文章编号:1000-7601(2016)06-0110-07 **doi**:10.7606/j.issn.1000-7601.2016.06.17

滴灌条件下核桃园土壤水分动态变化的数值模拟研究

李 丹,赵经华,付秋萍,洪 明,马英杰
(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为探究滴灌条件下核桃根系对土壤含水量的影响,试验以 8 a 生核桃树为研究对象,使用分层分段挖掘法分析核桃根系的空间形态分布,通过构建 HYDRUS－2D 模型,对有根系吸水下的土壤水分变化进行求解,并利用实测点数据校验 2D 模型的可用性。经过实际计算与理论分析,得出如下结论:在垂直二维剖面中,水平距树 0～30 cm、垂直 40～60 cm 土层的细根根长密度分布最大,为 1 618.216 $m \cdot m^{-3}$。对比实测数据与模拟数据,结果显示 RMSE 均小于 0.0186 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,ME 绝对值小于 0.0108 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,证明数值模拟效果较好,HYDRUS 模型可应用于实际试验研究。将根系模块纳入模型模拟,并比照单独水流模块作用,结果显示根系对土壤含水量产生影响,使体积含水率曲线整体低于单独水作用下的含水率曲线,且两者关系差异性显著。模拟核桃生育前期土壤含水量变化,结果表明灌水后 6 d 至 7 d 内,土壤含水量存在明显减小现象,故可将生育前期灌水周期设定为 6 d 或 7 d。

关键词:核桃树;滴灌;根系;土壤含水率;HYDRUS－2D 模型
中图分类号:S664.1; S275.6 **文献标志码**:A

Study on numerical simulation of soil moisture dynamic variation for walnut orchard under drip irrigation

LI Dan, ZHAO Jing-hua, FU Qiu-ping, HONG Ming, MA Ying-jie
(*College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Xinjiang Agricultural University*, *Urumqi*, 830052, *China*)

Abstract: Eight-year-old walnut trees were used to study the effect of root system on soil water content in different soil layers under drip irrigation. The root system was sampled from different soil layers. HYDRUS－2D model was built with consideration of water uptake by root system and checked. The results are described as follows: in vertical 2D profile, the soil layer of 40～60 cm being 0～30 cm away from the tree had the maximal fine root density of 1 618.216 $m \cdot m^{-3}$. The RMSE value and ME of the measured and simulated values from HYDRUS－2D are less than 0.0186 $cm^3 \cdot cm^{-3}$ and 0.0108 $cm^3 \cdot cm^{-3}$, respectively, suggesting that HYDRUS model could be used in the actual experiment research. The simulated results were different according to whether the effect of root system was considered, and the volumetric water content with root system considered is significantly lower. According to the simulated value for early stage of walnut, the soil content decreased a lot 6 days and 7days after irrigation, indicating that the irrigation cycle in earlier growing stage could be set 6 days or 7 days.

Keywords: walnut; drip irrigation; root system; soil water content; HYDRUS－2D

根系是陆生植物吸水的主要器官,它从土壤中吸收大量水分,满足植物体的需要[1]。植物根系吸水及其空间形态分布可以在很大程度上支配地下、大气中的水通量[2],根系在土壤中的分布状况同样是植物进行灌水、施肥等需要考虑的重要影响因素[3-4]。在众多灌水方式中,滴灌被认为是在干旱、半干旱地区最适宜浇灌行间种植的农作物(蔬菜和果树)的灌水技术。通过滴灌,水、肥能够最大限度地施用于植物根区,也可以尽量减少植株蒸发蒸腾量和深层渗漏量,同时,作物的大产量、高水分利用

收稿日期:2016-02-27
基金项目:新疆维吾尔自治区重大专项(201130103－1);国家科技支撑计划项目(2011Bad29B05);新疆水利科技项(2013G03);新疆水利水电工程重点学科基金资助项目(XJZDXK－2002－10－05)
作者简介:李 丹(1988—),女,河南开封人,硕士研究生,主要从事灌溉节水理论研究。E-mail:aydans@163.com。
通信作者:赵经华(1979—),男,新疆奇台人,副教授,硕士生导师,主要从事节水灌溉技术研究。E-mail:zhaojinghua_xj@126.com。

效率是滴灌优于地面灌的又一优势[5]。核桃是新疆南疆地区重要的经济作物,南疆适宜的环境条件为核桃的生长提供了强有力的保障,而作为干旱少雨地区,滴灌技术也已较多运用于林果产业生产。

数值模拟是一种简便易行的研究滴灌管理措施的方法。其中,HYDRUS 软件是用于模拟二维和三维变饱和环境中,水、热或溶质等运移情况最为全面的安装程序之一[6]。近些年来,许多研究者使用这一模型评估大田或实验室试验,大量数学模型也利用 HYDRUS 软件进行论证,例如,El-Nesr M N 等[7]关于物理障碍对水流及其溶质运移情况的研究,Deb S K 等[8]关于地面灌溉的美国山核桃根系模拟,Shouse P J 等[9]对浅盐地下水条件下根系吸水影响的探讨等。

在前人研究的基础上,本文着重探讨以下四个问题:(1) 核桃根系空间分布状态;(2) 评估 HYDRUS-2D 模型是否可以正确运用于大田实际根系水分模拟;(3) 根系对核桃根区土壤水分运动的影响;(4) 能否将 HYDRUS 模型作为田间灌水管理的有效手段之一。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验区位于新疆阿克苏地区红旗坡新疆农业大学林果试验基地内,距市区 13 km,地理位置为东经 80°14′,北纬 41°16′,海拔 1 133 m。地处天山中段的托木尔峰南麓,塔里木盆地北缘,属于典型的温带大陆性气候,多年平均太阳总辐射量 544.115 ~ 590.156 kJ·cm^{-2},多年平均年日照时数 2 855 ~ 2 967 h,无霜期达 205 ~ 219 d,多年平均降水量 42.4 ~ 94.4 mm,多年平均气温 11.2℃。

1.2　材料与试验设计

供试果树为 8 a 生核桃,品种为“温 185”。树行沿西南、东北方向种植,株行距为 2 m × 3 m。试验地区土地平整度较好,周边无遮蔽物。

大田试验灌水方式为地表滴灌,滴灌采用压力补偿式滴灌管,滴头间距为 0.5 m,滴灌管直径为 20 mm,流量为 3.75 L·h^{-1},均采用一行两管布置方式,每条滴灌管距树 0.5 m,试验中设置灌水定额为 300 m^3·hm^{-2}。

1.3　观测项目及测定方法

1.3.1　土壤基本性质测定　试验初期,在核桃地分层选取大田土样,并按照美国农业部土壤质地三角形筛分土粒,进行土壤颗粒划分。其中,取土剖面深度为 120 cm,每 20 cm 为一层,共 6 层。土壤质地分析结果如表 1 所示。根据土样筛分结果,将土层剖面划分为 3 层,其中,0 ~ 40 cm 为一层,40 ~ 60 cm 为一层,60 ~ 120 cm 为最后一层。同时,根据选取试样,采用日立 CR21G PF 高速冰冻离心机测定土壤水分特征曲线,从而获取不同土层土样特征曲线。

表 1　核桃根区土壤质地组成

Table 1　Soil texture in the root zone of walnut

土层 Soil layer /cm	容重 Bulk density /(g·cm^{-3})	土壤粒径比例 Ratio of soil particle size/%				土壤类型 Soil types
		< 0.002 mm	0.002 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 2 mm	> 2 mm	
0 ~ 20	1.38	7	56.5	36.5	0	粉砂壤土 Silt loam soil
20 ~ 40	1.42	7.2	67.9	24.9	0	粉砂壤土 Silt loam soil
40 ~ 60	1.40	2.9	15.8	81.3	0	壤砂土 Loamy sand
60 ~ 80	1.38	0.1	1.7	98.2	0	细砂 Fine sand
80 ~ 100	1.35	0.2	8.0	91.8	0	细砂 Fine sand
100 ~ 120	1.43	0.7	12.0	87.3	0	细砂 Fine sand

1.3.2　土壤含水率测定　试验地每株样树均布置 Trime 管 5 根,行间 3 根,株间 2 根,均从树干开始,每 50 cm 布置一根,至此,行间第 3 根 Trime 布置在距树 150 cm 处,株间第 2 根 Trime 管布置在距树 100 cm 处。在每次灌水前、灌水后、雨后,分别使用 TRIME-IPH 土壤剖面含水量测量系统对不同土层土壤水分状况进行监测,测定深度均为 120 cm,20 cm 为一层。除此,在距树 50 cm 的滴头下,布设 HYDRA 传感器 6 个,每 20 cm 埋设一个,直至 120 cm 土层,用于监测滴头下土壤含水率实时动态变化,并设定 1h 土壤含水量数据被测量 1 次。

1.3.3　棵间蒸发量、植株蒸腾量、气象资料监测　每株样树布置微型蒸渗仪 2 个,1 个放置在距树 150 cm(行间)的 Trime 管边,1 个放置在距树 100 cm(株间)的 Trime 管边。每天早晨定时测定各个微型蒸渗仪质量变化,最终以加权平均值计算得出每株树每天的棵间蒸发量。

植株蒸腾量采用 SF-G 探针式植物茎流仪计

算得出。

在试验区附近架设小型气象站 Watchdog,记录气象因子的实时数据变化,其中,时间间隔设定为 30 min。

1.3.4 核桃根系测定 试验于 2015 年 7 月 7 日采用分层分段挖掘法进行核桃根系取样。取样时,从树干开始,向行间挖取一个长 150 cm、深 120 cm 的土壤剖面,并按照 30 cm(长)×20 cm(宽)×20 cm(深)进行分层取样,共 30 个行向根区土样。将各个土样经水冲洗干净后,装入自封袋中带回实验室扫描。将每个自封袋中根样按照细根(根径 < 2 mm)与粗根(根径≥2 mm)分别进行根系扫描,扫描设备为 HP Scanjet 8200 型扫描仪。扫描成图后,经过 Delta – T Scan 软件分析,得到不同根系根长数据,从而计算得出根长密度分布。

2 模型构建

2.1 有限单元模型

滴灌下根区土壤水分运移模型使用 HYDRUS – 2D 进行数值模拟。在实际数值模拟中,可以忽略单个滴头和概念上的滴灌管作用,从而将它们概化为有入渗过程和土壤水再分布的二维(垂直)平面线源入渗[10]。Elmaloglou S 等[11]认为模拟二维过程的线源入渗假设是可以应用于理论实践当中。

HYDRUS 模型使用 Galerkin 线状有限元法进行空间离散,有限差分法进行时间离散。水流控制方程采用修改过的 Richards 方程,即嵌入汇源项以考虑作物根系吸水情况。通过对水流区域进行不规则三角形网格划分,求解各区域水流运动。

模拟水流入渗和重分布情况均使用 HYDRUS 模型。在变饱和刚性介质中考虑二维等温 Darcian 水流,并假定液体流动过程中没有空气影响,则二维变饱和流动(Richards)方程可表示为:

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

式中,$\theta(x,z,t)$ 为土壤体积含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$);L 为压力水头(m);z 为垂直距离(m);x 为水平距离(m);$K(\theta)$ 为非饱和水力传导函数($m \cdot s^{-1}$);t 为时间(s);S 为根系吸水汇源项(s^{-1})。

2.2 土壤参数

通过 Mualem(1976) 的统计空隙大小模型,van Genuchten(1980) 得到了关于土壤水滞留参数的非饱和导水率的预测方程。该土壤水参数模型可表述为:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geqslant 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^l [1 - (1 - S_e^{l/m})^m]^2 \quad (3)$$

其中 $m = 1 - 1/n,\ n > 1$

以上公式中包含 5 个独立参数:θ_r,θ_s,α,n 和 K_s。对于大多数土壤来说,孔隙连通性参数 l 在水力传导函数中取均值 0.5。

依据前期试验中获取的土壤质地及相关参数,本次试验使用 HYDRUS 软件自带的 ROSETTA 程序评估各个土壤参数[12],并通过土壤水分特征曲线拟合得到的数据加以辅助修正。

2.3 根系吸水参数

水流控制方程中的汇源项 S 表示植物根系在单位时间内从单位土体中吸收的水量,Feddes 等[13]将 S 定义为:

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (4)$$

其中,

$$S_p = b(x,z) S_t T_p \quad (5)$$

HYDRUS 模型中的根系二维分布函数可表述为[14]:

$$b(x,z) = \left(1 - \frac{z}{Z_m}\right)\left(1 - \frac{x}{X_m}\right) e^{-\left(\frac{p_z}{Z_m}|z^* - z| + \frac{p_r}{X_m}|x^* - x|\right)} \quad (6)$$

式中,$\alpha(h)$ 为土壤水势的指定响应函数($0 \leqslant \alpha \leqslant 1$);$S_p$ 为潜在吸水速率(s^{-1});$b(x,z)$ 为标准化二维根系吸水分布(m^{-2});S_t 为与蒸腾过程相关的土壤表面宽度(m);T_p 为潜在蒸腾速率($m \cdot s^{-1}$);X_m、Z_m 分别为 X 方向与 Z 方向最大根系长度(m);x、z 为 X 方向、Z 方向距树距离(m);p_z、p_r、z^*、x^* 为经验参数。本次研究中,试验测定取得 X_m、Z_m 分别为 150 cm、120 cm,经参数拟合,p_z、p_r、z^*、x^* 分别为 1、1、48 cm、2 cm。

2.4 边界条件和初始条件

试验期间,已采集每日植株蒸腾量、棵间蒸发量、日降水量、灌水量等数据,经统计整理,可作为日大气边界条件加以应用,故土壤边界设置为大气边界条件。针对距树 50 cm 的地面滴头,由于有周期性灌水发生,故滴头周边设置为变通量边界。在两侧的垂直传输界面上默认通量为 0,故设置为零通量边界。考虑到核桃试验地地下水位埋设较深,无水流交换发生,故设置为自由排水边界。HYDRUS – 2D 剖面边界最终设置如图 1 所示。

上述边界条件设置中,滴头周边流量通量密度 Q 表达式为[15]:

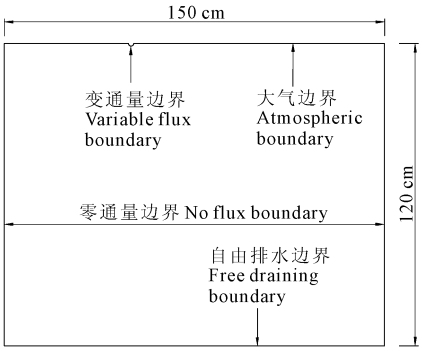

图 1　概化 2D 剖面模拟区边界

Fig.1　Generalized 2D profile simulation zone boundary

$$Q(\mathrm{cm\cdot h^{-1}}) = \frac{\text{滴头流量}(\mathrm{cm^3\cdot h^{-1}})}{\text{单位长度滴灌管表面积}(\mathrm{cm^2})} \tag{7}$$

当灌水停止时,滴头边界条件变为零通量边界条件。模拟剖面中,分别在地面滴头下 20、40、60、80、100、120 cm 处设置观测点,用以监测土壤水分动态变化。

2D 模型中,初始条件采用试验中所测得的各层土壤体积含水率。

2.5　模型评估

研究采用均方根误差(Root mean square error, RMSE)和均值误差(Mean bias error, ME)[16]评估滴灌核桃根系土壤水分模型的模拟结果。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{N}} \tag{8}$$

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)}{N} \tag{9}$$

式中,N 为实测点、模拟点对应个数;P_i 为模拟值;O_i 为实测值。$RMSE$ 用来反映模拟值与实测值之间的平均差异显著性,ME 用来显示模型预测中的系统误差或偏差,例如,ME 正值或负值分别显示估计过高或估计过低的趋势。

3　结果与分析

3.1　细根根长密度二维分布

核桃树细根根系垂直剖面二维分布如图 2 所示。为了研究土层深度与距树水平距离对根长密度的影响,现将细根根长密度(M)与土壤剖面水平距离(X)、土层深度(Z)进行二次多项式回归拟合,得到的模型关系如下:

$$M = 0.061X^2 - 18.953X - 0.069Z^2 + 9.223Z + 0.014XZ + 1396.705 \quad (R = 0.67) \tag{10}$$

通过上式的数学拟合可以看出,相对于水平距离的影响,土层深度对细根根长密度的影响更大,水平距离与土层深度相互之间具有协同作用,共同影响细根分布。使用 1stOpt 进行非线性规划计算,得出以细根根长密度最大化为目标的最优解,其值分别为水平距离 2.075 cm,土层深度 48.345 cm,此时,细根的根长密度为 1 618.216 $\mathrm{m\cdot m^{-3}}$。数据结果表明,距树水平距离 0~30 cm、土层深度 40~60 cm 为细根密度分布最大,说明此区域为根系生长最活跃的部分,同时也是根系吸收养分、进行新陈代谢最为旺盛的区域,是今后水肥、养分供给应着重考虑的区域。

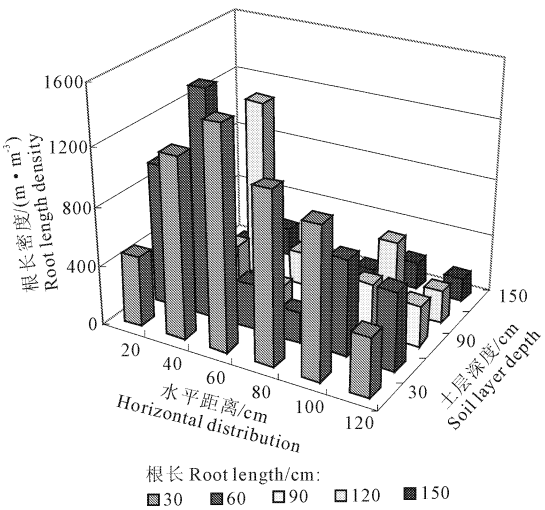

图 2　细根根长密度二维分布

Fig.2　Two-dimension distribution of fine root length density

3.2　根区土壤水分模拟评估

模型模拟时段为 2015 年 4 月 15 日—7 月 31 日,共 108 d,此时核桃树处于萌芽、发育阶段。根据 HYDRUS-2D 根区土壤含水量的模拟值结果与实际测量值,计算该模型的拟合度,并选取典型土层 20、80、100 cm 数据进行土壤含水率绘制,其结果如图 3 所示。从图中可以看出,不同土层土壤体积含水率模拟值与实测值拟合效果较好,模型评定指标 RMSE 与 ME 数值合理,说明模拟的土壤含水率变动在可控范围内,HYDRUS 模型可以应用于试验地实际数据模拟。

分析对比 0~20 cm 土层与 80、100 cm 土层,可以看出 0~20 cm 土层土壤体积含水率波动幅度较大,而下层土壤 80、100 cm 波动幅度较小,说明离土层表面越近,土壤含水量变化越剧烈,证明大气降水、植株蒸腾、棵间表土蒸发等大气边界条件对 0~20 cm 土层造成影响较大。

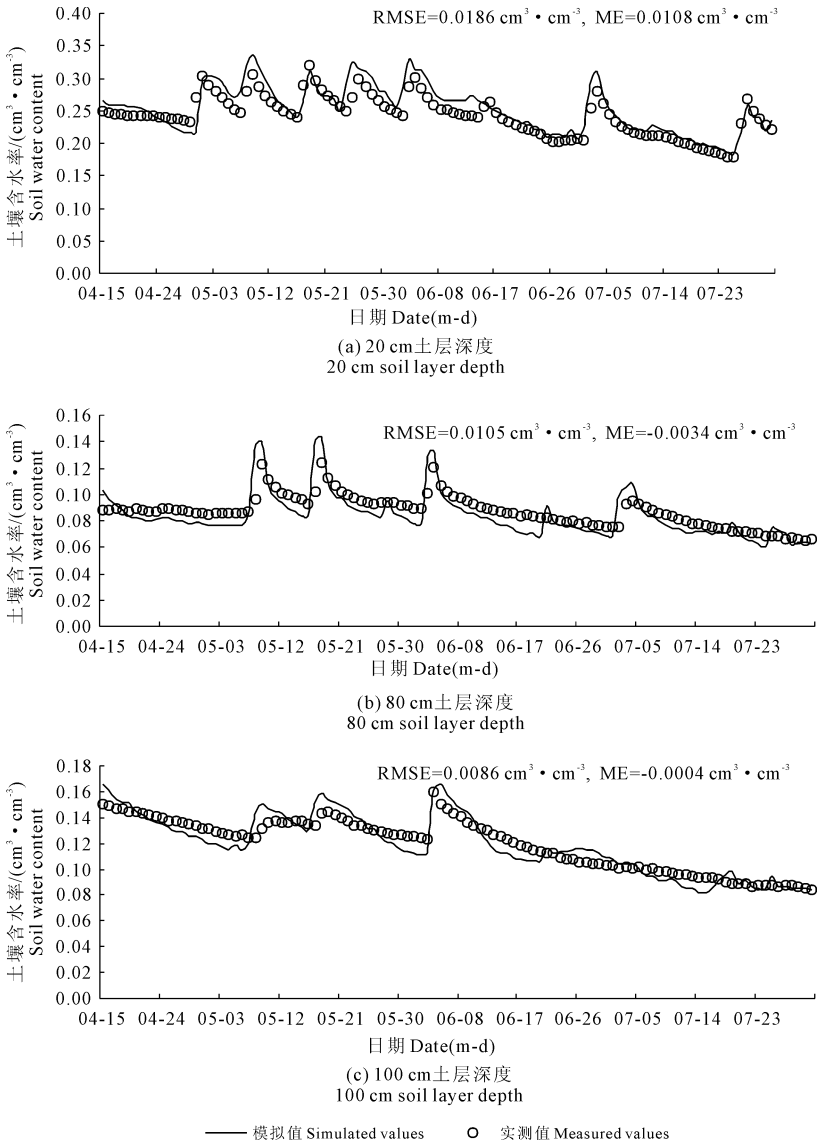

图 3 根区土壤含水量模拟值与实测值比较

Fig.3 Comparison between simulated and measured values of soil moisture in root zone

3.3 根系对土壤含水量的影响

分析核桃根系存在条件下与不存在条件下土壤水分动态变化值,进行样本数据统计分析,其结果如表 2 所示。随着观测土层的不断增大,各土层平均土壤含水率大致呈现减小趋势。对比有根与无根下土壤体积含水率,可以看出在观测时间段内,有根情况下土壤含水率总是小于无根情况。

综合根系土壤含水率变化,由表 3 可知,有根情况下土壤体积含水率与无根情况下土壤体积含水率之间,配对变量呈现出极显著正相关关系。对比 6 组观测土层,经两样本的配对差均值比较与 T 统计量值分析,最终得到对应的概率 P 值为 0.000,均小于 0.05,故认为核桃根系存在会对土壤体积含水率产生影响,有根与无根条件下的土壤体积含水率存在显著性差异。

3.4 灌后土壤剖面含水量分布模拟

针对一次灌水,使用 HYDRUS – 2D 模拟灌后一周土层剖面含水量分布,其结果如图 4 所示。从图 4a 可以看出,在灌水后当日,水流已下渗至垂直土层 65 cm 处,湿润范围已合理作用于吸水根系密集区域。之后,随着灌后时间的增长,以滴头为中心的周边土壤体积含水率不断减小,滴头下土壤含水量由最初的 0.368 $cm^3 \cdot cm^{-3}$减至灌后 6 d 的 0.309 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,最后改变为灌后 7 d 的 0.280 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。总体来看,6 d 后各土层土壤体积含水率数值下降较为显著,且此时土层土壤体积含水率接近灌水下限值,说明在核桃树生育前期,一般情况下 6 d(或 7 d)需进行灌水以满足核桃树生长的需要。

表 2　根系样本统计量分析

Table 2　Statistics analysis for root samples

土层深度 Soil layer depth /cm	根系分布 Root distribution	土壤含水率 Soil water content /($cm^3 \cdot cm^{-3}$)	标准差 Standard deviation	标准误 Standard error
0 ~ 20	有根情况	0.305	0.022	0.005
	无根情况	0.314	0.187	0.005
20 ~ 40	有根情况	0.312	0.020	0.005
	无根情况	0.321	0.018	0.004
40 ~ 60	有根情况	0.165	0.046	0.011
	无根情况	0.178	0.044	0.011
60 ~ 80	有根情况	0.096	0.035	0.009
	无根情况	0.105	0.037	0.009
80 ~ 100	有根情况	0.101	0.033	0.008
	无根情况	0.110	0.034	0.008
100 ~ 120	有根情况	0.106	0.037	0.009
	无根情况	0.115	0.036	0.009

表 3　根系样本两配对 T 检验

Table 3　Paried samples test for root system

土层深度 Soil layer depth/cm	r	配对差均值 Paired difference mean	T 统计量 T statistics	P
0 ~ 20	0.972	-0.008	-5.906	0.000
20 ~ 40	0.952	-0.009	-6.138	0.000
40 ~ 60	0.984	-0.014	-6.797	0.000
60 ~ 80	0.984	-0.008	-5.393	0.000
80 ~ 100	0.982	-0.009	-5.552	0.000
100 ~ 120	0.984	-0.009	-5.565	0.000

4　结论与讨论

根系是植物连接土壤与大气的通道,在 SPAC 系统的水分传输中,根系的作用不容忽视。根系系统的根系吸水及根系的空间分布,在很大程度上支配着水流进入大气环境或深入地下等活动[17]。而实际中,根系吸水分布不仅会受到根系密度分布的

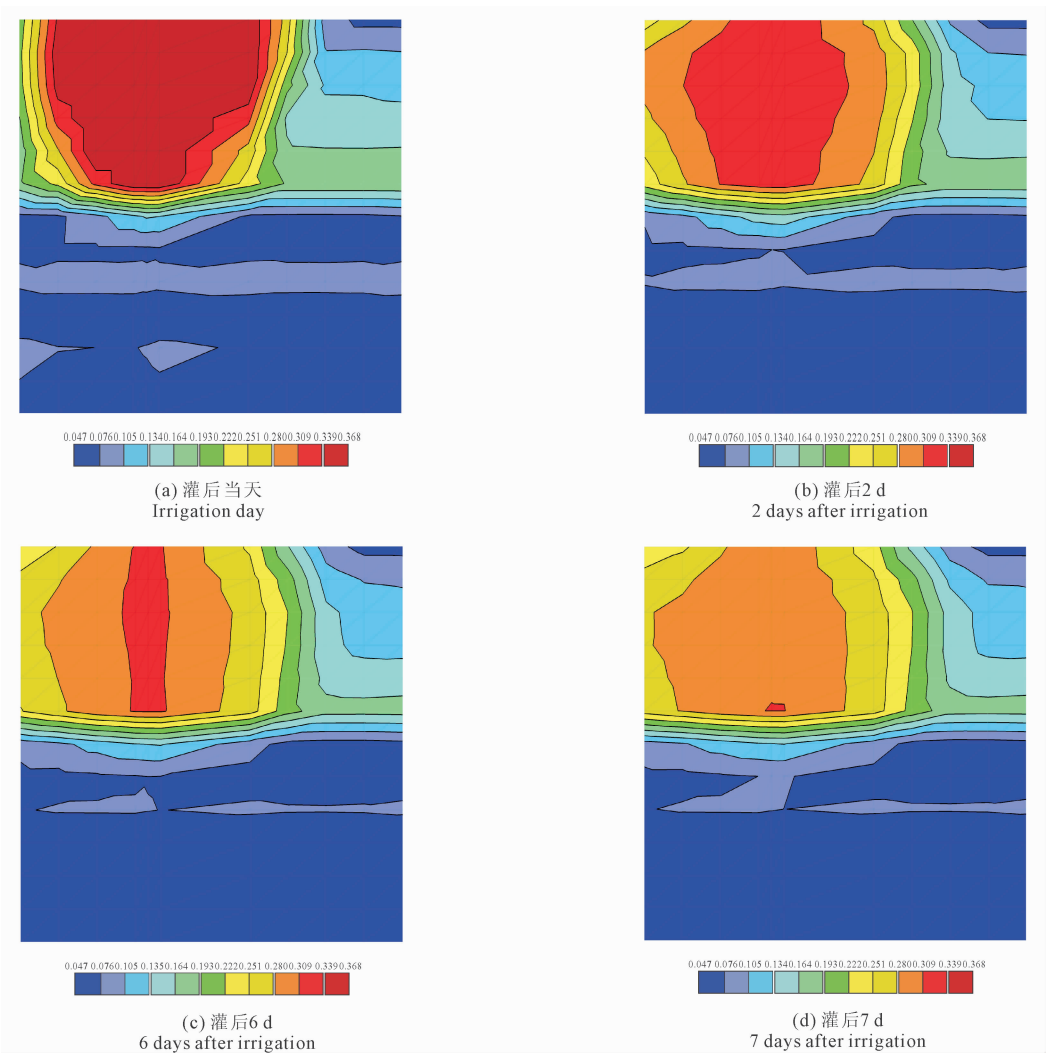

图 4　灌水后土层剖面含水率变化

Fig.4　The changes of water content in soil profile after irrigation

影响,也会受到可利用土壤水及土壤盐分的实时作用[18]。所以,本试验重点探讨了核桃根系对土壤水分的影响。

结合大田试验的分层分段挖掘法与室内试验的扫描分析,结果发现,在垂直二维根长密度分布中,距树水平 0~30 cm、垂直 40~60 cm 范围吸水根系分布最多,根长密度最大,最大根长密度可达到 1 618.216 $m \cdot m^{-3}$,说明此区域是灌水、施肥等田间管理的重点管理对象。而就根系而言,土层深度对根系生长的影响要大于水平距离,最终,土层深度与水平距离共同正影响根长密度剖面分布。

试验研究中,数值模拟被首次应用于田间灌水管理。相对于其它试验方法来讲,数值模拟具有快速、准确、便捷等优点,是研究大田试验最有效的手段之一。所以在核桃重点生育期,辅助一些试验设备,我们将田间实测数据与 HYDRUS - 2D 模拟数据进行对比分析,结果发现实测值与模拟值拟合度较好,可以应用 HYDRUS - 2D 模型进行实际理论研究。

为探讨核桃根系对土壤含水量变化的影响,应用模型模拟根系存在对土壤含水量的影响,结果发现有根条件下的土壤含水率值相对较低,且有根条件下土壤体积含水率与无根条件下土壤含水量存在显著性差异。经研究发现,灌水后 6d 土壤 2D 剖面体积含水率变化较大,各土层含水率含量逼近灌水下限,所以在一般情况下,核桃生育前期灌水周期应设定为 6 d 或 7 d。

核桃是新疆阿克苏地区的重要经济果树,在该种植园区,通过试验研究核桃根系的分布特征,使用 HYDRUS 软件数值模拟土壤水量变化,这对于进一步调控水肥施用、优化全生育期灌溉制度起到支撑作用。

参 考 文 献:

[1] 潘瑞炽.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,2012:17.

[2] Vrugt J A, Hopmans J W, šimunek J. Calibration of a two-dimensional root water uptake model[J]. Soil Science Society of America,2001,65(4):1027-1037.

[3] 张喜英.作物根系与土壤水利用[M].北京:气象出版社,1999:1-186.

[4] 杨胜利,刘洪禄,郝仲勇,等.畦灌条件下樱桃树根系的空间分布特征[J].农业工程学报,2009,25(S1):34-38.

[5] Selim T, Bouksila F, Berndtsson R, et al. Soil water and salinity distribution under different treatment of drip irrigation[J]. Soil Science Society of America,2013,77(4):1144-1156.

[6] Simunek J, Genuchten M T J, šejna M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes [J]. Vadose Zone Journal,2008,7(2):587-600.

[7] El-Nesr M N, Alazba A A, šimunek J. HYDRUS simulation of the effects of dual-drip subsurface irrigation and a physical barrier on water movement and solute transport in soil[J]. Irrigation Science,2014,32(2):111-125.

[8] Deb S K, Shukla M K, šimunek J, et al. Evaluation of spatial and temporal root water uptake patterens of a flood-irrigation pecan tree using the HYDRUS (2D/3D) model [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2013,139(8):599-611.

[9] Shouse P J, Ayars J E, šimunek J. Simulating root water uptake from a shallow saline groundwater resource[J]. Agricultural Water Management,2011,98(5):784-790.

[10] Skagges T H, Trout T J, šimunek J, et al. Comparison of HYDRUS - 2D simulations of drip irrigation with experimental observations[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2013,130(4):304-310.

[11] Elmaloglou S, Malamos N. Estimation of the wetted soil volume depth, under a surface trickle line source,considering evaporation and water extraction by roots[J]. Irrigation of Drainage,2005,54(4):417-430.

[12] Kool D, Ben-Gal A, Agam N, et al. Spatial and diurnal below canopy evaporation in a desert vineyard: measurements and modeling [J]. Water Resources Research,2014,50(8):7035-7049.

[13] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of filed water use and crop yield[M]. Wiley,New York,1978.

[14] šimunek J, Sejna M, van Genuchten. The HYDRUS software package for simulating two-and three-dimensional movement of water,heat,and mul-tiple solutes in variably-saturated media[C]. California: International Ground Water Modeling Center,2006.

[15] 席本野,贾黎明,王 烨,等.地下滴管条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟[J].应用生态学报,2011,22(1):21-28.

[16] Shen J, Batchelor W D, Jones J W, et al. Incorporation of a subsurface tile drainage component into a soybean growth model[J]. Transactions of the Asae,1998,41(5):1305-1313.

[17] Canadell J, Jackson R B, Ehleringer J B, et al. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale[J]. Oecologia,1996,108(4):583-595.

[18] Vrugt J A, Wijk M T, Hopmans J W, et al. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling[J]. Water Resources Research,2013,37(10):2457-2470.