

* 黄土区农田溶质径流过程模拟方法分析 *

王 全 九

(西安理工大学水资源研究所 西安 710048)

邵明安 李占斌 雷廷武

吕殿青

(中国科学院水土保持研究所 杨西杨陵 712100) (西安理工大学水资源研究所 西安 710048)
(水 利 部)

摘 要 根据黄土区土壤溶质向地表径流传递并随地表径流迁移的具体特点, 结合室内模拟实验研究分析结果, 探求了土壤溶质随地表径流迁移的影响因素和建立模拟模型的方式。同时推求了质量传递模型, 并对模型中的参数确定方法进行了分析。利用室内模拟结果, 对模型进行了初步验证。

关键词 土壤溶质 地表径流 模拟模型

Analysis of Simulating Methods for Soil Solute Transport with Runoff in Loess Plateau

W ang Q uanj iu

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology Xi'an 710048)

S hao M ing'an L i Zhanbing L ei T ingw u

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences Yangling Shaanxi 712100)

L u D ianqing

(Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology Xi'an 710048)

Abstract According to features of soil solute transport with runoff in loess plateau and experimental results in lab affect factors and method to establish simulation models of the process of soil solute transport with runoff are analyzed. The mass transfer model is set up and method to obtain parameters of the models is discussed.

Key words soil solute surface runoff stimulating model

土壤溶质随地表径流迁移是一个十分复杂的过程, 受到众多因素的影响, 如降雨特性、下垫面特性、植被条件、土壤抗蚀性、溶质的物理化学特性及环境温度等。但直接决定因素是化学元素、土体和水三者。其中化学元素是土壤溶质的组成成分, 也是研究的主要对象; 土体是土壤溶

* 收稿日期: 1999- 04- 15

* 中科院重大项目、国家自然科学基金和旱地农业与土壤侵蚀国家重点实验室基金资助项目。

质的寄存和运动的空间介质体,也是径流溶质的供给源;水是土壤溶质的溶剂和载体,也是溶质随地表径流迁移的驱动者,它不仅使土壤溶质随径流水迁移,而且使溶质随侵蚀泥沙而迁移。因此水是黄土区农田溶质迁移和动态变化的根本原因,它的迁移过程制约和决定着土壤溶质的迁移过程。所以一个完整的模拟土壤溶质随径流迁移模型不仅包括降雨—入渗—产流过程,而且要包括土壤侵蚀、溶质动态变化过程。

1 降雨过程中溶质径流迁移的主要影响因素

在一次降雨过程中,降雨初期的雨滴打击作用使土壤表层溶质与雨水混合,当土壤入渗能力大于雨强时,雨水全部入渗,土壤表层一部分溶质随入渗水分向下层迁移,表层土壤溶质含量逐渐减少。随着降雨量增多,土壤表层含水量逐渐增大,土壤入渗能力逐步小于雨强,地表开始积水,并随之产生地表径流,同时也产生土壤侵蚀与水土流失。在雨滴击溅、径流冲刷、紊动扩散及土壤侵蚀作用下,土壤溶质进入径流。土壤溶质一般以两种形式进入径流:一是溶解态形式,一般认为其存在于土壤溶液中,并随着溶液间的交换进入地表径流;另一是吸附态形式,这部分溶质被吸附在土壤颗粒上,并通过解吸和随侵蚀泥沙进入地表径流。这些溶质向地表径流传递主要受以下几方面作用的影响。

1.1 溶解和解吸作用

土壤中的化合物有的以溶解态形式存在于土壤溶液中;有的以吸附态形式被吸附在土壤颗粒上;有的未溶解以固态形式存在于土壤中。降雨—入渗过程补充了土壤水分,同时也改变了土壤溶液的浓度。这样一部分未溶解的固态物质可能溶解;一些溶质离子可能从土壤颗粒上解吸,也可能在土壤颗粒表层发生交换反应;由于同离子效应和盐基效应的作用,有些溶质的溶解度和电离度增加,有的可能减小。由于土壤是多种元素组成的复合体,因此无法用简单的公式描述这些复杂过程,一般只能根据具体溶质进行特殊处理。这一过程主要与土壤质地、土壤化学组成及其各组分含量、化学成分的溶解度和电离度、离子与土壤颗粒作用关系、离子的吸附与解吸特性、土壤水分特性及环境温度有关。

1.2 雨滴击溅作用

雨滴击溅作用在土壤溶质向地表径流迁移过程中起着至关重要的作用。一方面将表层土壤溶质与雨水混合,若土壤表面积水,击溅作用将使土壤表层溶质与表面积水及雨水混合,以供径流冲刷,起到掺和搅拌作用。同时它对下层土壤溶质起到扰动作用,加速了土壤溶质的化学物理过程的进行;另一方面雨滴击溅作用增加了土壤侵蚀,使吸附在土壤颗粒上的溶质随流失的土壤颗粒进入径流。此外,雨滴击溅作用改变了土壤表面特性,减少土壤入渗能力,使混合层土壤溶质随径流迁移的几率增加。雨滴的击溅作用表现为多种方面,因此也很难利用简单的模式进行描述。雨滴击溅作用主要与雨强、雨滴谱、雨滴动能、土壤质地、土壤容重、土壤覆盖、土壤前期含水量等因素有关。

1.3 径流冲刷作用

径流冲刷是土壤溶质损失的一个重要因素。首先它起到搬运作用,一方面将土壤表层溶解态溶质带走;另一方面径流冲刷加剧土壤侵蚀。吸附在土壤颗粒上的溶质随着侵蚀泥沙迁移而流失,增加了土壤溶质的损失;其次它起到了“催化剂”作用,由于径流冲刷使表土流失,下层土壤溶质失去了保护层,因而下层土壤溶质直接受到径流和雨滴作用,加剧了下层土壤溶质向地表径流的迁移。径流冲刷也是灌溉条件下土壤溶质随地表径流迁移的主要因素。研究径流冲刷作用是

研究土壤溶质向地表径流迁移的一个重要方面。特别对于水土流失比较严重的西北黄土地区更是如此。径流冲刷作用主要与降雨特性、土壤特性、土壤坡面特性及植被条件有关。

1.4 溶质紊动扩散作用

坡面水流在雨滴扰动及径流紊动作用下,加速了下层土壤溶质向径流传递过程,溶质紊动扩散作用远大于分子扩散作用。国外一些学者将坡面流分成层流和紊流,而层流和紊流间的溶质传递主要是在紊动扩散和雨滴扰动作用下进行的。这种作用主要与溶质种类、土壤表面的物理特性和表面糙率、坡面特性、径流排放情况、土壤特性及降雨特性等有关。

1.5 土壤入渗能力

土壤入渗能力不仅影响土壤水分运移特性和表面径流特性,而且影响土壤溶质运移特性及径流溶质运移特性。由于只有表层一定深度的土壤溶质参与径流迁移,而此深度以下的溶质不参与径流迁移,故此深度内溶质数量与土壤溶质随径流迁移量紧密相关。土壤溶质主要以对流形式随入渗水分在土壤中迁移,而表层土壤溶质的数量与土壤入渗能力密切相关,如入渗能力大,则表层土壤所含有的溶质数量减少。同时土壤表面混合层的溶质随径流迁移的几率随土壤深度的增加呈指数递减,这样入渗水量愈多,土壤溶质参与径流迁移的几率愈小,因此土壤入渗特性对于土壤溶质随径流迁移过程是十分关键的因素。

1.6 土壤植被条件

土壤植被对雨滴对土壤表面溶质与降雨水混合、土壤入渗能力、径流冲刷能力和土壤侵蚀过程具有重要的影响。由于土壤植被条件影响整个降雨-入渗-侵蚀-土壤溶质迁移过程,因此对不同植被条件下土壤溶质随径流迁移特性需进行深入研究。

影响土壤溶质随地表径流迁移的因素很多,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,因此目前还难于将这些物理过程用较为适用的模式进行描述。但一般的模型应反映一些主要因子,即径流溶质浓度可表示为:

$$c = f(\text{土壤溶质浓度及特性, 降雨特性, 下垫面条件, 土壤侵蚀特性, 植被条件})$$

2 土壤溶质随径流迁移的模拟模型理论

近几年国内外学者在室内外模拟实验基础上提出了多种多样的模拟模型,概括起来有集总参数模型^[1]、概念模型^[2]、以表层土壤为研究对象的完全和不完全混合模型^[3]、有效混合深度模型^[4]、土壤溶质分子扩散模型^[5]、对流质量传递模型^[6]、有效传递深度模型^[7]、溶质解吸模型^[8]、传递函数模型^[9]等。根据黄土区土壤溶质随地表径流迁移实验资料分析可知,这些模型有些无法应用于具有严重水土流失的黄土地区。根据对黄土坡面土壤溶质随地表径流迁移室内模拟研究结果,提出了适合黄土区的等效对流质量传递模拟模型,为流域或区域土壤溶质随地表径流迁移过程的模拟研究提供参考。

土壤溶质随地表径流迁移的途径和方式很多,无论那一种迁移机制都可概括为一个质量传递过程。土壤混合层溶质随径流迁移的几率随土壤深度呈非线性变化,而这种变化特性在模拟中很难体现,因此必须对混合层的溶质予以概化,赋予相同的迁移几率。这样认为混合层中的溶质具有相同的几率随径流迁移,且认为土壤溶质在混合层中的浓度分布是均匀的,并认为土壤溶质存在于土壤溶液中。这一概化的实质是将不同特性的化学物质迁移差别归功于质量传递系数,而溶质随径流迁移特性不发生任何变化,故称此混合深度为等效混合深度。这样无论土壤溶质是随

侵蚀泥沙或水进入径流,都可认为是通过对流质量传递方式进入径流,使模拟模型变的简单而且便于对不同条件进行比较。因此土壤溶质向径流所传递的溶质量取决于等效混合层溶质浓度和质量传递系数,用公式表示为:

$$M_r(t) = K_m C_s(t) \quad (1)$$

式中: $M_r(t)$ —— 时刻 t 向径流传递的溶质量; K_m —— 质量传递系数; $C_s(t)$ —— 时刻 t 等效混合深度内溶质浓度。

由式(1)可知,欲获得任一时刻进入径流的溶质量,需知等效混合深度内溶质浓度和质量传递系数。对于等效混合深度内溶质浓度,理论上可以通过联解非饱和土壤水分运动方程和土壤溶质迁移方程获得。但是在土壤侵蚀作用下,土壤表面发生变化,同时非饱和土壤水分运动参数和溶质迁移参数都难以确定,加上空间变异性,利用这种方法比较困难。然而目前未具有如同土壤水入渗的简单模拟土壤溶质迁移模式。因此必须对混合层内的溶质浓度变化过程进行概化。目前国外学者大都将土壤溶质浓度变化过程利用指数函数进行描述。这种模式适用于饱和土壤或不考虑水土流失。对于黄土地区存在严重的水土流失,水土流失加重了土壤溶质的流失。故此,根据实验资料分析得知,幂函数能较好描述等效混合层内的溶质浓度变化过程,即:

$$C_s = C_0 t^b \quad (2)$$

式中: C_s —— 等效混合深度溶质浓度; C_0 —— 开始产流时等效混合深度内溶质浓度; t —— 时间,产流开始时为 0; b —— 参数。

式(2)中 C_0 的确定也是饱和土和非饱和土的一大区别。对于饱和土壤,认为产流与降雨是同步的,则降雨前的土壤溶质浓度就是产流时刻土壤溶质浓度,而非饱和土壤则不然。在产流前,土壤入渗水分要挟带表层土壤溶质穿过混合层,而且穿过混合层量的多少,直接决定了混合层内土壤溶质的量。如果利用 H_0 代表等效混合深度,假定在产流前土壤水与降雨水完全混合,则根据质量平衡原理得:

$$C_0(it_p + \rho\theta H_0) = C_{10}\rho H_0 \quad (3)$$

式中: i —— 雨强 (cm/min); t_p —— 产流时刻 (min); ρ —— 土壤容重 (g/cm³); θ —— 初始土壤含水量 (g/g); H_0 —— 等效混合深度 (cm); C_{10} —— 初始土壤溶质含量 (g/g)。

因此 C_0 可表示为:

$$C_0 = \frac{C_{10}\rho H_0}{it_p + \rho\theta H_0} \quad (4)$$

将式(4)和(2)代入式(1)得:

$$\frac{dM_{r1}(t)}{dt} = M_r(t) = K_m \frac{C_{10}\rho H_0}{it_p + \rho\theta H_0} t^b \quad (5)$$

将式(5)积分得:

$$M_{r1}(t) = \frac{K_m C_{10} \rho H_0}{(b+1)(it_p + \rho\theta H_0)} t^{b+1} \quad (6)$$

式中: $M_{r1}(t)$ —— 径流溶质累积质量。

由于径流溶质浓度与径流量 $r(t)$ 的乘积为径流溶质质量,即 $M_r(t) = c(t) \times r(t)$,因此径流溶质浓度表示为:

$$c(t) = \frac{K_m C_{10} \rho}{r(t)(it_p + \rho\theta)} t^b \quad (7)$$

因此式(5)、(6)和(7)组成了等效对流质量传递模型。

3 模型参数推求方法

由于土壤溶质随径流迁移的影响因素较多, 很难通过简单的理论分析来推求出模型中的有关参数, 故此模型中的参数只能通过实验资料率定模型的方法获取。模型所表示的径流溶质质量变化过程如式(6)所描述。对于实测的径流溶质质量变化过程可用下式表示:

$$M_r(t) = a_1 t^{b_1}$$
 (8)

式中: $M_r(t)$ ——实测径流溶质质量; a_1, b_1 ——参数。
由于等式(6)和(8)所描述的径流溶质浓度应相等, 所以应有:

$$b_1 = b + 1$$
 (9)

以及

$$a_1 = \frac{k_m C_{10} \rho}{(b + 1) (it_p + \rho \theta_0)}$$
 (10)

将等式(9)和(10)变形为:

$$b = b_1 - 1$$
 (11)

和

$$k_m = \frac{a_1 b_1 (it_p + \rho \theta_0)}{C_{10} \rho}$$
 (12)

等式(11)和(12)就是利用实测资料率定参数的表达式。

笔者根据室内模拟实验资料推求了不同降雨强度下质量传递系数, 如表 1 所示。

表 1 质量传递系数

雨强/mm · m in ⁻¹	1. 65	1. 01	0. 65
质量传递系数	0. 3638	0. 2910	0. 1053

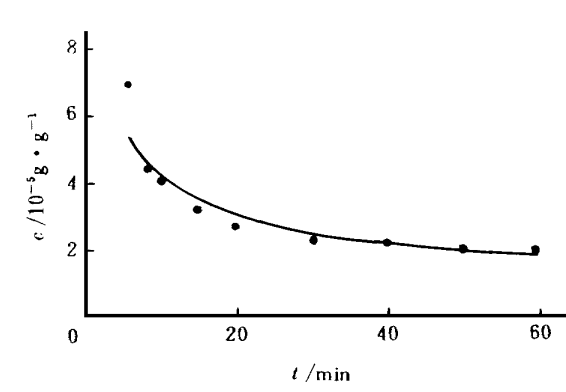


图 1 径流溶质浓度变化过程

从图 1 所示结果可知, 模型基本能反映径流溶质浓度变化特性。

5 结 语

本文在分析黄土区土壤溶质随地表径流迁移特性以及影响因素的基础上, 推求了对流质量
(下转第 104 页)

由表 1 可知, 随着降雨强度的增加, 质量传递系数相应增加, 这就说明了随着降雨强度的增加, 土壤溶质向地表径流迁移的数量增加, 这与实际情况是相吻合。

4 模型初步验证

由于对土壤溶质随地表径流迁移的研究目前还比较少, 因此缺乏野外实测资料。故此本文仅从室内模拟实验结果对其进行简单验证。当然田间与室内存在很大区别, 对于模型的可行性仍需进一步研究与改进。图 1 所示了实测结果与模拟结果间关系。

471~ 476

- 38 Waston D. A and Laflen J. M. Soil Strength, Slope and Rainfall Intensity Effects on Interrill Erosion Transactions of The A S A E, 1986, 29: 98~ 102
- 39 Al-durrah M. , and J. M. Bradford New Methods of Studying Soil Detachment due to Waterdrop Impact Soil Sci Soc Am. J, 1981, 45: 949~ 953
- 40 Cruse R. M and Larson W. E Effect of Soil Shear Strength on Soil Detachment due to Raindrop Impact Soil Sci Soc Am. J, 1977, 41: 777~ 781
- 41 Coote, D. R. , and C. A. Malcolm Mc Goven et al Seasonal Variation of Erodibility Indices on Shear Strength and Aggregate Stability in Some Ontario Soils Can J. Soil Sci , 1988, 68: 405~ 416
- 42 Mutchler C. K and Carter C. E Soil Variation during the Year Transactions of the A S A C, 1983, 26(1): 1102~ 1108

(上接第 71 页)

传递模型, 并分析了模型参数确定方法。同时利用实验结果对模型进行了简单验证。由于土壤溶质随地表径流迁移影响因素较多, 同时本身过程也十分复杂, 因此本研究仍属于初步探讨。大量的工作需进一步研究分析。

参考文献

- 1 Bruce, et al A Model for Runoff of Pesticides from Small Upland Water Sheds J. Environ. Qual 1974, 4: 541~ 548
- 2 Baiky et al Predicting Pesticide Runoff from Agriculture Lands: A Conceptual Model J. Environ. Qual , 1974, 3: 95~ 102
- 3 A huja et al The Depth of Runfall-runoff-soil Interactions as Detemined by p³². Water Resour. Res 1981, 17: 967~ 974
- 4 A huja Release of A Soluble Chemical from Soil to Runoff Trans A S A E, 1982, 25: 948~ 956
- 5 Rony Wallach et al Transfer of Chemicals From Soil Solution to Surface Runoff: a Diffusion-based Soil Model Soil Sci, Am. J. 1988, 52: 612~ 628
- 6 Rony Wallach et al The Concept of Convective Mass Transfer for Predicting of Surface Runoff Pollution by Soil Surface Applied Chemicals Trans A S A E 1989
- 7 Rony Wallach et al Modeling Solute Transfer from Soil to Surface Runoff: The Concept of Effective Depth of Transfer J. Hydrology, 1989, 109: 307~ 317
- 8 A. N. Sharpley et al The Kinetics of Phosphorts Desorption from Soil Soil Sci Am. J. 1981, 45: 493~ 496, 1981
- 9 王全九等 黄土坡面溶质随径流迁移相应函数模型 水利学报, 1994(11)