文章编号:1000-7601(2016)04-0006-06

不同湿润比下滴灌土壤入渗特性模拟试验研究

王 平,胡笑涛,王文娥

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室,陕西 杨凌 712100)

摘 要:为了研究滴头流量和设计湿润比对土壤水分运移规律及湿润体特性的影响,前期利用粘壤土进行试验研究,然后依据非饱和土壤水动力学理论和滴灌条件下土壤水分运移特征,建立了土壤水分运动模型,利用 HY-DRUS-3D 对不同湿润比下滴灌土壤入渗模型进行求解。通过所建模型,对11个观测点的模拟结果与实测结果进 行了对比,得出灌水结束时各观测点模拟与实测含水率的相对误差均小于10%,实测与模拟湿润比的相对误差为 4.75%~11.78%。利用所建模型对不同情景下湿润体运移规律进行了模拟,获得了湿润体特征变化规律:滴头流 量主要影响水平湿润锋的运移距离,而设计湿润比对垂直湿润锋运移距离的影响较大;滴头流量相同时,设计湿润 比越大,湿润体内平均含水率越大,高含水区(含水率>0.410 cm³·cm⁻³)半径也越大;设计湿润比相同时,湿润体 内含水率高于0.410 cm³·cm⁻³的湿润半径随流量增大而增大。

关键词:滴灌;湿润比;入渗特性;土壤含水率;数值模拟

中图分类号: S275.6 文献标志码: A

Simulation of soil infiltration characteristics under different wetted soil percentage

WANG Ping, HU Xiao-tao, WANG Wen-e

(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Designed wetted percentage and dripper discharge are two important parameters in the design of drip irrigation system, affecting the size of wetted body and growth status of plant. With the aim of elucidating the influence of dripper discharge and thereby designing wetted percentage according to soil moisture migration and wetting soil characteristic, this paper based on the theory of unsaturated dynamics and the characteristics of soil moisture transfer under drip irrigation, and established a model of soil water movement, HYDRUS – 3D software, to solve the soil infiltration model under different wetted soil percentage. The contrast of measured and simulated values showed that at the end of irrigation, the relative error between simulated and measured values of each observation point were less than 10%, and those for wetted soil percentage were $4.75\% \sim 11.78\%$. By simulating the wetted soil moisture migration under different condition using the established model, we obtained the rule of wetting body characteristics. Dripper discharge mainly affected the migration distance in horizontal direction, design wetted soil percentage had a greater influence on vertical direction. When the dipper discharge is the same, the larger the design wetted soil percentage, the greater the average moisture content in wetted body and the bigger radius of high water zone (water content > 0.410 cm³ · cm⁻³). When the design wetted percentage was the same, the radius of high water cut in wetted body increased as the dripper discharge increased.

Keywords: drip irrigation; wetted percentage; infiltration characteristics; soil water content; numerical simulation

滴灌是目前最先进的局部灌溉方法之一,节水 增产效果良好。与漫灌、喷灌等不同,滴灌属于点源 入渗,地表湿润范围及蒸发量小,灌溉水入渗主要集 中在作物根系,有效提高了水分利用效率,由于土壤 入渗速率与滴头流量同时影响到土壤水分运动及分布,进一步影响作物根系对水分吸收,因此国内外许 多学者都对滴灌条件下土壤水分运移规律及湿润体 特性进行了试验研究^[1-2]和数值模拟分析。Cote 和

收稿日期:2015-09-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51179163)

作者简介:王 平(1989—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事节水灌溉原理与新技术研究。E-mail:1092443775@qq.com。 通信作者:胡笑涛(1972—),男,博士,教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。E-mail:huxiaotaol1@nwsuaf.edu.cn。 Sival 都运用 Hydrus - 3D 软件对滴灌条件下的土壤 水分及溶质运移进行了模拟和分析[3-4];张林和魏 群也利用 Hydrus - 3D 模型对单点源和多点源滴灌 条件下土壤水分运移进行了模拟试验研究^[5-6]。但 是以上研究主要侧重于滴头流量、土壤特性、初始含 水率对湿润体的影响,很少涉及关于湿润比对湿润 体特性的影响。湿润比^[7]是滴灌系统设计的一个重 要参数,是把滴灌系统和作物生长的水分状况联系 起来的重要纽带。自 Keller^[8]提出湿润比的概念后, 湿润比(Wetted percentage, WP)在滴灌系统的设计 中得到了广泛应用, 雷廷武^[9-10] 根据湿润比的定 义,从理论上导出了湿润比计算公式的理论基础以 及实际应用时应满足的条件;晏清洪^[11]通过采用3 种滴灌湿润比,探讨了滴灌湿润比对根系分布的影 响。本文以不同湿润比、滴头流量的点源滴灌入渗 试验为基础,利用 HYDRUS - 3D 软件对水分运移规 律进行模拟,研究滴灌土壤水分的运移特征及含水 率分布规律,为滴灌系统设计提供理论依据。

1 数值分析模型

1.1 土壤水分运动方程

地表点源滴灌土壤水分运动属于典型的三维问题,HYDRUS 模型的水流状态为饱和 – 非饱和达西水流,根据达西定律、质量守恒定律^[12],假定土壤均质、各向同性,忽略水分运动时空气、温度和滞后效应对土壤水分运动的影响,土壤水分运动用 Richard 方程来描述:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \varphi_m}{\partial z} \right] \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial z}$$
(1)

式中, φ_m 为总水势(MPa); $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水 率(cm・min⁻¹); θ 为土壤体积含水率(cm³・cm⁻³);t为水分运动时间(min)。

1.2 定解条件

1.2.1 初始条件 求解土壤水分运动方程的初始 条件^[13]为:

$$h(x,y,z,t) = h_0(x,y,z)$$
 $0 \le x \le X;$
 $0 \le y \le Y; 0 \le z \le Z, t = 0$ (2)
式中, $h(x,y,z,t)$ 为计算区域的初始负压水头,
cm; x,y,z 分别为模拟计算区域水平长度、宽度和深
度,根据土壤入渗试验分别取 $x \in [0,30], y \in [0,$
30], $z \in [0,70], 单位为 cm$ 。

1.2.2 边界条件 滴灌条件下数值模拟计算区域 如图 1 所示,设土体上表面中心点为坐标原点,在该

节点处施加恒定流量;对应于室内实验上边界不考 虑蒸散和降雨强度, $\frac{\partial h}{\partial z} = 0, t > 0_{\circ}$



图1 数值模似计算区域

Fig.1 Numerical simulation calculation region

上边界是一个动态边界,参考张林等^[14]将上边 界分为两种情况考虑:

(1)滴头流量较小,出流速率小于土壤的入渗 速率,水分能够瞬间渗入土壤中,即地表无积水。

在滴头处有:

$$-K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h) + E = q \qquad (3)$$

式中, E 为土壤蒸发强度(cm · min⁻¹); $q = \frac{q_0}{A}$ 为滴 头流量(ml · min⁻¹); A 为土壤表面湿润面积(cm²)。

(2) 滴头流量较大,出流速率大于土壤的入渗 速率,水分不能迅速渗入土壤中,即地表有积水。

在地表饱和区有:

$$-K(h)\frac{\partial h}{\partial z} + K(h) = -E (R_s \leq x \leq X - R_s, z = 0)$$
(5)

式中,R_s为地表积水半径,cm。

模拟过程参考李久生^[14]文献中的方法:先假定 地表积水的半径,用数值模拟的方法来模拟水分运 动(模拟灌水量与实际灌水量的误差为5%左右), 将滴头流量与时间的乘积近似为土体水量的增加, 再通过数值模拟拟合地表积水半径与滴头流量的关 系。

由于土箱深度较大,故下边界可认为土壤水分 和土壤压力水头保持不变,即:

 $h(x, y, z, t) = h_0, 0 \le x \le X; t > 0$ (6)

1.3 数值求解

采用商业软件 HYDRUS - 3D 对上述模型进行 数值模拟,利用 Galerkin 有限单元法进行数学模型 的数值计算^[15],利用隐式差分法对时间进行离 散^[16]。模型的模拟区域长、宽、高分别为60、60、70 cm的长方体,采用三棱柱进行单元网格划分,网格 大小为1.9 cm;滴头附近由于土壤水势梯度较大, 对网格进行加密处理;为便于模拟结果的验证,模拟 时在沿滴头位置处的1/4 竖直剖面上设置了11 个 观测点,相邻观测点的水平间距和垂直间距均为7.5 cm,观测点具体布置如图2所示。



图 2 模拟区域观测点布置

Fig.2 Layout diagram of observation points in simulation region

2 模型验证

2.1 供试土壤

供试土壤为陕西杨凌西北农林科技大学灌溉排 水试验站粘壤土,取土层次为0~40 cm。土壤容重 为1.35 g·cm⁻³,土壤的机械组成为砂粒(0.02 mm) 占62.00%,粉粒(0.002~0.02 mm)占32.36%,粘粒 (<0.002 mm)占5.64%,土样风干后过2 mm 筛备 用。

土壤水分特征曲线利用高速离心机测定,土壤 饱和导水率用定水头法进行测定,土壤水分特征曲 线采用 Van Genuchten 模型拟合。

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / (I + |\alpha h|^n)^m h < 0\\ \theta_s & h \ge 0 \end{cases}$$
(7)

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{1/m})]^2$$
(8)

其中:

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$$
(9)

$$m = 1 - 1/n, n > 1$$
 (10)

式中, θ_s 为土壤饱和导水率(cm³ · cm⁻³); θ_r 为土壤 残余含水率(cm³ · cm⁻³); α ,n,m为拟合参数; α 是 与土壤物理性质有关的参数(cm⁻¹)。h为土壤负压 水头(cm); K_s 为渗透系数(cm · min⁻¹); S_e 为土壤有 效含水率(cm³ · cm⁻³);l为空隙连通性参数,一般情 况取为 0.5。本研究中土壤水分特性的参数值为 θ_r = 0.03 cm³ · cm⁻³; $\theta_s = 0.48$ cm³ · cm⁻³; $\alpha = 0.036$ cm⁻¹; n = 1.56; $K_s = 0.125$ cm · min⁻¹_o

2.2 试验装置与方法

通过室内单点源滴灌入渗试验,对所建数学模型进行验证。试验装置由供水系统、有机玻璃土箱和土壤水分测定仪 ECH₂O组成。供水系统由恒定水头为10m的水塔和滴头组成,滴头为两种以色列 NETAFIM 管上式压力补偿滴头,利用水塔向滴头供水,滴头实测流量分别为2.2L·h⁻¹和4.1L·h⁻¹;有机玻璃土箱尺寸为60 cm×60 cm×70 cm(长×宽×高);试验过程中采用 ECH₂O 土壤水分测定仪实时监测土壤湿润体内含水率的动态变化,ECH₂O 由传感器和数据采集器两部分组成。

试验土壤按照容重 1.35 g·cm⁻³分层装土,底层 装土厚度为 10 cm,上面每层为 7.5 cm,装土过程中 埋设传感器,共 40 个,传感器布置图如图 3 所示,传 感器的横向与垂向距离均为 7.5 cm;装土结束后自 然沉降一天以获得均匀稳定的土壤初始含水率。



图 3 传感器布置

Fig.3 Arrangement diagram of sensor

试验在相同土壤初始含水率(7%)和相同土壤 容重(1.35 g·cm⁻³)的条件下,分别选择滴头流量为 2.2、4.1 L·h⁻¹,设计湿润比为40%、60%、80%水平 下开展试验。试验于2014年4—6月在陕西杨凌西 北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验 室进行,试验开始后通过数据采集器监测48h内湿 润体的含水率变化情况,观测时间间隔为2min。

2.3 结果验证

2.3.1 土壤含水率 表1列出了灌水结束时60% 湿润比、滴头流量2.2 L·h⁻¹时,11个观测点实测与 模拟土壤含水率的对比结果。由表1可以看出,土 壤含水率的实测值与模拟值之间相对误差的绝对值 在1.6%~10%之间,此外还可以看出距离滴头越 远,含水率的相对误差越大,这可能是由于模拟是在 土壤均质、各向同性的理想情况下进行,而实际试验 时沉降过程中下层土壤会比上层土壤压实程度大, 进而减小了土壤下层水分运移速率,导致实测与模 拟含水率之间差值变大。但从总体来看,数值模拟 的结果与试验结果基本一致,说明利用所建立的数 学模型可以对滴灌的土壤水分运移进行模拟。

2.3.2 土壤含水率随时间的变化规律 图 4 为灌 水结束时,不同处理下的 3 个观测点处含水率随时 间变化规律的模拟与实测对比情况。从图中可以看 出,灌水开始后,观测点距离滴头越近,该观测点的 含水率增长速度越快,随着时间推移,含水率增长速 度逐渐趋于平缓,总的来看,各观测点处的含水率都 呈先增大后趋于平缓的趋势。通过模拟值与实测值 对比,可知模拟和实测的含水率变化规律基本一致, 各观测点的模拟值与实测值均较接近,相对误差(相 对误差=|模拟值-实测值|/实测值)均小于10%, 模拟结果能较好地反映湿润体内含水率的变化情 况。

表1 土壤含水率实测值与模拟值的对比					
Table 1	Cor	ntraction of measured and simulated soil moisture			

编号 Number	坐标/cm Coordinate	实测值 Measured value	模拟值 Simulation value	相对误差 Relative error/%	编号 Number	坐标/cm Coordinate	实测值 Measured value	模拟值 Simulation value	相对误差 Relative error/%
1	[0,0,0]	0.41	0.40	2.4	7	[22.5,0,0]	0.10	0.11	10.0
2	[0,0,-7.5]	0.36	0.38	5.6	8	[7.5, 0, -7.5]	0.39	0.38	-2.1
3	[0,0,-15]	0.28	0.30	7.1	9	[7.5,0, -15]	0.10	0.11	10.0
4	[0,0,-22.5]	0.10	0.11	10.0	10	[15,0,-7.5]	0.31	0.30	-4.5
5	[7.5,0,0]	0.37	0.38	1.6	11	[15,0, -15]	0.11	0.10	-8.3
6	[15,0,0]	0.32	0.31	3.7					







2.3.3 湿润比的变化规律 表2给出了灌水结束 时,不同处理下实际与模拟湿润比的对比情况,由表 中可以看出,模拟湿润比均稍大于实际湿润比,实际 与模拟湿润比的相对误差变幅在4.75%~11.78% 之间,误差原因可能是由于装土阶段土壤夯实不均 匀或由于仪器测量误差造成的。总体来看,模拟结 果仍可以很好地代表实测结果,表明所建模型可用 于实际湿润比的计算。

3 结果与分析

利用所建模型对湿润比分别为40%、50%、 60%、70%、80%,滴头流量分别为2.2、3.0、4.1、5.0 L·h⁻¹情况下湿润体的运移特征进行了模拟,并分 析了模拟结果的湿润体特性变化规律。

表 2 湿润比实测值与模拟值的对比/%

Table 2 Comparison of measured and simulated

wetted percentage

滴头流量 Dip discharge ∕(L·h ⁻¹)	设计湿润比 Design wetted ratio	实测湿润比 Measured wetted ratio	模拟湿润比 Simulated wetted ratio	相对误差 Relative error
	40	34.22	36.11	5.53
2.2	60	48.19	53.87	11.78
	80	71.39	74.78	4.75
	40	38.92	41.75	7.27
4.1	60	54.33	57.45	5.74
	80	70.67	75.74	7.18

3.1 流量和设计湿润比对湿润体形状的影响

表3为模拟的不同设计湿润比和滴头流量下湿

润体的深宽比(H/x,湿润体在垂直方向运移距离与 水平方向运移距离的比值)变化规律。由表3可以 看出,相同设计湿润比时,深宽比随滴头流量增大而 减小,说明滴头流量对水平运移距离的影响较大,滴 头流量较小时(2.2、3 L·h⁻¹),湿润锋的垂直运移距 离大于水平运移距离,这是因为滴头流量越大,土壤 入渗能力越小干供水强度,土壤表层积水半径越大, 加速了积水区在水平方向的运移速率:滴头流量相 同时,深宽比随设计湿润比的增大而增大,这说明设 计湿润比对垂直方向运移距离的影响大于对水平方 向运移距离的影响,这是由于同一滴头流量不会影 响湿润锋在水平方向的扩散速率,但随着设计湿润 比增大,灌水时间延长,而土水势梯度又随时间推移 逐渐减小,在重力势和基质势共同作用下,土壤水分 在垂直方向运移速率增大。因此滴头流量主要影响 湿润体的水平运移距离,而设计湿润比主要影响湿 润体的垂直运移距离。

表 3 不同设计湿润比下滴头流量对湿润体深宽比的影响

${\rm Table}\ 3$	Effects of dripper discharge and designed wetting
	ratio on width-depth ratio of wetted body

设计湿润比	深宽比 Width – depth ratio/(cm·cm ⁻¹)						
Designed wetting ratio/%	2.2 L·h ⁻¹	3.0 L·h ⁻¹	4.1 L•h ⁻¹	5.0 L·h ⁻¹			
40	1.025	0.971	0.952	0.933			
50	1.029	1.017	0.971	0.963			
60	1.034	1.018	0.992	0.983			
70	1.054	1.041	0.995	0.991			
80	1.077	1.068	1.031	1.021			

3.2 设计湿润比对土壤水分分布的影响

设计湿润比的选取对滴灌的灌溉效果有很大影 响,图 5 为灌水结束时,4.1 L·h⁻¹滴头流量、不同设 计湿润比下的土壤水分分布情况。从图中可以得 出,入渗所形成的湿润体剖面均为 1/4 椭圆形,随设 计湿润比增大,入渗的水平和垂直距离逐渐变大,湿 润体体积也相应变大。

设计湿润比越大,湿润体内高含水区(含水率> 0.410 cm³·cm⁻³)半径也越大,例如设计湿润比为 40%时,高含水区表层半径为 13 cm,而当设计湿润 比为 80%时,高含水区表层半径达到 16 cm;设计湿 润比逐渐增大时,湿润体内的平均含水率也依次增 大,分别为 0.251、0.256、0.262、0.268、0.272 cm³·cm⁻³,这是由于随着湿润比增大,虽然灌水量 变大,但湿润体积也会相应增大,导致湿润体内的平 均含水率变化较小。因此,对含水率值无太大要求

的情况下,适当地减小设计湿润比,可以达到节水效 果,而且几乎不会影响湿润体内的平均含水率大小。

3.3 滴头流量对土壤水分分布的影响

滴头流量影响湿润体的大小、形状和土壤水分 分布的不均匀程度,将对作物生长产生影响^[17]。图 6为灌水结束时设计湿润比为 60%、不同滴头流量 下湿润体内的含水率分布情况,图为湿润体的 1/4 剖面。

由图 6 可以看出滴头流量不同时,湿润体大小 随滴头流量增大有小幅度的增加。以滴头流量分别 为2.2 L·h⁻¹和4.1 L·h⁻¹为例,滴头流量为2.2 L·h⁻¹时实际湿润比为 53.87%, 而滴头流量为 4.1 L·h⁻¹时实际湿润比为 57.45%, 增长幅度仅为 6.65%;湿润体内高含水区表层半径随滴头流量增 大而增大,滴头流量逐渐增大时,湿润体内含水率高 于 0.410 cm³·cm⁻³的湿润半径分别为 11、13、15、16 cm,这是因为设计湿润比相同时,滴头流量越大,灌 水时间越短,地表附近的灌水无法及时下渗,形成积 水区的范围也会变大,湿润体内的高含水区的范围 也相应增大;由于湿润体大小随滴头流量的增大而 增大,因此在设计湿润比相同情况下,滴头流量的增 大反而会减小湿润体内的平均含水率,从而有可能 在滴头流量较大时,湿润体内的含水率无法满足作 物的生长需求。

4 结 论

本文根据非饱和土壤水动力学理论和单点源滴 灌条件下土壤水分运移特征,按照试验条件设定边 界,建立了单点源滴灌条件下土壤水分运动数学模 型,并用商业化 HYDRUS – 3D 软件对模型进行了数 值求解。通过对 3 种设计湿润比、2 种流量条件下 滴灌土壤水分随时间变化规律的模拟值与实测值进 行对比可知:

 1)灌水结束时,观测点处模拟与实测含水率的 相对误差均在10%以内;实测与模拟湿润比的相对 误差变幅为4.75%~11.78%,总体上模拟结果可以 很好地代表实测结果,表明所建模型可用于对实际 入渗特性的模拟计算。

2) 滴头流量对湿润锋水平运移距离的影响较大,设计湿润比主要影响湿润锋在垂直方向的运移距离;相同滴头流量(4 L·h⁻¹)时,设计湿润比越大,湿润体内平均含水率越大,且湿润体内高含水区(含水率>0.410 cm³·cm⁻³)半径也越大;设计湿润比相同(60%),滴头流量不同时,湿润体大小随滴头流量





Fig.5 Effects of designed wetting ratio on soil water distribution







增大有小幅度增加,湿润体内含水率高于 0.410 cm³·cm⁻³的半径随滴头流量的增大而增大,但是滴头流量增大反而会降低湿润体内的平均含水率。

实际指导灌溉时,应结合作物根区分布情况,合 理地选择滴头流量和设计湿润比,使水分不至于造 成无效蒸发和深层渗漏,例如滴灌条件下种植棉花、 蔬菜等经济作物,根系在垂直方向主要分布在0~ 30 cm 土层,在水平方向是由作物植株处向两侧逐 渐减小,适宜选择较小的设计湿润比和较大的滴头 流量,既不会造成深层渗漏,也可以达到很好的湿润 效果。

参考文献:

- 张振华,蔡焕杰,郭永昌,等.滴灌土壤湿润体影响因素的实验 研究[J].农业工程学报,2002,18(2):17-20.
- [2] 李道西,代小平,冯 江,等.滴头流量和灌水量对滴灌土壤水 分运动的影响[J].节水灌溉,2012,(2):13-15.
- [3] Cote C M, Bristow K L, Charlesworth P B, et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation[J]. Irrigation Science, 2003,22(3/4):143-156.
- [4] A. A. Siyal, T. H. Skaggs. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation [J]. Agricultural water Management, 2008,96(6):893-904.
- [5] 张 林,吴普特,朱德兰,等.多点源滴灌条件下土壤水分运移 模拟试验研究[J].排灌机械工程学报,2012,30(2):237-243.

(下转第17页)

2010,31(4):90-95.

- [6] 穆兴民,高 鹏,巴桑赤烈,等.应用流量历时曲线分析黄土高 原水利水保措施对河川径流的影响[J].地球科学进展,2008, 23(4):382-389.
- [7] Tianming Huang, Zhonghe Pang. Groundwater recharge and dynamics in northern China: implications for sustainable utilization of groundwater[J]. Proceedings of the Fourteenth International Symposium on Water-Rock Interaction, Wri 14, 2013,7:369-372.
- [8] Changbin Li, Jiaguo Qi, Shuaibing Wang, et al. A Holistic system approach to understanding underground water dynamics in the loess tableland: a case study of the dongzhi loess tableland in northwest China[J]. Water Resources Management, 2014,28(10):2937-2951.
- [9] Gutierrez-Lopez J, Asbjomsen H, Helmers M, et al. Regulation of soil moisture dynamics in agricultural fields using strips of native prairie vegetation[J]. Geoderma, 2014, 226:238-249.
- [10] Huihui Feng, Yuanbo Liu. Trajectory based detection of forestchange impacts on surface soil moisture at a basin scale [Poyang Lake Basin, China][J]. Journal of Hydrology, 2014,514:337-346.
- [11] 段争虎.土壤水研究在流域生态一水文过程中的作用、现状与 方向[J].地球科学进展,2008,23(7):682-684.
- [12] 唐笑天.陕西苹果产业发展存在问题及对策建议[J].山西果树,2015,(1):30-31.
- [13] Lei Yang, Wei Wei, Liding Chen, et al. Response of deep soil moisture to land use and afforestation in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2012,475:111-122.
- [14] 程立平,刘文兆,李 志.黄土塬区不同土地利用方式下深层 土壤水分变化特征[J].生态学报,2014,34(8):1975-1983.
- [15] 王 锐,刘文兆,李 志.黄土塬区 10 m 深剖面土壤物理性质 研究[J].土壤学报,2008,45(3):550-554.

- [16] 曹 裕,李 军,张社红,等,黄土高原苹果园深层土壤干燥化 特征[J].农业工程学报,2012,28(15):72-79.
- [17] 张 义,谢永生,郝明德.黄土高原沟壑区塬面苹果园土壤水 分特征分析[J].土壤,2011,43(2):293-298.
- [18] 程立平,刘文兆.黄土塬区土壤水分分布特征及其对不同土地 利用方式的响应[J].农业工程学报,2011,27(9):203-207.
- [19] 王永东,徐新文,雷加强,等.塔里木沙漠公路防护林带土壤水 分动态研究[J].科学通报,2008,53(增刊2):89-95.
- [20] 张 盼,刘文兆.应用时间序列模型分析长武塬区地下水水位 的变化特征[J].水土保持研究,2010,17(3):22-27.
- [21] Liping Cheng, Wenzhao Liu, Zhi Li, et al. Study of Soil water movement and groundwater recharge for the Loess Tableland using environmental tracers[J]. Transactions of the Asabe, 2014,57(1):23-30.
- [22] 张社红,李 军,王学春,等.渭北旱塬苹果园地产量和深层土 壤水分效应模拟[J].生态学报,2011,31(13):3767-3777.
- [23] 王国梁,刘国彬,党小虎.黄土丘陵区不同土地利用方式对土 壤含水率的影响[J].农业工程学报,2009,25(2):31-35.
- [24] 王延平,韩明玉,张林森,等.陕西黄土高原苹果园土壤水分分 异特征[J].林业科学,2013,49(7):16-25.
- [25] 樊 军,郝明德,邵明安.黄土旱塬农业生态系统土壤深层水 分消耗与水分生态环境效应[J].农业工程学报,2004,20(1):
 61-64.
- [26] 李玉山.旱作高产田产量波动性和土壤干燥化[J].土壤学报, 2001,38(3):353-356.
- [27] 李玉山.黄土区土壤水分循环特征及其对陆地水分循环的影 响[J].生态学报,1983,3(2):91-101.
- [28] 李玉山.黄土高原森林植被对陆地水循环影响的研究[J].自 然资源学报,2001,16(5):427-432.

(上接第11页)

- [6] 魏 群,费良军.地表滴灌点源入渗土壤水分运动的模拟研究[J].广东水利水电,2012,(z1):7-10,15.
- [7] 傅 琳,董文楚,郑耀泉.微灌工程技术指南[M].北京:水利电力出版社,1988:96-100.
- [8] Keller J, Karmeli D. Trickle irrigation design parameters [J]. Transaction of the ASAE, 1974, 17(4):678-684.
- [9] 雷廷武,郑耀泉,聂光镛.滴灌湿润比的有理设计方法及应用 [J].农业工程学报,1992,8(1):23-34.
- [10] 雷廷武.滴灌湿润比的解析设计[J].水利学报,1994,(1):1-9.
- [11] 晏清洪,王 伟,任德新,等.滴灌湿润比对成龄库尔勒香梨生 长及耗水规律的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):7-13.
- [12] 李光永,郑耀泉,曾德超,等.地埋点源非饱和土壤水运动的数 值模拟[J].水利学报,1996,27(11):47-56.

- [13] 张 林,吴普特,范兴科.多点源滴灌条件下土壤水分运动的数值模拟[J].农业工程学报,2010,26(9):40-45.
- [14] 李久生,张建君,饶敏杰.滴灌施肥灌溉的水氮运移数学模拟 及试验验证[J].水利学报,2005,36(8):932-938.
- [15] Liping Pang, Murray E Close, James P. C Watt, et al. Simulation of picloram, atrazine, and simazine leaching through two New Zealand soils and into ground water using HYDRUS – 2D[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2000,44(1):19-46.
- [16] Prit Pal Singh Lubana, N.K. Narda. Soil water dynamics model for trickle irrigated tomatoes[J]. Agricultural Water Management, 1998, 37(2):145-161.
- [17] 李明思,康绍忠,孙海燕.点源滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J].农业工程学报,2006,22(4):32-35.