

# 垄作沟灌水分入渗模拟与灌水沟断面优化

张新民<sup>1</sup>, 张吉孝<sup>2</sup>, 单鱼洋<sup>1</sup>

(1. 甘肃省水土保持科学研究所, 兰州 730020; 2. 甘肃农业大学 工学院, 兰州 730070)

**摘 要:**以石羊河流域民勤地区为例,采用典型土壤实测土壤水分运动参数,应用 Hydrus 软件模拟不同沟型、不同垄宽条件下沟灌土壤水分运动,并研究了湿润锋推进过程,建立了沟灌土壤水分二维入渗模型,分析了灌水均匀度。结果表明:沟形相同条件下,竖向湿润锋的推进距离与沟底宽及水深呈正相关关系;水平湿润锋的推进距离由沟中水位决定;沟灌累计入渗量由灌水沟湿周的大小决定,入渗初期符合幂函数形式,入渗后期符合线性形式;同种土壤在沟深与水深相同时,V 型沟横向灌水均匀度高于梯形沟,且水位越高均匀度越高。

**关键词:**沟灌;入渗模拟;断面优化;均匀度

**中图分类号:**S271

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2014)01-0137-05

## Numerical Simulation of Infiltration and Cross-section Optimization under Furrow Irrigation

ZHANG Xin-min<sup>1</sup>, ZHANG Ji-xiao<sup>2</sup>, SHAN Yu-yang<sup>1</sup>

(1. Gansu Research Institute for Soil and Water Conservation, Lanzhou 730020, China;

2. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The hydraulic parameters of the typical soil collected from Minqin in the Shiyang River valley were tested. Water movement was simulated by Hydrus software under different types of furrow and ridge width, respectively. Both wetting front and irrigation uniformity was studied, and the two-dimensional infiltration model was established. The results showed that the relationship between vertical wetting front and furrow bottom width follows a positive correlation under the same furrow type, as well as a positive relationship was found between the water depth and vertical wetting front; cumulative infiltration was determined by wetted perimeter in the furrow irrigation and was found to follow a power function and linear function at the beginning infiltration and later, respectively; both furrow depth and water depth were same, uniformity in V type was higher than in trapezoid type, the deeper water level was and the higher uniformity was for the identical soil.

**Key words:** furrow irrigation; simulation of infiltration; cross-section optimization; uniformity

随着水资源短缺问题的不断加剧,干旱半干旱地区农业可持续发展受到了严重的挑战,发展有效的节水技术势在必行。目前,垄作沟灌技术被广泛应用于多种作物的种植(如小麦、玉米、马铃薯等)。为了更好地发挥该技术的节水作用,许多专家和学者对该技术中的技术参数和水分运移进行了大量的研究。张新燕等<sup>[1]</sup>通过室内试验对沟水深、沟底宽、土壤导水率及初始含水量等因素对水分运移的影响进行了分析评价。张永久<sup>[2]</sup>通过小麦田间试验,提出张掖地区合理沟垄宽。水分运移的研究方式主要有试验和模

型模拟两种。Kostiakov<sup>[3]</sup>通过试验建立了沟灌入渗经验公式并被广泛应用于沟灌入渗量的计算<sup>[4-5]</sup>。聂伟波等<sup>[6]</sup>研究发现,沟灌水平、垂直湿润锋运移与时间的 1/2 次方呈线性函数关系,并建立了数学模型模拟湿润锋的距离,取得了理想的结果。王自奎等<sup>[7]</sup>的研究表明,湿润锋水平方向和垂直方向运移距离与时间呈幂函数关系,灌水过程中沟中与垄上土壤含水量增加明显,再分布过程中凭借水平向基质势的作用垄上含水量不断增加。随着计算机技术的不断发展,数值模型模拟作为一种重要的手段被应用到水分运移

模拟当中。孙景生<sup>[8]</sup>利用田间灌水试验和 Infiltrv 5 软件相结合的方式,对沟灌入渗参数进行了反算,结果令人满意。聂卫波<sup>[9]</sup>利用 SRFR 模型成功的模拟了沟灌过程中水流推进、消退及入渗过程。Šimuněk 等<sup>[10]</sup>开发了 Hydrus 模型,目前被广泛用于模拟沟灌水分运移的模型。这些研究成果为更好地了解沟灌水分运移规律和制定合理的灌水量提供了良好的基础。但这些研究均未将灌技术参数与灌水质量评价相结合,尤其是未能在春小麦垄作沟灌的水分运动规律研究的基础上,研究灌水质量评价方法与灌水技术参数。

本文以石羊河流域民勤地区为例,通过室内实验验证 Hydrus-2D 模型模拟的可靠性<sup>[11]</sup>。并根据田间布置,应用该模型模拟分析不同垄宽情况下 V 形、梯形灌水沟裸地条件下土壤水分运动规律,研究不同垄沟参数的湿润锋推进、入渗量,建立沟灌土壤水分二维入渗模型,分析灌水均匀度,从提高灌水效率角度出发提出优化灌水沟断面及尺寸,以期为进一步研究干旱区垄作沟灌技术参数提供基础。

## 1 沟灌二维入渗土壤水动力学模型

### 1.1 基本方程

沟灌入渗既有沟底垂向入渗,也有沟侧水平方向入渗,属于二维非饱和土壤水分运动。假设土壤为各向同性、均质的多孔介质,土壤内部不考虑气阻和温度的影响,忽略蒸发对入渗的影响,根据质量守恒定律和非饱和达西定律,土壤水分运动的偏微分方程为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (1)$$

式中: $\theta$ ——土壤体积含水量( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $t$ ——时间( $\text{min}$ ); $x, z$ ——模拟计算区域的横向与垂向坐标; $D(\theta)$ ——非饱和土壤水的扩散率( $\text{cm}^2/\text{min}$ ); $K(\theta)$ ——非饱和土壤的导水率( $\text{cm}/\text{min}$ )。

### 1.2 沟灌土壤水分运动的定解条件

- (1) 初始条件:
- $$\theta(z, t) = \theta_0(z) \quad (0 \leq x \leq X, 0 \leq z \leq Z, t = 0) \quad (2)$$
- 式中: $\theta_0$ ——土壤的初始含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $X, Z$ ——模拟计算区域的横向和垂向最大距离( $\text{cm}$ )。

- (2) 边界条件:如图 1 所示沟灌土壤水分运动计

算模型简图, $X, Z$ 为平面坐标, $z$ 轴以向下为正。计算域左右两个边界 OA 和 O'A'为对称线,水平通量为零,沟壁水面以上部分 CD 和 C'D'边界上通量也为零,地面线 OD 和 O'D'上垂直通量为零,沟底 BC 和 B'C'、BB'边在灌水过程中满足定水头边界;下边界 AA'为自由排水。综上所述,其边界条件可总结为:

$$\begin{cases} h(x, z) = H - h - z & 0 \leq t \leq t_e & \text{BC、B'C'和 BB'} \\ \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0 & 0 \leq t & \text{OA 和 O'A'} \\ -D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = 0 & 0 \leq t & \text{OD 和 O'D'边} \\ \theta = \theta_0 & 0 \leq t & \text{AA'} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $h$ ——灌水沟中水深( $\text{cm}$ ); $H$ ——沟深( $\text{cm}$ ); $t_e$ ——灌溉停水时间( $\text{min}$ )。

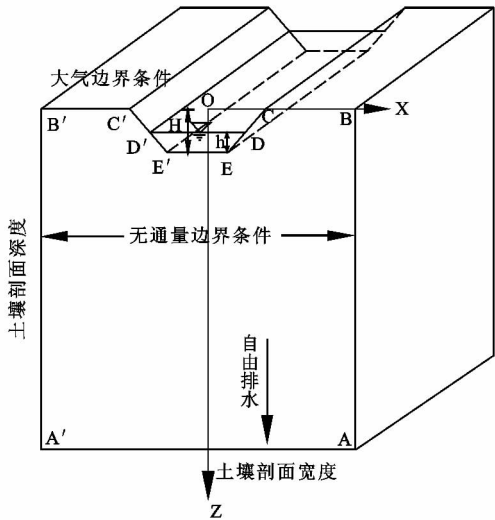


图 1 沟灌模型简图

## 2 模拟土壤基本情况

### 2.1 物理性质

试验土样采自甘肃省水利科学研究院民勤节水农业暨生态建设试验示范基地。试验基地位于石羊河流域下游的民勤县大滩乡(北纬 39°03',东经 103°36')。属大陆性荒漠干旱区,多年平均降水量在 110 mm 左右,年蒸发量 2 644 mm,日照时数 3 010 h 以上,地下水埋深为 18~25 m。试验土壤为该区域的代表性土壤砂质黏壤土。土壤机械组成见表 1。

表 1 土壤物理性质

土壤容重/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	各级颗粒质量分数/%			土壤质地
	黏粒( $d < 0.002 \text{ mm}$ )	粉粒( $0.02 \text{ mm} > d \geq 0.002 \text{ mm}$ )	砂粒( $d \geq 0.02 \text{ mm}$ )	
1.45	38.41	11.79	49.81	砂质黏壤土

### 2.2 水分运动参数

根据模型模拟需要,使用美国 SEC 公司生产的

1500F1 型 15Bar 压力膜仪测定土壤水分特征曲线,用中科院南京土壤物理研究所研制的非饱和导水率

测定仪(FS-1)测定土壤导水率  $K_s$ , 饱和含水率  $\theta_s$  用环刀法测定。将这些实测数据用 Retc 软件和 Van Genuchten 模型拟合参数,模型参数见表 2。Van Genuchten 模型为:

$$\theta(h)=\begin{cases} \theta_r+\frac{(\theta_s-\theta_r)}{(1+|\alpha h|^n)^m} & h<0 \\ \theta_s, h\geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$K(h)=\begin{cases} K_sS_e'[1-(1-S_e^{1/m})^m]^2 & h<0 \\ K_s & h\geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S_e=\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}, \quad m=1-\frac{1}{n} \quad (6)$$

式中: $\theta_r$ ——残余土壤体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $\theta_s$ ——饱和土壤体积含水率( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ); $h$ ——压力水头( $\text{cm}$ ); $\alpha$ ——进气吸力倒数( $\text{cm}^{-1}$ ); $n,m$ ——土壤水分特征曲线的形状参数; $S_e$ ——有效饱和度, $m=1-1/n,n>1$ 。

表 2 土壤水分运动 VG 模型参数

土壤类型	$\gamma_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_r/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3})$	$\alpha/\text{cm}$	$n$	$K_s/(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
砂质黏壤土	1.45	0.0580	0.47	0.03	1.457	0.0305

3 模拟计算

3.1 模拟方案

根据研究区土壤性质、农机具情况和地方种植习惯,选用 V 形沟、梯形沟进行模拟,模拟方案见表 3。

3.2 模拟计算

数值模拟计算采用 Hydrus-2D 软件,模型中土

壤水力学特性采用 VG 模型描述。假定模拟土壤为均质且各向同性,初始含水量按作物生长适宜最低含水量确定,砂质黏壤土取  $0.177\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。有限单元划分由计算机自动生成,模拟初始与最小时间步长均为  $0.05\text{ min}$ ,含水量与吸力公差分别为  $0.001\text{ cm}^3/\text{cm}^3$  和  $0.1\text{ cm}$  水柱,最大迭代次数 30 次,模拟时间为  $780\text{ min}$ 。

表 3 沟灌入渗模拟方案

方案号	沟底宽/cm	沟深/cm	沟坡	沟口宽/cm	垄宽/cm	总宽/cm	水深/cm	备注
Trian20	0	20	1:1	40	60	100	18.0	V 形
Trian13.5	0	20	1:1	40	60	100	13.5	V 形
Trian15	0	15	1:1	30	60	90	13.5	V 形
Trape15	15	15	1:1	45	60	105	13.5	梯形
Trape20	20	15	1:1	50	60	110	13.5	梯形

4 结果与分析

4.1 湿润锋推进过程

沟灌土壤水分入渗分为两个阶段,初期为自由入渗,湿润体为半球体,但随着入渗时间增长,相邻两沟水平向湿润锋发生交汇,入渗逐渐由二维入渗变为竖向一维入渗。沟灌土壤水入渗湿润锋推进与沟型、沟中水深、土壤性质等有关。图 2 为相同沟深、不同沟底宽灌水沟的竖向湿润锋推进过程模拟结果。由图 2 可以看出,相同沟型情况下,沟的底宽越大,竖向湿润锋推进速度就越快,两种梯形沟的推进速度明显大于 V 形沟。

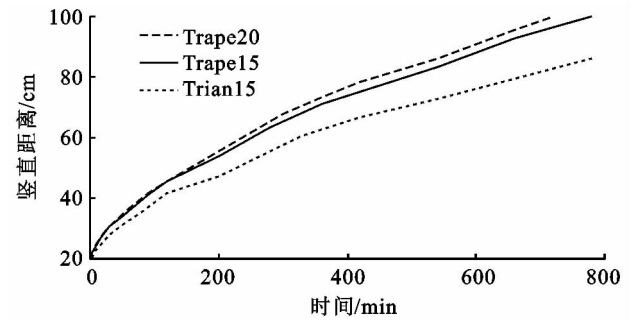


图 2 不同底宽灌水沟竖向湿润锋推进过程线

同样绘制上述三种沟形水平向湿润锋推进过程线(图 3)。由图 3 可以看出,沟开口越大,水平向湿润锋推进越远,但如果排除沟宽影响,三种沟形侧向湿润垄体范围相同。为了研究沟深、水深对湿润锋推进的影响,利用模拟结果绘制 V 形沟方案的竖向湿润锋(图 4)。由图 4 可以看出,沟深、水深均影响竖向湿润锋推进速度,沟深相同时,水深越大,竖向湿润推进越快;水深相同时,沟越深,竖向湿润锋推进越远。沟中灌溉水对水平向湿润锋推进的影响主要由水位来决定的,无论沟宽窄与深浅,只要水位相同,水平向湿润锋推进速度相同,湿润垄的宽度也相同,否则,水位越低,湿润垄的宽度也越小。不同沟水位情况下垄的湿润宽度过程见图 5。

4.2 累计入渗量及其变化规律

累计入渗量反映单位长度沟灌水的入渗总量,其计算模型是沟灌水流模拟和灌水质量评价的依据。研究认为<sup>[9]</sup>,沟灌入渗与畦灌入渗一样,累计入渗量符合 Kostiakov 公式描述的幂函数形式,本研究的砂质黏壤土更符合线性函数形式。图 6 为梯形沟的模拟结果拟合图,由图 6 可看出,在入渗初期,幂函数有较好的拟合效果,在入渗中期,两种形式均存在一定

的误差,而在入渗后期,用线性关系能更好地描述累计入渗量与历时的变化规律。累计入渗量模型用于评价灌水质量时,主要用模型曲线的中后段,为此本

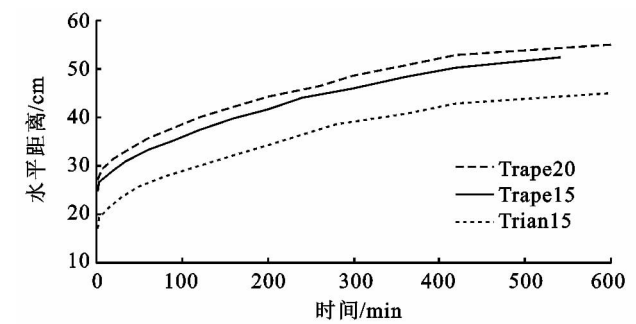


图 3 不同底宽灌水沟水平向湿润锋推进过程线

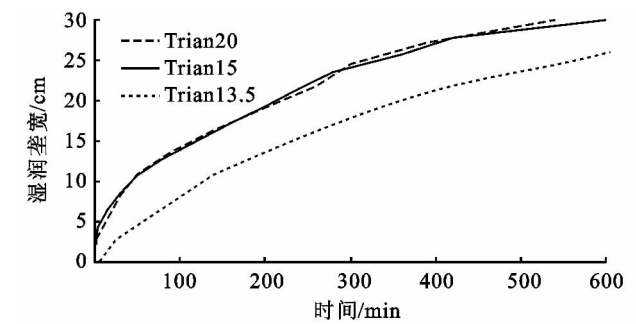


图 5 V 形沟不同沟水位时垄湿润宽度

进一步分析发现,在土壤性质等条件相同的情况下,累计入渗量由灌水沟湿周来决定。采用线性模型对模拟方案累计入渗量进行拟合,结果见表 4。

表 4 不同灌水沟方案累计入渗量回归模型

方案	回归模型	$R^2$
Trian20	$W=146.86+2.7533\tau$	0.9961
Trian13.5	$W=107.49+2.2128\tau$	0.9966
Trian15	$W=98.685+2.073\tau$	0.9965
Trape15	$W=155.68+2.847\tau$	0.9973
Trape20	$W=170.76+3.0774\tau$	0.9965
单位湿周	$W=2.9276+0.05356\tau$	0.9965

表 5 不同垄宽沟灌入渗交汇时间及竖向湿润锋位置

垄宽/cm	交汇时间/min				竖向湿润锋/cm			
	30	40	50	60	30	40	50	60
Trian20	115	220	315	540	46.9	58.1	68.7	84.5
Trian13.5	230	360	560	780	56.4	68.6	80.0	91.8
Trian15	120	213.3	333.3	600	41.9	48.7	61.0	76.1
Trape15	120	213.3	340	540	45.4	56.8	69.1	83.5
Trape20	120	220	360	600	45.6	57.8	73.5	90.9

比较表 5 可以看出,相同沟深与水深情况下,V 形沟横向灌水均匀度优于梯形沟;相同断面情况下,沟中水位越高越有利于提高横向灌水均匀度。由于垄沟参数还与土壤性质有关,本研究中的砂质黏壤土,参考文献[11],推荐 V 形沟:沟深 15~20 cm,垄宽 30~50 cm,沟坡采用松散土壤的稳定边坡 1:1,沟中水深略小于沟深;梯形沟:沟底宽小于 15 cm,沟

文讨论采用中后段拟合较好的线性模型。  
线性: $W=155.68+2.874\tau$   $R^2=0.9965$  (7)  
Kostiakov 公式: $W=22.99\tau^{0.6737}$   $R^2=0.9942$  (8)

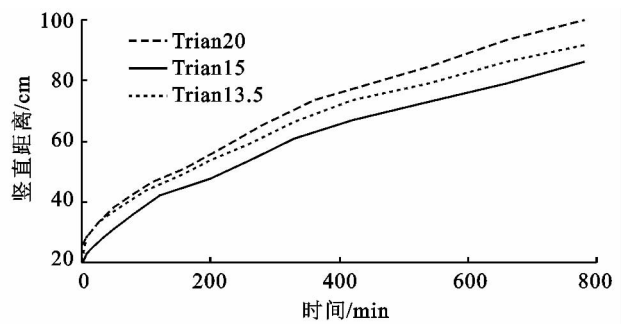


图 4 不同水深 V 形沟竖向湿润锋推进过程线

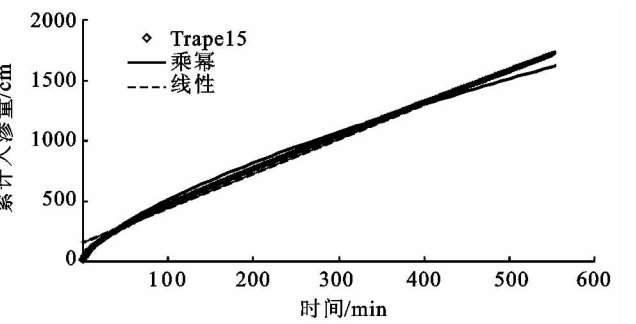


图 6 方案 Trape15 累计入渗量拟合图

4.3 灌水沟参数优化

不同于畦灌,垄作沟灌由于存在沿沟横断面方向的二维入渗,所以其横向灌水均匀度对提高灌水质量至关重要,目前关于沟灌横向均匀度的评价指标尚未建立,本文暂采用交汇入渗时竖向湿润锋距离来衡量,交汇入渗时竖向湿润锋距离越小,横向灌水均匀度越高,反之横向灌水均匀度越低。采用图 2—5 湿润锋推进过程线求得 5 个模拟方案在垄宽 30,40,50,60 cm 时发生交汇入渗时间及与之对应的竖向湿润锋位置(表 5)。

深小于 15 cm,垄宽 30~50 cm,沟坡边坡 1:1,沟中水深略小于沟深。

5 结论

本文采用实测土壤水分运动参数和 Hydrus-2D 软件,建立了沟灌土壤水分二维入渗模拟模型,模拟分析了不同垄宽情况下 V 形、梯形灌水沟裸地条件

下土壤水分运动规律, 分析了灌水均匀度, 从提高灌水效率角度出发提出了优化灌水沟断面及尺寸, 得出的主要结论有:

(1) 沟灌土壤水分入渗湿润锋推进与沟型、沟中水深、土壤性质等有关, 相同沟型情况下, 沟的底宽越大, 竖向湿润锋推进速度就越快, 沟深相同, 水深越大, 竖向湿润锋推进越快越远。沟中灌溉水对水平向湿润锋推进的影响主要由水位来决定, 无论沟宽窄与深浅, 只要水位相同, 水平向湿润锋推进速度相同, 湿润垄的宽度也相同。

(2) 入渗初期, 累计入渗量较好符合 Kostiakov 公式描述的幂函数形式。在入渗后期, 线性关系能更好地描述累计入渗量与历时的变化规律。在土壤性质等条件相同情况下, 累计入渗量由灌水沟湿周来决定。

(3) 采用交汇入渗时竖向湿润锋距离来衡量横向灌水均匀度, 相同沟深与水深情况下, V 形沟横向灌水均匀度优于梯形沟; 相同断面情况下, 沟中水位越高越有利于提高横向灌水均匀度。

#### 参考文献:

- [1] 张新燕, 蔡焕杰, 王健. 沟灌二维入渗影响因素实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(9): 38-41.
  - [2] 张永久. 河西绿洲灌区春小麦垄作栽培产量效应及其影响机制的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2006.
  - [3] Kostiakov A V. On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for stud-
- 
- (上接第 136 页)
- [5] 王绍武, 赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析[J]. 地理学报, 1979, 34(4): 331-341.
  - [6] 朱亚芬. 530 年来中国东部旱涝分区及北方旱涝演变[J]. 地理学报, 2003, 58(增): 100-107.
  - [7] 龚志强, 支蓉, 封国林, 等. 中国近 530 年干湿变化及其持续性特征研究[J]. 气象学报, 2009, 67(2): 307-320.
  - [8] Li J J, Feng Z D, Tang L Y. Late Quaternary monsoon patterns on the Loess Plateau of China[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1988, 13(2): 125-135.
  - [9] 刘现彬, 夏郭胜, 贾佳, 等. 兰州九州台黄土磁性特征及其古气候意义研究[J]. 第四纪研究, 2012, 32(4): 761-770.
  - [10] 姚辉, 徐国昌. 甘肃省近 520 年旱涝特征及干旱频率变化[J]. 干旱区资源与环境, 1992, 6(1): 68-74.
  - [11] 霍云雷. 兰州地区近 540 年旱涝灾害研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 1-5.
  - [12] 白虎志, 董安祥, 郑广芬. 中国西北地区近五百年旱涝分布图集[M]. 北京市: 气象出版社, 2010.

ying it from a dynamics point of view for purposes of amelioration[J]. Transactions of the Sixth Commission of International Society of Soil Science: part A, 1932, 6: 17-21.

- [4] Hopmans J W. Stochastic description of field measured infiltration data[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32: 1987-1993.
- [5] Scaloppi E J, Merkley G P, Willardson L S. Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995, 121(1): 57-69.
- [6] 聂卫波, 马孝义, 王术礼. 沟灌入渗湿润体运移距离预测模型[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 20-25.
- [7] 王自奎, 吴普特, 赵西宁, 等. 模拟垄沟灌溉土壤水分入渗特性试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(3): 24-28.
- [8] 孙景生, 康绍忠, 崔文军. 不同沟灌条件下土壤入渗参数的估算[J]. 灌溉排水学报, 2005, 24(4): 46-50.
- [9] 聂卫波. 畦沟灌溉水流运动模型与数值模拟研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [10] Šimunek J, Šejan M, van Genuchten M T. The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media, version 2. 0[M]. Colorado School of Mines, 1999.
- [11] 张吉孝, 张新民, 刘久如, 等. 用 HYDRUS-2D 和 RETC 数值模型反推土壤水力参数的特点分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(5): 161-166.
- [13] 李刚, 何大明, 叶长青. 云南红河流域径流的时空分布变化规律[J]. 地理学报, 2008, 63(1): 41-49.
- [14] 竹磊磊, 李清平, 李娜. 近 539 年河南省旱涝变化分析[C]. 第 26 届中国气象学会年会气候变化分会场论文集, 2009.
- [15] 伊云鹤, 吴绍洪, 陈刚. 1961—2006 年我国气候变化趋势与突变的区域差异[J]. 自然资源学报, 2009, 24(12): 2147-2157.
- [16] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2 版. 北京市: 气象出版社, 2007.
- [17] 丁一汇, 张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805.
- [18] 郭瑞, 查小春. 泾河流域 1470—1779 年旱涝灾害变化规律分析[J]. 陕西师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(3): 90-95.
- [19] 王涌泉. 太阳活动与黄河洪水关系的探讨[J]. 人民黄河, 1981(4): 23-29.
- [20] 王云璋, 张元东. 黄河流域旱涝与太阳活动关系的初步探讨[J]. 人民黄河, 1983(6): 45-50.