极端干旱地区葡萄根系吸水数值模拟

苏李君[1]，王全九[1※]，白云岗[2]，曾　辰[3]，南庆伟[1]，卢震林[2]

（1. 西安理工大学水利水电学院，西安 710054；　2. 新疆水利水电科学研究院，乌鲁木齐 830049；
3. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室，北京 100085）

摘　要：研究成龄葡萄根系分布与吸水特征及耗水规律，能够为制定成龄葡萄灌溉制度、提出丰产与节水相协调的成龄葡萄田间水分管理模式和创建成龄葡萄水分高效利用技术体系提供技术支撑。该文在分析灌溉条件下葡萄吸水特征的基础上，建立了一维非饱和土壤水分运动的无网格数值模拟模型，并依据实测葡萄根系分布特征，获得了葡萄一维根系分布函数，将其与不同的经验根系分布函数应用于数值模型进行动态模拟。通过模拟值与土壤水分实测值的比较分析，结果表明，不同根系分布模型下土壤水分模拟差别不大，相对误差均在 1%以下，但相对于其他根系分布，指数根系数分布模拟值与实测值的误差较大，因此，认为拟合的根系分布函数和无网格数值模型能很好的模拟极端干旱地区葡萄根系吸水和土壤水分运动，且在缺乏实际根长分布数据的条件下，线性根系分布和分段根系分布都可反映葡萄实际根系分布，为利用简单一维根系分布模型分析不同灌溉条件葡萄吸水特征提供参考。

关键词：数值方法，模型，土壤水分，根系吸水，根系密度分布函数，无网格方法
doi：10.3969/j.issn.1002-6819.2012.06.015
中图分类号：S663.1；S152.7　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1002-6819(2012)-06-0088-06

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.
Su Lijun, Wang Quanjiu, Bai Yungang, et al. Numerical simulation of root water uptake for grape in extremely arid region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 88－93. (in Chinese with English abstract)

0　引　言

吐哈盆地是中国著名葡萄生产基地，也是严重资源性缺水的极端干旱区，年平均降水量仅 16.5 mm，而年平均蒸发能力高达 3 300 mm，目前水资源开发利用程度已达本区占有水资源量的 130%，水资源短缺已成为该区农业及社会经济可持续发展的“瓶颈”，为此，发展葡萄节水灌溉技术成为该地区缓减水资源供需矛盾的主要途径。研究成龄葡萄根系分布与吸水特征及耗水规律，能够为制定极端干旱的吐哈盆地成龄葡萄灌溉制度，提出丰产与节水相协调的成龄葡萄田间水分管理模式和创建成龄葡萄水分高效利用技术体系提供技术支撑。

植物根系吸水特征通常可以利用含水率剖面反求根系吸水速率[1-5]，也可以采用建立根系吸水函数模型直接获得[6-9]。目前，根系吸水函数有微观和宏观两种，但大多根系吸水经验函数都是在 Feddes 等[10]模型的基础上发展而来。一般果树根系密度分布在田间不易测定，可应用经验根系密度函数来反映根系密度分布状态，也可通过土壤水分剖面估算的方法求出根系密度分布[5]。一般常用的经验根系密度分布有指数分布[11]、线性分布[12]以及分段函数分布[13]等形式。由于葡萄根系分布比较复杂，呈现三维分布，如果利用三维分布模型模拟分析土壤水分运动及其分布，会导致根系吸水相关参数难以获得，因此本文将葡萄根系分布概化为一维分布，并建立土壤水分运动模型。本文根据实测出的根系分布、植物蒸散量和土壤水分剖面分布，建立一维葡萄根系吸水模型，采用 Feddes 等[10]根系吸水模型，利用无网格方法模拟土壤水分分布，并利用实测的土壤水分剖面进行验证，探讨根系分布函数模型对葡萄根系吸水的影响，并分析根系分布函数以及经验根系密度分布函数的适用性，为分析葡萄吸水特征提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

该试验基地位于火焰山以南，吐鲁番市东南部的葡萄乡铁提尔村，距吐鲁番市 12 km，地处北纬 42.87°，东经 89.20°，海拔为 32.8 m。年降雨量为 16 mm，年蒸发量为 3 600 mm，全年日照时数为 3200h，10℃以上有效积温为 5 300℃以上，无霜期达为 210 d。试验地种植的葡萄品种为无核白，树龄为 10 a，栽培方式为小棚架栽培，株距为 1.2～1.5 m，定植沟为东西走向。

1.2　试验内容

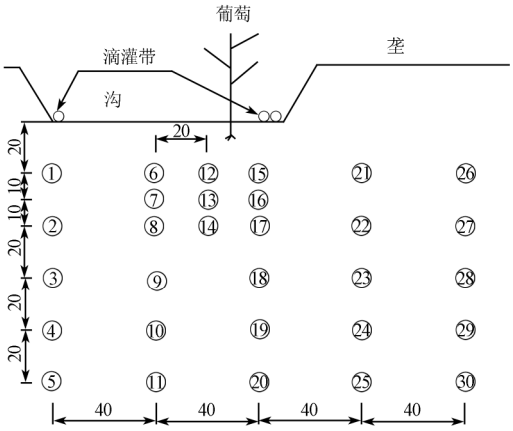
试验在试验基地的葡萄园进行，试验日期为 2010 年 3 月 5 日至 2010 年 6 月 15 日，葡萄行距为 360 m，株距约 1.2～1.5 m。葡萄采用滴灌方法进行灌溉。滴灌系统的毛管采用一沟三管布置，即葡萄栽培沟内葡萄树两侧沿沟垄方向距葡萄主干 40 cm 处布置两条滴灌带，另在架下枝蔓生长方向一侧

收稿日期：2011-07-10　　修订日期：2011-11-21
基金项目：国家支撑计划（2011BAD29B05）
作者简介：苏李君（1986－），男（湖北钟祥人），博士生，从事土壤物理和数值模拟方面的研究。西安　西安理工大学水资源研究所，710048。
Email：sljun11@163.com
※通信作者：王全九（1964－），男，教授，内蒙古丰镇人，教授，博士生导师，主要从事土壤物理与溶质运移研究。西安　西安理工大学水资源研究所，710048。Email：wquanjiu@163.com

沿沟边距葡萄主干 60 cm 处布置一条滴灌带，（见图 1）。滴头流量为 2.7 L/h，灌水定额为 525 m^3/hm^2，灌水时间间隔为 9 d。灌水停止后，每天 20:00 测定一次含水率，降雨天除外，9 d 读取一次气象站数据。

1.3　土壤含水量测定方法

本试验对不同深度和位置的土壤含水率进行动态监测，并将同一深度土壤含水率的平均值作为该深度的实测土壤含水率。土壤含水量采用美国 Campbell Scientific 公司生产的时域反射仪（time domain reflectometry 100），简称 TDR-100 进行测定，其探头为自制的三针式，探针长度 20 cm。TDR 探头的布设以栽培沟底为基准水平面，以沟垄交界面上边缘为起止点，记为基点，植株位于水平 60 cm，沿沟垄方向（水平方向）每 40 cm、垂直方向每 20 cm 布设一个探头，中间水平垂直都加密布设。从基点开始，水平方向上取样长度为 160 cm，垂直方向上取样深度为 100 cm，共布设 6 个点，水平位置分别为 0、40、60、80、120、160 cm，编号分别为 1#、2#、3#、4#、5#、6#。由于根系在 3#点垂直位置上分布较为密集，因此选取 3#点为水平加密点，布设 20，30，40 cm 3 个深度。1#、5#、6#三个点布设 20，40，60，80，100 cm 5 个深度，2#、4#布设 20，30，40，60，80，100 cm 6 个深度，所有探头都采用横插式，具体布设如图 1 所示。



注：1. 图中单位均为 cm；2. 标号 1～5 为 1#点 TDR 探头布设位置；标号 6～11 为 2#点 TDR 探头布设位置；标号 12～14 为 3#点 TDR 探头布设位置；标号 15～20 为 4#点 TDR 探头布设位置；标号 21～25 为 5#点 TDR 探头布设位置；标号 26～30 为 6#点 TDR 探头布设位置。

图 1　TDR 探头布设示意图

Fig.1　Schematic diagram of TDR probe layout

1.4　根长密度分布测定与根系分布特征

由于试验地葡萄树龄为 10 a，因此可以假设葡萄根系不随时间变化而变化，且每株根系分布基本一致。以栽培沟底为基准水平面，基准面下每 20 cm 为一层，深度取至 100 cm；两沟间以沟垄交界面上边缘为起止点，每 30 cm 为一取样单元，共取 360 cm；两株葡萄间以中点为起点，每 30 cm 为一取样单元，共取 120 cm。考虑到大于 2 mm 根的吸水活性不高，葡萄主要依靠小于 2 mm 的细根（也称作吸收根）吸收土壤水分，于是只需要用水冲洗挑出小于 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 ImageJ 软件进行分析，得到根长、根表面积等参数，选取细根总根长作为根系分析参数[14]。

取土测定出葡萄根系在该试验地最大分布深度为 100 cm 及在 360 cm×120 cm 面积上不同深度的根系分布（表 1）。

表 1　每 20 cm 土层根长分布实测值

Table 1　Measured values of root length of every 20 cm soil layer

深度/cm	≤2 mm 细根根长/mm
0～20	13053.18
＞20～40	8792.98
＞40～60	5561.04
＞60～80	2033.42
＞80～100	3414.57

1.5　土壤水力参数确定

利用张力计法对试验地土壤水分特征脱湿曲线进行测定，利用 van Genuchten 模型描述土壤水分特征曲线，具体表达式为[15]

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=\left[\frac{1}{1+(\alpha h)^{n'}}\right]^m$$

式中，参数θ_s为饱和土壤含水率，cm^3/cm^3；θ_r为滞留土壤含水率，cm^3/cm^3；k_s为土壤饱和导水率，cm/d；α是与进气吸力有关的参数，cm^{-1}；n'是形状系数，$m=1-1/n'$。采用 RETC 拟合了 van Genuchten 水分特征曲线参数，同时实际测定土壤饱和导水率，公式中相关参数列在表 2 中。

表 2　试验区土壤水力参数

Table 2　Hydrodynamic parameters of experimental soil

参数	$\theta_s/(cm^3\cdot cm^{-3})$	$\theta_r/(cm^3\cdot cm^{-3})$	$k_s/(cm\cdot d^{-1})$	α/cm^{-1}	n'
数值	0.4	0.09	36	0.054	1.26

注：参数θ_s为饱和土壤含水率，cm^3/cm^3；θ_r为滞留土壤含水率，cm^3/cm^3；k_s为土壤饱和导水率，cm/d；α是与进气吸力有关的参数，1/cm；n'是形状系数。

2　模拟模型

由于葡萄根系分布比较复杂，呈现三维分布，如果采用三维分布模型模拟，会导致根系吸水相关参数难以获得，且湿润体形状近似为矩形，因此本文将葡萄根系分布概化为一维分布，建立土壤水分运动模型，对一维土壤水分运动进行数值模拟，并分析模型的适用性。

2.1　土壤水分运动基本方程

假设土壤为均质、各向同性的刚性多孔介质,不考虑气相及温度对水分运动的影响,将土壤水分运动概化为一维分布，则土壤水分运动可用 Richards 方程来描述，即[15]

$$C(h)\frac{\partial h}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\left[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}\right]-\frac{\partial K(h)}{\partial z}-S(z,t) \qquad (1)$$

式中，z 为垂向距离，规定向下为正，cm；h 为土壤基质势，cm；$C(h)$为比水容量，1/cm；$K(h)$为非饱和土壤的导水率，cm/d；$S(z,t)$为根系吸水项，1/d。

本文以灌水后第一天的土壤含水量剖面作为研究的初始条件，即 t=0 表示灌水后第一天

$$h(z,0)=h_0(z) \qquad t=0 \quad , \quad z\geq 0$$

边界条件仅考虑根系对水分分布的影响，则上下边界条件为下式所示，其中 z_1 为根系最浅分布深度，z_N 为根系最深分布深度

$$h(z_1,t)=h_u(t) \qquad t>0$$
$$h(z_N,t)=h_2(t) \qquad t>0$$

2.2 葡萄根系吸水函数

本文采用 Feddes 等提出的根系吸水模型建立根系吸水项 $S(z,t)$

$$S(z,t) = r(h)b(z)Tp \tag{2}$$

$$r(h)=\begin{cases}\dfrac{h_1-h}{h_1-h_2} & h_2<h\le h_1\\ \dfrac{h-h_4}{h_3-h_4} & h_4\le h\le h_3\\ 1 & h_3\le h\le h_2\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{3}$$

式中，Tp 为植物潜在蒸腾速率，cm/d；$r(h)$为水分胁迫函数；h_1 为根系吸水厌氧点，cm；h_2 为根系吸水最适点开始土壤基质势，cm；h_3 为根系吸水最适点结束土壤基质势，cm；h_4 为根系吸水萎蔫点土壤基质势，cm；$b(z)$为相对根系密度分布函数，cm^{-1}。本文采用 Hydrus-1D 软件[16]提供的成龄葡萄根系吸水参数，h_1=-10 cm，h_2=-25 cm，h_3=-1 000 cm，h_4=-8 000 cm。

2.3 根系密度分布函数

根系密度分布是影响根区土壤水分运动的重要因素，因此，准确描述根系密度分布将决定是否能够更加精确地对土壤水分运动进行数值模拟。目前，国内外学者就根系密度分布函数 $b(z)$提出了多种经验函数，较为常用的有指数分布函数、线性分布函数和分段分布函数。

Raats[11]提出根系密度分布函数满足指数函数关系，并且根系分布在土壤表层为最高，$b(z)$表示为

$$b(z)=ae^{-az} \tag{4}$$

式中，a 为根系指数分布的经验参数。

Prasad[12]通过研究湿润土壤中根系分布，发现根系主要从土壤上层吸收水分，因此将根系密度分布函数描述为线性分布函数

$$b(z)=\frac{2}{L}\left(1-\frac{z}{L}\right) \tag{5}$$

式中，L 为根系分布的最大深度，cm。

Hoffman 和 van Genuchten[13]提出了分段根系密度分布函数

$$b(z)=\begin{cases}\dfrac{1.66667}{L} & z\le 0.2L\\ \dfrac{2.0833}{L}\left(1-\dfrac{z}{L}\right) & 0.2L\le z\le L\\ 0 & z>L\end{cases} \tag{6}$$

2.4 模型求解

本文采用径向基函数配点无网格方法[17-19]结合牛顿迭代法对土壤水分运动方程（1）进行求解，该无网格方法仅需要节点坐标信息，方程离散形式简单，且径向基函数逼近程度高，能满足精度要求。

对 d 维实空间中定义Ω上的任意连续可微函数 $u(x)$，可由径向基函数$\varphi(\|x-x_i\|)$近似表示为[20]

$$u(x)\approx\tilde{u}(x)=\sum_{i=1}^{N}a_i\varphi(\|x-x_i\|)=\sum_{i=1}^{N}a_i\varphi(r_i(x)) \ , \tag{7}$$
$$x\in\Omega\subset R^d \ , \quad r_i(x)=\|x-x_i\|$$

式中，i 为节点序号；N 为节点数；a_i 为待定系数；r_i 为 Euclidian 范数。

在数值计算中，通常采用的径向基函数有：MQ 函数$\varphi(r)=(c^2+r^2)^{1/2}$（$c>0$）、高斯函数$\varphi(r)=\exp(-cr^2)$（$c>0$）和逆 MQ 函数$\varphi(r)=(c^2+r^2)^{-1/2}$（$c>0$）。其中 c 为自由参数，r 为 Euclidian 范数。本文采用高斯函数建立近似函数。

由于式（1）中二阶导项为非线性项，不能直接采用配点法，因此我们先对其做一阶中心差分处理

$$\frac{\partial}{\partial z}[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}]_{z=z_j}\approx\frac{1}{2\Delta z}\left\{[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}]_{z=z_{j+1}}-[K(h)\frac{\partial h}{\partial z}]_{z=z_{j-1}}\right\}=$$
$$\frac{1}{2\Delta z}\left[K(h_{j+1})\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_{z=z_{j+1}}-K(h_{j-1})\left(\frac{\partial h}{\partial z}\right)_{z=z_{j-1}}\right]$$

式中，Δz 为空间步长，当 j=1，N 时，z_j 为边界点；当 j=2，3，…，N-1 时，z_j 为内点。

式（1）的左端项采用向前差分离散，则

$$\left(C(h)\frac{\partial h}{\partial t}\right)_{z=z_j}^{t=t^{n+1}}\approx\left(C(h^{n+1})\frac{h^{n+1}-h^n}{\Delta t}\right)_{z=z_j}=C(h_j^{n+1})\frac{h_j^{n+1}-h_j^n}{\Delta t}$$

其中Δt 为时间步长，t^{n+1} 表示时间为$(n+1)\times\Delta t$，$n\ge 0$。

式（1）的右端第二项采用中心差分离散，则

$$\left(\frac{\partial K(h)}{\partial z}\right)_{z=z_j}^{t=t^{n+1}}\approx\frac{K(h_{j+1}^{n+1})-K(h_{j-1}^{n+1})}{2\Delta z}$$

$h(z,t^n)$ 表示时间为 t^n 时深度 z 处的土壤基质势，其近似值 $\tilde{h}(z,t^n)$ 可采用径向基函数表示为

$$\tilde{h}(z,t^n)=\sum_{j=1}^{N}\alpha_j^n\phi(\|z-z_j\|)=\sum_{j=1}^{N}\alpha_j^n\phi_j(z) \tag{8}$$

式中，当 j=1，N 时，z_j 为边界点；当 j=2，3，…，N-1 时，z_j 为内点。

采用配点法，要求上式在边界点处满足边界条件，在域内满足微分方程，有

$$\begin{cases}\displaystyle\sum_{j=1}^{N}\alpha_j^{n+1}\left(C(h_i^{n+1})\phi_j(x_i)-\frac{\Delta t}{2\Delta z}\left(K(h_{i+1}^{n+1})\left(\frac{d\phi_j(z)}{dz}\right)_{z=z_{i+1}}-K(h_{i-1}^{n+1})\left(\frac{d\phi_j(z)}{dz}\right)_{z=z_{i-1}}\right)\right)=C(h_i^{n+1})h_i^n+\frac{K(h_{i+1}^{n+1})-K(h_{i-1}^{n+1})}{2\Delta z}, \\ \qquad\qquad i=2,3,\cdots,N-1,\quad n=0,1,2,\cdots, \\ h_i^0=h_0, \qquad\qquad i=2,3,\cdots,N-1, \\ \displaystyle\sum_{j=1}^{N}\alpha_j^{n+1}\phi_j(z_1)=h_1^{n+1}\ ,\ \sum_{j=1}^{N}\alpha_j^{n+1}\phi_j(z_N)=h_2^{n+1}\ , \qquad n=0,1,2,\cdots,\end{cases} \tag{9}$$

$$\psi_j(z_i)=C(h_i^{n+1})\phi_j(z_i)-\frac{\Delta t}{2\Delta z}\left(K(h_{i+1}^{n+1})\left(\frac{\mathrm{d}\phi_j(z)}{\mathrm{d}z}\right)_{z=z_{i+1}}-K(h_{i-1}^{n+1})\left(\frac{\mathrm{d}\phi_j(z)}{\mathrm{d}z}\right)_{z=z_{i-1}}\right) \quad (10)$$

$$F_i^{n+1}=C(h_i^{n+1})h_i^n+\frac{K(h_{i+1}^{n+1})-K(h_{i-1}^{n+1})}{2\Delta z}$$

则（10）可写矩阵方程形式

$$\boldsymbol{HU=F} \quad (11)$$

其中

$$H=\begin{bmatrix}\phi_1(z_1) & \phi_2(z_1) & \phi_3(z_1) & \cdots & \phi_N(z_1)\\ \phi_1(z_N) & \phi_2(z_N) & \phi_3(z_N) & \cdots & \phi_N(z_N)\\ \psi_1(z_2) & \psi_2(z_2) & \psi_3(z_2) & \cdots & \psi_N(z_2)\\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ \psi_1(z_{N-1}) & \psi_2(z_{N-1}) & \psi_3(z_{N-1}) & \cdots & \psi_N(z_{N-1})\end{bmatrix} \quad (12)$$

$$U=[\alpha_1^{n+1},\alpha_N^{n+1}\alpha_2^{n+1},\cdots,\alpha_{N-1}^{n+1}]^T,$$

$$F=[h_1^{n+1},h_2^{n+1},F_2^{n+1},\cdots,F_{N-1}^{n+1}]^T。$$

3　结果与讨论

本文采用 Matlab 进行编程计算[21]，其中模拟深度为 100 cm，总模拟时间 9 d，试验地垂直方向上划分 5 个单元，空间步长 20 cm，时间步长 1 d，土壤基质势迭代控制标准取绝对误差 0.1 cm。根系吸水模型采用 Feddes 等模型，且该地区 2010 年 4 月 25 日至 5 月 15 日的葡萄最大蒸腾速率为 0.2 cm/d。

3.1　经验根系分布函数与由实测数据拟合的根系分布的比较

由葡萄根系最大扎根深度为 100 cm，即 L=100，同时可以得到每个经验根系分布函数的参数值。根据公式（4）～（6），可推算出指数分布函数中的参数 a

$$a=b(z=0)=0.0205$$

则指数关系根系密度分布函数为

$$b(z)=0.0205e^{-0.0205z} \quad (13)$$

线性关系根系密度分布函数为

$$b(z)=0.02(1-0.01z) \quad (14)$$

分段根系密度分布函数为

$$b(z)=\begin{cases}0.0166667 & z\le 20\\ 0.020833(1-0.01z) & 20<z\le 100\\ 0 & z>100\end{cases} \quad (15)$$

本文根据实测根长拟合了葡萄根长密度分布函数，表 3 为根据根长分布得到的不同深度根长分布比例。其中，分布比例为该深度根长占总根长的比例，累积分布比例为该深度之上每个深度根系分布比例之和。

对表 3 中数据进行拟合，得到根系累积分布函数

$$Y(z)=-0.0001z^2+0.0205z \quad (16)$$

相关系数为 0.9929。对根系累积分布函数进行求导，可以得到根系密度分布函数

$$b(z)=-0.0002z+0.0205 \quad (17)$$

表 3　每 20 cm 根长分布比例

Table 3　Proportional distribution of root length of every 20 cm soil layer

深度/cm	根长/mm	分布比例	累积分布比例
0～20	13053.18	0.397	0.397
20～40	8792.98	0.268	0.665
40～60	5561.04	0.169	0.834
60～80	2033.42	0.062	0.896
80～100	3414.57	0.104	1.000

利用公式（13）、（14）、（15）、（17）计算了深度为 20～100 cm 的根系分布，计算结果由图 2 所示。从图中可以看出，实测拟合分布与线性分布相差不大，分段函数分布在 20 cm 深度以下与实测拟合函数基本一致，而指数分布与其他几种分布均相差较大。因此在缺乏根系试验资料的情况下，可采用线性分布和分段函数分布这两种经验根系分布函数来模拟根系分布状态。

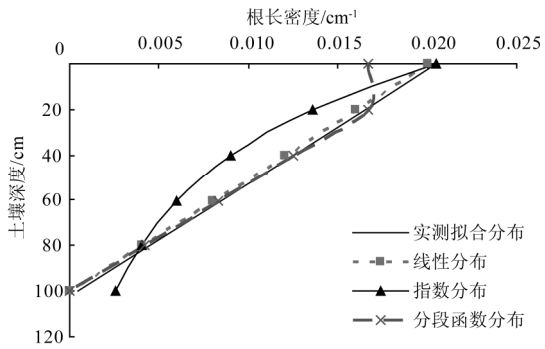


图 2　经验根长密度分布与由实测数据拟合的根长密度分布比较

Fig.2　Comparison of empirical root length density distribution and root length density distribution fitted by measured data

3.2　土壤水分分布的数值模拟结果分析

由于葡萄根系的吸收根主要分布在土壤深度 20 cm 以下，20 cm 以上土壤水分变化主要由于土面蒸发，而 20 cm 以下土壤水分变化主要由于根系吸水，因此，将拟合的葡萄根系分布函数带入土壤水分运动方程（1）模拟 20 cm 以下土壤含水率分布变化，并通过土壤水分模拟值与实测值比较，分析根系分布函数和无网格数值模拟模型的准确性。图 3 显示了灌水后，土壤垂直剖面含水率的数值模拟结果与实测土壤水分剖面的对比情况。其中灌水时间为 4 月 25 日，同时选取灌水后第 1 天和灌水后第 8 天的实测含水率分布与模拟结果进行验证。从图 3 可以看出，由实测拟合根系密度分布函数得到的模拟结果能够反映实际灌水后垂直剖面含水率的变化。

为了比较不同方法获得根系分布对土壤水分分布的影响，将拟合的根系分布、指数根系分布、线性根系分布、分段根系分布分别代入模型进行数值模拟。通过对这4种根系分布模式下土壤水分模拟值的误差分析(表4)可以看出，根系指数分布下的土壤水分模拟值和实测值

的最大误差和相对误差都最大，而实测拟合分布、线性分布和分段函数分布下的土壤水分模拟值和实测值的误差值相对较小。总之，4 种分布模式下的土壤水分模拟值和实测值的相对误差都不大，都可以用来模拟根系吸水，且线性根系分布函数以及分段经验根系分布函数对于葡萄根系分布函数具有适用性，这两种经验根系分布函数只需要最大分布深度即可，参数获取简单，实际应用较为方便。

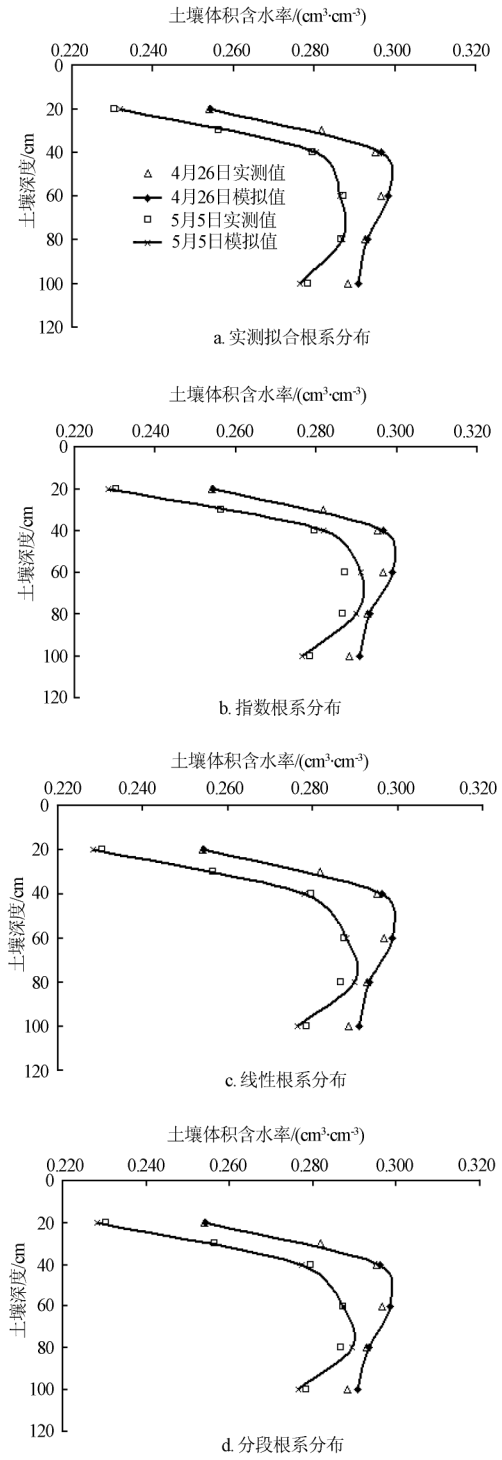


图 3 不同根系分布模式下的土壤水分模拟值与水分实测值比较

Fig.3 Comparison of simulated and measured values of soil moisture under different root distribution patterns

表 4 不同根系分布模式下土壤水分模拟值和实测值误差分析

Table 4 Error analysis of simulated and measured values of soil moisture under different root distribution patterns

	实测拟合分布	指数分布	线性分布	分段函数分布
最大误差/%	0.27	0.41	0.28	0.27
相对误差/%	0.65	0.96	0.68	0.70

4 结 论

本文采用无网格法建立了一维根系吸水条件下的土壤水分运动数学模型，并将根据根长实测值拟合的根长密度函数和经验根长密度函数带入该数学模型，模拟了灌水后一个周期内的水分运动，并通过田间试验的验证和对比分析，可以得到如下结论：

1）拟合的根系分布、指数经验根系分布、线性经验根系分布和分段经验根系分布都可以用来建立葡萄根系吸水模型，但指数根系分布比其他三种分布模式相差较大。在缺乏根系测定资料情况下，线性经验根系分布和分段经验根系分布可以近似反映成龄葡萄根系分布状态。

2）本文构造的无网格数值模拟方法能够很好的模拟根系吸水条件下的土壤水分运动，说明文中建立的一维葡萄根系吸水模型能反映吐鲁番地区葡萄根系的吸水情况。同时进一步验证了经验分布函数可以反映根系实际分布，且经验模型所需参数获取简单，应用方便。

[参 考 文 献]

[1] 左强，王数，陈研. 反求根系吸水速率方法的探讨[J]. 农业工程学报，2001，17(4)：17－21.
Zuo Qiang, Wang Shu, Chen Yan. Approaches to simulating root-water-uptake rate by solving inverse problem of Richards' equation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(4): 17－21. (in Chinese with English abstract)

[2] 左强，王东，罗长寿. 反求根系吸水速率方法的检验与应用[J]. 农业工程学报，2003，19(2)：28－33.
Zuo Qiang, Wang Dong, Luo Changshou. Accuracy and stability of the inverse method to estimate the average root-water-uptake rate and its application[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(2): 28－33. (in Chinese with English abstract)

[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.
Zuo Qiang, Meng Lei, Wang Dong. Estimating normalized root length density distribution of winter wheat using measured soil water content profiles[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(4): 1－6. (in Chinese with English abstract)

[4] 郭向红，孙西欢，马娟娟. 根系吸水模型参数的混合遗传算法估算方法[J]. 农业机械学报，2009，40(8)：80－85.
Guo Xianghong, Sun Xihuan, Ma Juanjuan. Inverse method estimating root water uptake model parameters using hybrid genetic algorithms[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 80－85. (in Chinese with English abstract)

[5] 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)：112－117.

Wang Yunxi, Li Mingsi, Lan Mingju. Effect of soil wetting pattern on cotton-root distribution and plant growth under plastic mulched drip irrigation in field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(8): 112－117. (in Chinese with English abstract)

[6] 王利春，石建初，左强，等. 盐分胁迫条件下冬小麦根系吸水模型的构建与验证[J]. 农业工程学报，2011，27(1)：112－117. Wang Lichun, Shi Jianchu, Zuo Qiang, et al. Establishing and validating the root water uptake model of winter wheat under salt stress conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 112－117. (in Chinese with English abstract)

[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. Qi Libin, Fan Jun, Shao Min'an, et al. Simulation and verification of soil moisture of root distribution functions for alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 24－29. (in Chinese with English abstract)

[8] Homaee M, Feddes R A. Quantification of root water extraction under salinity and drought[M]. Developments in plant and soil science, 2001, 92: 67－377.

[9] 胡军成，汤亮，刘小军，等. 小麦根系长度的估算方法与参数分析[J]. 农业工程学报，2011，27(10)：112－117. Hu Juncheng, Tang Liang, Liu Xiaojun, et al. Estimation method and parameter analysis on root length in wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(10): 112－117. (in Chinese with English abstract)

[10] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. Simulation of field water use and crop yield[R]. Center for Agricultural Publishing and Documentation，Wageningem, 1978: 189.

[11] Raats P A C. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots[J]. Soil Sci Soc Am J, 1974, 38: 717－722.

[12] Prasad R. A linear root water uptake model[J]. J Hydrol, 1988, 99: 297－306.

[13] Hoffman G J, van Genuchten M T. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control. In: Taylor H M, Sinclair T R(eds), Limitations to efficient water use in crop production[M]. American Society of Agronomy, Wisconsin, USA, 1983: 73－85.

[14] Wang X, Wang Z, Han Y, et al. Variations of fine root diameter with root order in Manchurian ash and Dahurian larch plantations[J]. Frontiers of Forestry in China, 2007, 2(1): 34－39.

[15] 雷志栋，杨诗秀，谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京：清华大学出版社，1988.

[16] 邵明安，黄明斌. 土—根系统水动力学[M]. 陕西科学技术出版社，2000：131－133.

[17] 张雄，刘岩. 无网格法[M]. 北京：清华大学出版社，2004.

[18] 苏李君，秦新强，王志刚. 对流占优扩散方程的无网格法[J]. 武汉理工大学学报，2010，32(11)：172－176. Su Lijun, Qin Xinqiang, Wang Zhigang. Meshless method for convection-dominated diffusion equations[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(11): 172－176. (in Chinese with English abstract)

[19] Wang Zhigang, Qin Xinqiang, Wei Guo, et al. Meshless method with ridge basis functions[J]. Applied Mathematics and Computation, 2010, 217: 1870－1886.

[20] 张颖超，吕凤云，孙乐林. 用径向基函数插值解自共轭椭圆型方程[J]. 数学杂志，2007，27(5)：541－545. Zhang Yingchao, Lu Fengyun, Sun Lelin. Sloving a self-conjugate elliptic equation with the interpolation property of radial basis function[J]. Journal of Mathematics, 2007, 27(5): 541－545. (in Chinese with English abstract)

[21] 葛哲学. 精通 MATLAB[M]. 北京：电子工业出版社，2008.

Numerical simulation of root water uptake for grape in extremely arid region

Su Lijun[1], Wang Quanjiu[1※], Bai Yungang[2], Zeng Chen[3], Nan Qingwei[1], Lu Zhenlin[2]

(1. *Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering*, *Xi'an University of Technology*, *Xi'an* 710054, *China*; 2. *Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research*, *Urumchi* 830049, *China*; 3. *Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes*, *Institutes of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100085, *China*)

Abstract: According to the researches about the root distributions of mature grape, the characteristics of root water uptake and the laws of water consumption, it can be provided technical support for formulating the optimum irrigation system, proposing reasonable water management pattern and creating technical system of high-efficiency utilization of water. Based on analyzing the characteristic of water uptake and the measured data of the grape root distribution under condition of irrigation, a meshless numerical simulation model for one-dimensional water flow in unsaturated soils and one-dimensional root distribution function of grape were introduced in this paper. Further, the root distribution function and the other empirical root distribution functions were applied to numerical simulation model to demonstrate the appropriateness. According to the comparison between the results of dynamic simulation and data of field experiment, it shows that the simulated values of fitting root distribution, exponential root distribution, linear root distribution and piecewise root distribution are coincide well with measured values, and all of the relative errors are below 1%. However, compared with other root distribution functions, the error of exponential root distribution is larger. Therefore the fitting root distribution and the meshless numerical model can simulate the root water uptake of grape and the soil water movement in extremely arid region well. Moreover, under the condition of the shortage of the field root length distribution, linear root distribution and piecewise root distribution can be used to describe the practical root distribution of grape, and provide reference for using one-dimensional simple root distribution model to analyze the characteristic of grape water uptake under irrigation condition.

Key words: numerical methods, models, soil moisture, root water uptake, root distribution function, meshless method