

# 浑水入渗机制及模拟模型研究\*

王全九 王文焰

(西安理工大学)

邵明安

(中科院 水利部水土保持研究所)

汪志荣 吕殿青

(西安理工大学)

**摘 要** 泥沙的沉积会改变土壤表面特性,影响土壤的入渗特性,但目前对此问题仅是通过实验研究,未形成具有物理机制的计算土壤入渗过程的模型,不利于根据现代土壤物理方法描述浑水入渗过程。该文通过对浑水入渗特性和浑水入渗规律的分析,对现有的 Green-Ampt 入渗模式进行改进,将泥沙沉积对入渗的影响归结为对湿润锋平均吸力的影响。这样有利于利用现有清水入渗模式来计算浑水入渗过程,并且利用室内模拟实验资料对模型进行检验,检验结果表明该模型是合理的。

**关键词** 浑水入渗 Green-Ampt 公式 模拟模型

长期以来,黄河流域由于水资源短缺,一些灌区不得不引取含沙水流进行农田灌溉。特别是近几十年来,在陕西省泾惠、洛惠及宝鸡峡三大灌区以及华北等地又开展了引浑淤灌,使灌溉水的含沙量大大超过了 15 %。

多年来,引浑灌溉在缓减旱情和增加土壤肥力、改良土壤质地和改良盐碱地等方面发挥了巨大作用。但由于泥沙的沉积改变了土壤表面的机械组成,以及影响了土壤的入渗机制<sup>[1]</sup>。目前对这一问题的研究主要通过实验方法揭示浑水的入渗规律,并利用相关分析的方法建立含沙量与入渗率间的相互关系等。而未从土壤物理学的角度对这一问题的内在机制进行深入研究。本文试图根据国内外有关研究的成果,通过浑水入渗物理机制的分析研究,提出其具有物理意义的模拟模型,并利用实验资料对其做进一步分析。

## 1 浑水入渗物理机制分析及数学模型

### 1.1 物理机制分析

浑水与清水的入渗过程,除具有相同的物理机制外,对于浑水来讲,还存在着浑水中含沙物质对入渗过程的特殊影响关系。

众所周知,在浑水灌溉中,由于含沙水流是在糙率较大的田间流动,因而一部分泥沙将在流动过程中不断地挂淤在高低不平的田面上;同时含沙水流在田面的流动实质是一个非恒定的水流推进过程,其推进流量及流速随着沿程入渗水量的增加而逐渐减小,以致水流的挟沙能力也在不断降低,因此造成水流在推进过程中部分泥沙将沿畦长方向逐渐落淤;此外随着含沙水流沿畦长方向的逐渐入渗,其入渗水量中的泥沙也将全部滞留于田面。这样在浑水灌溉中作为含沙水流中的泥沙这一“客体”,在上述挂淤、落淤及入渗滞留的作用下,在田面上逐渐形成

收稿日期: 1998-05-11 1999-01-20 修订

\* 中科院重大项目(KZ951-B1-211)、国家自然科学基金(59779027、59849005)和旱地农业和土壤侵蚀国家重点实验室资助项目

王金九, 博士, 副教授, 西安市金花南路 西安理工大学 748 信箱, 710048

了一个光滑的致密层。致密层的形成与发展改变了土体入渗的上边界条件及性状, 表现为致密层密度增加, 孔隙度减少, 导水能力明显降低。正是由于在浑水入渗的情况下, 含沙水流在土壤表面逐渐形成了一个致密层, 实质上是将土壤这一入渗体变成了一个上实下松的双层结构, 从而使表土致密层成为整个入渗过程的一个控制层。也就是说不同含沙水流的入渗能力, 将主要受控于相应含沙水流所形成的表土致密层的性状<sup>[2~4]</sup>。

## 1.2 数学模型

根据上述浑水入渗物理机制的分析, 可以看出在利用数学模型来表述浑水入渗能力的变化过程存在两个途径: 一是将入渗土体看成是一个具有致密层的双层结构, 从而对整个入渗起控制作用的表土致密层建立函数关系。此种情况下可以假定致密层在整个入渗过程中已达到饱和, 利用达西定律可建立入渗通量关系, 但该模型求解困难。

另一途径是在建模时仍将整个土壤层作为研究对象, 根据 Green-Ampt 公式的建模思路与假定, 并将致密层对土壤入渗的影响全部归功于湿润锋处平均吸力的影响, 这样使湿润锋处的平均吸力成为含沙量的函数, 即

$$q = k_s \left( 1 + \frac{H(\rho)}{L_f} \right) \quad (1)$$

式中  $q$ ——土壤入渗通量,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $H(\rho)$ ——湿润锋处的平均吸力,  $\text{cm}$ ;  $k_s$ ——土壤饱和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$ ;  $\rho$ ——浑水泥沙含量,  $\text{g}/\text{g}$ ;  $L_f$ ——湿润锋的深度,  $\text{cm}$ 。

根据水量平衡原理可由下式求得

$$F = (\theta - \theta_0)L_f \quad (2)$$

式中  $F$ ——累计入渗量,  $\text{cm}$ ;  $\theta, \theta_0$ ——分别为土壤饱和及前期含水量。

(1) 式浑水入渗模型, 与 Green-Ampt 公式的不同之处在于概化湿润锋处的平均吸力值, 引入了浑水含沙量的影响关系, 并将清水与浑水两种入渗通过概化湿润锋处平均吸力有机地联系起来。因此, 这一公式能否与实际的浑水入渗过程相吻合, 以及如何确定湿润锋处平均吸力与浑水含沙量的函数关系式, 并将浑水入渗与清水入渗有机的联系起来是本项研究进一步需要解决的重要问题。

## 2 浑水入渗模型的验证

### 2.1 实验方法

试验土样取自西安杜陵塬的马腾空地区。颗粒组成如表 1 所示, 根据颗粒组成分析, 本土样为重沙壤土。土样经风干, 过筛处理后, 按容重为  $1.35 \text{ g}/\text{cm}^3$ , 分层装入直径为  $11.8 \text{ cm}$ , 高为  $80 \text{ cm}$  的有机玻璃圆筒内。实验是在一维垂直土柱入渗装置上进行的。在实验过程中保持土面以上水头为  $4 \text{ cm}$ 。土样前期含水量为  $0.024 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 饱和含水量为  $0.48 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。在整个实验过程中, 测定累计入渗量的变化过程。为了研究不同泥沙量的浑水入渗特性, 对清水及含沙量为  $10\%$ 、 $20\%$ 、 $30\%$  和  $40\%$  的浑水分别进行了入渗实验。并利用下式对累积入渗量与入渗时间关系进行了拟合

$$F = at^b \quad (3)$$

式中  $F$ ——累积入渗量,  $\text{cm}$ ;  $t$ ——入渗时间,  $\text{min}$ ;  $a, b$ ——系数。

拟合结果如表 2 所示。从相关系数  $r$  来看实测资料符合幂函数形式。

表 1 实验土壤颗粒组成与物理参数

Tab 1 Soil particle size distribution and physical parameters

颗粒直径 /mm	< 0.1	< 0.05	< 0.01	< 0.005	< 0.001	饱和含水量 /cm <sup>3</sup> · cm <sup>-3</sup>	饱和导水率 /cm · min <sup>-1</sup>
含量/%	100	45.0	18.5	7.67	3.95	0.48	0.0105

表 2 土壤入渗参数拟合值

Tab 2 Fitted values of parameters  
of infiltration

含沙量 /%	a	b	r
0	0.63513	0.5069	0.99975
10	0.49676	0.5484	0.99964
20	0.31666	0.5855	0.99910
30	0.29766	0.5909	0.98923
40	0.23353	0.6405	0.98991

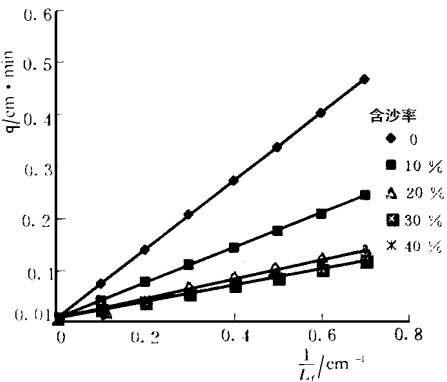


图 1 土壤入渗率与湿润锋处平均吸力间关系曲线

Fig. 1 Relationship between soil infiltration  
rate and average suction at wetting front

2.2 结果分析

将不同泥沙含量的入渗资料, 根据公式(1)进行了处理, 点绘了入渗率与概化湿润锋深度的倒数间关系曲线, 如图 1 所示。从图示结果来看, 入渗率与概化湿润锋深度的倒数具有明显的线形关系。同时不同泥沙含量的关系线基本交于一点, 其值为 0.01 cm/min, 与土壤饱和导水率基本相同。同时各条直线的斜率随着入渗水含沙量的增加逐渐减小。这说明了湿润锋平均吸力随着入渗水泥沙含量的增加呈现递减, 这些结果证明了上述浑水入渗模型是正确的。同时图 1 所示含沙量为 0 的清水入渗关系也证明了 Green-Ampt 公式也适用于黄土地区。因此可以通过湿润锋平均吸力将清水入渗与浑水入渗联系起来。

根据等式(1)可以计算出各种情况下, 湿润锋平均吸力。结果显示随着浑水含沙量的增加, 湿润锋平均吸力减小。但当含沙量增加到 30 % 以后, 该平均吸力基本趋于稳定。说明当泥沙量高达某一值后, 泥沙含量的继续增加对土壤入渗的影响甚小。如果以清水入渗的吸力作为基点, 对不同泥沙含量情况的湿润锋平均吸力利用式(4)处理为无量纲数。并将处理后的吸力定义为相对吸力  $H$ , 即

$$H = \frac{H(\rho)}{H(0)} \tag{4}$$

式中  $H$  ——相对吸力;  $H(\rho)$  ——不同含沙量的浑水入渗的湿润锋处平均吸力, cm;  $H(0)$  ——清水入渗的湿润锋处平均吸力, cm。利用指数函数对相对吸力与泥沙含量间关系进行拟合, 拟合结果为

$$H = 0.8831 \exp(-5.3015\rho) \tag{5}$$

该式相关系数  $R = 0.93$ 。则任一含沙量的浑水入渗情况下, 其湿润锋处的平均吸力可表示为

$$H(\rho) = 0.8831 \times H(0) \exp(-5.3015\rho) \tag{6}$$

当然对于清水入渗情况下的概化湿润锋平均吸力,也可利用土壤的非饱和导水曲线和现有的公式来计算,这里不多叙述。对于本研究土壤,不同泥沙含量的浑水入渗率可表示为

$$q = 0.01 \left( 1 + \frac{65 \times 0.8831 \exp(-5.3015 \rho)}{L_f} \right) \quad (7)$$

对于入渗率或累积入渗量与时间的关系可利用现有的公式计算,即

$$t = \frac{\theta - \theta_s}{k_s} (L_f - H(\rho)) \ln \left[ \frac{H(\rho) + h + L_f}{h + H(\rho)} \right] \quad (8)$$

式中  $h$ ——土壤表面积水深度, cm。

对于表面积水深度较少的情况,  $h$  可假定为 0, 这样上式可简化。

### 3 结 语

在浑水灌溉过程中,灌溉水中所携带的泥沙会沉积在土壤表面,影响土壤入渗能力。本文在分析浑水入渗物理过程和内在机制的基础上,对现存的 Green-Ampt 公式进行了必要的改进,并将浑水泥沙对入渗的影响归结为对湿润锋平均吸力的影响。同时将湿润锋平均吸力与泥沙含量建立关系,便于利用现有的清水入渗资料计算浑水入渗过程。并根据实验资料对模型进行了检验。检验的结果证明模型是合理的。同时也说明了 Green-Ampt 公式适合于黄土地区的清水浑水入渗过程的模拟计算。

#### 参 考 文 献

- 1 王文焰等. 波涌灌溉试验研究与应用. 西安: 西北工业大学出版社, 1994, 73~ 80
- 2 王全九等. 层状土入渗机制与数学模型. 水利学报, 1998, 1(增刊): 76~ 79
- 3 A huja L R. Applicability of the Green and Ampt type model for infiltration through surface crust. Soil Sci, 1994, 118: 283~ 288
- 4 A huja L R, Modeling infiltration into crusted soils by the Green-Ampt approach. Soil Sci Soc Am J 1983, 47: 412~ 418

## Mechanism and Simulating Model for Muddy Water Infiltration

Wang Quanjiu Wang Wenyan

(Xi'an University of Technology, Xi'an)

Shao Ming'an

(Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR)

Wang Zhirong Lu Dianqing

(Xi'an University of Technology)

**Abstract** The sediment will deposit on the surface of irrigated soils when the muddy water is used to irrigate. The deposition layer will change the surface features of irrigated soils. Therefore infiltration features of muddy water is different from that of clean water. But these problems have been only researched by the way of experiment and there are not any models with physical bases to forecast the infiltration processes of muddy water. In the paper the original Green-Ampt Equation was modified based on the analyses of infiltration features of muddy water. Effect of deposited sediment on infiltration was reflected by the average suction of wetting front. And the modified Green-Ampt Equation was convenient to calculate the infiltration process through existed infiltration data for clean water infiltration. The modified Green-Ampt Equation was checked by lab experimental data and the result indicated that the model is reasonable.

**Key words** muddy water infiltration, Green-Ampt equation, simulation model