

文章编号:0559-9350(2010)06-0671-06

# 黄土坡面土壤溶质随径流迁移有效混合深度模型特征分析

王全九<sup>1,2</sup>, 王辉<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 西安 712100)

摘要: 本文依据饱和土壤条件下有效混合深度概念, 建立了适合黄土坡面的土壤溶质向地表径流传递的有效混合深度模型。完全混合深度模型结构简单, 参数便于获取。而不完全混合深度模型形式上相对复杂, 参数获取具有一定难度, 为此给出了不完全混合模型的简化形式。利用试验资料分析了完全混合深度模型和不完全混合深度模型与实测径流溶质浓度匹配程度, 结果显示不完全混合模型能更好配合径流溶质浓度变化过程, 同时计算的累计径流溶质质量准确性也高于完全混合深度模型。

关键词: 黄土坡面; 有效混合深度; 土壤溶质

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

## 1 研究背景

土壤溶质随径流迁移过程涉及了土壤养分流失和土壤肥力减退, 以及水环境问题。国内外学者对此进行了大量研究, 以揭示其内在机制<sup>[1-8]</sup>, 并相继提出了不同类型的描述土壤溶质随地表径流迁移的数学模型, 主要包括集总参数模型、混合深度模型和基于溶质解吸模型<sup>[9-12]</sup>。由于混合深度模型具有明确物理意义, 成为目前研究重点模型。但国外的有效混合深度模型大都建立在饱和土壤基础上, 同时不存在严重土壤侵蚀。对于黄土地区, 土壤长期处于非饱和状态, 而且涉及严重的土壤侵蚀问题。因此如何建立适合黄土地区特殊条件下, 土壤溶质随径流迁移过程的简单易行的数学模型是需要深入研究的问题。本文依据有效混合深度概念建立了适合非饱和土壤溶质随地表径流迁移过程的有效混合深度模型, 并分析了模型特征, 为建立适合黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移过程的数学模型提供参考。

## 2 完全混合与不完全混合模型

在降雨条件下土壤溶质迁移过程可以分成两部分, 一是随入渗水向深层迁移, 一是随地表径流迁移。对于传统的完全混合与不完全混合模型, 开始降雨前混合层内部土壤处于饱和状态, 这两个过程同步发生。对于非饱和土壤, 而这两个过程分割主要取决雨强与土壤入渗能力的对比关系。为了使有效混合深度概念应用于非饱和状态, 需要将土壤水分和溶质迁移过程进行概化。假定开始降雨量首先使有效混合层内土壤饱和, 在有效混合深度饱和以后才发生产流过程; 有效混合深度内的溶质总是均匀分布, 并进入地表径流的几率相同; 无论溶质以何种方式进入地表径流, 都将看成以溶解态形式进入径流, 将土壤侵蚀的综合作用看成是对有效混合深度和浓度比例系数的影响; 在整个降雨期间混合层内溶质浓度与入渗水向深层携带的溶质浓度及随地表径流迁移的溶质浓度成固定比例关系。

收稿日期: 2008-08-22

基金项目: 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划“流域水土工程创新团队”项目; 国家自然科学基金项目资助; 中科院“百人计划”优先资助项目

作者简介: 王全九(1964-), 内蒙丰镇人, 教授, 主要从事土壤物理与农业水土工程研究。E-mail: wquanjiu@163.com

(1)产流时有效混合深度内溶质浓度。如果土壤饱和含水量为  $\theta_s$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) ,初始含水量为  $\theta_i$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) ,有效混合层厚度为  $h_m$  (cm) ,则开始降雨饱和和单位面积有效混合深度内土壤需补充水分  $w_i$  (cm) 为:

$$w_i = (\theta_s - \theta_i) h_m \quad (1)$$

满足有效混合深度内缺水需要降雨时间  $t_i$  (min) 为:

$$t_i = \frac{(\theta_s - \theta_i) h_m}{r} \quad (2)$$

式中  $r$  为降雨强度 ( $\text{cm}/\text{min}$ )。如果将溶质吸附过程看成是等温线性吸附过程,表示为:

$$c_s = kc_0 \quad (3)$$

式中:  $c_s$  为吸附在土壤颗粒上的溶质量 ( $\text{g}/\text{g}$ );  $k$  为等温线性吸附系数 ( $\text{cm}^3/\text{g}$ );  $c_0$  为土壤溶液溶质浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )。

为了推求简单描述土壤溶质随地表径流迁移模型,Ahuja<sup>[9]</sup>提出了有效混合深度概念,并认为有效混合深度内溶质浓度与向下入渗水携带溶质浓度以及径流溶质浓度呈比例,此时有效混合深度内溶质浓度 ( $c_m$ ) 可表示为:

$$c_m = \frac{h_m (\theta_s + \rho_s k) c_i}{ar(t_p - t_i) + h_m (\theta_s + \rho_s k)} \quad (4)$$

式中:  $\rho_s$  为土壤容重 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $a$  为入渗水溶质浓度与有效混合深度内溶质浓度的比值;  $c_i$  为土壤溶质初始浓度换算成饱和状态的溶质浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $t_p$  为地表积水时刻 (min)。

降雨产流后,有效混合深度内的溶质一部分随地表径流迁移,一部分随入渗水向深层运移,因此有效混合深度内溶质随时间变化可表示为:

$$\frac{dh_m c (\theta_s + \rho_s k)}{dt} = -aic - bRc \quad (5)$$

积分上式得:

$$c = c_m \exp \left( - \frac{a \int_{t_p}^t i dt + b \int_{t_p}^t R dt}{h_m (\theta_s + \rho_s k)} \right) \quad (6)$$

式中:  $c$  为产流后任意时刻有效混合深度溶质浓度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $R$  为径流强度 ( $\text{cm}/\text{min}$ );  $i$  为土壤入渗率 ( $\text{cm}/\text{min}$ );  $b$  为径流溶质浓度与混合层浓度比值。

径流溶质浓度表示为:

$$bc = bc_m \exp \left( - \frac{a \int_{t_p}^t i dt + b \int_{t_p}^t R dt}{h_m (\theta_s + \rho_s k)} \right) \quad (7)$$

式(7)描述了径流溶质浓度随时间变化过程。模型中包含了两个特殊参数,即  $a$  和  $b$ ,如果  $a$  为 1,假定入渗水溶质浓度与有效混合深度内溶质浓度相同;如果  $b$  为 1,假定有效混合深度内溶质浓度与径流溶质浓度相同;如果  $a = b = 1$ ,形成完全混合模型。但在实际中如何取值,也是值得研究的问题。本模型没有直接反映土壤侵蚀对土壤养分随地表径流迁移特征的影响,而是间接反映到混合深度 ( $h_m$ ) 和相关参数中。因此这些参数难以从理论上进行分析,仅能利用试验资料进行推求。利用基于短历时 Philip 入渗公式的产流模型<sup>[13]</sup>描述累积入渗量和累积径流量,具体的产流模型表示为:

$$I = S(t - t_m)^{0.5} - t_p r \quad (8)$$

$$R_1 = tr - S(t - t_m)^{0.5} \quad (9)$$

式中:  $I$  为累积入渗量 (cm);  $R_1$  为累积净雨深度 (cm);  $t_m = \frac{S^2}{4r^2}$ ;  $S$  为吸湿率。

这样形成了不完全混合模型:

$$bc = bc_m \exp \left( - \frac{(a - b) S(t - t_m)^{0.5} + btr - at_p r}{h_m (\theta_s + \rho_s k)} \right) \quad (10)$$

如果  $a = b = 1$  ,形成了完全混合模型:

$$c = c_m \exp\left(-\frac{tr - t_p r}{h_m(\theta_s + \rho_s k)}\right) \quad (11)$$

如果假定入渗水中溶质浓度与有效混合深度内溶质浓度相同,即  $a = 1$  ,这样就形成了部分混合模型:

$$bc = bc_m \exp\left(-\frac{(1-b)S(t-t_m)^{0.5} + btr - t_p r}{h_m(\theta_s + \rho_s k)}\right) \quad (12)$$

对式(10)取对数,并令  $c_r = bc$  ,  $A = \ln(bc_m) + \frac{at_p r}{h_m(\theta_s + \rho_s k)}$  ,  $B = \frac{(a-b)S}{h_m(\theta_s + \rho_s k)}$  ,  $C = \frac{br}{h_m(\theta_s + \rho_s k)}$  ,

则有:

$$\ln(c_r) = A - B(t-t_m)^{0.5} - Ct \quad (13)$$

由于径流溶质浓度一般比有效混合深度内溶质浓度要小许多,因此参数  $b$  比较小,这样假定  $C$  比较小,模型简化为两个参数,径流溶质浓度就变为:

$$c_r = A_1 \exp(-B(t-t_m)^{0.5}) \quad (14)$$

其中  $A_1 = \exp(A)$  。

由于径流强度  $R$  (cm/min) 可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$R = r - \frac{1}{2}S(t-t_m)^{-0.5}, t > t_p \quad (15)$$

则单位时间、单位面积上的径流溶质质量 ( $W$  g/(cm<sup>2</sup> min)) 为:

$$W = A_1 \exp(-B(t-t_m)^{0.5}) \left(r - \frac{1}{2}S(t-t_m)^{-0.5}\right) \quad (16)$$

单位面积上的累积径流失量 ( $W_1$  g/cm<sup>2</sup>) 为:

$$W_1 = A_1 \int_{t_p}^t \exp(-B(t-t_m)^{0.5}) \left(r - \frac{1}{2}S(t-t_m)^{-0.5}\right) dt \quad (17)$$

这样形成了非饱和土壤条件下土壤溶质随地表径流迁移的部分有效混合深度模型。

### 3 径流浓度随时间变化特征分析

由于土壤溶质随地表径流迁移受到多种因素的影响,建立严格意义上的土壤溶质随地表径流迁移的数学模型困难比较大,即使按照严格物理意义建立的模型包含有关土壤水分运动参数、溶质迁移参数、传递系数和混合深度等参数。而由于溶质迁移不仅涉及到水分运动,而且涉及到土壤侵蚀问题,以及他们间相互作用,这些因素耦合作用使土壤溶质随地表径流迁移过程变得更为复杂和难以准确分析。在这种情况下人们为了便于模型应用,企图寻求既具有明确物理意义,又形式上简单而参数便于推求的数学模型。有效混合深度模型概念清楚,形式简单,易于田间应用。上述模型企图通过概化,使模型在形式上简单,便于对径流溶质浓度与时间关系进行分析,探讨土壤溶质随地表径流迁移的内在物理过程。下面利用试验资料对完全混合模型和不完全混合模型描述径流溶质浓度与时间关系进行分析。

(1) 试验资料获取基本条件。本试验所用土壤为杨陵壤土,施肥方式采用表层混施,控制肥土钾肥力水平 317mg/kg。试验土槽规格为长×宽×高 = 100cm×30cm×20cm,控制壤土干容重为 1.3g/cm<sup>3</sup>,将土样均匀装入试验土槽中,其中土壤表层 10cm 填装含有肥料的土样,初始土壤质量含水量均为 10%  $\theta_s = 0.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。设定坡度为 5°和 15°。降雨采用人工降雨方式,降雨历时 90min,雨强均为 80mm/h,每组试验设 1 个重复。

(2) 模型配合径流溶质浓度效果评估。

①完全混合模型。完全混合模型(式(11))所描述的径流溶质浓度与时间呈现指数函数关系,利用试验资料探讨这种关系在黄土坡面上是否适合。下面利用试验资料对模型所描述的径流溶质浓度与产流时间指数关系进行分析,图 1 显示了雨强为 80mm/h,坡度为 5°和坡度为 15°情况下径流钾离子浓

度随时间变化过程,并利用完全混合模型对试验数据进行处理,其中坡度为 $5^\circ$ 和 $10^\circ$ 下产流时刻分别为3.5min和2min。具体拟合结果如下:

坡度为 $5^\circ$  
$$c(t) = 4.038 \times 10^{-6} e^{-0.0439(t-t_p)}$$
$$R^2 = 0.8$$

坡度为 $15^\circ$  
$$c(t) = 5.958 \times 10^{-6} e^{-0.0329(t-t_p)}$$
$$R^2 = 0.83$$

结果显示拟合系数在0.8左右,在产流前期径流浓度与曲线匹配比较差,而后期相对比较好。为了进一步分析曲线拟合结果对径流溶质质量的影响,利用实测径流过程和实测径流溶质浓度及曲线拟合结果,计算了径流溶质累计质量,结果如图2所示。并计算了相对误差,坡度为 $5^\circ$ ,相对误差为2%;坡度为 $15^\circ$ ,相对误差为12%。误差随着坡度增加而增加。但总的来看,模型对产流初期径流溶质浓度描述不够准确,主要由于产流初期,径流强度小,径流浓度大,而目前模型不能很好反映这一特征。

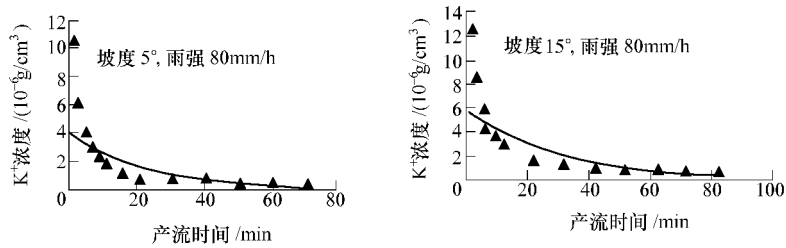


图1 径流钾离子浓度随时间变化过程

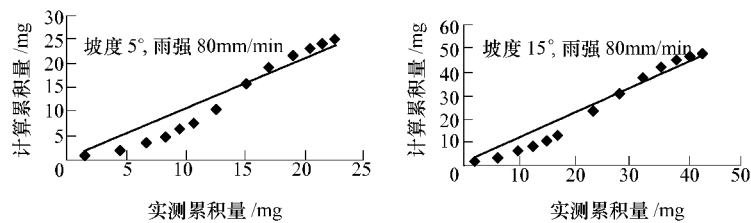


图2 实测与计算径流累计 $K^+$ 量

②不完全混合模型。不完全模型(式(14))假定径流溶质浓度、下渗水溶质浓度和有效混合层浓度不相同,但三者之间成线性关系。径流溶质浓度与时间不呈现指数关系,而是与时间平方根呈现指数关系。同样利用实测径流过程和实测径流溶质浓度进行曲线拟合(如图3所示),结果如下:

坡度为 $5^\circ$ : 
$$c_r(t) = 13.209 \times 10^{-6} e^{-0.4427(t-t_m)^{0.5}}$$
$$R^2 = 0.93$$

坡度为 $15^\circ$ : 
$$c_r(t) = 15.016 \times 10^{-6} e^{-0.3817(t-t_m)^{0.5}}$$
$$R^2 = 0.93$$

图3同样显示产流初期,拟合曲线与实测资料配合不大理想。径流溶质累计质量的计算结果如图4所示,坡度为 $5^\circ$ 时,计算结果与实测值之间的相对误差为0.3%;坡度为 $15^\circ$ 时,相对误差达6.8%。

由完全混合模型与不完全混合模型拟合径流溶质浓度情况来看,不完全混合模型配合效果更好。从计算累计径流溶质质量来看,同样显示不完全模型更加准确。

从上面利用试验资料分析模型与试验资料配合情况来看,不完全混合模型优于完全混合模型,但建立模型的目的是用于分析田间土壤溶质随地表径流迁移过程,因此要求模型结构简单和参数便于获取。从上面两个模型来看,形式上显然完全混合模型比较简单。在已知降雨入渗产流特征和土壤溶质吸附特征的前提下,模型仅包含有效混合深度一个参数。由于人们对与土壤溶质随地表径流迁移物理机制认识不够深入,目前仍未提出确定有效混合深度的直接方法,因此如何通过直接方法获得有效混合深度仍是研究的热点问题。目前一般仅通过获得径流溶质浓度随时间变化过程后,利用模型处理试验资料

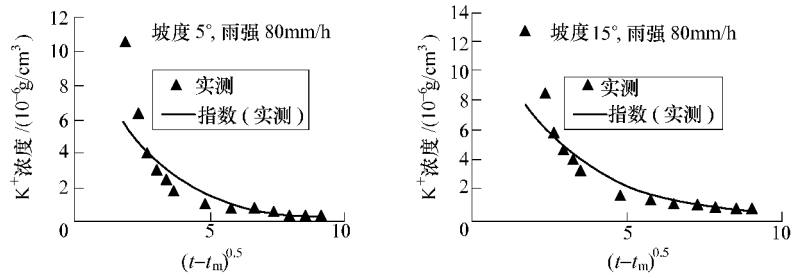


图3 径流  $K^+$  浓度随时间变化过程

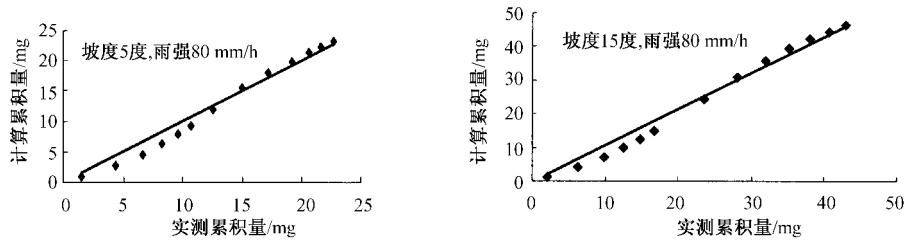


图4 实测与计算径流累计  $K^+$  量

反推有效混合深度。根据式(11)处理试验资料所获得的系数,利用式(11)所描述指数系数表达式就可以计算有效混合深度。对于本实验坡度为  $5^\circ$  和  $10^\circ$  而言,所计算的有效混合深度分别为  $3.42\text{cm}$  和  $4.56\text{cm}$ ,显示有效混合深度随坡度增加而增加。而不完全混合模型(式(10)中除有效混合深度以外,还包含有参数  $a$  和  $b$ ,而 3 个参数相互关联,需要利用实测径流溶质浓度过程,并需通过参数优选方法获得,这样易于造成参数的不唯一性。同时由于缺乏深入研究,对于  $a$  和  $b$  取值问题仍没有明确方法,需要进一步研究。因此从参数获取方面,完全混合模型的参数相对易于获得。当然利用式(14)可直接分析径流溶质浓度变化过程,仅包含参数  $A_1$  和  $B$ ,模型形式比较简单,并直接利用实测径流溶质浓度可返推参数  $A_1$  和  $B$ 。对于坡度为  $5^\circ$  和  $10^\circ$  下获得参数  $A_1$  和  $B$  分别为  $13.209 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3$  与  $0.4427$  和  $15.016 \times 10^{-6} \text{g/cm}^3$  与  $0.3817$ 。 $A_1$  随着坡度增加而增加,而  $B$  随坡度增加而减小。从上面分析可以看出,完全混合模型仅需要确定参数  $hm$ ,而不完全混合模型需要确定  $A_1$  和  $B$ ,因此在实际应用中应根据计算精度和方便性来选择所采用的模型。

#### 4 结论

根据黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移特征,结合描述饱和土壤条件下土壤溶质随地表径流迁移的有效混合深度模型特点,建立了黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移的有效混合深度模型。并利用试验资料对模型配合径流溶质浓度变化过程的进行了检验,结果显示不完全混合模型无论在配合径流溶质浓度随时间变化过程,还是计算径流溶质质量方面,都优于完全混合模型,但完全混合模型形式简单,包含参数少,易于获取,因此在模型选择应用方面,应根据计算精度和参数获取方便性方面综合确定。

#### 参 考 文 献:

- [1] 张亚丽,张兴昌,邵明安. 秸秆覆盖对黄土坡面矿质氮素径流流失的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 85-88.
- [2] 王全九,沈晋,王文焰. 降雨条件下黄土坡面溶质随地表径流迁移实验研究[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 11-17, 52.
- [3] 傅涛,倪九派,魏朝富,等. 不同雨强和坡度条件下紫色土养分流失规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(1): 71-74.

- [ 4 ] 任理,李保国,曾凡,等. 土壤溶质运移两种新的求参方法的应用[J]. 水利学报,1999(11):1-6
- [ 5 ] 刘春平,邵明安. 土壤溶质运移的边界层运动[J]. 水利学报,1999(12):11-16.
- [ 6 ] 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(4):92-97.
- [ 7 ] Walton R S,Volker R E,Bristow K L. Solute transport by surface runoff from low-angle slopes : theory and application[J]. Hydrological Processes,2000(14):1139-1159.
- [ 8 ] Wang Quanjiu,Horton Robert,Shao Ming. Effective raindrop kinetic energy influence on soil potassium transport into runoff[J]. Soil Science,2002,167(6):1-8.
- [ 9 ] Ahuja L R. Characterization and modeling of chemical transfer to runoff[J]. Adv. Soil Sci.,1986(4):149-188,
- [10] Sharpley A N. The enrichment of soil phosphorus in runoff sediments[J]. J. Environ Qual.,1983(9):521-526
- [11] Wallach Rony, Galina Grigorin, Judith Rivlin. A comprehensive mathematical model for transport of soil-dissolved chemicals by overland flow[J]. Journal of Hydrology,2001,247:85-99.
- [12] Zhang X C,Norton LD,Hickman M. Rain pattern and soil moisture content effects on Atrazine and Metolachlor losses in runoff[J]. J. Environ Qual.,1997,26:1539-1547.
- [13] 穆天亮,王全九,王辉. 基于短历时 Philip 入渗公式的产流模型[J]. 水土保持学报,2008,22(4):62-64.

## Analysis on the feature of effective mixing depth model for soil solute transporting with surface runoff on loess slope

WANG Quan-jiu<sup>1,2</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>

(1. Xian University of Technology, Shaanxi Xi'an 710048, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming, Shaanxi Xi'an 712100, China)

**Abstract:** Based on the concept of effective mixing depth a mathematical model describing the soil solute transporting with surface runoff on loess slope is developed. The incomplete mixing model is complex in structure, and is relatively difficult to obtain the related parameters. Where as, the completed mixing model is simple in structure, and the parameters in the model are easy to obtain. So that a simplified model for the incomplete mixing model is suggested. The experimental data fitting shows that, the incomplete mixing model fits the experimental data better than the complete mixing model, and the calculated accumulated solute amount by the incomplete mixing model is more accurate.

**Key words:** loess slope; effective mixing depth; soil solute

(责任编辑:吕斌秀)