

# 基于 Green - Ampt 和 Philip 模型的波涌灌间歇入渗模型研究

傅渝亮 费良军 聂卫波 陈琳 吴军虎

(西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

**摘要:** 为了进一步揭示波涌灌间歇入渗的影响机制与规律,基于 Green - Ampt 和 Philip 入渗模型理论,建立了波涌灌间歇入渗分区模型,将第 2 供水周期及其后的供水周期内形成的入渗湿润区分别划分为重力势湿润区和基质势湿润区,并阐述了基于间歇入渗过程湿润区的分区入渗理论,通过 Green - Ampt 模型和 Philip 模型参数间的内在联系,建立了关于土壤体积含水率增量与累积入渗量之间的数学模型,并进一步根据土壤体积含水率增量与累积入渗量之间的线性图形特征,确定了不同分区下各供水周期的水分运动参数,分别为湿润锋面处吸力  $h_f$  与表征饱和导水率  $K_s$ ,且各间歇周期供水阶段的  $h_f$  随着周期数的增大呈减小趋势,最后,利用分区模型将不同供水周期下的累积入渗量与湿润锋运移距离计算值同实测资料相比较,与实际值相比总体平均相对偏差分别为 3.6% 和 8.6%,改进模型的适用性较好,拟合精度较高。因此,该模型可以较准确地描述波涌灌间歇入渗机理,为波涌灌灌水技术的合理设计提供了理论依据。

**关键词:** 波涌灌; 间歇入渗; Philip 模型; Green - Ampt 模型; 饱和导水率; 湿润锋吸力

**中图分类号:** S275.8      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0194-08

## Intermittent Infiltration of Surge Irrigation Model Research Based on Green - Ampt and Philip Models

Fu Yuliang Fei Liangjun Nie Weibo Chen Lin Wu Junhu

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

**Abstract:** In order to reveal the further influence mechanism and law of intermittent infiltration of surge irrigation, based on the theory of Green - Ampt and Philip models, this paper proposes the concept of dividing the infiltration and wetting zone of the second water supply period and later period of water supply into two zones. The two zones were humid region of gravity potential and matrix potential. And the infiltration of concept characteristics of two zones was described. Building a mathematical model of the increasing capacity of volumetric water content by the inner relationship between the parameters of the two models (Green - Ampt and Philip models) and based on the linear pattern characteristics between the increment of soil volumetric water content and cumulative infiltration capacity, the water movement parameters of different water supply periods were determined. One of the water movement parameters was suction value of wetting flog  $h_f$  and another was characterized saturated hydraulic conductivity  $K_s$ . The value of  $h_f$  of intermittent period has the decreasing trend with the increase of the number of cycles. Finally, using the improved model to compare the calculated cumulative infiltration capacity and wetting front with measured data, a higher fitting precision was acquired. Compared with the measured data, the overall average relative deviations were 3.6% and 8.6% respectively. The improved model has good applicability. Hence a more accurate description of the mechanism of intermittent infiltration of surge irrigation could be described by this model which provides theoretical basis for the reasonable design of

收稿日期: 2016-06-21 修回日期: 2016-07-14

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51279157, 51479161, 51079121)和陕西省教育厅重点实验室项目(15JS064)

**作者简介:** 傅渝亮(1985—),男,博士生,主要从事节水灌溉与农业水土工程研究, E-mail: 42125548@qq.com

**通信作者:** 费良军(1963—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉和农业水资源利用与水环境研究, E-mail: feiliangjun2008@163.com

surge flow irrigation technology.

**Key words:** surge irrigation; surge infiltration; Philip model; Green - Ampt model; saturated hydraulic conductivity; suction of wetting front

## 引言

波涌灌条件下土壤水分入渗属于间歇入渗。波涌灌作为一种改进的地面灌溉方法,以其良好的节水效果受到国内外学者的广泛关注<sup>[1-5]</sup>,并且在波涌灌间歇入渗特性<sup>[6-7]</sup>和节水机制方面<sup>[8]</sup>取得了大量成果,但对于入渗机理及模型模拟方面的研究较少<sup>[9]</sup>,难以系统地描述间歇入渗过程。在灌溉过程中,由于地表干湿反复交替作用,形成了直接影响地表入渗能力的致密层。目前,关于致密层对土壤水分入渗的影响仍是研究热点之一。由于致密层的形成及其影响因素较复杂,难以确定准确的适用于波涌灌间歇入渗的确定性参数模型,从而限制了波涌灌的田间应用<sup>[10]</sup>。樊贵盛等<sup>[11]</sup>通过波涌灌大田试验阐述了间歇入渗过程的减渗机理,并分析了土壤入渗能力的降低主要是因为土壤入渗湿润区上边界水力传导度的减小,使地表形成并发展为致密层。为有效阐述间歇入渗的减渗特性,汪志荣等<sup>[12]</sup>基于 Green - Ampt 模型分析了间歇入渗过程,并将致密层对入渗的影响归结为概化饱和和区导水率的变化,并结合 Darcy 定律,估算出相应间歇周期下的表征导水率和湿润锋处的土壤吸力,并提出了土壤吸力为一个不随周期变化的常数。

上述研究成果均忽略了变化的吸力  $h_f$  对间歇入渗过程的影响。笔者认为,Green - Ampt 模型在间歇入渗应用过程中,主要有两方面因素共同影响间歇入渗减渗效果,一方面是对概化的饱和区的影响,这主要由饱和导水率决定;另一方面是基于间歇周期内停水阶段土壤含水率的再分布影响,彭振阳等<sup>[13]</sup>通过一维入渗理论分析与实验研究指出过渡层占湿润层的比例变化主要原因之一就是土壤初始含水率。

关于参数  $h_f$  的研究,张光辉等<sup>[14]</sup>以 Brooks 和 Corey 持水模型条件下的 van Genuchten 导水模型为基础,研究了参数  $\Delta\theta$  与  $h_f$  之间的变化规律( $\Delta\theta$  为饱和含水率与初始含水率之差),提出吸力  $h_f$  仅与  $\Delta\theta$  的变化有关。因此,探明间歇入渗条件下,波涌灌间歇入渗过程中  $\Delta\theta$  与  $h_f$  之间的变化规律非常重要。

对于  $h_f$  与  $\Delta\theta$  两参数之间的关系,KHANJI 等<sup>[15]</sup>提出吸力库容(Storage-suction factor)这一概念,用符号  $C$  表示,其值为湿润锋面处有效基质吸

力  $h_f$  与  $\Delta\theta$  乘积,即  $C = h_f \Delta\theta$ ,其取值范围为  $0 \sim 0.1 \text{ m}$ 。BEVEN<sup>[16]</sup>利用 G - A 入渗模型,假定吸力库容为一常数,并根据此假设分析并验证了  $h_f$  随  $\Delta\theta$  增大而减小这一结论。对于实际间歇入渗第 2 间歇周期(即经过第 2 个供水和停水的整个过程)及随后的间歇周期入渗过程中,土壤初始含水率  $\theta_i$  随着间歇周期的周期数(即完成波涌灌入渗全过程所需供水和停水过程的次数)的增加而增大,即  $\Delta\theta$  小时,  $h_f$  增大。从模型上进一步说明了  $\Delta\theta$  与  $h_f$  之间呈负相关关系。

对于  $\Delta\theta$  在间歇入渗过程中的变化规律,到目前为止,未见相关报道,因此,本文在 Green - Ampt 和 Philip 入渗模型以及波涌灌研究成果基础上,利用 Green - Ampt 和 Philip 模型二者内在的参数关系,引用土壤含水率增量  $\Delta\theta$  的概念<sup>[13]</sup>,并考虑湿润区土壤含水率增量随时间的变化,建立相关入渗参数的改进模型,提出基于间歇入渗过程湿润区的分区理论,对间歇入渗各供水周期下,不同湿润区的分区入渗参数进行求解,旨在为波涌灌灌水技术研究提供理论依据。

## 1 基本理论

### 1.1 Philip 模型

PHILIP<sup>[17]</sup>认为在入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈幂级数关系,模型表达式为

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (1)$$

式中  $i$ ——入渗率,  $\text{cm}/\text{min}$

$S$ ——土壤吸湿率,  $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$

$t$ ——入渗时间,  $\text{min}$

$A$ ——稳渗率,  $\text{cm}$

对于短历时入渗,土壤基质势在土壤水分垂直入渗过程中为主要驱动力的情况下,Philip 入渗模型可简化为

$$i = \frac{1}{2}St^{-0.5} \quad (2)$$

不同的入渗率对应不同的入渗时间,土壤吸湿率  $S$  可根据确定的入渗率和相应的入渗时间拟合确定,本文因各间歇周期的时间较短,均采用短历时入渗公式(2)计算入渗率。

### 1.2 Green - Ampt 模型

Green - Ampt 模型<sup>[18]</sup>基本假定为:入渗时存在

明确的水平湿润锋面,同时具有固定不变的吸力  $h_f$  (cm),土壤含水率  $\theta$  的分布呈阶梯状,湿润区为饱和含水率  $\theta_s$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),湿润前锋为初始含水率  $\theta_i$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ),由达西定律得出地表处入渗率为

$$i = K_s \frac{h_0 + h_f + z_f}{z_f} \quad (3)$$

式中  $K_s$ ——土壤表征饱和和导水率,  $\text{cm}/\text{min}$

$h_0$ ——土壤表面积水深度,  $\text{cm}$

$z_f$ ——概化的湿润锋深度,  $\text{cm}$

对于压力水头较小 ( $h_0 < 5 \text{ cm}$ )、一维积水垂直入渗、且入渗时间相对较短的情况,基质势和重力势起主要控制作用,式(3)可简化为

$$i = K_s \frac{h_f + z_f}{z_f} \quad (4)$$

其中,概化的湿润锋深度可根据水量平衡原理确定,具体表示为

$$I = (\theta_s - \theta_i) z_f = \Delta\theta z_f \quad (5)$$

式中  $I$ ——累积入渗量,  $\text{cm}$

$\Delta\theta$ ——湿润体内土壤体积含水率的增量值,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$

### 1.3 基于 Green - Ampt 和 Philip 模型的间歇入渗参数模型的建立与参数求解

#### 1.3.1 模型建立

根据王全九等<sup>[19-20]</sup>的研究,在 Philip 模型中包括土壤吸湿率 ( $S$ ) 和稳渗率 ( $A$ ) 两个特征参数;在 Green - Ampt 模型中同样包括土壤表征饱和和导水率 ( $K_s$ ) 和湿润锋面吸力 ( $h_f$ ) 两个特征参数,并建立了  $K_s$ 、 $h_f$ 、 $S$  3 个参数间的理论关系式,并在一维垂直入渗实验中进行验证。联立式(2)、(4)即得

$$K_s \frac{(h_f + z_f)}{z_f} = \frac{1}{2} S t^{-0.5} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)整理得

$$(h_f + z_f) \Delta\theta = \frac{1}{2K_s} S t^{-0.5} I \quad (7)$$

将  $I = S t^{0.5}$  代入式(7),即可描述一维垂直积水入渗的二模型参数互推关系式

$$S^2 = 2K_s (h_f + z_f) \Delta\theta \quad (8)$$

式(8)反映了吸湿率、表征饱和和导水率、概化湿润锋吸力以及  $\Delta\theta$  之间的关系。

将式(8)进一步变形得

$$(h_f + z_f) \Delta\theta = h_f \Delta\theta + z_f \Delta\theta = \frac{S^2}{2K_s} \quad (9)$$

式(9)中等式左边  $z_f \Delta\theta = I$ ,则式(9)变形为

$$h_f \Delta\theta = \frac{S^2}{2K_s} - I \quad (10)$$

简化得

$$\Delta\theta = \frac{S^2}{2K_s h_f} - \frac{I}{h_f} \quad (11)$$

因此,式(11)称为基于 Green - Ampt 和 Philip 模型的改进间歇入渗参数模型。

#### 1.3.2 参数求解

在一维积水垂直入渗过程中,体积含水率增量  $\Delta\theta$  和累积入渗量  $I$  均为实测值,累积入渗量可以进一步采用 Philip 模型计算,令  $a = \frac{S^2}{2K_s h_f}$ 、 $b = \frac{S}{h_f}$  便可以得到  $\Delta\theta \sim t^{0.5}$  的相关关系式,并呈线性关系,令其截距  $a$  与斜率  $b$  分别等于  $\frac{S^2}{2K_s h_f}$  和  $\frac{S}{h_f}$ ,则基于图形特征的参数饱和和导水率  $K_s$  和吸力  $h_f$  的求解表达式分别为

$$K_s = \frac{S^2}{2ah_f} \quad (12)$$

$$h_f = \frac{S}{b} \quad (13)$$

为了方便描述,对土壤体积含水率增量  $\Delta\theta$  随时间的变化规律进行概化处理,用实测累积入渗量与湿润锋的比值表示,对累积入渗量随时间的变化关系采用 Philip 模型表示,对湿润锋运移距离与时间的关系用幂指数函数表示,得

$$z_f = B t^d \quad (14)$$

即在间歇入渗任一周期内,供水阶段土壤湿润剖面的概化含水率增量均可表示累积入渗量  $I$  和与湿润锋深度  $z_f$  的比值,则各间歇周期内供水阶段的含水率增量  $\Delta\theta_i$  随入渗时间  $t$  的变化可概化为

$$\Delta\theta_i = \theta_s - \theta_i = \frac{I_i}{z_{fi}} = \frac{S_i t_i^{0.5}}{B_i t_i^{d_i}} = \frac{S_i}{B_i} t_i^{0.5 - d_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中  $z_{fi}$ ——间歇周期  $i$  实际湿润锋运移距离,  $\text{cm}$

$S_i$ ——间歇周期  $i$  供水阶段吸湿率,  $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$

$B_i$ 、 $d_i$ ——间歇周期  $i$  湿润锋运移系数和指数

## 2 模型验证

根据第1节分析,基于土壤含水率增量与累积入渗量两参数之间的相关关系,可进一步验证饱和和导水率  $K_s$  和湿润锋面处吸力  $h_f$  的合理性,利用参数代入模型反求累积入渗量  $I$ 、湿润锋深度  $z_f$  计算值,将累积入渗量和湿润锋运移距离的计算值与实测值进行相关性分析,确定参数的合理性,室内实验数据采用吴军虎等实测数据<sup>[21]</sup>。

### 2.1 实验方法和材料

实验地点在西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室,在室内进行了肥液质量浓度

$c = 100 \text{ mg/L}$ 、入渗时间  $T_c = 120 \text{ min}$  的肥液连续入渗实验,以及周期供水时间  $30 \text{ min}$ 、循环率  $r^* = 1/2$ 、周期数  $n = 4$ 、间歇时间  $T_{off} = 30 \text{ min}$  的肥液间歇入渗

实验。实验装置和测量方法参照文献[21]。实验土样基本参数见表1。

表1 土壤颗粒级配组成及基本参数

Tab.1 Distribution of grain composition and basic soil parameters

土壤容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	质量分数/%			土壤初始 含水率/ ( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	初始硝态氮 质量比/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	初始铵态氮 质量比/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	pH 值	饱和含水率/ ( $\text{cm}^{-3}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和导水率/ ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
	砂粒 (粒径 $1.0 \sim$ $0.05 \text{ mm}$ )	粉粒 (粒径 $0.05 \sim$ $0.002 \text{ mm}$ )	粘粒 (粒径小于 $0.002 \text{ mm}$ )						
1.30	10.45	53.70	2.88	0.237	11.56	0.13	7.7	0.681	0.024

## 2.2 结果分析

### 2.2.1 间歇入渗周期入渗过程中湿润区内含水率增量随时间的变化特性

吴军虎等<sup>[21]</sup>研究认为:采用幂函数关系拟合间歇入渗第1周期供水阶段的湿润锋发展过程较好,采用线性函数关系拟合间歇入渗第1周期间歇阶段及以后各周期供水与间歇阶段的湿润锋变化可以比较准确地拟合灌施条件下间歇入渗湿润锋运移距离<sup>[22]</sup>,湿润锋运移模型为

$$z_{fi} = B_i t^{d_i} \quad (16)$$

各周期的累积入渗量及湿润锋运移模型的拟合结果见表2。

表2 间歇入渗各供水周期累积入渗量及湿润锋运移拟合参数

Tab.2 Parameters of cumulative infiltration and wetting front transport in fitting under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

周期数 $i$	累积入渗量 $I/\text{cm}$		湿润锋运移距离 $z/\text{cm}$			
	(Philip 模型)		( $z = Bt^d$ 幂指数函数模型)			
	$S_i$	决定系数 $R^2$	$B_i$	$d_i$	决定系数 $R^2$	
1	0.686 0	0.986 1	1.717 3	0.622 6	0.951 8	
2	0.221 2	0.975 1	0.107 6	1	0.986 7	
3	0.177 0	0.980 6	0.072 0	1	0.996 3	
4	0.143 4	0.971 9	0.069 4	1	0.992 0	

图1为第1、2间歇周期内供水与停水阶段土壤剖面含水率分布动态变化过程。 $\theta_0$ 表示初始含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_1$ 表示第1间歇周期阶段地表处含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_s$ 表示饱和含水率,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\psi_m$ 表示湿润锋面处基质势,  $\text{cm}$ ; ①表示第1周期供水阶段结束时湿润锋面位置处  $\psi_m = -h_{\beta_1}$ ; ②表示第1周期停水阶段结束时湿润锋面位置处  $\psi_m = -h_{\beta_2}$ ; ③表示第2周期供水阶段结束时湿润锋面位置处  $\psi_m = -h_{\beta_3}$ 。

由图1可知,理论上,利用传统 Green - Ampt 模型描述间歇入渗各间歇周期内的整个入渗周期内均以假定活塞流为前提,图中  $t_1$  主要为第1周期供水

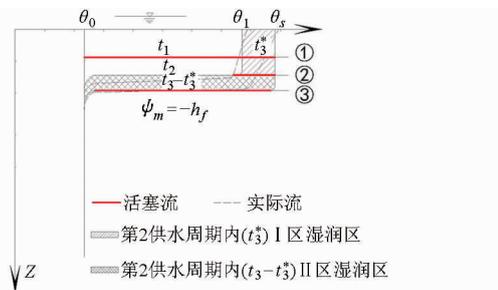


图1 波涌灌间歇入渗再分布阶段与2次供水阶段含水率剖面分布示意图

Fig.1 Distribution on profile of soil moisture in phase from 1st redistribution to 2nd irrigation under intermittent infiltration of surge irrigation

阶段结束时,  $t_2$ 为第1周期间歇阶段结束时,  $t_3$ 为第2周期供水阶段结束时,为了准确描述  $t_3$  含水率分布变化情况,以  $t_2$ 停水阶段结束时的含水率作为初始值,以  $t_3$ 再供水阶段结束时的含水率作为结束值,在此阶段即可将湿润区分为两部分:即 I 区重力势阶段 ( $t_3^*$ ) 和 II 区基质势阶段 ( $t_3 - t_3^*$ )。经分析,图1中 I 区主要是对上一周期间歇阶段未饱和的颗粒孔隙进行补水,基质势作用较小,主要以重力势为驱动力,此阶段定义为重力势补水阶段,入渗区域为 I 区,当 I 区补水阶段含水率均达到饱和状态时,补水状态结束,入渗过程持续进行,土壤水分由 I 区运移到 II 区,运移时的湿润锋面位置于初始含水率  $\theta_0$  交汇处,其所对应的吸力(基质势的负值)作为水分下渗的主要驱动力,此阶段定义为基质势入渗阶段。综上所述,整个再供水阶段的湿润锋面处吸力变化规律应为:先在 I 区维持一较小的吸力,到达 II 区以后,其值逐渐增大。

为了更好地描述含水率增量随时间的变化规律,利用各间歇周期供水阶段的入渗模型(表2),对入渗湿润区内概化的土壤含水率增量随时间变化的拟合计算值和实测值进行对比,结果如图2所示。整个入渗过程中,各间歇入渗下供水周期内的含水率增量的实测值与概化的计算值均随时间的增加呈减小的趋势,并且随着周期数的增加,其增量减幅随

之增大,其中第1供水周期含水率增量减幅为47%,后3个供水周期其含水率增量减幅分别为74.7%(第2供水周期)、76.8%(第3供水周期)和75.7%(第4供水周期),在整个间歇入渗过程中,根据累积入渗量、湿润锋运移距离和含水率增量三者之间的数学关系式(式(15))可知,含水率增量变化与湿润锋运移距离呈负相关,累积入渗量与湿润锋运移距离均随间歇周期的增加而减小,湿润锋运移距离随着供水周期的增加呈减小的程度较累积入渗量的减小程度大<sup>[22]</sup>,因此两者之间的比值变化规律应随供水周期的增大而增大,即含水率增量随之增大,并且整个周期供水阶段实测值与计算值相关性较好,模型适用性较好,入渗第①阶段前9 min内,含水率增量随时间的增加呈减小趋势,经测算,各供水周期含水率增量随时间增加(0~9 min)的平均变化率由小到大依次为:第1供水周期、第2供水周期、第4供水周期、第3供水周期,分别为-0.060、-0.247、-0.249、-0.306 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>3</sup>·min)。当入渗时间为9~30 min时,各供水周期含水率增量计算值均逐渐接近于实测值,最后达到一恒定值(介于0.25~0.45 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>之间),对于不同供水周期内(I区和II区)的含水率增量随时间变化由小到大为:第1供水周期、第2供水周期、第4供水周期、第3供水周期。

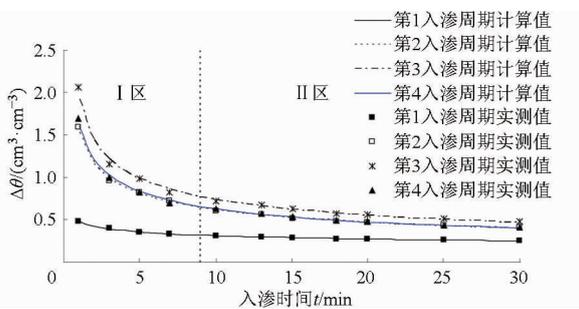


图2 各间歇供水周期内的湿润区含水率增量实测值与计算值随时间的变化

Fig. 2 Compared with increment on moisture content to vary over time between measured value and calculated value under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

为进一步判定概化的含水率增量与实测值相关性,采用与实测值对比的方法,判定其相关系数与均方根误差(RMSE),公式为

$$V_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{obs},i} - X_{\text{calc},i})^2}{N}} \quad (17)$$

式中  $X_{\text{obs},i}$ ——各观测点的实测值  
 $X_{\text{calc},i}$ ——各观测点的计算值  
 $N$ ——观测样本数

当相关系数( $r$ )越高,误差(RMSE)越小,则代表计算值越接近实测值,相关效果越好。整体对比结果见图3所示。

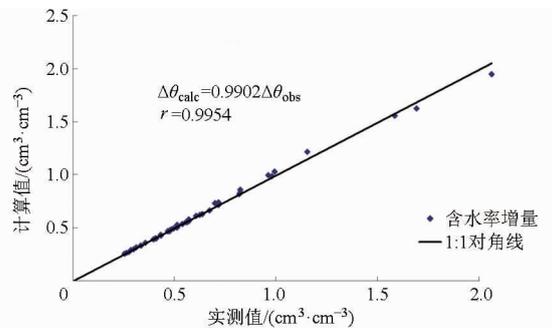


图3 各间歇供水周期内的湿润区含水率增量实测值与计算值对比

Fig. 3 Analysis on increment of moisture content between measured values and calculated values under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

经相关性分析,总体样本数 $N$ 为44、显著性水平 $\alpha=0.01$ 时,实际相关系数为 $r=0.9954$ ,远大于相关系数临界值 $r_{\alpha}=0.384$ ,并且标准误差RMSE为0.073。说明相关性较高,适用性较好。

### 2.2.2 模型参数 $K_s$ 与 $h_f$ 求解

通过图2,分别将波涌灌各间歇周期(第2供水周期)及以后周期内的I区重力势阶段和II区基质势阶段的含水率增量与时间的0.5次方分别进行线性拟合(第1周期按照全区域进行线性拟合),结果见表3。

各间歇周期分区进行线性拟合的结果表明,当显著性水平 $\alpha=0.01$ 时,其 $r$ 整体均达到0.95以上,其均方根误差(RMSE)较小,介于0.006~0.029之间,线性相关性较高,计算值与实测值偏差较小,模型适用性较好。

进一步结合式(11)~(13)计算出各间歇周期内参数 $h_f$ 与 $K_s$ ,计算结果见表4。

由表4可知,随着周期数的增加,饱和导水率计算值随周期数增加逐渐减小,I区的湿润锋面处吸力和II区的吸力也随周期的增加而减小,对相同周期下不同入渗区的吸力进行比较,第2供水周期及之后供水周期内的吸力与第1供水周期不同的是,II区均大于I区的吸力,根据图1分析结果可知,由于间歇阶段水分入渗经历了再分布过程,导致I区很大程度上含水率随周期数的增加而提高,相应基质势作用随着周期数的增加逐渐减小,仅以重力势和压力势作为水分的驱动力,这是地表致密层形成与基质势综合变化的结果。当水分从I区运移到II区时,土壤初始含水率明显降低,这时湿润锋面处形成较大的吸力作用,水分入渗的主要驱动力为基质

表 3 各间歇供水周期不同分区条件下  $\Delta\theta \sim t^{0.5}$  线性拟合结果

Tab.3 Linear relationship of  $\Delta\theta \sim t^{0.5}$  in fitting in different wetting zones under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

周期数	I 区			II 区		
	线性拟合关系式	r	RMSE	线性拟合关系式	r	RMSE
1	$\Delta\theta = -0.0314t^{0.5} + 0.4170$				0.9649	0.006
2	$\Delta\theta = -0.2159t^{0.5} + 1.3113$	0.9851	0.009	$\Delta\theta = -0.0787t^{0.5} + 0.8278$	0.9874	0.011
3	$\Delta\theta = -0.3111t^{0.5} + 1.6779$	0.9818	0.022	$\Delta\theta = -0.0995t^{0.5} + 1.0118$	0.9639	0.012
4	$\Delta\theta = -0.2523t^{0.5} + 1.4039$	0.9541	0.029	$\Delta\theta = -0.0848t^{0.5} + 0.8648$	0.9754	0.009

表 4 各间歇周期供水内不同分区下饱和导水率及吸力估算值

Tab.4 Estimated values of saturated hydraulic conductivity and suction for improved model in different zones of each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

入渗区	参数	周期数			
		1	2	3	4
I	吸力 $h_f$	22.058	1.025	0.569	0.568
	饱和导水率 $K_s$	0.026	0.018	0.016	0.013
II	吸力 $h_f$	22.058	2.811	1.779	1.691

势,因此对应的吸力较 I 区增大。进一步揭示了间歇入渗过程中湿润锋面处吸力的变化规律。

另外,对于饱和导水率随周期的变化规律可建立对数关系模型

$$K_s = -0.0088 \ln i + 0.0253 \quad (r = 0.9801) \quad (18)$$

最终式(18)准确描述了饱和导水率与周期数之间的相关关系,拟合后模型的相关系数达到 0.9801,说明拟合关系式相关性较好。

### 2.2.3 基于 Green - Ampt 和 Philip 适用于间歇入渗数学模型验证

#### 2.2.3.1 累积入渗量计算值与实测值对比

为了比较分析利用关于 Green - Ampt 和 Philip 模型推求参数的精度和对累积入渗量计算精度的影响,利用推求参数( $K_s$ 和 $h_f$ )反算波涌灌间歇入渗各周期累积入渗量计算值,并与实测值进行线性比较,图4显示了累积入渗量计算值和实测值之间的关系,并利用线性回归拟合两者的相关关系。

第1供水周期

$$I_{calc} = 0.9603 I_{obs} \quad (r = 0.9747) \quad (19)$$

第2供水周期

$$I_{calc} = 0.8986 I_{obs} \quad (r = 0.9668) \quad (20)$$

第3供水周期

$$I_{calc} = 0.8950 I_{obs} \quad (r = 0.9785) \quad (21)$$

第4供水周期

$$I_{calc} = 0.8789 I_{obs} \quad (r = 0.9618) \quad (22)$$

式中  $I_{obs}$  —— 累积入渗量的实测值, cm

$I_{calc}$  —— 累积入渗量的计算值, cm

经分析,模型计算值与实测值线性回归结果相关系数  $r$  均高于 0.96,当整体样本数  $N = 38$ 、显著性水平  $\alpha = 0.01$  时,回归后的相关系数  $r$  大于相关系数临界值  $r_\alpha = 0.4128$ ,计算精度较高,符合实际规律。另外,从式(19) ~ (22)也可以看出,相同入渗时间时,累积入渗量实测值较计算值偏大,实测值和计算值的相对偏差值平均为 3.6%,造成该差异的原因可能是因为 Green - Ampt 模型是基于假定活塞流作为前提的,实际上土壤中孔隙分布并不是绝对均匀的,与活塞流相比,并不存在明确的水平湿润锋面,计算结果会产生一定的误差。

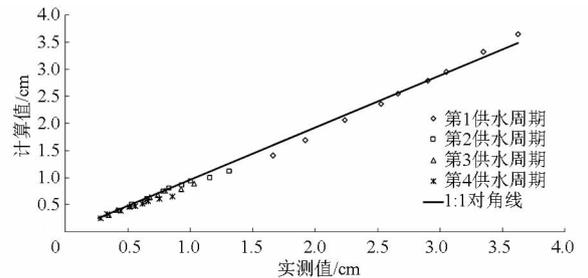


图 4 各间歇供水周期内的累积入渗量计算值与实测值比较  
Fig.4 Compared with calculated value and measured values on infiltration amount under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

#### 2.2.3.2 湿润锋运移距离计算值与实测值对比

为了比较 Green - Ampt 和 Philip 二者结合模型推求的模型参数精度和对湿润锋运移距离计算精度的影响,利用已求参数  $K_s$ 和 $h_f$ 反算湿润锋运移距离计算值并与实测值进行比较,图5显示了所计算的湿润锋运移距离和实测湿润锋运移距离间的关系,并利用线性回归分析其相关关系,拟合结果如下:

第1供水周期

$$z_{calc} = 1.0457 z_{obs} \quad (r = 0.9867) \quad (23)$$

第2供水周期

$$z_{calc} = 0.9808 z_{obs} \quad (r = 0.9862) \quad (24)$$

第3供水周期

$$z_{calc} = 0.8726 z_{obs} \quad (r = 0.9309) \quad (25)$$

第4供水周期

$$z_{calc} = 0.8629 z_{obs} \quad (r = 0.9188) \quad (26)$$

式中  $z_{\text{obs}}$ ——湿润锋运移距离的实测值, cm  
 $z_{\text{calc}}$ ——湿润锋运移距离的计算值, cm

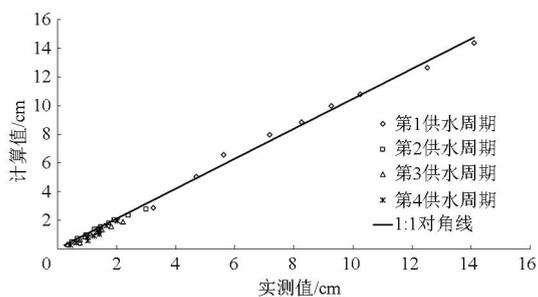


图5 各间歇供水周期内的湿润锋运移距离计算值与实测值比较

Fig.5 Compared with calculated value and measured values on wetting front under each cycle of intermittent infiltration of surge irrigation

经分析,模型计算值与实测值线性回归结果相关系数  $r$  整体均高于 0.91,当整体样本数  $N=38$ 、显著性水平  $\alpha=0.01$  时,回归后的相关系数  $r$  大于相关系数临界值  $r_{\alpha}=0.4128$ ,计算精度较高,总体符合实际湿润锋运移规律。另外,从式(23)~(26)也可知,相同入渗时间时,湿润锋运移距离实测值较计算值偏大,实测值和计算值的相对偏差值平均为 8.6%,造成这种差异性规律同样主要由于 Green-Ampt 公式是基于假定活塞流作为前提,实际上土壤中空隙分布不均,与活塞流相比,会产生一定的误差,实际湿润锋面运移距离大于假定活塞流下的计算湿润锋面运移距离。但整体偏差小于 10%,表明

上述基于间歇入渗改进的入渗模型较好地反映了间歇入渗特性,模型总体适用性较好,可靠性较高。

### 3 结论

(1)通过理论分析,传统 Green-Ampt 模型在模拟间歇入渗过程中,无法准确描述湿润锋处吸力的变化规律,认为湿润锋面处的吸力不应概化为不随周期变化的常数。

(2)针对间歇入渗过程中含水率剖面分布特征,将第 2 供水周期及随后的入渗周期含水率分布规律分为 2 个入渗区,分别为 I 区补水阶段和 II 区入渗阶段。

(3)利用 Green-Ampt 模型和 Philip 模型改进方程式,转换为含水率增量与累积入渗量的相关关系式,并利用其图形特征,分别对 I 区补水阶段和 II 区入渗阶段的含水率增量与累积入渗量进行线性拟合,并求出不同分区的参数  $K_s$  和  $h_f$ 。

(4)利用所得的参数计算了土壤累积入渗量与湿润锋运移距离,并与实测值进行了比较,通过线性回归发现,整体相关系数均达到了 0.9 以上,湿润锋运移距离计算值与实测值偏差大于累积入渗量,但整体相对偏差均小于 10%,运移规律与实际一致,满足精度要求,对于将含水率增量随时间的变化规律转换为真实累积入渗量与真实湿润锋的比值是成立的,模型适用性较好。

### 参 考 文 献

- 刘群昌,许迪,谢崇宝,等.波涌灌溉技术田间适应性分析[J].农业工程学报,2002,18(1):35-40,12.  
LIU Qunchang, XU Di, XIE Chongbao, et al. Adaptability of surge flow irrigation applying on farmland affiliation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 35-40,12. (in Chinese)
- 王文焰,费良军,汪志荣,等.浑水波涌灌溉的节水机理与效果[J].水利学报,2001,32(5):5-10,16.  
WANG Wenyan, FEI Liangjun, WANG Zhirong, et al. Water-saving mechanism and the effects of muddy water surge-flow irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(5): 5-10,16. (in Chinese)
- 王文焰,汪志荣,费良军,等.波涌灌溉的灌水质量评价及计算[J].水利学报,2000,31(3):55-60.  
WANG Wenyan, WANG Zhirong, FEI Liangjun, et al. Evaluation and calculation of irrigation quality in surge flow irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(3): 55-60. (in Chinese)
- BENHAM B I, REDDELL D L, MAREK T H. Performance of three infiltration models under surge irrigation [J]. Irrigation Science, 2000, 20(1): 37-43.
- ISMAIL S M, DEPEWEG H. Simulation of continuous and surge flow irrigation under short field conditions [J]. Irrigation and Drainage, 2005, 54(2): 217-230.
- 费良军,王文焰.浑水间歇入渗模型研究[J].水利学报,1999,30(2):41-44.  
FEI Liangjun, WANG Wenyan. Study on mathematical model for muddy water intermittent infiltration [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(2): 41-44. (in Chinese)
- 费良军,王云涛.波涌畦灌灌水技术要素的优化组合研究[J].水利学报,1996,27(12):16-22,28.  
FEI Liangjun, WANG Yuntao. Study on optimization for combination of technical parameters in surge flow border irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 27(12): 16-22,28. (in Chinese)
- 吴军虎,费良军,李怀恩,等.波涌灌溉土壤间歇入渗数学模型研究现状[J].水土保持学报,2003,17(5):51-53,58.  
WU Junhu, FEI Liangjun, LI Huaen, et al. Review on infiltration model for surge irrigation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(5): 51-53,58. (in Chinese)

- 9 傅渝亮, 费良军, 聂卫波, 等. 波涌灌间歇入渗饱和-非饱和土壤水分运动数值模拟及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 66 - 71.  
FU Yuliang, FEI Liangjun, NIE Weibo, et al. Numerical simulation and experiment of soil moisture movement in saturated-unsaturated soil under surge irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 66 - 71. (in Chinese)
- 10 樊贵盛, 张建丰. 大田土壤间歇入渗试验方法及其精度提高措施[J]. 农田水利与小水电, 1993(6): 18 - 22.  
FAN Guicheng, ZHANG Jianfeng. On the experiment method of field soil the intermittent infiltration and measures for enhancing the experiment precision[J]. China Rural Water and Hydropower, 1993(6): 18 - 22. (in Chinese)
- 11 樊贵盛, 潘光在. 波涌灌地面水流运动的零惯量模型及数值计算[J]. 水利学报, 1994, 25(6): 66 - 73.  
FAN Guicheng, PAN Guangzai. The zero-inertia mathematical model and numerical method for the flow in surge irrigation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 25(6): 66 - 73. (in Chinese)
- 12 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 间歇供水条件下 Green - Ampt 模型[J]. 西北水资源与水工程, 1998, 9(3): 7 - 10.  
WANG Zhirong, WANG Wenyan, WANG Quanjiu, et al. The Green - Ampt model of surge flow irrigation[J]. Water Resources & Water Engineering, 1998, 9(3): 7 - 10. (in Chinese)
- 13 彭振阳, 黄介生, 伍靖伟, 等. 基于分层假设的 Green - Ampt 模型改进[J]. 水科学进展, 2012, 23(1): 59 - 66.  
PENG Zhenyang, HUANG Jiesheng, WU Jingwei, et al. Modification of Green - Ampt model based on the stratification hypothesis[J]. Advances in Water Science, 2012, 23(1): 59 - 66. (in Chinese)
- 14 张光辉, 邵明安. 用土壤物理特性推求 Green - Ampt 入渗模型中吸力参数  $S_f$ [J]. 土壤学报, 2000, 37(4): 553 - 557.  
ZHANG Guanghui, SHAO Ming'an. Using soil physical properties to determine the absorptive parameter  $s_f$  in Green - Ampt infiltration model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(4): 553 - 557. (in Chinese)
- 15 KHANJI J, MOREL-SEYTOUX H J. Derivation of an equation of infiltration[J]. Water Resources Research, 1974, 10(4): 795 - 800.
- 16 BEVEN K. Infiltration into a class of vertically non-uniform soils[J]. Hydrological Sciences Journal, 1984, 29(4): 425 - 434.
- 17 PHILIP J R. The theory of infiltration about sorptivity and algebraic infiltration equations[J]. Soil Science, 1957, 83(5): 345 - 357.
- 18 GREEN A W H, AMPT G A. Studies on soil physics[J]. The Journal of Agricultural Science, 1911, 1(4): 1 - 24.
- 19 王全九, 来剑斌, 李毅. Green - Ampt 模型与 Philip 入渗模型的对比分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 13 - 16.  
WANG Quanjiu, LAI Jianbin, LI Yi. Comparison of Green - Ampt model with philip infiltration model[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 13 - 16. (in Chinese)
- 20 史晓楠, 王全九, 巨龙. 微咸水入渗条件下 Philip 模型与 Green - Ampt 模型参数的对比分析[J]. 土壤学报, 2007, 44(2): 360 - 363.  
SHI Xiaonan, WANG Quanjiu, JU Long. Parameters of Philip and Green - Ampt models for soils infiltrated with brackish water [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(2): 360 - 363. (in Chinese)
- 21 吴军虎, 乔莲莲, 费良军. 肥液间歇入渗土壤湿润特性实验研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(5): 5 - 9.  
WU Junhu, QIAO Lianlian, FEI Liangjun. Soil wetting characteristic under intermittent infiltration of fertilizer solution [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(5): 5 - 9. (in Chinese)
- 22 吴军虎. 波涌灌溉间歇入渗水氮运移特性试验及数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2004: 37 - 38.