

# 土壤容重对深层坑渗灌入渗特性影响的试验研究

李涛 张建丰\* 杨艳芬 程慧娟 李剑

(西安理工大学 水资源研究所,西安 710048)

**摘要** 为了揭示土壤容重对深层坑渗灌入渗量的影响规律,通过室内均质土模拟试验,采用非线性回归法对试验数据进行分析;建立了以土壤容重为参数深层坑渗灌的 Kostiakov 和 Philip 改进模型,并进行了验证。结果表明:入渗时间相同时,入渗量随着土壤容重的增大而减小;Kostiakov 入渗模型和 Philip 入渗模型都适用于模拟深层坑深灌的入渗过程,相关系数均在 0.99 以上;建立的 2 个改进模型计算精度均很高,效率系数分别为 99.7% 和 99.9%。相比较而言,深层坑渗灌的 Philip 模型具有一定的理论依据,计算精度较高且模拟效果好,可作为计算深层坑渗灌入渗量的有效模型。

**关键词** 土壤容重; 入渗量; 入渗模型; 模型效率系数

中图分类号 O 357.3 文章编号 1007-4333(2010)06-0089-06 文献标志码 A

## Experimental study on impact of soil bulk density on infiltration properties of deep pit infiltration irrigation

LI Tao, ZHANG Jian-feng\*, YANG Yan-fen, CHENG Hui-juan, LI Jian

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

**Abstract** In order to reveal the effects of soil bulk density on the infiltration volume of deep pit irrigation, the indoor simulation experiment of heterogeneity soil was done, and then the experimental data was analyzed by the non-linear regression method. Kostiakov and Philip advanced infiltration model with parameter of bulk density were established and proved. The main findings indicate that: the infiltration volume increases with the decrease of soil bulk density at the same time; Kostiakov and Philip infiltration models are applicable to infiltration of deep pit irrigation and their correlation coefficients are both above 0.99. Both models showed very high accuracy and the efficiencies of the model coefficients were 99.7% and 99.9% respectively. Compared to Kostiakov model, Philip model with theoretical basis, high accuracy and better simulation results was considered as an effective model for calculating the volume infiltration of deep pit irrigation.

**Key words** bulk density; volume infiltration; infiltration model; efficiency of the model coefficients

新疆吐哈盆地极端干旱区葡萄种植普遍采用沟灌灌溉,由于高温及特殊的戈壁沙石土壤,使得该地区大部分灌溉水资源渗漏或蒸发,水资源浪费十分严重。因此,寻求适合该地区的节水灌溉技术,对该地区经济的可持续发展具有重要意义。膜孔灌<sup>[1-4]</sup>通过田间覆膜阻碍了田间水分的蒸发,但是葡萄种植的沟-垄地形使得该灌水技术不适用。滴灌是一

种局部灌溉,不仅减少了棵间蒸发,而且增加产量<sup>[5-6]</sup>,可节水 70% 以上<sup>[7-8]</sup>,但滴灌的湿润深度不能完全覆盖到成龄葡萄根系生长的深层土壤;而且强烈的蒸发也消减了其节水效果。渗灌是将水输入埋设在地下一定深度的渗水管,借助土壤毛细管作用湿润土壤的灌溉方法<sup>[9-11]</sup>,但普遍存在耗能比较大,容易堵塞,检修困难等问题。鉴于此,本研究针

收稿日期: 2010-05-04

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAD38B03); 新疆自治区重大专项(200731136-5)

第一作者: 李涛,硕士研究生, E-mail: litao4891@163.com

通讯作者: 张建丰,教授,主要从事土壤水分运动与灌区自动化等研究, E-mail: jfzhang@mail.xaut.edu.cn

对极端干旱区成龄葡萄生长的特殊环境提出一种灌水方法——深层坑渗灌,水分通过灌水器直接输送至作物根系生长的深层土壤,减少表层土壤滞留的水分,降低田间蒸发量,不影响土壤透气性,且供水装置位于地表,容易维护。这种灌水方法在国内外鲜有报道。本研究拟通过室内试验,确定模拟深层坑深灌入渗量的有效模型,旨在为深层坑渗灌理论及技术要素的进一步研究,以及在生产实践中的运用提供理论依据。

## 1 试验装置及方法

采用西安理工大学水资源研究所研制的深层坑渗灌试验装置(图1),主要包括土箱、灌水器 and 马氏瓶,均采用有机玻璃材料制成,以便于观测。试验土箱为 60 cm×60 cm×80 cm 的长方体;灌水器为带底的 1/4 圆周的管,半径 9 cm,为保证水分均匀入渗,底部间隔 1 cm 均匀的开  $\phi 2$  mm 的孔;马氏瓶的截面积 500 cm<sup>2</sup>,用橡皮软管与土箱连接。

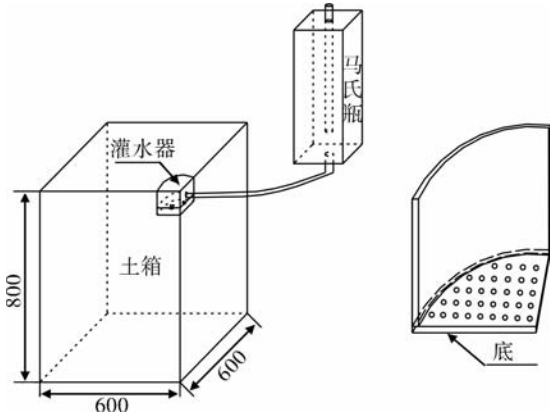


图1 深层坑渗灌入渗试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experiment device of deep pit infiltration irrigation

试验土样为新疆吐鲁番鄯善土,土壤颗粒粒径组成见表1,风干,粉碎,过孔径 2 mm 筛,初始质量含水率 2%,按设计土壤容重分层装入试验土箱,每 5 cm 填装 1 层,共 16 层,设计土壤容重分别为: 1.35、1.45、1.55、1.60 和 1.65 g/cm<sup>3</sup>。试验中,灌水器粘于土箱一角,埋深 10 cm,马氏瓶供水,水头保持 3 cm。由马氏瓶的刻度读取入渗水量,透过有机玻璃观测湿润体形状及湿润锋的运动过程,观测

的时间间隔先密后疏,停水后取土测含水率。

表1 新疆吐鲁番鄯善土颗粒粒径组成

Table 1 Soil particle size distribution in Shanshan turpan Xinjiang

粒径/mm	质量分数/%	粒径/mm	质量分数/%
<0.002	8.46	<0.100	51.24
<0.005	16.29	<0.200	72.59
<0.010	23.46	<0.250	78.58
<0.020	30.63	<0.500	93.19
<0.050	40.22	<2.000	100.00

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同土壤容重条件下入渗量与时间的关系

图2示出灌水器半径为 9 cm,水头 3 cm,土壤初始含水率 2%,土壤容重分别为 1.35、1.45、1.55、1.60 和 1.65 g/cm<sup>3</sup> 时,入渗量随时间的变化关系。可以看出:土壤容重对深层坑渗灌的入渗量有显著影响。入渗时间相同,不同土壤容重条件下,入渗量随着土壤容重的增大而减小,且减小幅度在减小。

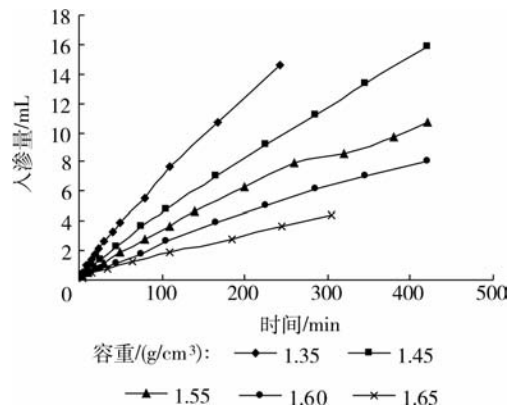


图2 不同土壤容重条件下入渗量随时间的变化

Fig. 2 Change of infiltration according to time under different soil bulk densities

### 2.2 入渗模型拟合

经分析,在深层坑渗灌单灌水器条件下,入渗量与时间的关系符合 Kostiaikov 和 Philip 入渗模型,分别采用这 2 个入渗模型对图 2 中的数据点进行拟合,结果见表 2。可以看出,显著水平为 0.01 时,2 种入渗模型的相关系数均大于临界相关系数  $R_{0.01}$ ,相关关系显著,表明这 2 种入渗模型都能很好的反

映深层坑渗灌入渗量与时间的关系。Kostiakov 入渗模型：

$$I = kt^b \quad (1)$$

式中： $I$  为入渗量，mL； $t$  为入渗时间，min； $k$ 、 $b$  为拟

合参数。Philip 入渗模型：

$$I = St^{1/2} + At \quad (2)$$

式中： $S$  为土壤吸湿率，mL/min<sup>0.5</sup>； $A$  为常数，mL/min。

表 2 Kostiakov 和 philip 模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Kostiakov and Philip models

土壤容重/ (g/cm <sup>3</sup> )	Kostiakov 入渗模型			philip 入渗模型			R <sub>0.01</sub>
	$k$	$b$	$R$	$S$	$A$	$R$	
1.35	78.764 1	0.824 2	0.999 9	132.072 3	21.094 3	0.999 6	0.708
1.45	50.198 4	0.832 6	0.999 8	86.164 6	14.250 0	0.999 5	0.708
1.55	37.072 6	0.835 2	0.999 8	64.324 8	10.689 6	0.999 3	0.684
1.60	27.017 3	0.832 1	0.999 1	45.588 7	7.682 8	0.998 4	0.708
1.65	19.075 3	0.830 7	0.999 6	34.719 6	5.220 5	0.999 8	0.765

注： $k$ 、 $b$  为拟合参数； $S$  为土壤吸湿率，mL/min<sup>0.5</sup>； $A$  为常数，mL/min。

### 2.3 土壤容重对入渗模型参数影响的机理分析

#### 2.3.1 Kostiakov 入渗模型

由式(1)，当  $t=1$  时， $k = I$ ，表明  $k$  的物理意义为入渗第一单位时段末的入渗量，因此，土壤容重对  $k$  的影响实际是对入渗过程第一单位时段末入渗量的影响。第一单位时段末的入渗量实际上是入渗界面处第一单位时段内的水分运动通量。

$$k = q = -k(\theta) \frac{d\varphi}{dx} \quad (3)$$

式中： $q$  为入渗界面处第一单位时段内的水分运动通量，mm/min； $k(\theta)$  为非饱和导水率； $\frac{d\varphi}{dx}$  为水势梯度。由非饱和达西定律(式(3))可知， $k$  与入渗表面的导水率  $k(\theta)$  和势梯度  $\frac{d\varphi}{dx}$  成正比。不同土壤容重下入渗表面的土壤都始终处于饱和状态，因而可以认为：入渗表面的导水率为饱和导水率；基质势梯度都等于 0。由于试验中保持 3 cm 水头不变，重力势梯度不变。所以，总势梯度不变。在入渗的第一单位时段内，土壤容重越大，土壤密实度越大，土壤孔隙度越小，使得入渗表面处的饱和导水率越小，而总势梯度不变，因而拟合系数  $k$  随土壤容重的增加而减小(表 2)。对式(1)两边求以  $t$  为底的对数，得：

$$b = \log t^{\frac{I_t}{k}} \xrightarrow{\text{变形}} \frac{\lg \frac{I_t}{k}}{\lg t} \quad (4)$$

式中： $I_t$  为第  $t$  时刻末的入渗量。由式(4)可以看

出： $b$  值等于第  $t$  单位时段末与第一单位时段末的入渗量比值的常用对数和时间的常用对数的比值。当  $t=10$  时， $b = \lg \frac{I_{10}}{k}$ ，所以可以认为  $b$  值的物理意义为第 10 单位时段末的入渗量与第 1 单位时段末的入渗量比值的常用对数。在相同土样、初始含水率、入渗水头和灌水器半径的情况下，第 10 单位时段末的入渗量和第 1 单位时段末的入渗量都随土壤容重的增加而减小，因此，二者比值的常用对数值变化很小。这就是表 2 中拟合的  $b$  值变化不大的主要原因。

#### 2.3.2 Philip 入渗模型

Philip 入渗模型是在一维条件下推导出来的，但也有将其应用于三维入渗过程的模拟<sup>[3]</sup>，并且模拟效果很好。因此，这里也采用 Philip 入渗模型分析深层坑渗灌的入渗过程。在 Philip 入渗模型中，土壤吸湿率  $S$  的理论计算公式为式(5)和式(6)<sup>[12-13]</sup>：

$$S = \int_{\theta_0}^{\theta_s} \lambda(\theta) d\theta \quad (5)$$

式中： $\theta_s$  和  $\theta_0$  为饱和含水率和为初始含水率，cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>。

$$\lambda(\theta) = x t^{-0.5} \quad (6)$$

式中： $x$  为湿润锋位移距离，cm。不同土壤容重条件下，土壤容重愈大，土壤孔隙则愈小，水分运动受到的阻力愈大，相同时间内湿润锋的位移愈小，则由

式(6)和式(5)可见 $\lambda(\theta)$ 值愈小,吸渗率 $S$ 愈小。这与表2中的计算结果一致。

在 Philip 入渗模型中, $A$ 为常数,在长历时的入渗过程中, $A$ 表示稳定入渗率,其值与饱和导水率的值相同。根据饱和达西定律有:

$$q = -k_s \frac{dH}{dL} \quad (7)$$

式中: $k_s$ 为饱和导水率, $\text{cm}^3/\text{min}$ ;  $H$ 为总水头, $\text{cm}$ ;  $L$ 为渗流路径的直线长度 $\text{cm}$ ;  $q$ 为土壤水分通量, $\text{cm}/\text{min}$ 。在单位梯度(即 $\frac{dH}{dL} = 1$ )作用下,随土壤容重的增大,土壤孔隙减小,水分运动所受的阻力增大,孔隙中水流的速度相应降低,因此,土壤水分通量必然随之减小,则饱和导水率值也减小。所以,随土壤容重不断地增大, $A$ 值相应地减小,这与表2的计算结果一致。

#### 2.4 以土壤容重为参数的 Kostiakov 入渗改进模型

由于 $b$ 值变化很小,因此,取其平均值0.832作为 $b$ 的真值,则 Kostiakov 模型变为改进的 Kostiakov 模型:

$$I = kt^{0.832} \quad (8)$$

利用式(8)对图2中的数据点进行拟合,结果见表3。取显著水平0.01,式(8)拟合的相关系数均大于其所对应的临界相关系数 $R_{0.01}$ ,相关性极显著。这表明改进的 Kostiakov 模型能够反映深层坑渗灌在不同土壤容重条件下,入渗量随时间的变化规律。

表3 改进 Kostiakov 模型对图2数据的拟合结果

Table 3 Fitting results of the data in figure 2 with improving Kostiakov model

土壤容重/( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$k$	$R$	$R_{0.01}$
1.35	75.779 8	0.999 9	0.708
1.45	50.654 7	0.999 8	0.708
1.55	37.977 0	0.999 8	0.684
1.60	27.180 1	0.999 1	0.708
1.65	19.045 2	0.999 6	0.765

表3表明, $k$ 值随土壤容重的增大而减小,回归分析结果见图3和式(9)。

$$k = -183.43r + 320.94 \quad R = 0.993 1 \quad (9)$$

式中: $r$ 为土壤容重, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。取显著水平0.01,对于5个点的数据系列,相关系数 $R=0.993 1$ 大于临界相关系数 $R_{0.01}=0.959$ ,表明 $k$ 与土壤容重的相

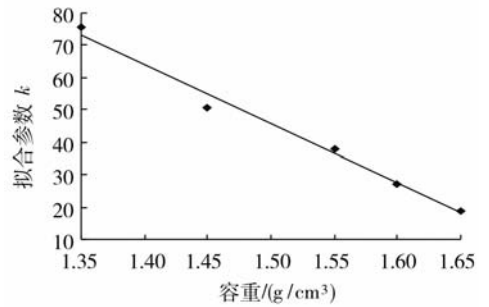


图3 改进 Kostiakov 模型的拟合参数  $k$  与土壤容重的关系

Fig. 3 Relationship between bulk density and fitting parameter  $k$  of improving Kostiakov model

关性极显著。将式(9)代入式(8),得到以土壤容重为参数的深层坑渗灌的 Kostiakov 改进模型:

$$I = (-183.43r + 320.94)t^{0.832} \quad (10)$$

#### 2.5 以土壤容重为参数的 Philip 入渗改进模型

由对 Philip 入渗模型模拟结果的分析可知, $S$ 和 $A$ 值均随土壤容重的增大而减小,对各土壤容重与其所对应的 $S$ 值和 $A$ 值进行一元线性回归分析,结果见图4,拟合公式为:

$$S = -317.13r + 554.61 \quad R = 0.989 8 \quad (11)$$

$$A = -51.199r + 89.61 \quad R = 0.994 0 \quad (12)$$

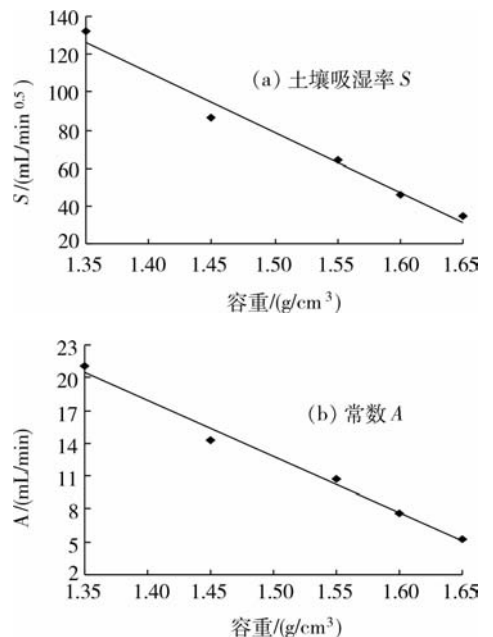


图4 Philip 模型参数与土壤容重的关系

Fig. 4 Relationship between parameter of Philip model and soil bulk density

取显著水平 0.01, 对于 5 个点的数据系列, 临界相关系数  $R_{0.01} = 0.959$ , 两式拟合的相关系数均大于临界相关系数, 因此, 系数  $S$  和  $A$  均与土壤容重呈极显著相关性。

将式(11)和(12)代入式(2), 得到以土壤容重为参数的深层坑渗灌 Philip 入渗改进模型:

$$I = (-317.13r + 554.61)t^{1/2} + (-51.199r + 89.61)t \quad (13)$$

### 2.5.1 改进模型的验证

以土壤容重  $1.4 \text{ g/cm}^3$ 、灌水器半径  $9 \text{ cm}$  的试

验数据为基础, 采用线性回归分析的方法, 对模型计算精度进行检验结果见图 5, 拟合公式为:

Kostiakov:

$$y = 1.0125x \quad R^2 = 0.9975 \quad (14)$$

Philip:

$$y = 1.0066x \quad R^2 = 0.9990 \quad (15)$$

式中:  $x$  和  $y$  分别为实测值和计算值, mL。相关系数的平方分别为 0.9975 与 0.9990, 回归直线斜率分别为 1.0125 和 1.0066, 这表明计算值与实测值很接近, 两模型的计算精度均较高。

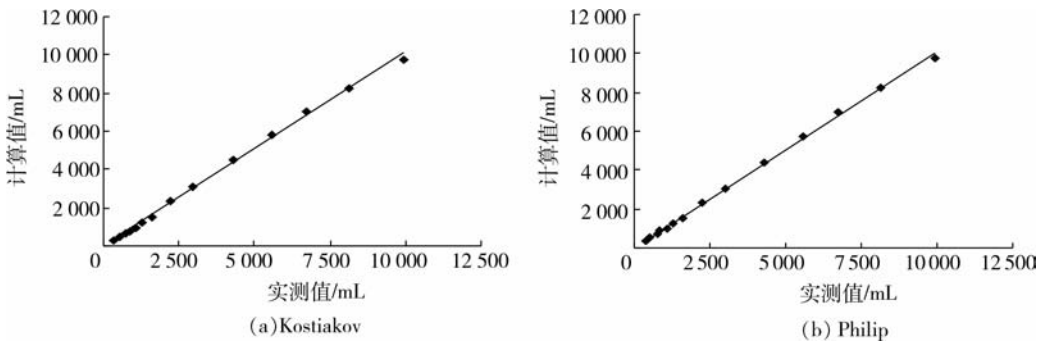


图 5 Kostiakov 和 Philip 改进模型计算的入渗量与实测值的关系

Fig. 5 Relationship between values of infiltration volume calculated by improved Kostiakov and Philip models and measurement

### 2.5.2 改进模型的评价

为了对模型进行评价, 引进模型效率系数  $W$  作为判断模型模拟效果优劣的量化指标<sup>[14]</sup>。  $W$  越接近 1 模拟效果越好:

$$W = 1 - \frac{\sum (Q_r - Q_c)^2}{\sum (Q_r - \bar{Q}_r)^2} \quad (16)$$

式中:  $Q_r$  为实测值;  $Q_c$  为计算值;  $\bar{Q}_r$  为实测值的平均值。经计算, 深层坑渗灌 Kostiakov 和 Philip 改进模型的模型效率系数  $W$  分别为 99.7% 和 99.9%。所以, 两模型在描述不同土壤容重条件下深层坑渗灌的入渗规律时均具有很好的效果。

从模型理论性角度, 深层坑渗灌 Kostiakov 改进模型的结构比较简单, 应用比较方便, 但建立在经验模型的基础上, 缺乏一定的理论支持。深层坑渗灌 Philip 改进模型结构较复杂, 但建立在具有一定理论基础的模型上, 具有一定的理论依据, 且各参数也有明确的物理意义。

从模型计算精度角度, 不同土壤容重条件下, 深

层坑渗灌 Kostiakov 和 Philip 改进模型的计算值与实测值拟合直线的斜率均非常接近 1, 表明两模型均可作为深层坑渗灌入渗量的计算模型; 但比较而言, 深层坑渗灌 Philip 改进模型相关系数的平方更大, 计算精度更高。

从模型评价模拟效果角度, 以土壤容重为参数的深层坑渗灌 Philip 改进模型的模型效率系数较大, 模拟效果更好。

## 3 结束语

在室内试验的基础上, 研究了深层坑渗灌单灌水器的入渗量随时间变化的规律。得到如下结果: 入渗量随入渗时间的增大而增大, 时间相同时, 入渗量随土壤容重的增大而减小; Kostiakov 模型的拟合参数  $k$  随土壤容重的增大而减小, 而拟合参数  $b$  变化不大; Phillip 模型中吸渗率  $S$  和常数  $A$  均随土壤容重的增大而减小; 建立了以土壤容重为参数的深层坑渗灌 Kostiakov 和 Philip 改进模型; 深层坑

渗灌 Philip 改进模型具有一定的理论依据、计算精度较高且模拟效果较好。深层坑渗灌 Philip 改进模型可以作为不同土壤容重条件下计算深层坑渗灌入渗量的有效模型。

### 参 考 文 献

- [1] 费良军,程东娟,雷雁斌,等.膜孔灌单点源入渗特性与数学模型研究[J].西北农林科技大学学报,2007,35(5):212-217
- [2] 费良军,李发文.膜孔灌单向交汇入渗数学模型研究[J].农业工程学报,2003,19(3):68-72
- [3] 吴军虎,费良军,王文焰.膜孔灌溉单孔入渗特性研究[J].水科学进展,2001,12(3):307-312
- [4] 贾丽华,费良军,程东娟.不同灌溉施肥方式的土壤硝态氮分布特性试验研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(2):44-49
- [5] Louise K, Johan R, John G, et al. Low-cost drip irrigation: A suitable technology for southern Africa? An example with tomatoes using saline irrigation water [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89: 59-70
- [6] Mathieu N, Guangyao W, Ronald G. Withholding of drip irrigation between transplanting and flowering increases the yield of field-grown tomato under plastic mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87: 285-291
- [7] 赵竟成.关于节水灌溉的再认识:兼论广义的节水灌溉[J].中国农村水利水电,1999(7):4-8
- [8] 李永顺,马存奎,牟日升,等.果树滴灌需水量与灌溉制度试验研究[J].灌溉排水,1993,17(2):15-20
- [9] 白丹,魏小坑,王凤翔,等.节水灌溉工程技术[M].西安:陕西科学技术出版社,2001:149-150
- [10] Philip J R. Theory of infiltration [J]. *Advances in Hydroscience*, 1969(5):215-296
- [11] 梁海军,刘作新,舒乔生,等.橡塑渗灌管渗水性能实验研究[J].农业工程学报,2006,22(7):56-59
- [12] Philip J R. The theory of infiltration: I The infiltration equation and its solution [J]. *Soil Science*, 1957, 83(2):345-357
- [13] Philip J R. The theory of infiltration: IV Sorptivity and algebraic infiltration equation [J]. *Soil Science*, 1957, 83(1):257-264
- [14] 刘晓阳,毛节奏,李纪,等.雷达估测降水模拟史灌河流域径流[J].北京大学学报,2005,38(3):342-349