup>[19]</sup>认为非平衡模型拟合结果较差是因为拟合参数较多而影响精度。王代长等<sup>[17]</sup>则认为在平衡、非平衡模型都能较好描述离子运移时,应尽量减少参数个数以提高精度。

表 3 用不同模型拟合亚硒酸根离子在不同土柱高度条件下的 BTC 得到的参数值

| 模型   | $H/$<br>cm | $v/$<br>( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $D/$<br>( $\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $R$   | $\beta$ | $\omega$ | $R^2$  | RSS      |
|------|------------|---|---|-------|---------|----------|--------|----------|
| 平衡模型 | 8          | 4.45  | 1.485   | 4.186 | —       | —        | 0.9896 | 0.001705 |
|      | 10         | 4.37  | 0.6697  | 4.406 | —       | —        | 0.9978 | 0.000402 |
|      | 12         | 4.33  | 0.5822  | 4.280 | —       | —        | 0.9966 | 0.000577 |
|      | 14         | 3.82  | 0.4169  | 4.195 | —       | —        | 0.9878 | 0.002045 |
| 两区模型 | 8          | 4.45  | 1.025   | 4.334 | 0.7338  | 0.0913   | 0.9915 | 0.001072 |
|      | 10         | 4.37  | 0.601   | 4.465 | 0.2205  | 98.93    | 0.9978 | 0.000385 |
|      | 12         | 4.33  | 0.5114  | 4.271 | 0.4057  | 85.76    | 0.9964 | 0.000537 |
|      | 14         | 3.82  | 0.467   | 4.262 | 0.8921  | 0.2431   | 0.9883 | 0.002292 |

注: $H$ 表示土柱高度。

通过差异性分析发现,2 种模型对  $D$  值( $0.7885 \text{ a}$ ,  $0.6511 \text{ a}$ )、 $R$  值( $4.330 \text{ a}$ ,  $4.2668 \text{ a}$ )拟合的结果都为差异不显著( $p < 0.05$ ),特别是对  $R$  值的拟合,2 个模型拟合结果约为相等,可见两区模型在求解  $\beta$ 、 $\omega$  过程中对  $D$  值、 $R$  值拟合的精确度影响不大。平衡模型的建立前提是假设运移离子在土壤溶液和土壤固相之间迅速反应,达到瞬时反应平衡;非平衡模型描述的则是运移离子在土壤溶液和土壤固相间发生了受时间制约的动力学

反应过程<sup>[10]</sup>。亚硒酸根离子是反应性离子,与土壤颗粒之间的吸附分配过程更适用于非平衡过程,虽然拟合的参数较多,但对于 $D$ 值和 $R$ 值的拟合也具有较高精确度,因而采用非平衡模型对亚硒酸根离子的运移参数进行拟合更为适合。

## 2.2 2种模型拟合的 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在不同条件下穿透曲线的比较分析

图1、图2分别是2种模型拟合的 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在不同容重及不同土柱高度条件下的穿透曲线。从图中可见,在相同条件下2种模型拟合的曲线几乎完全重叠,说明2种模型均能较好地拟合 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在沙质黄绵土中的运移,拟合的结果可靠。图1中,随着容重的增加,穿透趋向向右偏移,对应的 $R$ 值越大。图2中随着土柱高度的增加,穿透曲线右移,且初始穿透所需时间也随着增加。两图中穿透曲线初始穿透时间越长,对应的拟合参数 $D$ 值越小,其中图1中虽然容重为 $1.35\text{ g/cm}^3$ 时的穿透曲线与容重 $1.31\text{ g/cm}^3$ 的穿透曲线相比向右偏移,但初始穿透时间却较小,而对应的 $D$ 值较大,可见初始穿透时间能较为直观地反映 $D$ 值的大小,初始穿透时间越小,其对应的 $D$ 值越大。2个图中的所有曲线线形较为一致,对应的拟合参数 $R$ 值相差不大。 $R$ 值反映了运移离子在土壤中所受到的阻力,阻力越大,在相同时间穿透出土柱的离子越少,穿透曲线就表现为更加平缓。但胡俊栋等<sup>[11]</sup>和Chen等<sup>[20]</sup>研究了多环芳烃淋溶行为的CDE模型模拟,他们发现由于实际阻滞因子大于模型拟合值而导致实际穿透曲线比非平衡模型拟合的穿透曲线线形表现尖而陡的形状。分析其原因是穿透曲线虽然在吸附解析全过程表现为 $R$ 值越大,穿透曲线线形总体呈现尖而陡的形状,但在吸附阶段,仍然是 $R$ 值越大,曲线越平缓。综上所述,穿透曲线线形可较好地反映阻滞因子 $R$ 值的大小,而初始穿透时间则能较好地反映弥散系数 $D$ 的大小。

## 3 结论

通过饱和和稳定条件下的混合置换实验,获得了 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在沙质黄绵土中的穿透曲线,通过STANMOD软件分别应用平衡模型和非平衡两区模型对穿透曲线进行拟合。

(1)随着容重增大,亚硒酸根离子运移的阻滞因子 $R$ 值增大,弥散系数 $D$ 值则是先增大后减小。容重的增加对弥散系数 $D$ 值产生的影响会因为运移离子和土壤类型的差异而产生变化。

(2)随着土柱高度的增加,弥散系数 $D$ 值减小, $R$ 值则变化不大,用土柱实验通过求解对流-弥散方程逆问题求解阻滞因子 $R$ 值的方法有较高的精确度。

(3)平衡模型和非平衡两区模型对亚硒酸根离子在沙质黄绵土中的运移参数的拟合总体上差距不大。在非平衡程度较大时,平衡模型对阻滞因子 $R$ 值的拟合稍差,而在非平衡程度较小时,虽然非平衡两区模型在求解 $\beta$ 、 $\omega$ 过程中会对 $D$ 值、 $R$ 值的拟合结果产生一定影响,但影响不大,仍能较为精确地拟合运移参数 $R$ 值、 $D$ 值。对于亚硒酸根离子的运移参数拟合,非平衡两区模型效果更加。

(4)穿透曲线能较好地反映出离子在土体中的运移特征:初始穿透时间越早,对应的弥散系数 $D$ 值越大;而穿透曲线的线形则能较好地反映出阻滞因子的大小,曲线越平缓则 $R$ 值越大。

参考文献:

- [1] 温以华. 不同质地和容重对 $\text{Cl}^-$ 在土壤中运移规律的影响[J]. 水土保持研究, 2002, (3): 73-75.
- [2] 吕殿清, 高继红, 金海燕, 等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中迁移行为的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 341-347.
- [3] Nielsen D R, Biggar J W. Miscible displacement in soils I: Experimental information 1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1960, 25(1): 1-5.
- [4] Huang S, Zhang R D, Zhang J Y, et al. Effects of pH and soil texture on the adsorption and transport of Cd in soils[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(11): 3293-3299.
- [5] Valderrama C, Arevalo J A, Casas I, et al. Modelling of the Ni(II) removal from aqueous solutions onto grape stalk wastes in

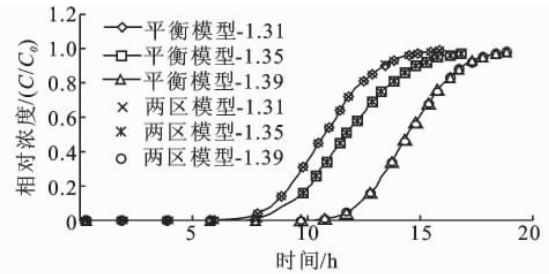


图1 2种模型拟合的 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在不同容重下的穿透曲线

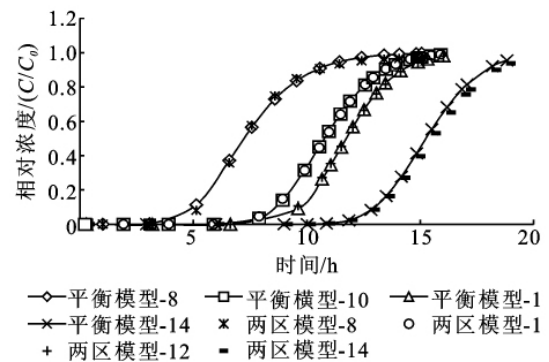


图2 2种模型拟合 $\text{SeO}_3^{2-}$ 在不同容重下的穿透曲线

- fixed-bed column[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 174: 144-150.
- [6] Li Z H. Chromate transport through surfactant-modified zeolite columns[J]. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 2006, 26: 117-124.
- [7] Yolcubal I, Akyol N H. Adsorption and transport of arsenate in carbonate-rich soils; Coupled effects of nonlinear and rate-limited sorption[J]. *Chemosphere*, 2008, 73: 1300-1307.
- [8] Toride N, Leij F J, Van Genuchten M T. The CXTFIT code for estimating transport parameters from laboratory or field tracer experiments[M]. Version 2. 0. Riverside, California; U. S. Salinity Laboratory, 1995.
- [9] Simunek J, Van Genuchten M T, Sejna M, et al. Studio of Analytical Models for solving the convection-dispersion equation [R]. Riverside, California; U. S. Salinity Laboratory, 2004.
- [10] 张增强, 张一平. 化学物质在土壤中的持留释放与运移[J]. *农业环境保护*, 1997, 16(4): 168-171.
- [11] 胡俊栋, 陈静, 王学军, 等. 多环芳烃室内土柱淋溶行为的 CDE 模型模拟[J]. *环境科学学报*, 2005, 25(6): 821-828.
- [12] 李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤容重对红壤水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(5): 101-103.
- [13] 吕殿青, 王宏, 潘云, 等. 容重变化对土壤溶质运移特征的影响[J]. *湖南师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 22(1): 75-79.
- [14] Al-Salamah I S. Effect of soil texture and bulk density on the leaching of Urea fertilizer[J]. *Met., Env. and Arid Land Agric. Sci.*, 2003, 14: 129-143.
- [15] Chen X M, Wu H S, Wo F. Nitrate vertical transport in the main paddy soils of Tai lake region, China[J]. *Geoderma*, 2007, 142: 136-141.
- [16] Van Genuchten M T, Wagenet R J. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation; Theoretical development and analytical solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53(5): 1301-1310.
- [17] 王代长, 蒋新, 贺纪正, 等. 酸性土壤中  $Cd^{2+}$  的吸附与运移特性[J]. *环境化学*, 2007, 26(3): 307-313.
- [18] Khan A U H, Jury W A. A laboratory study of the dispersion scale effect in column outflow experiments[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 1990, 5(2): 119-131.
- [19] 刘庆玲, 徐绍辉. 不同质地土壤中铜离子运移阻滞因子研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42(6): 930-935.
- [20] Chen J, Wang X J, Hu J D, et al. Modeling surfactant LAS influenced PAHs migration in soil column[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, 176: 217-232.

上接第 201 页

参考文献:

- [1] 于贵瑞. 全球变化与陆地生态系统碳循环和碳蓄积[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [2] Janssens I A, Lankreijer H, Matteucci G, et al. Productivity over shadows temperature in determining soil and ecosystem respiration across European forests[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(3): 269-278.
- [3] 朱教君, 闫巧玲, 范阿南. 东北山区次生林生态系统土壤碳通量研究[C]//第五届中国青年生态学工作者学术研讨会论文集. 广州: 中国生态学会青年工作委员会, 2008: 112-120.
- [4] 张增信, 施政, 何容, 等. 北亚热带次生栎林和人工松林土壤呼吸日变化[J]. *南京林业大学学报*, 2010, 34(1): 19-23.
- [5] 王旭, 周广胜, 蒋延玲, 等. 长白山阔叶红松林皆伐迹地土壤呼吸作用[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(5): 355-362.
- [6] 冯朝阳, 吕世海, 高吉喜, 等. 华北山地不同植被类型土壤呼吸特征研究[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 20-26.
- [7] 林丽莎, 韩士杰, 王跃思, 等. 长白山 4 种林分土壤  $CO_2$  释放通量的研究[J]. *生态学杂志*, 2004, 23(5): 42-45.
- [8] 张慧东. 寒温带兴安落叶松林土壤二氧化碳释放特征研究[J]. *林业科学*, 2008, 44(9): 142-145.
- [9] 黄耀. 地气系统碳氮交换: 从实验到模型[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [10] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, et al. Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413: 622-625.
- [11] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2668-2674.
- [12] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1983, 22: 153-160.
- [13] Yang Y S, Chen G S, Dong B, et al. Responses of soil respiration to soil rewetting in a natural forest and two monoculture plantations in subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953-958.
- [14] 杨金艳, 王传宽. 东北东部森林生态系统土壤碳贮量和碳通量[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2875-2882.
- [15] Raich J W, Tufekcioglu A. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 71-90.
- [16] 胡亚林, 汪思龙, 颜绍旭, 等. 杉木人工林取代天然次生阔叶林对土壤生物活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(8): 1411-1416.