

滴灌条件下成龄核桃根系空间分布特征和模型研究

焦萍, 虎胆·吐马尔白, 米力夏提·米那多拉

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:以阿克苏地区进行地表滴灌的成龄核桃树为研究对象,基于 Hydrus 1D 软件进行地表滴灌条件下的 4 种一维根系密度分布函数(实测根系数据模型、指数分布模型、线性分布模型和分段分布模型)进行土壤水分数值模拟研究。结果表明:根系行方向浅层(0~40 cm 土层)、中层(50~80 cm 土层)、深层(>90 cm)分布差异性极显著($P < 0.01$),株方向差异性显著($P < 0.05$)。滴灌条件下,核桃树根系分布主要位于浅层土壤区(0~40 cm),是根系主要吸水部位,占比 65%~73%。指数分布模型、线性分布模型和分段分布模型精度均较高,误差在 4% 范围内;在根系数据缺失条件下,推荐使用线性分布函数和分段分布函数来模拟根系分布。

关键词:滴灌;核桃树;根系分布;数值模拟;模型构建

中图分类号:S664.1;S275.6 **文献标志码:**A

Study on the spatial distribution characteristics and models of the roots of mature walnut under drip irrigation

JIAO Ping, Hudan · Tumarbai, Milixiati · Minadola

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: Based on the Hydrus 1D software, four kinds of one-dimensional root density distribution functions (measured root data model, exponential distribution model, linear distribution model, and subsection distribution model) under the condition of surface drip irrigation were carried out for numerical simulation of soil moisture. The results showed that there were significant differences of the row direction in the distribution of roots in shallow (0~40 cm), middle (50~80 cm), deep (>90 cm) ($P < 0.01$), and plant direction ($P < 0.05$). Under the condition of drip irrigation, the root system of walnut was mainly located in the shallow soil layer (0~40 cm), which was the main part of water absorption, accounting for 65%~73%. The accuracy of exponential distribution model, linear distribution model, and segmented distribution model were all high, and the error was within 4%. Because of the difficulty of model parameter measurement, it was recommended to use linear distribution function and segmented distribution function to simulate root distribution under the condition of lack of root data.

Keywords: drip irrigation; walnut tree; root distribution; numerical simulation; model construction

作物根系吸水是 SPAC 水分传输系统中的一个重要部分,也是作物根区土壤水分动态模拟的必要数据^[1]。根的存在影响了被植被覆盖的上层土壤水分含量的时空分布^[2],作物和覆盖植被的根系研究^[3-6]对土壤水分的运移及生产实践均具有重要的

意义^[7]。国内树木根系研究虽起步较晚,但发展迅速,例如康绍忠等^[8]对苹果树根系研究方法做了研究,卫新东^[9]、田盼盼等^[10]分别对黄土丘陵和干旱区的红枣根系分布与土壤水分关系进行了研究,苏李君^[11]、周青云等^[12]对极端干旱区和分根交替灌

收稿日期:2019-10-09

修回日期:2020-08-19

基金项目:国家重点实验室资助项目(2018nkms02);塔里木河流域阿克苏管理局资助项目(TGJAKSSKS2019001);河海大学国家重点实验室基金(2016490511);国家自然科学基金(51469033)

作者简介:焦萍(1995-),女,硕士研究生,甘肃金塔人,研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail:1445263909@qq.com

通信作者:虎胆·吐马尔白(1961-),男(哈萨克族),新疆温泉人,教授,博士生导师,主要从事土壤水盐运移理论及节水灌溉技术研究。E-mail:hudant@hotmail.com

溉下的葡萄根系分布进行了数值模拟,而李建林、冯起等^[13-14]针对极端干旱区的胡杨进行了类似的研究。根系吸水函数有微观根系吸水模型和宏观根系吸水模型两种,但大部分吸水模型都是以 Feddes^[15]模型为基础发展而来的。根系密度函数可以通过实测得出,也可通过经验根系密度函数来得到根系密度分布模型。一般常用的经验根系密度分布有指数分布、线性分布以及分段函数分布^[7,11]等形式。因作物根系吸水的重要性,作物根系的空间分布和根系吸水模型的构建一直是研究热点。因此本文通过研究核桃一维根系空间分布和利用 Hydrus 1D 软件模拟经验根系分布函数与实测根系数据模拟得到的模型来模拟核桃土壤水分剖面数据,为干旱地区成龄核桃园土壤水分动态模拟和缺

乏实测根系数据时根系分布函数的建立提供研究依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于新疆阿克苏地区红旗坡农场(80°20'E,41°16'N)。该地属典型的暖温带干旱性气候,海拔 1 130 m。多年平均太阳总辐射量 544.115~590.156 kJ·cm⁻²,多年平均日照时数 2 855~2 967 h,无霜期达 205~219 d,多年平均降水量 42.4~94.4 mm,年有效积温为 3 950℃。试验区面积为 0.106 hm²,地下水埋深在 6 m 以下,水质符合灌溉水质标准。试验地土壤物理性质见表 1,土壤类型为粉砂壤土。

表 1 试验地土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties in test sites

土层深度/cm Depth of soil layer	颗粒组成 Particle composition/%			$\theta_r/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\theta_s/(cm^3 \cdot cm^{-3})$	$\alpha/(cm^{-1})$	n	$K_s/(cm \cdot d^{-1})$
	<0.002 mm	0.002~0.050 mm	0.050~2.000 mm					
0~20	7.0	56.5	36.5	0.0408	0.4204	0.0055	1.6493	58.50
20~40	7.2	67.9	24.9	0.0462	0.4459	0.0044	1.7220	51.43
40~60	7.3	55.5	37.2	0.0363	0.3898	0.0449	1.7996	59.60
60~80	7.4	63.5	29.1	0.0495	0.3791	0.0355	1.6891	56.58
80~100	7.1	58.5	34.4	0.0429	0.3868	0.0407	1.6085	53.70

注: θ_r 为土壤残余含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$); θ_s 为土壤的饱和含水率($cm^3 \cdot cm^{-3}$); α 、 n 为经验参数; K_s 为土壤的饱和导水率($cm \cdot d^{-1}$)。

Note: θ_r is the residual water content ($cm^3 \cdot cm^{-3}$), θ_s is the saturated water content ($cm^3 \cdot cm^{-3}$), α and n are empirical parameters, K_s is the saturated hydraulic conductivity ($cm \cdot d^{-1}$).

1.2 试验设计

试验于 2019 年 3 月 20 日—2019 年 8 月 25 日在试验基地核桃园内进行。试验采用 2005 年所建的无底自由排水边界测坑(测坑内土体为原状土),研究核桃在地表滴灌条件下根系生长分布状态和土壤水分剖面变化。研究对象选用成龄“温 185”核桃,株行距为 2 m×3 m,宽窄行密植。采用滴头流量为 3.2 L·h⁻¹进行地表滴灌,滴灌带布置方式为一行两管模式,滴灌带距树 40 cm 布设。成龄核桃灌溉制度见表 2。

1.3 测定项目

1.3.1 土壤含水率和棵间蒸发 试验采用剖面土壤水分传感器(TRIME-PICO-IPH,IMKO Inc.,Germany)测定土壤水分数据。以树干地面交点为圆心,垂直方向每 10 cm 一个监测点,测定深度 100 cm。水平方向每 40 cm 一个监测点,行方向测定长度 150 cm,株方向测定长度 100 cm。采用精度为 0.01 g 的天平称重方法测定棵间蒸发量。监测时间段为 2019 年 7 月 25 日—8 月 8 日,测定时间每天 10:00。TRIME 测定管布置见图 1。

表 2 核桃灌溉制度表

Table 2 Walnut irrigation schedule

生育期 Growth period	灌水日期 Irrigation date (m-d)	灌水定额 Irrigation quota /(m ³ ·hm ⁻²)	次数 Frequency
萌芽期 Adorable period	04-05	900	1
开花结果期 Flowering and fruiting period	04-03	450	1
果实膨大期 Fruit expanding period	05-14,05-25	450	2
硬核期 Hard core stage	06-04,06-18, 06-28	450	3
油脂转化期 Oil conversion period	07-25,08-08	450	2
成熟期 Mature period	不灌水 No irrigation	0	0
休眠期 Dormancy period	11-01	1200	1
合计 Total		5700	10

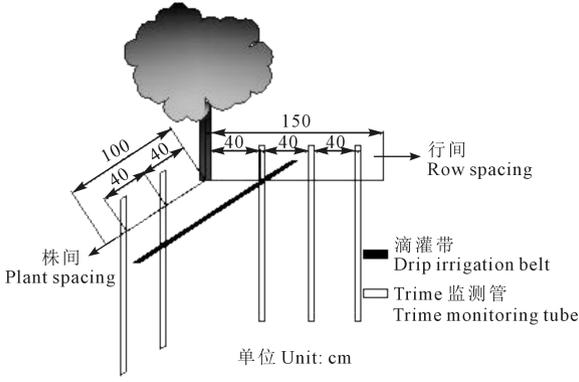


图 1 剖面土壤水分测定管布置图

Fig.1 Layout of soil moisture measuring pipe in profile

1.3.2 叶面积指数 LAI 采用 Hemiview 冠层分析系统每月对核桃树定期监测。

1.3.3 根系取样 于 2019 年 6 月 7 日采用分段分层掘进法取根系样本。本研究中成龄核桃种植密度大,因此根系取样时在株行间均取样。以地表面为基准面,基准面下每 10 cm 为一层,取至 100 cm。两行间以行交界面上边缘为起止点,每 30 cm 为一取样单元,取至 150 cm;两株间以中点为起止点,每 20 cm 为一取样单元,取至 100 cm。因果树主要依靠细根 (<2 mm) 吸收土壤水分,只需要用水冲洗挑出 <2 mm 的细根。将挑选出的每层土壤根系平铺于有机玻璃水槽内,采用扫描仪扫描图像并利用 Delta-T scan 软件进行分析,得到根长、直径及根表面积等参数,选取细根总根重和总根长数据作为根系分析参数。

1.3.4 气象数据 气象数据根据微型气象站 (Watchdog 2900 ET, Spectrum Technologies Inc., USA) 同步测定。数据每 30 min 记录 1 次,利用自带软件 (HOBO, Spectrum Technologies Inc., USA) 下载数据。测定项目包括太阳辐射 (Solar radiation)、气温 (Temperature)、相对湿度 (Relative humidity)、风速 (Wind speed) 及降雨量 (Rainfall) 等。

2 模型构建

模拟模型包括 3 个子模型:土壤水分动力学模型、根系吸水模型和蒸腾蒸发模型。这 3 个子模型互相耦合共同作用。

2.1 土壤水分动力学模型

Hydrus 1D 模型模拟选用“水分运移”和“根系吸水”两个模块,其中土壤水分运动方程由 Richards 方程^[16-17]确定:

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

式中, z 为垂向坐标 (cm); t 为时间 (h); θ 为土壤体积含水率 (%); $D(\theta)$ 为土壤水分运动扩散率 ($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$); $K(\theta)$ 为非饱和土壤导水率 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); S 为根系吸水汇源项 (h^{-1}), 代表单位时间内根系从单位体积土壤中吸收的水量。

土壤水分动力学参数采用 VG 模型^[18-19] 表示为:

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

$$K(h) = \begin{cases} K_s S_e^{1/2} (1 - S_e^{1/m})^2 & (h < 0) \\ K_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

$$S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (4)$$

式中, θ_r 、 θ_s 为土壤残余含水率和饱和含水率 ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); K_s 为土壤饱和导水率 ($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$); α 、 n 、 m 为经验参数, $m = 1 - 1/n$ 。

土壤水分运动方程的初始条件为:

$$\theta_j(z, 0) = \theta_{0j}, 0 \leq z \leq 100; j = 1, \dots, 10 \quad (5)$$

式中, j 为土壤的层次; θ_{0j} 为第 j 层土壤初始含水率 (%); θ_{0j} 为 θ_j 的初始值。

边界条件设定为:无灌水时,上边界为大气边界。土壤水分运动主要取决于降水或地面蒸发,为第一、二、三类边界(分别为:变量已知边界、水流通量已知边界和水流通量随边界变量的变化),随着时间变化,可在各类边界之间相互转化。模拟计算区域的下边界处,考虑地下水埋深大于 6 m 的情况,假定为自由排水边界条件。

上边界条件:

$$-D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} + K(\theta) = \begin{cases} -E(t) \\ Q(t) \end{cases} \quad z = 0, t \geq 0 \quad (6)$$

下边界条件:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = 0, z = 100, t \geq 0 \quad (7)$$

式中, $E(t)$ 、 $Q(t)$ 分别为蒸发和入渗强度 ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

2.2 根系吸水模型

2.2.1 作物根系吸水模型 Hydrus-1D 模型模拟选择 Feddes 模型^[15]。此模型输入参数较少,因此式 (1) 中的 $S(z, t)$ 采用 Feddes 提出的根系吸水模型:

$$S(z, t) = \alpha(h) b(z) T_p \quad (8)$$

式中, $S(z, t)$ 为潜在根系吸水速率 (h^{-1}); $\alpha(h)$ 为土壤水势指定相应函数 ($0 \leq \alpha \leq 1$); $b(z)$ 为根长密度分布函数; T_p 为潜在蒸腾强度 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

2.2.2 根长分布函数 $b(z)$ 根长分布对根区土壤

水分运移影响至关重要,能否精确模拟核桃树根区土壤水分运移,根长分布函数的建立是一个重要环节。目前,较为常见的经验根系密度分布函数有指数分布函数、线性分布函数和分段分布函数^[7,11]。

(1) 指数根系分布函数满足指数函数关系,土壤表层的根系分布最高, $b(z)$ 表示为:

$$b(z) = \alpha e^{-\alpha z} \quad (9)$$

式中, α 为指数根系分布函数的经验参数。

(2) 线性根系分布函数主要研究的是湿润条件下的根系分布特征,提出根系吸水主要发生于土壤上层,因此将根系密度分布函数用线性分布函数表示:

$$b(z) = \frac{2}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right) \quad (10)$$

式中, L 为根系分布最大深度(cm)。

(3) 分段根系分布函数假定在 0.2 L 范围内有根系分布的骤减规律,与线性分布函数相反。 $b(z)$ 表示为:

$$b(z) = \begin{cases} \frac{1.66667}{L}, z \leq 0.2L \\ \frac{2.08333}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right), 0.2L < z \leq L \\ 0, z > L \end{cases} \quad (11)$$

式中, L 为根系分布最大深度(cm)。

2.3 蒸腾蒸发模型

采用 Penman - Monteith 公式计算参考作物蒸发蒸腾量^[20],公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (12)$$

式中, ET_0 为参考作物腾发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为作物表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); T 为平均空气温度($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 m 高度风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); $(e_a - e_d)$ 为水汽压差(kPa); Δ 为水汽压 - 温度关系曲线的斜率($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数($\text{kPa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$);900 为转换系数。

利用单作物系数方法计算作物潜在腾发量,公式如下:

$$ET_c = k_c ET_0 \quad (13)$$

式中, ET_c 为作物潜在腾发量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); k_c 为实际作物系数,根据文献^[21]确定。

将 ET_c 分为作物潜在蒸腾 \bar{T}_p 和土壤潜在蒸发 E_p ,即

$$ET_c = \bar{T}_p + E_p = ET_c(1 - e^{-0.6LAI}) + ET_c e^{-0.6LAI} \quad (14)$$

式中, LAI 为叶面积指数。

3 结果与分析

3.1 行方向和株方向根系密度分布特征

通过对行方向和株方向的根长密度做单一样本 t 检验(表 3)发现,浅、中、深 3 个土层根长密度差异显著,置信度在 95%。说明对核桃根系分区是合理且可行的,具体为浅层根系区(0~40 cm)、中层根系区(50~80 cm)、深层根系区(>90 cm)。

表 3 各土层根长密度方差分析

Table 3 Variance analysis of root length and density in different soil layers

方向 Direction	土层/cm Layer	F 值 F value	显著度 Saliency
行方向 Row direction	0~40(浅层 Shallow layer)	4.777	0.009**
	50~80(中层 Middle level)	7.404	0.002**
	>90(深层 Deep level)	5.530	0.005**
株方向 Plant direction	0~40(浅层 Shallow layer)	4.924	0.008**
	50~80(中层 Middle level)	9.272	0.001**
	>90(深层 Deep level)	4.383	0.012*

注: * 为差异显著($P < 0.05$), ** 为差异极显著($P < 0.01$)。

Note: * indicates the difference was significant ($P < 0.05$), and ** indicates the difference was extremely significant ($P < 0.01$).

将试验实测得到的行方向和株方向的核桃吸水根系分别在垂直方向和水平方向上取平均值,得到图 2。由图 2a 和 2b 可知,垂直方向上可将核桃吸水根系分为 3 个部分,即浅层根系(0~40 cm)、中层根系(50~80 cm)、深层根系(>90 cm);行方向分别占比 65%、31%、4%,株方向分别占比 73%、22%、5%。结合图 3 浅、中、深土层土壤含水率动态图可得到,浅层土壤受灌溉影响明显,在灌水后(7 月 25 日)浅层土壤含水率迅速得到补充,而灌水对中层和深层土壤水分补偿不明显。在灌水后第 7 天(7 月 31 日)开始核桃根系受水分胁迫,因其浅层根系根长密度分布较大的原因,此时也主要依靠浅层根系对果树供水,因此浅层土壤水分较中深层有降低趋势。说明在滴灌条件下核桃树深层根系不发达,整个生育期内的果树蒸腾量主要依靠浅层土壤储水量及浅层根系的吸水生理活动;其根系吸水是较为简单的主要受根长密度影响的吸水活动。由图 2c 和 2d 可知,核桃根系行方向与株方向水平分布均呈现先增大后减小的“单峰”趋势。对比垂向分布和水平分布根长密度平均值发现,行方向根长密度均大于株方向根长密度。

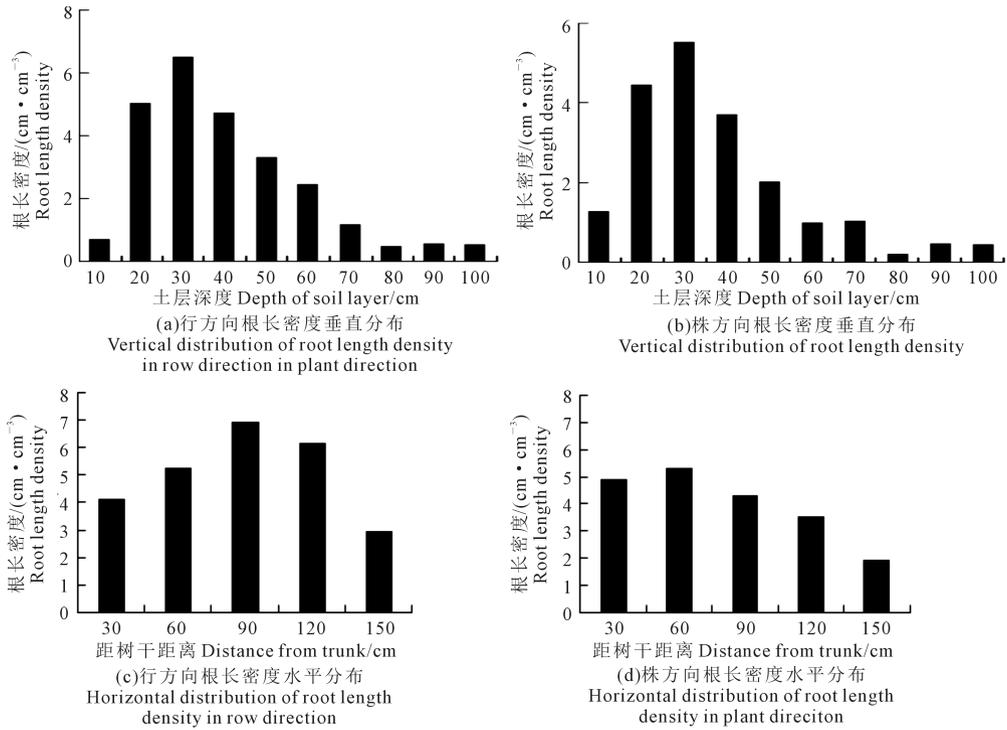


图 2 一维根长密度分布图

Fig.2 One-dimensional root length density distribution

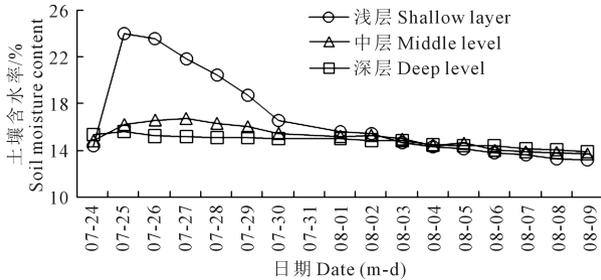


Fig.3 Dynamics of soil water content in shallow, middle, and deep soil layers

3.2 一维根长分布函数

根据植物根系剖面分布状态,目前相对根长分布函数 $b(z)$ 较为常用的有指数关系函数、线性分布函数和分段分布函数^[7,11]。通过计算得到核桃行方向和株方向指数关系函数因其表层根长比例不同分别为 $b(z) = 0.0283e^{-0.0283z}$ 、 $b(z) = 0.0431e^{-0.0431z}$ 。线性分布函数因其根系分布最大深度相同均为 $b(z) = 0.02(1 - 0.01z)$ 。而宽窄行分段分布函数也相同,当 $z \leq 0.2L$ 时, $b(z) = 0.0166667$; 当 $0.2L \leq z \leq L$ 时, $b(z) = 0.020833(1 - 0.01z)$; 当 $z > L$ 时, $b(z) = 0$ 。根系分布实测数据为离散数据,无连续性,根据表 4 将根系实测根长归一化处理得到实测根长分布函数为 $b(z) = 0.02131 - 0.00021z$ 。从图 4 可以得到,实测数据拟合函数与线性函数分布、分段函数分布相近,而与指数函数分布相差较大。因此在根系数

表 4 每 20 cm 根长分布比例

Table 4 Ratio of root length distribution per 20 cm

方向 Direction	土层深度/cm Depth of soil layer	根长/cm Root length	分布比例/% Distribution ratio	分布比例累计值 Cumulative value of distribution proportion
行方向 Row direction	0~20	52612.12	0.22	0.22
	20~40	101302.26	0.43	0.65
	40~60	55413.71	0.24	0.89
	60~80	16879.10	0.07	0.86
	80~100	10210.20	0.04	1.00
株方向 Plant direction	0~20	40348.26	0.34	0.34
	20~40	45464.00	0.39	0.73
	40~60	18136.91	0.15	0.88
	60~80	7610.09	0.07	0.95
	80~100	5657.08	0.05	1.00

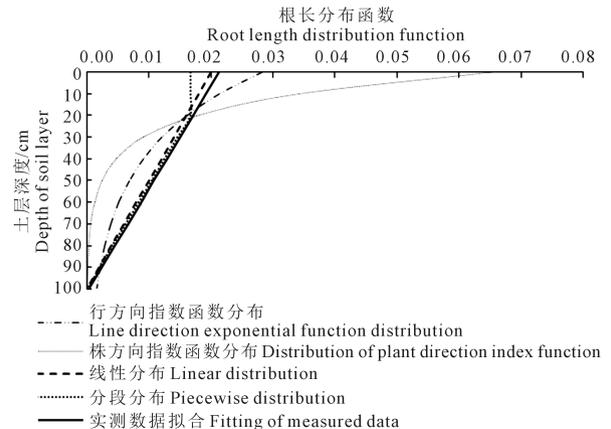


Fig.4 Comparison of root length distribution functions

据缺失的情况下,利用线性根系密度分布函数和分段根系密度分布函数来模拟核桃根系分布是可行并且合理的。

3.3 一维根长分布函数适用性评价

将实测数据模拟模型、指数分布模型、线性分布模型、分段分布模型分别应用于 Hydrus-1D 软件自带的 Feddes 根系吸水模型,对土壤水分进行数值模拟,模拟时间为灌后 15 d。图 5 为不同根长密度

分布函数条件下土壤含水率模拟值与实测值比较结果。通过 15 d 剖面土壤水分误差分析(表 5)可以得到,实测数据模拟模型、指数分布模型、线性分布模型、分段分布模型整个模拟时段内的相对误差和均方根误差均在 4% 范围内,均可以较好地模拟剖面土壤水分。通过误差平均值的比较,发现线性函数和分段分布函数平均误差较小,对于滴灌条件下的核桃根系吸水适用性更好。

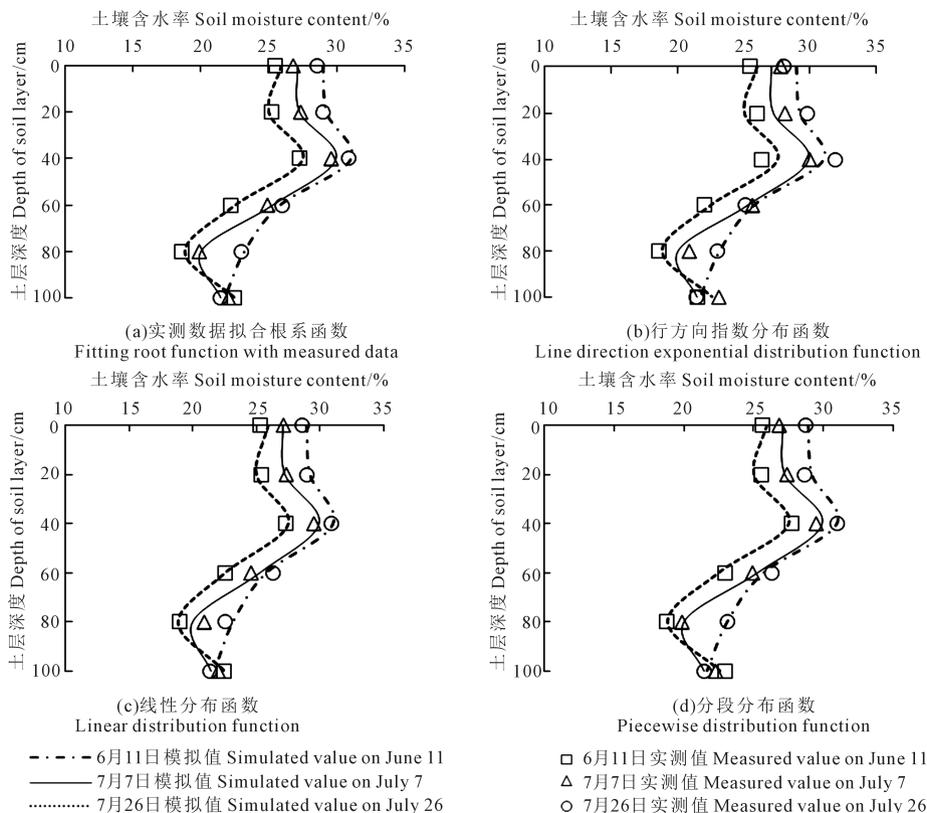


图 5 土壤水分模拟值与实测值比较

Fig.5 Comparison of simulated and measured values of soil moisture

表 5 根长分布函数土壤水分模拟值和实测值误差分析

Table 5 Error analysis of soil moisture simulated value and measured value with root length distribution functions

灌水后天数 Days after irrigation	实测模拟分布 Measured simulated distribution		指数分布 Exponential distribution		线性分布 Linear distribution		分段函数分布 Piecewise function distribution	
	δ	RMSE	δ	RMSE	δ	RMSE	δ	RMSE
1	0.57	0.11	0.71	0.14	0.70	0.14	0.70	0.14
2	3.53	0.60	3.28	0.56	3.34	0.57	3.34	0.57
3	2.28	0.35	0.17	0.03	0.15	0.02	3.63	0.55
4	0.85	0.12	1.26	0.18	0.56	0.08	2.46	0.35
5	2.58	0.34	3.52	0.46	0.47	0.06	0.60	0.08
6	1.00	0.12	1.85	0.22	1.85	0.22	1.85	0.22
7	3.56	0.42	0.94	0.11	0.44	0.05	0.31	0.04
8	2.68	0.27	1.89	0.21	1.17	0.13	1.17	0.13
9	3.98	0.39	0.06	0.01	0.94	0.10	0.94	0.10
10	3.10	0.30	2.57	0.27	1.53	0.16	1.56	0.16
11	2.76	0.28	0.89	0.09	0.29	0.03	0.29	0.03
12	3.83	0.38	1.53	0.15	2.68	0.27	2.66	0.27
13	0.15	0.01	2.64	0.26	3.98	0.39	0.15	0.01
14	2.14	0.21	3.83	0.38	3.10	0.30	2.14	0.21
15	1.94	0.18	1.56	0.15	2.01	0.19	1.94	0.18
平均值 Average value	2.33	0.27	1.78	0.21	1.55	0.18	1.58	0.20

注: δ 为相对误差, RMSE 为均方根误差。

Note: δ is relative error and RMSE is root mean square error.

4 讨 论

根系吸水是农田 SPAC 系统中的重要环节,它是作物连接土壤与大气的重要部分,同时是作物土壤水分运移数值模拟的基础。目前为止,根系吸水模型已广泛应用于大田作物与果树研究中。作物根系分布较浅,分布范围较小,根系取样较为简单,甚至可以做到随生育期实时监测。而对于成龄果树,树体粗壮,根系范围较深较广,根系取样工作较困难,对于根系吸水模型的建立影响较大。因此,寻找适用于成龄核桃树可靠的经验模型可以弥补其不足。

众多研究表明,果树一维根系分布满足随深度增加的递减规律^[11,13]。因此,对较为常用的 3 种经验根系分布函数进行适用性评价研究,如李建林等^[13]、齐丽彬等^[7]和李苏君等^[11]对胡杨、紫花苜蓿和葡萄根系分布研究所得结果较为相似,即线性分布函数、分段分布函数精度更高。所以本文在研究滴灌条件下成龄核桃根系分布函数时,误差在 4% 以内,其中线性分布函数、分段分布函数误差在 2% 以内,说明该分布函数同样满足核桃根系分布规律。在缺乏实测根系数据时,可使用这两种根系分布函数来模拟实际情况。滴灌条件下成龄核桃的根系分布与其他灌溉条件下的果树根系分布有明显不同,尤其是因为滴灌灌溉模式影响,使得根系发育为浅根吸水特征,中深层(>40 cm)根系不发达,这与其他果树根系发育有明显差异。且成龄核桃果树根系分布复杂,二、三维条件下的根系分布函数更能代表实际情况,本文未作研究,希望在后续研究中能完善补充。

5 结 论

本文对滴灌条件下成龄核桃的一维根系空间分布和一维根系土壤水分运移做了数值模拟,得到以下结论:

1) 滴灌条件下,成龄核桃主要靠浅层根系(0~40 cm)吸收水分;核桃根系发育以横向为主,深层(>80 cm)因滴灌灌溉模式的影响根系不发达。行方向与株方向条件下的根长密度分布,趋势大体一致,但株方向的根长密度远低于行方向。说明行、株间距也会影响核桃根系发育,窄行条件会制约根系的发展,适当的增大行、株间距有利于核桃树根系的生长发育。

2) 通过对一维根长指数分布函数、线性分布函数、分段分布函数和由实测数据模拟分布函数的对比发现,这 4 种模型均能较好地模拟剖面土壤水分

的运移,其误差在 4% 范围内。在核桃根系数据缺失的情况下,推荐使用线性分布函数、分段分布函数来模拟核桃根系的分布。因为这两种分布函数模拟结果误差较小且模型参数容易获得。

参 考 文 献:

- [1] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 冬小麦根系吸水模式的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 1992, 20(2): 5-12.
- [2] 王玉阳, 陈亚鹏. 植物根系吸水模型研究进展[J]. 草业学报, 2017, 26(3): 214-225.
- [3] 左强, 孟雷, 王东. 应用实测含水率剖面估算冬小麦相对根长密度分布[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 1-6.
- [4] 白文明, 左强, 李保国. 乌兰布和沙区紫花苜蓿根系吸水模型[J]. 植物生态学报, 2001, 25(4): 431-437.
- [5] 虎胆·马尔白, 王一民, 等. 膜下滴灌棉花根系吸水模型研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 66-70.
- [6] 王允喜, 李明思, 蓝明菊. 膜下滴灌土壤湿润区对田间棉花根系分布及植株生长的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 31-38.
- [7] 齐丽彬, 樊军, 邵明安, 等. 紫花苜蓿不同根系分布模式的土壤水分模拟和验证[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 24-29.
- [8] 姚立民, 康绍忠, 龚道枝. 苹果树根系吸水研究方法的讨论[J]. 水资源与水工程学报, 2004, 15(1): 13-18, 23.
- [9] 卫新东, 汪星, 汪有科, 等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 88-97.
- [10] 田盼盼, 董新光, 姚鹏亮, 等. 干旱区不同灌溉方式下枣树根系分布特性研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1): 102-105.
- [11] 苏李君, 王全九, 白云岗, 等. 极端干旱地区葡萄根系吸水数值模拟[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 88-93.
- [12] 周青云, 王仰仁, 孙书洪. 根系分区交替滴灌条件下葡萄根系分布特征及生长动态[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 59-63, 58.
- [13] 李建林, 冯起, 司建华. 极端干旱区胡杨吸水根系的分布与模拟研究[J]. 干旱区地理, 2008, 31(1): 97-101.
- [14] 冯起, 司建华, 李建林, 等. 胡杨根系分布特征与根系吸水模型建立[J]. 地球科学进展, 2008, 23(7): 765-772.
- [15] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of field water use and crop yield[R]. Wageningen: Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1978.
- [16] Lafolie F, Guennelon R, van Genuchten M T H, et al. Analysis of water flow under irrigation: I. Theory and numerical solution[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53: 1310-1318.
- [17] Elmaloglou S, Malamos N. A method to estimate soil-water movement under a trickle surface line source with water extraction by roots[J]. Irrigation and Drainage, 2003, 52(3): 273-284.
- [18] 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.
- [19] Šimunek J, Šejna M, van Genuchten M T H. IGWMC-TPS 53-251 V.2.0 The HYDRUS-2D software package for simulation two dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably saturated media [S]. Colorado: International Groundwater Modeling Center, Colorado School of Mines, 1999.
- [20] 郭向红, 孙西欢, 马娟娟, 等. 冬小麦不同深度灌水条件下土壤水分运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 237-244, 209.
- [21] 赵经华, 洪明, 马英杰, 等. 不同微灌灌水技术下成龄核桃耗水规律的研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(5): 94-97.