

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.021

土壤大孔隙对坡面溶质流失的影响*

张小娜¹ 冯杰² 邵伟³ 尹义星¹

(1. 南京信息工程大学水文气象学院, 南京 210044; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044;
3. 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

摘要: 以室内实验槽为平台, 利用人工模拟降雨实验, 研究了大孔隙对坡面 Br^- 流失的影响。研究表明, 大孔隙坡面的地面径流中 Br^- 流失总量和平均流失速率均较无大孔隙坡面小。将大孔隙特征尺度、降雨强度、降雨历时、坡度和离子吸附系数作为模型的输入, 坡面溶质累积流失量作为模型输出, 建立了基于模糊神经网络的坡面溶质流失模型。并以 160 组实测数据为基础, 对模型进行了仿真验证。仿真结果显示, 坡面累积溶质流失量模拟仿真输出与实验测量输出基本一致, 所建系统模型是有效的。

关键词: 溶质流失 土壤大孔隙 模糊神经网络

中图分类号: P642.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0117-05

Effects of Soil Macropore on Slope Solute Loss

Zhang Xiaona¹ Feng Jie² Shao Wei³ Yin Yixing¹

(1. College of Hydrometeorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China
2. Water Resources Research Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China
3. College of Water Resources and Hydrology, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Using indoor experimental tanks, a simulated rainfall experiment was conducted to explore the effect of soil macropore on slope Br^- loss. Results revealed that the total amount and average rate of Br^- loss over slope land with soil macropore were less than those without soil macropore. A model of solute loss on slope was built based on fuzzy neural network. The characteristic scale of macropore, rainfall intensity, rainfall duration and adsorption coefficient of ions were used as input variables and the cumulative solute loss quantity on slope was output. Comparing with 160 sets of measured data, simulation results reflected real cumulative solute loss quantity on slope, which showed the established model was effective.

Key words: Solute loss Soil macropore Fuzzy neural network

引言

大量的室内和田间实验研究表明, 土壤大孔隙是一种普遍存在的现象。土壤大孔隙体积虽然仅占土壤体积的 0.1% ~ 5%, 但却很大程度上影响着水分及溶质在土壤中的运移^[1-4], 进而影响到坡面溶质流失。大孔隙对坡面产汇流及溶质影响的研究是当前国际上从事水、环境和土壤物理等研究学者关

注的焦点。此研究不仅对土壤学和水资源学的发展和理论建设有着极为重要的科学意义, 而且可以为生产活动及宏观决策提出科学依据。由于实验和理论的条件限制, 近十几年我国才开始对此方面进行研究。虽然起步较晚, 但也取得了不少成果^[5-14]。但总体来说, 我国在大孔隙对溶质运移的影响研究方面, 无论是实验上还是理论上均处于研究的初期阶段, 相对薄弱; 尤其是大孔隙对坡面溶质流失影响

收稿日期: 2012-05-23 修回日期: 2012-07-08

* 国家自然科学基金资助项目(41105077)、水利部公益性行业科研专项资助项目(201001047)、江苏省高校自然科学基金基础研究资助项目(11KJB170008)和南京信息工程大学科研基金资助项目(S8110144001)

作者简介: 张小娜, 讲师, 主要从事水文水资源研究, E-mail: nanaxiao86@163.com

的研究更是相对较少。本文以室内实验槽为平台,通过人工降雨实验,在分析大孔隙对坡面溶质流失的影响基础上,建立一个基于模糊神经网络的坡面溶质流失模型。

1 实验设计

实验在3个可变坡度的实验槽(长×宽×高为2 m×0.55 m×0.35 m)内进行,人工降雨系统采用黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室的侧喷区自动模拟降雨系统。为准确模拟田间的实际状况,采用分层取土法和分层填土法,0~15 cm为第1层,15~30 cm为第2层。2层土壤的基本物化性质

表1 土壤基本物化性质

Tab.1 Basic physicochemical properties of soil

| 取土深度/m | 土壤类型 | 密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 孔隙度/% | 有机质质量分数/% | 饱和土壤传导率/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|-----------|------|-----------------------------------|-------|-----------|---------------------------------------|
| 0~0.15 | 重壤土 | 2.19×10^3 | 42.1 | 1.79 | 1.624×10^{-6} |
| 0.15~0.30 | 重壤土 | 2.01×10^3 | 35.1 | 1.80 | 1.326×10^{-6} |

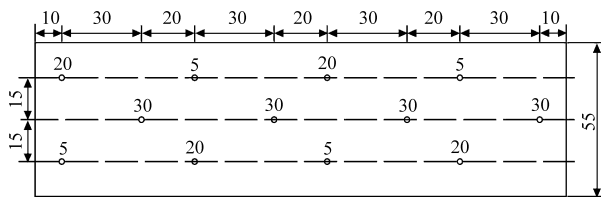


图1 大孔隙分布平面图

Fig.1 Plane distribution of macropores

2007年10~11月对3槽共进行9场人工降雨,其中前3场降雨的降雨强度设定为30 mm/h,中间3场降雨的降雨强度设定为60 mm/h,后3场降雨的降雨强度设定为120 mm/h;针对每种降雨强度,分别采用3种不同的坡度(5°、10°、15°)进行试验。每次降雨前将1.7 g KBr溶解于水中,配制成1 000 mL溶液,降雨前均匀洒入3个实验槽中。地面径流、壤中流及地下径流测定皆采用称量法。土壤容积含水量测定采用负压计法。水样中的Br⁻浓度测定采用比色法。因为在实验过程中,雨滴的打击使得实验槽表面的土壤遭到侵蚀,进而会影响到土壤大孔隙的几何形状。所以每一次降雨之前,重新按照设计好的大孔隙分布图,在不同深度处插入不同深度的不锈钢杆,之后缓慢拔出,以保证室内模拟大孔隙整个实验过程中大孔隙特征基本不发生变化。

2 大孔隙对坡面溶质流失的影响

Br⁻是保守离子,在土槽中仅作迁移运动,不发生吸附和转化。计算可得到9场降雨下的Br⁻随地面径流流失总量,其结果表明大孔隙坡面地面径流中Br⁻流失总量较无大孔隙坡面小。如:20071018

如表1所示。实验槽1中种植有紫花苜蓿,紫花苜蓿是豆科苜蓿属多年生草本植物,根系发达,是产生大孔隙的理想植物;槽2中有直径均为8 mm的人造大孔隙,其大孔隙的分布图如图1所示,图中5、20、30分布表示大孔隙深度为5、20和30 cm,人造大孔隙的制作方法是在填土过程中按照设计好的大孔隙分布图在不同深度埋入不锈钢杆,填土完毕后,小心拔出;槽3为裸土坡面。由于植被生长需要一定的时间周期,在降雨之前对3槽进行同样的处理,同时加水,加同质量的水。在无雨期,将土槽运到室外,接受日光,遇到阴雨天气,推进实验室。直至植被生长成熟,然后才进行实验。

场次下槽1、槽2和槽3地面径流中Br⁻流失总量分别为42.538、32.318和72.149 mg;20071105场次下分别为35.673、30.620和38.371 mg。这可能是由于有大孔隙坡面中存在大孔隙快速通道,使得Br⁻快速运移至地下,坡面中Br⁻量相对减少,而无大孔隙坡面中没有快速通道,Br⁻无法快速运移至地下。图2为20071018场次3槽Br⁻流失速率的动态变化,可以看出降雨前期3槽的Br⁻流失速率均处于陡降阶段,随着降雨历时的增加,3槽的Br⁻流失速率趋于平缓。分析其原因,这可能因为Br⁻带有负电荷,与土壤颗粒所带电荷相同,故土壤颗粒对其具有排斥力,Br⁻便于脱离土壤颗粒,随水溶液迁移。在开始降雨后,雨滴打击作用,使土壤表层Br⁻与降雨混合,一部分随入渗水向下层迁移,一部分保留在表土层。开始产流后,表层土壤Br⁻随径流水迁移,由于Br⁻易迁移的特点,径流Br⁻量很快下降。随之在雨滴打击下和径流冲刷作用下,使上层土壤产生流失,下层土壤有可能逐渐供给地面径流Br⁻,故供给径流的Br⁻减少,使得Br⁻的坡面流速速率随之减低并进入平缓变化阶段。降雨前期是

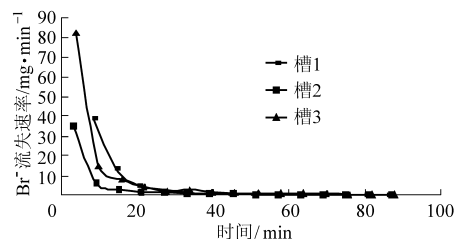


图2 地面径流中Br⁻流失速率动态变化

Fig.2 Dynamic change of Br⁻ loss rate in surface runoff

造成 3 槽 Br^- 流失量差别的重要阶段, 降雨后期, 3 槽的 Br^- 流失速率趋于相同。

3 基于模糊神经网络的溶质流失模型建立

土壤溶质随地表径流迁移是一个十分复杂的过程, 影响土壤溶质随地表径流迁移的因素很多, 如降雨特性、下垫面特性、径流冲刷、土壤抗蚀性、溶质的物理化学特性及环境温度等。作为模拟土壤溶质随地表径流迁移的模拟模型应尽可能反映这些影响因素, 然而由于对这些复杂过程中每一个具体环节研究的仍不透彻, 因此目前很难将这些物理过程用较为适用的确定性模型进行描述^[15-17]。

利用模糊神经网络实现坡面累积溶质流失量的自动预测, 主要是利用实验数据, 使在模拟坡面溶质流失量过程中能够考虑更多的因素和指标, 力求使预测的坡面溶质流失量与实测的坡面溶质流失量相似。这种方法的最吸引人之处在于预测模型具有学习功能, 可以对不明确的对象进行自学习。利用模糊神经网络建模, 不必对过程或对象内部进行分析, 只要用测得的过程输入输出数据对模糊神经网络进行训练, 就可获得其输入输出特性与实际过程等价的坡面溶质运移模型。

3.1 模糊神经网络结构

ANFIS 中, 最常用的模糊推理模型为 Takagi - Sugeno 模型^[18], 其典型模糊推理规则为

$$\text{If } x \text{ is } A \text{ and } y \text{ is } B \text{ Then } z = f(x, y)$$

它表示规则的输出为输入变量的线性组合或常值。其中, A 和 B 作为前提的模糊数, $z = f(x, y)$ 为结论中的精确数, 通常 $f(x, y)$ 为 x 和 y 的多项式。当 $f(x, y)$ 为一阶多项式时, 称为一阶 Sugeno 模糊模型。模糊神经网络的结构如图 3 所示, 其同一层的每个节点具有相似的功能, 它为有两个规则的一阶 Sugeno 模糊模型: 若 x 是 A_1 , y 是 B_1 , 则 $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$; 若 x 是 A_2 , y 是 B_2 , 则 $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ 。

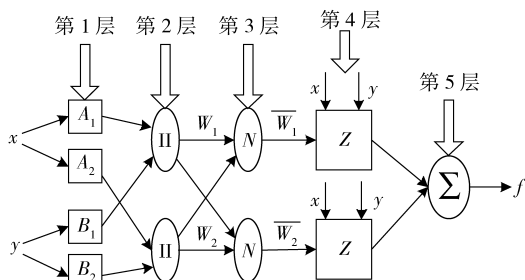


图 3 模糊神经网络结构图

Fig. 3 Structure of fuzzy neural network

第 1 层: 负责输入信号的模糊化, 这一层的每个

节点 i 是一个有节点函数的自适应节点, 即

$$O_i^1 = \begin{cases} \mu_{A_i}(x) & (i = 1, 2) \\ \mu_{B_{i-2}}(y) & (i = 3, 4) \end{cases} \quad (1)$$

式中 O_i^1 ——模糊集 A_1, A_2, B_1, B_2 的隶属函数

x, y ——节点 i 的输入

A_i, B_{i-2} ——与该节点函数相关的语言变量

$\mu_{A_i}(x)$ —— x 属于 A_i 的程度

$\mu_{B_{i-2}}(y)$ —— y 属于 B_{i-2} 的程度

隶属度函数可以是任意合适的参数化隶属函数, 通常选用钟形函数

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_i}{a_i}\right)^{2b_i}} \quad (2)$$

式中 a_i, b_i, c_i 为前提参数, 隶属度函数的形状随这些参数的改变而改变。

第 2 层: 这一层的节点负责将所有输入信号相乘, 其乘积输出为

$$O_i^2 = W_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad (i = 1, 2) \quad (3)$$

这里, 每个节点的输出代表一条规则的适应度, “ \times ”可以是任何满足 T 规范的 AND 算子^[18]。

第 3 层: 第 i 个节点计算第 i 条规则的适应 W_i 与所有规则的适应度 W 之和的比值, 即

$$O_i^3 = \bar{W}_i = \frac{W_i}{W_1 + W_2} \quad (i = 1, 2) \quad (4)$$

该层的输出称为归一化适应度。

第 4 层: 第 i 个节点具有输出为

$$O_i^4 = \bar{W}_i f_i = \bar{W}_i (p_i x + q_i y + r_i) \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

式中 \bar{W}_i ——从第 3 层传来的归一化适应度

p_i, q_i, r_i ——结论参数

第 5 层: 该层计算所有传来信号之和作为总输出, 即

$$O_i^5 = \sum_i \bar{W}_i f_i = \frac{\sum_i W_i f_i}{\sum_i W_i} \quad (i = 1, 2) \quad (6)$$

3.2 混合学习算法

虽然可以应用 BP 或梯度下降法进行自适应网络的参数辨识, 但这种简单方法收敛速度非常缓慢, 而且容易陷入局部最小。一个自适应网络的输出是某些网络参数的线性组合, 因此可以用线性最小二乘法来辨识线性参数, 这样就可以将最小二乘法与梯度下降法结合起来, 对系统的参数进行辨识。混合学习算法是一种将反向传播算法 (BP 算法) 和最小二乘法相结合的网络参数辨识方法, 其步骤如下:

(1) 确定前提参数的初始值, 用最小二乘法计算结论参数。

给定前提参数后, ANFIS 的输出可以表示成结

论参数的线性组合。由式(6)得

$$f = \frac{W_1}{W_1 + W_2} f_1 + \frac{W_2}{W_1 + W_2} f_2 = \overline{W}_1 f_1 + \overline{W}_2 f_2 = \overline{W}_1 x p_1 + \overline{W}_1 y q_1 + \overline{W}_1 r_1 + \overline{W}_2 x p_2 + \overline{W}_2 y q_2 + \overline{W}_2 r_2 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} \quad (7)$$

式中,列向量 \mathbf{X} 的元素构成结论参数集合 $\{p_1, q_1, r_1, p_2, q_2, r_2\}$,若已有 P 组输入输出数据对,且给定前提参数,则矩阵 \mathbf{A} 、 \mathbf{X} 、 f 的位数为 $P \times 6$ 、 6×1 和 $P \times 1$ 。一般的,样本数据个数远大于未知参数的个数 ($P \gg 6$),使用最小二乘法得到均方误差最小 ($\min \|\mathbf{A}\mathbf{X} - f\|$) 意义下的结论向量的最佳估计

$$\mathbf{X}^* = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T f \quad (8)$$

(2) 根据步骤(1)得到的结论参数进行误差计算,采用前馈神经网络中的 BP 算法,将误差由输出端反向传到输入端,用梯度下降法更新前提参数,从而改变隶属函数的形状。

3.3 建模思想

降雨条件下坡面土壤溶质迁移是一个复杂的物理化学过程,受到降雨特征、下垫面条件、土壤特征、化学物质性质、地形因素(坡度和坡长)以及耕作与施肥方式等众多因素的影响。这些影响因素通过溶质溶解与吸附作用、雨滴击溅作用、径流冲刷作用、溶质紊动扩散作用以及入渗水浸提携带作用不同程度上影响着土壤溶质在坡面迁移过程,只是各因素影响强度强弱表现各异。国内外学者已通过大量室内和野外实验研究,对这些因素如何影响土壤溶质迁移过程获得一定的认识和理解。根据前人的研究成果^[1],将这些因素归为降雨特征、土壤特性、地形条件和化学物质特性 4 大类。采用降雨强度和降雨历时两个因子来表征雨滴击溅对坡面溶质累积流失量的影响;采用土壤对溶质本身的吸附系数来表征溶质特性对溶质坡面流失量的影响程度;采用坡度来表征地形条件对坡面溶质流失量的影响。模糊神经网络模型是建立在大量数据的基础之上,由于实验资料中坡长和坡宽的情况较为单一,所以这里建立的基于模糊神经网络的坡面溶质流失量模型只适用于在坡长为 2 m 和坡宽为 0.55 m 的坡面,也就是说把坡长和坡宽设为定值,不考虑这两项对溶质坡面累积流失量的影响,采用土壤大孔隙特征尺度作为表征大孔隙对坡面溶质累积流失量的影响因子^[13]。

该系统有 5 个输入变量,分别是降雨强度、降雨历时、坡度、大孔隙特征尺度和离子吸附系数,每个变量都对应 3 个模糊集,所以第 1 层有 15 个节点;通过输入变量模糊集的不同组合,共生成了 243 条模糊规则,所以第 2、3 层各有 243 个节点;每 1 条模

糊规则的结论对应只有 1 个参数,所以第 4 层有 243 个节点;第 5 层是对第 4 层 243 个节点的融合结果,所以只有 1 个节点。这表明,模糊神经网络的各层已不再是一个黑箱,各节点都有了具体的意义,便于人们对知识的理解。

4 仿真验证

为验证本文提出的坡面溶质累积流失量模糊神经网络模型的有效性,以 9 场降雨 27 种坡面情况的坡面溶质累积流失量实测数据为基础,将实验数据分成训练数据集和核对数据集,训练数据集用于建模,而核对数据集用于模型验证,这样得到的模型对训练数据无偏,并对新的数据可能有较好的泛化性能。选取训练样本数据 143 组,核对样本数据 17 组,利用数据对所建立的模糊神经网络模型进行训练。网络模型的输入为降雨强度、降雨历时、坡度、大孔隙特征尺度和离子吸附系数,其中降雨强度和降雨历时可从自动模拟降雨系统中直接获取;坡度可通过测量可变坡度实验槽的仰角得到;大孔隙特征尺度通过 VIMAC 模型模拟计算得到^[13];离子吸附系数通过文献[3]得到。这 5 个变量的隶属度函数类型都选用广义钟形函数 gbellmf,隶属度函数个数都为 3。网络模型的输出为坡面累积溶质流失量。坡面累计溶质流失量可根据实验记录的地面径流量和相应时间段的地面径流中溶质浓度两者计算获得。输入变量数据分成 2 个集合,其中一个集合作为网络训练样本向量,对建立的模型进行训练,称为训练集合;另一个集合用于对训练后的模型进行检验,称为核对集合。坡面溶质累积流失量模糊神经网络模型输入数据如图 4 所示。

对通过实验获得的样本数据进行归一化处理,通过实验数据对坡面溶质累积流失量模糊神经网络模型进行训练。在进行训练时,最大训练次数设定为 120,训练误差限为 0.001,训练算法选用反向传播算法(BP 算法)和最小二乘法相结合的混合学习算法(hybrid)。经训练得到的模糊神经网络模型预测输出与实测数据的比较结果和训练过程中的误差如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可以看出,模糊神经网络模拟坡面累积溶质流失量与实验实测坡面累积溶质流失量基本一致,而从图 6 可以看出,在用实验数据对系统模型进行训练的过程中,训练数据误差和核对数据误差随着训练次数的增加同时减小,且最大均方根误差为 0.29,说明所建系统模型是有效的。模拟坡面累积溶质流失量与实测坡面累积溶质流失量的绝对误差

如图 7 所示。

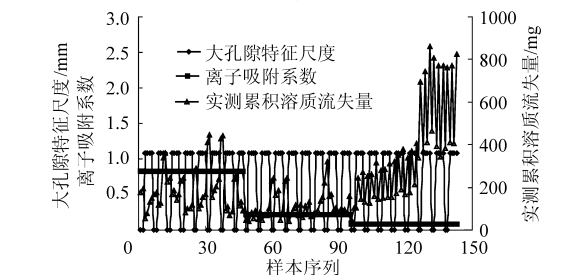
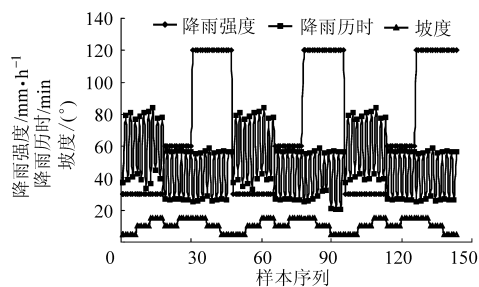


图 4 基于模糊神经网络的坡面溶质流失模型的输入数据

Fig. 4 Input data of slope solute loss model based on fuzzy neural network

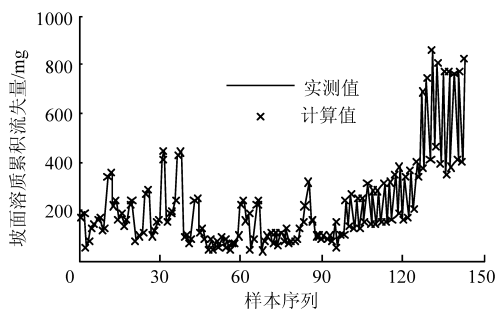


图 5 计算值与实测值的比较

Fig. 5 Comparison of calculated and measured values

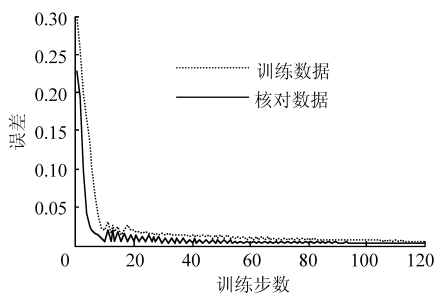


图 6 训练过程中的误差变化曲线

Fig. 6 Error change curves during training process

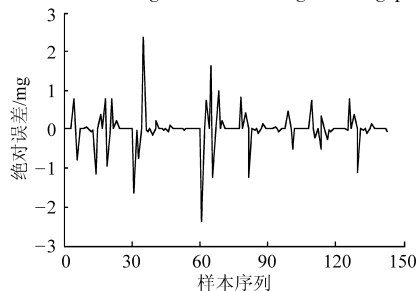


图 7 计算与实测误差变化曲线

Fig. 7 Change curve of calculated and measured error

5 结论

(1) 大孔隙坡面地面径流中 Br^- 流失总量和平均流失速率均较无大孔隙坡面小。

(2) 降雨前期是造成有无大孔隙坡面 Br^- 流失量差别的重要阶段,降雨后期,3 坡面的 Br^- 流失速率趋于相同。基于模糊神经网络,建立了坡面溶质流失模型。仿真结果表明,坡面累积溶质流失量模拟仿真输出与实验测量输出是基本上一致的。

参 考 文 献

- Eevina Lamy, Laurent Lassabatere, Beatrice Bechet, et al. Modeling the influence of an artificial macropore in sandy columns on flow and solute transfer[J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(4): 392 ~ 402.
- San José Martínez F, Martín M A, Caniego F J, et al. Multifractal analysis of discretized X-ray CT images for the characterization of soil macropore structures[J]. Geoderma, 2010, 156(2): 32 ~ 42.
- 王辉. 降雨条件下黄土坡地养分迁移机理及模拟模型 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
Wang Hui. Mechanism and simulation of nutrient transport on loess slope land during rainfall [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- Stehouwer R C, Dick W A, Traina S J. Sorption and retention of herbicides in vertically oriented earthworm and artificial burrows [J]. Journal of Environmental Quality, 1994, 23(2): 286 ~ 292.
- 区自清, 贾良清, 金海燕, 等. 大孔隙和优先水流及其对污染物在土壤中的迁移行为的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(3): 341 ~ 347.
Qu Ziqing, Jia Liangqing, Jin Haiyan. Macropores and preferential flow and their effects on pollutant migration in soil [J]. Acta Pedol Sin, 1999, 36(3): 341 ~ 347. (in Chinese)
- 倪余文. 土壤优先水流及溶质优先迁移的研究 [D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2000.
Ni Yuwen. Preferential flow and its effect on solute migration in soil [D]. Shenyang: Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2000. (in Chinese)
- 冯杰, 张佳宝, 郝振纯, 等. 水及溶质在有孔隙土壤中运移的研究: II 数值模拟 [J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(4): 77 ~ 82.
Feng Jie, Zhang Jiabao, Hao Zhenchun, et al. A study of the transport of water and solute in macroporous soils (II): numerical simulation [J]. Hydrolic Geology and Engineering Geology, 2004, 31(4): 77 ~ 82. (in Chinese)
- 马东豪, 王全九. 土壤溶质迁移的两区模型与两流区模型对比分析 [J]. 水利学报, 2004, 35(6): 92 ~ 97.
Ma Donghao, Wang Quanjiu. Analysis of two-region model and two-flow domain model for soil solute transport [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(6): 92 ~ 97. (in Chinese)

- 3 Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Gong Jirui, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. *Soil & Tillage Research*, 2004, 75:53 ~ 59.
- 4 Maurer T, Herrmann L, Gaiser T, et al. A mobile wind tunnel for wind erosion field measurements [J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 66:257 ~ 271.
- 5 Jordan S Borak, Michael F Jasinski, Richard D Crago. Time series vegetation aerodynamic roughness fields estimated from moths observations[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 135:252 ~ 268.
- 6 Daniel E Buschiazio, Ted Oobeck, Sergio A Bascal. Wind erosion quantity and quality of an Entic Haplustoll of the semi-arid pampas of Argentina[J]. *Journal of Arid Environments*, 2007, 69:29 ~ 39.
- 7 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 北方农牧交错区草原地表土壤风蚀原位测试技术[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(6):49 ~ 54.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(6):49 ~ 54. (in Chinese)
- 8 陈智, 麻硕士, 赵永来, 等. 保护性耕作农田地表风沙流特性[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1):118 ~ 122.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1):118 ~ 122. (in Chinese)
- 9 麻硕士, 陈智. 土壤风蚀测试与控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- 10 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 旱作农田近地表风沙运动与防风蚀效果[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1):54 ~ 58.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Drought farmland near surface blown sand and wind erosion controlling effect [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1):54 ~ 58. (in Chinese)
- 11 孙悦超, 麻硕士, 陈智, 等. 植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8):156 ~ 159.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Effect elements research on anti-wind erosion of conservation tillage farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(8):156 ~ 159. (in Chinese)
- 12 Chen Zhi, Cui Hongmei, Wu Pei, et al. Study on the optimal intercropping width to control wind erosion in north China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, 110:230 ~ 235.

~~~~~

(上接第 121 页)

- 9 张德生, 沈冰, 沈晋, 等. 稳态条件下土壤溶质运移的两区模型及其解析解[J]. *水利学报*, 2003, 34(10):44 ~ 50.  
Zhang Desheng, Shen Bing, Shen Jin, et al. Two-region model for solute transport in soil under the condition of steady flow[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 34(10):44 ~ 50. (in Chinese)
- 10 冯绍元, 高光耀, 霍再林, 等. 考虑弥散尺度效应的抽水井附近溶质运移模型及半解析解[J]. *水利学报*, 2010, 41(9):1 024 ~ 1 031.  
Feng Shaoyuan, Gao Guangyao, Huo Zailin, et al. Semi-analytical solution for reactive solute transport in the convergent flow to an extraction well considering scale-dependent dispersion[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(9):1 024 ~ 1 031. (in Chinese)
- 11 郭会荣. 优先流影响下的入渗补给过程及溶质运移实验与模拟[D]. 武汉: 中国地质大学, 2008.  
Guo Huirong. The experimental study and numerical simulation of groundwater recharge processes and preferential solute transport in soils[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese)
- 12 朱磊, 杨金忠, 岳卫峰. 水流在土壤大孔隙中运动的数值模拟[J]. *灌溉排水学报*, 2008, 27(3):20 ~ 23.  
Zhu Lei, Yang Jinzhong, Yue Weifeng. Numerical simulation of the transport of water in soil with macropores[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(3):20 ~ 23. (in Chinese)
- 13 张小娜. 大孔隙土壤的产汇流模型和溶质流失模型研究及实验验证[D]. 南京: 河海大学, 2009.  
Zhang Xiaona. Study on runoff yield and concentration model and solute loss model in macroporous soils and experiment verification[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese)
- 14 盛丰, 张仁铎, 刘会海. 基于分形理论的土壤优先流运动控制方程[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2):52 ~ 56.  
Sheng Feng, Zhang Renduo, Liu Huihai. Governing equations for modeling preferential flow in unsaturated soil based on fractal theory[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(2):52 ~ 56. (in Chinese)
- 15 Wilton Pereira da Silva, Jürgen W Precker, Cleide M D P S e Silva, et al. Determination of effective diffusivity and convective mass transfer coefficient for cylindrical solids via analytical solution and inverse method: application to the drying of rough rice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 98(3):302 ~ 308.
- 16 童菊秀, 杨金忠, 暴入超. 非饱和土中溶质地表径流迁移模型及解析模拟[J]. *水科学进展*, 2009, 20(1):10 ~ 17.  
Tong Juxiu, Yang Jinzhong, Bao Ruchao. Model for chemicals transfer to surface runoff in unsaturated soil and its analytical modeling[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(1):10 ~ 17. (in Chinese)
- 17 陆乐, 吴吉春, 王晶晶. 多尺度非均质多孔介质中溶质运移的蒙特卡罗模拟[J]. *水科学进展*, 2008, 19(3):333 ~ 338.  
Lu Le, Wu Jichun, Wang Jingjing. Monte Carlo modeling of solute transport in a porous medium with multi-scale heterogeneity [J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(3):333 ~ 338. (in Chinese)
- 18 李国勇. 神经模糊控制理论及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009:286 ~ 309.