

# Philip 公式在三维入渗及参数测算中的应用

任尚岗<sup>1</sup>, 张振华<sup>1</sup>, 杨润亚<sup>2</sup>, 潘英华<sup>1</sup>, 谭国强<sup>1</sup>, 李陆生<sup>1</sup>, 朱敏<sup>1</sup>

(1. 鲁东大学地理与规划学院, 山东烟台 264025; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 基于 Philip 公式, 分析了 Philip-Dunne 入渗和单环入渗的三维动态过程, 讨论了公式中的参数  $A$  与土壤饱和导水率  $k_s$  的关系并据此建立了  $k_s$  估算模型。结果表明: Philip 公式在三维入渗的动态过程分析中仍然适用, 其参数  $A$  与  $k_s$  存在显著的幂级数关系, 入渗实验方法及仪器规格会影响  $k_s$  与  $A$  间的拟合关系及其精度; Philip 公式在分析 Philip-Dunne 入渗时精度比单环入渗高; 基于参数  $A$  建立的  $k_s$  估算模型在两种三维入渗中预测的  $k_s$  值与实测值相比误差保持在 5% 以内, 具有一定的实用价值。

**关键词:** Philip 公式; Philip-Dunne 入渗; 单环入渗

**中图分类号:** S152.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2011)05-0192-05

土壤水入渗是地表水与地下水相互作用的纽带, 是陆地水循环过程的重要组成部分, 它与土壤中营养物质的运移、土壤微生物的活动和植物的生长发育密切相关<sup>[1,2]</sup>。测定土壤水入渗参数是确定降水入渗与径流比例, 设计灌溉、排水系统工程, 提高农业生产的关键<sup>[3,4]</sup>, 因此, 迅速准确地获取土壤水动力参数非常重要。

土壤水入渗参数决定于土壤的质地、结构、孔隙率及其大小分布、有机质含量等因素, 国内外学者为研究土壤水入渗特征做了大量工作。Green 和 Ampt 基于毛管理论, 假设土壤含水量剖面存在陡的湿润峰面, 提出了 Green-Ampt 入渗模型<sup>[5]</sup>; Philip 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, 提出了 Philip 公式<sup>[6]</sup>; 王全九通过三种类型的土壤入渗实验, 对比分析了 Green-Ampt 模型和 Philip 公式<sup>[4]</sup>; 邵明安利用 Philip 入渗公式推求了土壤水分运动参数<sup>[7]</sup>; 张振华基于图形特征, 研究了 Green-Ampt 入渗模型中关键参数的求解方法<sup>[8]</sup>; John Philip 基于 Dunne T 和 Safran E 的亚马逊流域入渗数据和 Green-Ampt 基本假设, 提出的 Philip-Dunne 入渗方法<sup>[9]</sup>; Reynolds 和 Elrick 在 Bouwer、Daniel 的研究<sup>[10-12]</sup>基础上, 推导出了单环入渗中饱和导水率的求算公式<sup>[12]</sup>。土壤水动力参数可在田间测定, 也可采集土壤在室内测定, 从室外采集的土芯不可避免地受到一定程度破坏, 同时从孤立的土芯获取的土壤水入渗参数很多时候并不能准确反映田间土壤的总体入渗特征, 因而田间现场直接进行入渗实验是最合理的。然而, 田间土壤水运动的众多影响因

子造成三维入渗分析相对复杂, 求算公式中参数众多, Philip-Dunne 入渗中  $k_s$  更是关于相关参数的隐式方程, 这为我们带来了很大不便。为简化相关分析过程及其参数计算, 本文利用简单的 Philip 公式分析 Philip-Dunne 入渗和单环入渗过程, 并据此研究相关参数与土壤特征参数的相关性, 建立了土壤饱和导水率估算模型。以期与研究田间土壤三维入渗提供参考。

## 1 理论基础

### 1.1 Philip-Dunne 入渗模型

Philip-Dunne 入渗研究的是初始干燥的土壤在积水条件下的三维降水头入渗问题, John Philip 用等面积的球形表面(球体半径  $r_0 = r_i/2$ )代替实际的渗透表面, 通过几何系数  $g_c = 8/\pi^2$  等效地把三维入渗描述成半径为  $r$  的一维径向入渗来分析入渗通量, 建立了利用 Philip-Dunne 入渗推求土壤饱和导水率  $k_s$  和湿润锋吸力  $\Psi$  的求算方法。

$$\tau(\Delta\theta, \Psi) = \left(1 + \frac{1}{2a}\right) \log\left(\frac{a^3 - 1}{a^3 - \rho^3}\right) - \frac{3}{2a} \log\left(\frac{a - 1}{a - \rho}\right) + \frac{\sqrt{3}}{a} \arctan\left(\frac{\sqrt{3}a(\rho - 1)}{2a^2 + a(\rho + 1) + 2\rho}\right) \quad (1)$$

$$\tau = \frac{8k_s t}{\pi^2 r_0}; \rho = \frac{R(t)}{r_0}; a^3 = \frac{3(\Psi + h_0 + \pi^2 r_0/8)}{r_0 \Delta\theta} + 1$$

式中,  $h_0$  为入渗管内初始水位高度,  $\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$  为入渗前后土壤含水率变化值,  $R(t)$  为对应于入渗管水位  $h(t)$  的湿润球半径。

式(1)是湿润锋吸力  $\Psi$  和土壤水分含量增量

收稿日期: 2010-09-01

基金项目: 国家自然科学基金(50609022, 40801100); 山东省教育厅项目(J07YF16)

作者简介: 任尚岗(1983—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事区域水土资源高效利用研究。

通讯作者: 张振华(1971—), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事区域水土资源高效利用研究。E-mail: zhangzh71@163.com。

$\Delta\theta$ 的函数,基于式(1)Philip、De Haro、Muñoz-Carpena各自通过一定的计算方法获得 $k_s$ 和 $\Psi$ 值。本文基于Muñoz-Carpena设计的Philip-Dunne入渗参数求算专业软件WPDunne 1.0获取了各试验点的湿润锋吸力 $\Psi$ 及饱和导水率 $k_s$ 。

## 1.2 单环入渗

单环入渗计是测量土壤表层水分入渗特征的重要工具,利用单环入渗计测量时,环中的水分入渗属于积水条件下的三维运动过程。Reynolds W D建立了利用单环入渗法推求土壤饱和导水率 $k_s$ 的计算方法<sup>[12]</sup>。

$$Q_s = \frac{r}{G} (k_s H + \phi_m) + \pi r^2 k_s \quad (2)$$

$$G = 0.316(d/r) + 0.184$$

式中: $r$ 为入渗环半径; $H$ 为入渗环内积水深度; $d$ 为入渗环插入地下的深度; $\phi_m$ 为土壤基质势通量。本文利用公式(2),采用双水头入渗法,在两个积水深度 $H_1$ 、 $H_2$ 条件下分布获取稳态通量 $Q_{s1}$ 、 $Q_{s2}$ ,解二元一次方程组求算 $k_s$ 和 $\phi_m$ 。

## 2 材料与方法

### 2.1 供试土壤

试验地位于鲁东大学试验地内,随机在3点取样,将土样自然风干,过2 mm孔径的土筛后利用沉降法对土壤进行颗粒分析。按照国际土壤质地分类标准进行划分,试验地土壤为壤土,土壤的机械组成见表1。

表1 试验土壤的机械组成(%)

Table 1 Mechanical compose of the experimental soil

粘粒 Clay	粉粒 Powder	细砂粒 Fine sand	粗砂粒 Coarse sand
$\leq 0.002$ mm	0.002 ~ 0.020 mm	0.020 ~ 0.200 mm	0.200 ~ 2 mm
11.8508	49.2596	36.347	2.5428

### 2.2 试验过程

Philip-Dunne实验于2009年4~5月进行,利用半径2.1 cm,高30、40、50 cm三种类型的入渗管在45个试验点分别进行入渗实验。把入渗管插入不饱和土壤钻井的底部10 cm,保证入渗管与钻空壁之间没有缝隙,入渗试验开始前,在入渗环内覆盖一层低阻力尼龙网,以减小供水时水流对土壤表面的扰动,实验过程记录入渗管内水头每下降5 cm消耗的时间( $h_0 = 30$  cm时记录 $t_{0.05}$ 、 $t_{0.10}$ 、 $t_{0.15}$ 、 $t_{0.20}$ 、 $t_{0.30}$ ;  $h_0 = 40$  cm时记录 $t_{0.05}$ 、 $t_{0.10}$ 、 $t_{0.15}$ 、 $t_{0.20}$ 、 $t_{0.25}$ 、 $t_{0.30}$ 、 $t_{0.40}$ ;  $h_0 = 50$  cm时记录 $t_{0.05}$ 、 $t_{0.10}$ 、 $t_{0.15}$ 、 $t_{0.20}$ 、

$t_{0.25}$ 、 $t_{0.30}$ 、 $t_{0.35}$ 、 $t_{0.40}$ 、 $t_{0.50}$ ),用于分析累计入渗量与时间的关系,得到相应的拟合参数;利用TDR测定每个人渗点实验前后土壤含水率 $\theta_0$ 、 $\theta_s$ ,获取土壤含水率的变化 $\Delta\theta$ ,结合入渗管内水位下降一半消耗的时间 $t_{med}$ 和入渗完成需要的时间 $t_{max}$ 获取土壤饱和导水率。

单环入渗实验于2009年6~7月进行,由环和马氏瓶两部分组成。利用直径10、20、30 cm,高30 cm的三种类型的入渗环在20个人渗点分别进行实验,为保持原状土不受扰动,在打入的过程中尽量使入渗环的顶端保持水平,而且环内的土壤表层也未进行平整。入渗试验开始前,在入渗环内覆盖一层低阻力尼龙网,以减小供水时水流对土壤表面的扰动。利用马氏瓶供水,通过调节马氏瓶的高度获得一定的滴头流量,使入渗环内水位维持恒定的积水深度,每隔2 min观测一次马氏瓶内水位降落深度,直至连续三次马氏瓶水位下降值基本一致,达到稳定入渗状态为止,获取准稳态下的稳态通量。停止供水,使环内下降5 cm,利用同样的方法在另一积水深度下获取的稳态通量,利用双水头法获取土壤饱和导水率。

## 3 结果与分析

### 3.1 三维入渗的动态过程分析

利用WPDunne 1.0和公式(2)分别获取Philip-Dunne和单环入渗各试验点相应的土壤饱和导水率,根据平均值加标准差剔除异常点的方法<sup>[13]</sup>检测实验效果,在45个Philip-Dunne入渗点上剔除3个异常点,20个单环入渗点上剔除1个异常点。

Philip认为入渗过程中任意时刻的入渗率与时间呈现幂级数的关系<sup>[11]</sup>:

$$i_0 = 0.5St^{-0.5} + A \quad (3)$$

式中, $i_0$ 为入渗率(cm/min); $S$ 为土壤吸湿率(cm/min<sup>0.5</sup>); $t$ 为入渗时间(min); $A$ 为一个常数(cm/min)。对公式(3)关于时间积分得累积入渗量 $I_0$ 的表达式:

$$I_0 = St^{0.5} + At \quad (4)$$

目前Philip模型主要应用于土壤水的一维入渗分析<sup>[14~17]</sup>,本文利用公式(4)分析41个Philip-Dunne入渗试验点和20个单环入渗试验点上的三维动态过程。图1为Philip-Dunne入渗试验中其中一个人渗点上不同初始水头下 $I_0$ 与 $t^{0.5}$ 的关系,公式(5、6、7)为相应拟合关系式。

$$h_0 = 30 \text{ cm}: I_0 = 1.5403t^{0.5} + 0.1491t, R^2 = 0.9976 \quad (5)$$

$$h_0 = 40 \text{ cm}: I_0 = 2.1643t^{0.5} + 0.1668t, R^2 = 0.9948 \quad (6)$$

$$h_0 = 50 \text{ cm}: I_0 = 3.2188t^{0.5} + 0.1568t, R^2 = 0.9950 \quad (7)$$

图 2 为单环入渗中选取同一个人渗点上不同直径条件下的下  $I_0$  与  $t^{0.5}$  的关系,公式(8、9、10)为相应的拟合关系式。

$$D_0 = 10 \text{ cm}: I_0 = 0.3579t^{0.5} + 0.3938t, R^2 = 0.9984 \quad (8)$$

$$D_0 = 20 \text{ cm}: I_0 = 0.2975t^{0.5} + 0.1824t, R^2 = 0.9998 \quad (9)$$

$$D_0 = 30 \text{ cm}: I_0 = 0.2099t^{0.5} + 0.2214t, R^2 = 0.9983 \quad (10)$$

由 41 个 Philip-Dunne 入渗点和 20 个单环入渗点上,累积入渗量  $I_0$  与时间  $t^{0.5}$  的拟合模型的决定系数  $R^2$  都大于 0.82,且通过 0.01  $F$  精度检验,知 Philip 公式适合分析 Philip-Dunne 和单环的三维入渗动态过程。分析各自相应的拟合系数,以公式(5)、(6)、(7)为例,知 Philip-Dunne 入渗的三维动态过程中,表征土壤吸湿率的参数  $S$  随初始入渗水头的增加逐渐增大,初始入渗水头不同造成土壤吸湿率存在明显的差异,主要原因为土壤水的压力势的大小差异造成的,水位越高,入渗水头所产生的水头压力梯度越大,从而引起土壤吸湿率越大;表征饱和和导水率的系数  $A$  随入渗水头变化没有明显差异。单环入渗中,以公式(8)、(9)、(10)为例,知表征土壤吸湿率的参数  $S$  随入渗环直径的增大逐渐减小,入渗环直径不同土壤吸湿率存在差异,主要原因是土壤水入渗从入渗环底部突破一维进入三维状态时环底周长面积比造成的,入渗环直径最大,入渗环底部周长面积比越小,环内水与土壤的接触率越低,从而引起土壤吸湿率越小;同样入渗环的规格对表征饱和和导

水率的系数  $A$  没有明显的影响。

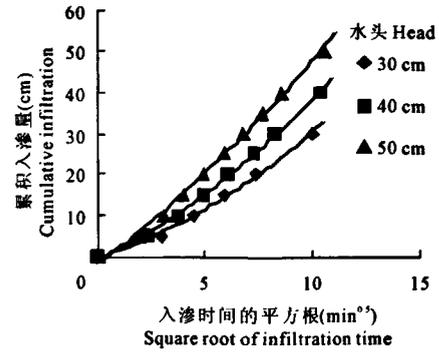


图 1 Philip-Dunne 入渗的动态过程

Fig.1 Dynamic change of Philip-Dunne infiltration

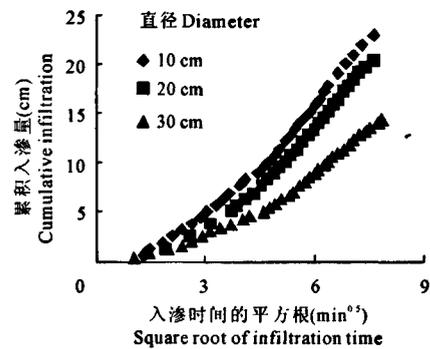


图 2 单环入渗的动态过程

Fig.2 Dynamic change of sing-ring infiltration

### 3.2 土壤入渗参数模型

根据以上分析,利用 Philip 公式对 Philip-Dunne 和单环实验的三维入渗过程的拟合精度较高,为了进一步探索 Philip 公式在三维入渗中的应用价值,分析 Philip 公式中的参数与三维入渗中土壤水入渗特征参数的关系,在一维长历时积水入渗中,Philip 入渗模型中的  $A$  可以表征土壤饱和和导水率,探索三维入渗中饱和和导水率  $k_s$  与利用 Philip 公式拟合入渗过程获取的参数  $A$  的关系(如表 2)。

表 2  $k_s$  与拟合参数  $A$  的关系

Table 2 Relationship between saturated hydraulic conductivity and fitting parameters

三维入渗类型 Three-dimensional infiltration type	$k_s$ 与 $A$ 的拟合方程 Fitted relationship between $k_s$ and $A$	$R^2$	RMSE	
Philip-Dunne 入渗 Philip-Dunne infiltration	30 cm 初始水头 30 cm initial head	$k_s = 0.0036A^{1.8593}$	0.9471 **	0.7104
	40 cm 初始水头 40 cm initial head	$k_s = 0.0026A^{1.7542}$	0.9630 **	0.5147
	50 cm 初始水头 50 cm initial head	$k_s = 0.0032A^{1.3979}$	0.9071 **	0.3467
	不区分初始水头 Mixed initial head	$k_s = 0.0018A^{1.6258}$	0.8376 **	0.8326
单环入渗 Single-ring infiltration	10 cm 直径入渗环 10 cm diameter single-ring	$k_s = 0.3252A^{0.7290}$	0.7138 **	0.9601
	20 cm 直径入渗环 20 cm diameter single-ring	$k_s = 0.2311A^{0.4521}$	0.7232 **	0.9219
	30 cm 直径入渗环 30 cm diameter single-ring	$k_s = 0.4373A^{0.6860}$	0.8853 **	0.9108
	不区分入渗环直径 Mixed diameter single-ring	$k_s = 0.3132A^{0.6956}$	0.6826 **	1.0213

注: \*\* 表示 0.01 极显著  $F$  检验水平。 Note: \*\* express highly significant  $F$ -test 0.01 level.

由表中  $k_s$  与参数  $A$  的关系可知, Philip 公式分析 Philip-Dunne 和单环实验的三维入渗过程获取的参数  $A$  的意义虽发生了变化,不能表征土壤的饱和导水率,但两者仍存在密切关系,因此田间大量的三维入渗获取土壤饱和导水率时,可以在部分试验点上利用相应的求算公式计算入渗参数,同时由 Philip 公式分析其入渗过程得到参数  $A$ , 建立两者的关系获取土壤饱和导水率的求算模型,求算剩余试验点的  $k_s$ , 这在求算公式相对复杂的三维入渗参数求算中具有一定的使用价值。

分析表中不同入渗条件下  $k_s$  与参数  $A$  的关系可知,虽在各自入渗条件  $A$  与  $k_s$  的拟合关系都通过了 0.01 极显著  $F$  检验,但相对于 Philip-Dunne 入渗,单环入渗中  $k_s$  与参数  $A$  拟合的  $R^2$  较小,均方根误差 RMSE 较大,拟合效果相对较差,这是由于 Philip-Dunne 入渗是单一的三维入渗过程,而单环入渗存在由一维到三维入渗的转变过程,整个单环入渗过程是由一维和三维两种入渗形式混合组成。同时,同一种入渗类型中,实验仪器规格不同时  $k_s$  与参数  $A$  的拟合关系和拟合效果也存在差异,Philip-Dunne 入渗中三个不同的初始入渗水头下,得到的  $k_s$  与  $A$  的拟合参数、相关系数及均方根误差均存在差异,同样不区分初始入渗水头条件下  $k_s$  与  $A$  的拟合效果明显较差也说明实验仪器规格影响  $k_s$  与  $A$  的拟合关系;同样,由表中数据可知单环入渗中不同直径的入渗环也会影响  $k_s$  与  $A$  的关系。

根据上述分析, Philip 公式一定程度上可以分析土壤的三维入渗过程,但其参数意义明显发生了变化,试验土壤初始、周边条件及实验方法、实验仪器规格都会影响  $k_s$  与  $A$  的关系。

### 3.3 参数模型检验

为进一步验证基于 Philip 公式确定的参数  $A$  建立的  $k_s$  求算模型的实用性,在 Philip-Dunne 的 41 个人渗点上选取 25 样点,单环入渗的 20 个人渗点上选取 10 个样点,按照上述方法建立  $k_s$  求算模型。基于模型获取剩余入渗点上的土壤饱和导水率(预测值),分析预测值与利用 WPDunne 1.0 和公式(2)获取的  $k_s$  计算值的关系(图 3、图 4)。

从图可知,应用参数  $A$  建立的  $k_s$  求算模型预测土壤饱和导水率时, Philip-Dunne 入渗中预测值与实测值之间的线性回归确定性系数  $R^2$  为 0.9549,通过 0.01 极显著  $F$  水平检验,预测值是实测值的 0.9991 倍,达到了非常理想的效果;单环入渗中预测值与实测值之间的拟合关系虽也通过 0.01 极显著  $F$  水平检验,但  $R^2$  为 0.6685,相对较低。本文建立

的预测模型具有一定的应用价值。

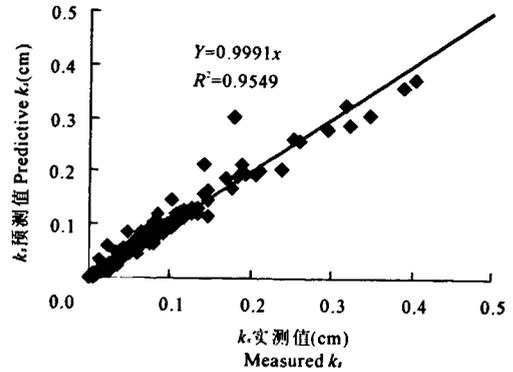


图 3 Philip-Dunne 入渗中  $k_s$  预测值与实测值的关系

Fig.3 Relationship between the actual measured  $k_s$  and forecastin Philip-Dunne infiltration

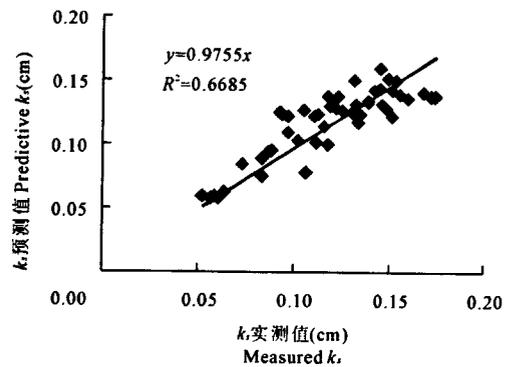


图 4 单环入渗中  $k_s$  预测值与实测值的关系

Fig.4 Relationship between the actual measured  $k_s$  and forecastin singe-ring infiltration

## 4 结论

本文在田间进行了初始入渗水头为 30、40、50 cm 的 Philip-Dunne 入渗和直径为 10、20、30 cm 的单环入渗实验,获取了三维入渗过程中土壤含水率变化、累积入渗量-时间以及对应的土壤入渗参数,用 Philip 公式对 Philip-Dunne 和单环入渗过程进行了分析,同时讨论了 Philip 公式中的参数  $A$  与土壤饱和导水率的关系并据此建立了基于参数  $A$  建立的  $k_s$  求算模型。得到以下结论: Philip 公式在三维入渗动态过程分析中仍然适用,其参数意义发生了变化, Philip 公式中的参数  $A$  与土壤饱和导水率存在幂级数关系,在各自入渗条件下的拟合效果均通过了 0.01 极显著  $F$  检验,试验土壤的初始、周边条件及实验方法、实验仪器规格都会影响  $k_s$  与  $A$  的关系;在 Philip-Dunne 单纯的三维入渗中 30、40、50 cm 的初始水头下  $k_s$  与  $A$  拟合的  $R^2$  分别为 0.9471、0.963 和 0.9071,利用部分实验数据建立求算模型后预测

的  $k_s$  是实测值的 0.9991 倍, 两者的线性回归确定性系数为 0.9549; 单环入渗过程是由一维和三维两者入渗形式组成,  $k_s$  与  $A$  拟合关系虽通过 0.01 极显著  $F$  检验, 但与 Philip-Dunne 入渗相比拟合效果较差, 10、20、30 cm 的三个直径条件下  $R^2$  分别为 0.7138、0.7232 和 0.8853, 建立求算模型的预测  $k_s$  是实测值的 0.9755 倍,  $R^2 = 0.6685$ ; 相比于单环入渗, Philip 公式在 Philip-Dunne 入渗中的应用更强。本文只在壤土中进行了 Philip-Dunne 和直径两种入渗实验, 得出的结论有待于进一步验证。

#### 参考文献:

- [1] 王全九, 邵明安. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 13—15.
- [2] 张 艳. 土壤水力参数的推求方法及其空间变异性研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 1—2.
- [3] Fares A, Alva A K, Nkedi-Kizza P, et al. Estimation of soil hydraulic properties of a sandy soil using capacitance probes and Guelph permeameter[J]. *Soil Sci*, 2000, 165(10): 768—777.
- [4] 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.
- [5] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: 1. Flow of air and water through soils[J]. *J Agric Sci*, 1911, 4(1): 1—24.
- [6] Philip J R. The theory of infiltration 1: the infiltration equation and its solution[J]. *Soil Sci*, 1957, 83(5): 345—357.
- [7] 邵明安, 王全九, Horton. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法. I. 理论分析[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1): 1—8.
- [8] 张振华, 谢恒星, 刘继龙, 等. 基于图形特征的 Green-Ampt 入渗模型关键参数  $s_f$  和  $k_s$  的简化求解[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2): 203—208.
- [9] Philip J R. Approximate analysis of falling-head lined borehole permeameter[J]. *Water Resour Res*, 1993, 29: 3763—3768.
- [10] Brouwer H. Intake rate: Cylinder, infiltrometer [C]// Klute A. *Methods of soil analysis*. Madison, WI: ASA and SSSA, 1986: 825—844.
- [11] Daniel D E. In situ hydraulic conductivity tests for compacted clay [J]. *J Geotech Eng (Am Soc Civ Eng)*, 1989, 115: 1205—1226.
- [12] Reynolds W D, Elrick D E. Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54: 1233—1241.
- [13] 史 舟, 李 艳. 地统计学在土壤学中的应用[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 19—20.
- [14] 汪志农. 灌溉排水工程学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [15] 希勒尔·D 著. 土壤和水—物理原理和过程[M]. 华 孟, 叶和才, 译. 北京: 中国农业出版社, 1981.
- [16] 辛 琛, 王全九, 樊 军. 负水头条件下的水平一维土壤吸渗特征[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(9): 20—26.
- [17] 李 燕, 高 明, 魏朝富, 等. 紫色土水分一维水平运动的数值模拟[J]. *西南农业大学学报*, 2006, 28(4): 627—632.

## Application of Philip Formula in the three-dimensional infiltration and calculating parameter

REN Shang-gang<sup>1</sup>, ZHANG Zhen-hua<sup>1</sup>, YANG Run-ya<sup>2</sup>, PAN Ying-hua<sup>1</sup>, TAN Guo-qiang<sup>1</sup>, LI Lu-sheng<sup>1</sup>, ZU Min<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Planning, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China;

2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A and F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Based on Philip formula, three-dimensional dynamic process of Philip-Dunne and sing-ring infiltration were studied, and also the relationship between of parameter  $A$  in Philip formula and saturated hydraulic  $k_s$ , as well as computing  $k_s$  model were explored. The results show is applicable in the analysis of three-dimensional infiltration, and there is a positive power function, affected by experimental methods and it's equipment specifications, relationship between  $k_s$  and  $A$ ; The accuracy of Philip formula used in Philip-Dunne infiltration was higher than in singe-ring infiltration; Compared with actual measured  $k_s$  in infiltration experiments, the forecast  $k_s$  based on computing model has a overall error below 5%, and then the simply model can be used to estimate infiltration parameters.

**Keywords:** Philip formula; Philip-Dunne infiltration; single-ring infiltration