

紫花苜蓿不同根系分布模式的土壤水分模拟和验证

齐丽彬^{1,3}, 樊军^{1,2}, 邵明安^{1,2*}, 王万忠^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 根系分布影响着土壤水分养分吸收, 实测根系分布费时费力, 经验根系分布函数参数简单, 应用方便。该研究在田间采用苜蓿栽培土柱试验, 测定根系分布, 并将其和不同经验根系分布函数分别应用于 Hydrus-1D 对土壤水分进行动态模拟, 通过土壤水分实测值和模拟值比较, 验证分析了经验根系分布函数的适用性以及土壤水分动态变化的影响。结果表明: 拟合的根系分布、Prasad 分布、Hoffman 和 van Genuchten 分布 3 种根系分布函数的根长密度模拟值与 36 cm 以下的根长密度实测值较为吻合, Raats 根系分布模拟值与实测值及其他分布函数则差别较大。不同根系分布下土壤水分模拟差别不大, 平均相对均方根误差在 3.5% 以下。非胁迫生长条件下, Prasad 根系分布、Hoffman 和 van Genuchten 根系分布都可描述紫花苜蓿实际根系分布状况。

关键词: 土壤水分, 根系密度分布函数, 验证, 数值模拟
中图分类号: S152.7, S152.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1002-6819(2009)-4-0024-06

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 Ming'an, et al. Simulation and verification of soil moisture of root distribution functions for alfalfa[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(4): 24-29.(in Chinese with English abstract)

0 引言

了解根系吸收土壤水分的状况和动态对于进行土壤水分的模拟与预测、灌溉制度的合理制定以及植物对水分的高效利用、作物的稳产和高产等均具有很强的实际意义。研究植物根系一维吸水过程可以通过含水率剖面反求根系吸水速率方法^[1-3], 也可以采用建立根系吸水函数的方法^[4]。可靠的根系吸水函数能够较准确地模拟出土壤剖面含水率分布^[5,6]。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基于 Feddes 等^[7]模型发展而来。美国盐土实验室开发的一维非饱和土壤水运动模型 Hydrus-1D 软件^[8]提供了 Feddes 等^[7]模型, 吸水模型中根系分布则影响着根系吸水速率的剖面分布。邵明安等^[8,9]研究认为, 吸水模式中吸水速率与根密度不是简单的正比关系, 而是和有效根密度有关, 即吸水能力较强的毛根有关, 因此应选取细根分布来分析对根系吸水的影响。

根系密度分布在田间不易测定, 可通过土壤水分剖面估算的方法求出根系密度分布^[3], 也可应用经验根系密度函数来反映根系密度分布状态。一般常用的根系密度分布有指数分布^[10]、线性分布^[11]以及分段函数^[12]等形式。本研究采用苜蓿栽培土柱试验^[3,8,13-15], 实测出根系分布、

植物蒸散和土壤水分剖面变化, 采用 Feddes 等^[7]根系吸水模型, 利用 Hydrus-1D 软件模拟土壤水分, 并和实测土壤水分剖面进行对比, 评价分析不同根系分布函数对根系吸水的影响, 以探讨根系分布函数的建立以及经验根系密度分布函数的适用性。

1 试验方法

为了在植物不同生长阶段能够同时获得植物蒸腾量, 根系生长分布状态和土壤水分剖面变化, 本研究采用土柱栽培苜蓿、称重系统和水分测量系统对根系吸水过程进行测定。Hao 等研究表明^[16], 低灌溉水平下, 根系吸水受水分胁迫的影响要比受根系分布的影响大。本文则选取非胁迫条件下, 比较分析根系分布对土壤水分剖面动态变化的影响以及 Raats 指数分布^[10]、Prasad 线性分布^[11]、Hoffman 和 van Genuchten 分段分布^[12]几种根系经验分布函数的适用性。

1.1 土柱试验

试验于 2006~2007 年在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行。土柱为沿轴向对半剖开的 PVC 管, 其高 210 cm, 内径 29.5 cm。PVC 管用圆形钢卡固定并用玻璃胶粘好缝隙至不漏水, 底部采用漏眼的铁盘扣紧, 与下部土层无接触, 可以自由排水, 底盘和钢卡上均有固定钢丝绳的钢钩以利于吊起称重。将土柱置入田间挖好的土槽内, 并在上方铺盖木板以减少太阳辐射的影响。中间置入长度为 200 cm 的 TDR 水分测量管后, 将过 5 mm 筛的风干土壤(当地沙黄土)按照容重 1.40 g/cm³ 分层装填至离 TDR 测管管口 5 cm 处。土柱装填完毕后按照饱和和含水率灌入营养液(尿素和磷酸二氢钾混合液), 水分进行再分布最终土壤处于田间持

收稿日期: 2008-09-13 修订日期: 2009-02-12
基金项目: 国家自然科学基金(40601041); 中国科学院西部之光(2005YB01)资助
作者简介: 齐丽彬(1977-), 女, 河南信阳人, 博士生, 主要从事生态生态系统通量研究。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。
Email: lbqi04@163.com
*通讯作者: 邵明安, 研究员, 研究方向为土壤物理。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。Email: mashao@ms.iswc.ac.cn

水量状态。之后均匀种植紫花苜蓿 (*Medicago sativa*) 于水分测量管周围, 待出苗后间苗至 5 棵左右, 并在土壤表面覆盖 3~5 cm 厚蛭石 (蛭石直径 2~3 mm) 以抑制 (棵间) 土壤蒸发。试验使用称重法测定植物蒸散量。试验过程中, 通过称重和测定水分剖面来确定灌水时间

和营养液量以使植物处于无水分、养分胁迫条件下生长 (植物幼苗期每 10 d 左右灌 1 次营养液), 试验在遮雨棚下进行, 以便进行水分处理。本试验共设置 30 个土柱, 按不同生长时间剖开土柱, 且每 2 个土柱同期剖开 (即共 2 个重复), 具体试验装置如图 1 所示。

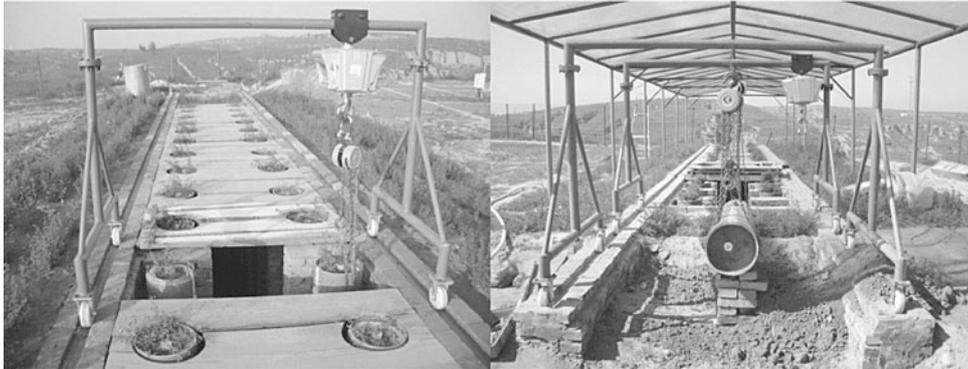


图 1 土柱试验装置
Fig.1 Test device of soil column

1.2 根长密度分布测定方法

分别在植物的分枝期、现蕾期、开花期和成熟期, 吊起土柱沿以前剖开的管缝拆开, 每隔 10 cm 横向切割土体, 然后用水冲洗挑出细根。将每层土壤的根系平铺于有机玻璃水槽内, 采用扫描仪扫描图像并利用根系分析软件 DT-SCAN(英国 Delta-T Devices Ltd.) 进行分析, 得到根长、根表面积、根径分布等参数, 选取细根总根长作为根系分析参数^[17]。

1.3 土柱试验参数的确定

植物蒸散利用电子秤称重获得, 同时使用 TDR 测定剖面土壤水分。对供试土壤采用环刀法测定饱和导水率, 并利用离心机法测得脱湿曲线, 采用 RETC 拟合得到 van Genuchten 函数形式下水分特征曲线参数 (表 1), 其中参数 θ_s 为饱和土壤含水率; θ_r 为滞留土壤含水率; k_s 为土壤饱和导水率; α 是与进气吸力有关的参数, n 是形状系数。

表 1 供试土壤水动力学参数

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	0.38	0.08	58.00	0.01	1.48

1.4 植物潜在蒸腾速率和根系分布的确定

由于土壤表面覆盖了 3~5 cm 厚的蛭石, 各土柱的土面蒸发十分微弱, 本研究中将之近似为零, 相应地, 称重获得的植物蒸散量即可近似为蒸腾量。当年种植紫花苜蓿在供水充分生长条件下, 选取开花后期进行 11 d 的土壤水分动态监测和蒸腾速率测定, 并在此后将土柱拆开测定根系分布剖面。此阶段天气状况稳定, 11 d 间平行重复样柱所测根系分布差别不大, 假定在此期间根系密度分布基本稳定。考虑到前期土壤水分供应充足, 在此期间所测的最大蒸腾量 1.0 cm/d 可视为植物潜在蒸腾速率。拆开土柱测定出土柱内苜蓿根系最大扎根深度为 180 cm 以及根长分布 (表 2)。

表 2 土柱每 10 cm 土层根长分布实测值

Table 2 Measured values of root length of every 10 cm soil layer in soil column

土壤深度/cm	每层土根长/m	土壤深度/cm	每层土根长/m
0~10	67.65	90~100	20.21
10~20	32.29	100~110	19.04
20~30	74.17	110~120	21.94
30~40	52.55	120~130	19.78
40~50	48.21	130~140	19.83
50~60	55.47	140~150	17.10
60~70	34.74	150~160	9.10
70~80	35.49	160~170	3.88
80~90	31.70	170~180	0.91

2 基本理论

2.1 Hydrus-1D 模型土壤水分运动原理

以地表为基准面, 垂直一维土壤水分运移的定解问题可表示为 (坐标轴向下为正)^[18]:

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

式中 h ——土壤基质势, cm; θ ——体积含水率; $K(h)$ ——非饱和导水率, cm/d; z ——土壤深度, cm; t ——时间, d; $S(z, t)$ ——根系吸水速率, d^{-1} 。

本研究的初始条件为:

$$h(z, 0) = h_0(z) \quad 0 \leq z \leq L, \quad t = 0 \quad (2)$$

式中 $h_0(z)$ ——初始土壤水基质势, cm; L ——植物最大扎根深度, cm。

上边界条件为:

$$\left[-K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right]_{z=0} = -E(t) \quad t > 0 \quad (3)$$

式中 $E(t)$ ——蒸发强度, cm/d。

下边界条件为渗流自由面条件 (Seepage face):

$$\begin{aligned} h(L,t) < 0 \text{ 时, } \left[-K(H) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right]_{z=L} &= 0 \quad t > 0 \\ h(L,t) \geq 0 \text{ 时, } h(L,t) &= 0 \quad t > 0 \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 植物根系吸水函数

$S(z,t)$ 采用常用的 Feddes 等^[7]提出的根系吸水模型:

$$S(z,t) = \gamma(h)S_p = \gamma(h)b(z)T_p \quad (5)$$

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{h_1 - h}{h_1 - h_2} & h_2 < h \leq h_1 \\ 1 & h_3 \leq h \leq h_2 \\ \frac{h - h_4}{h_3 - h_4} & h_4 \leq h < h_3 \end{cases}$$

$$b(z) = \frac{b'(z)}{\int_0^L b'(z) dz}$$

式中 S_p ——最大根系吸水速率, d^{-1} ; T_p ——植物潜在蒸腾速率, cm/d ; h_1 、 h_2 、 h_3 和 h_4 ——分别为根系吸水厌氧点土壤基质势、根系吸水最适点开始和结束土壤基质势、根系吸水萎蔫点土壤基质势, 对于苜蓿采用 Hydrus-1D 中的建议值: -10、-25、-1500 和 -9000 cm ; $b(z)$ ——相对根系密度分布函数; $b'(z)$ ——实测根系密度分布函数。

2.3 经验根系密度分布函数

根据植物根系剖面分布状态, 目前相对根系密度分布函数 $b(z)$ 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。

2.3.1 指数关系根系密度分布函数

Raats^[10]提出了指数关系的根系密度分布函数, 以根系分布在土壤表层为最高:

$$b(z) = ae^{-az} \quad (6)$$

式中 a ——根系指数分布的经验参数。

对于式 (6), 当 $z=0$ 时, 则

$$b(z=0) = a \quad (7)$$

因此经验参数 a 实际上为土壤表层根系密度分布比例。

Gale 和 Grigal^[19]提出渐近线根系分布:

$$b(z) = -\beta^z \ln \beta \quad (8)$$

式中 β ——根系渐近线分布的经验参数。

当 $\beta = e^{-a}$ 时, $b(z)$ 和 Raats 指数根系分布函数完全一样^[20], 因此两者分布意义相同。也有学者研究了 Gale 和 Grigal 渐近线根系分布对土壤水分模拟的影响^[21]。

2.3.2 线性关系根系密度分布函数

Prasad^[11]发现在湿润土壤中, 根系主要从土壤上层吸收水分, 故描述根系密度分布函数为:

$$b(z) = \frac{2}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right) \quad (9)$$

2.3.3 分段根系密度分布函数

Hoffman 和 van Genuchten^[12]提出了分段根系密度分布函数:

$$b(z) = \begin{cases} \frac{1.66667}{L} & z \leq 0.2L \\ \frac{2.08333}{L} \left(1 - \frac{z}{L} \right) & 0.2L < z \leq L \\ 0 & z > L \end{cases} \quad (10)$$

2.3.4 由每层土的根长实测值拟合根长密度分布函数

将土壤在最大扎根深度范围内共分为 n 层。 z_i 和 z_{i+1} 分别为第 i 层土壤上部和下部土壤深度 (cm), 其间隔深度为 $\Delta z_i = z_{i+1} - z_i$, 实测根长为 y_i (cm), 非等间距下根长分布比例 Y_i 则为:

$$Y_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} b(z) dz = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{b'(z)}{\int_0^L b'(z) dz} dz = \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} b'(z) dz}{\int_0^L b'(z) dz} = \frac{y_i / \Delta z_i}{\sum_{j=1}^n (y_j / \Delta z_j)} \quad (11)$$

则深度 z_{i+1} 处累计根长分布比例 $Y(z_{i+1})$ 为:

$$Y(z_{i+1}) = \sum_{j=1}^i Y_j \quad (12)$$

从而可拟合出 $Y(z)$ 函数, 进而对其求导得到相对根长密度 $b(z)$ 表达式:

$$\frac{dY(z)}{dz} = b(z) \quad (13)$$

上式在 $b(z)$ 线性分布情况下, 则可简化为:

$$\frac{Y_i}{\Delta z_i} = b(\bar{z}_i), \quad \text{其中 } \bar{z}_i = (z_i + z_{i+1}) / 2 \quad (14)$$

然后拟合出根系密度分布函数。

对于 $b(z)$ 非线性分布下, 式 (14) 法拟合根系分布的误差较大^[22], 需采用本文的式 (11) ~ (13) 法进行拟合, 较能反映实际根系分布状态。

3 结果与分析

Hydrus-1D 模型输入中, 供试土壤均质, 模拟深度为 180 cm , 总模拟时间 11 d , 土柱垂直方向上划分 100 个单元, 空间步长 1.8 cm , 初始时间步长 0.001 d , 土壤水基质势迭代控制标准取绝对误差 0.1 cm , 最大迭代次数 20 次, 迭代次数 < 3 次时, 下次拟采用时间步长为上次时间步长的 1.3 倍, 迭代次数 > 7 次时, 下次拟采用时间步长为上次时间步长的 0.7 倍。根系吸水模型采用 Feddes 等模型, 土面蒸发通量近似为 0^[15], 植物最大蒸腾速率为 1.0 cm/d 。

3.1 由每层土的根长实测值拟合根长密度分布函数

实测根系分布数据 (表 2) 是离散点, 缺乏连续性, 根据式 (11)、(12) 对表 2 实测根长进行归一化计算, 拟合得到二次曲线 $Y(z)$, 决定系数达到 0.9975, 然后由式 (13) 得到根长分布 $b(z)$ 为:

$$b(z) = -6.4 \times 10^{-5} z + 0.01 \quad (15)$$

本试验条件下生长了 150 d 左右的紫花苜蓿的累计根长分布比例与土壤深度呈极显著二项式函数拟合关系, 通过微分可以求得根长密度分布与土壤深度呈线

性关系，从而得到根长密度连续分布剖面。由以上数据分析可知根长密度呈线性分布，此种分布也可采用式 (14) 直接拟合得到与式 (15) 相同的表达式，但采用式 (11) ~ (13) 拟合可较为直观地反映累计根长分布比例。

根据实测数据和式 (7) 也可推算出 Raats 指数分布函数中的参数 a 。由式 (15) 得出土壤表层根系分布比例约为 0.01，则其经验根长密度分布函数为：

$$b(z) = 0.01e^{-0.01z} \quad (16)$$

3.2 经验根系分布和由实测数据拟合的根系分布比较

由图 2 可看出，由实测数据拟合的根系分布和 Prasad 经验分布差别不大，在整个土壤剖面上，拟合的根系密度均低于 Prasad 根系密度；拟合的根系分布与 Hoffman 和 van Genuchten 分段分布在 36 cm 深度以下其分布趋势一致；Raats 指数分布与其他根系分布函数均相差较大。

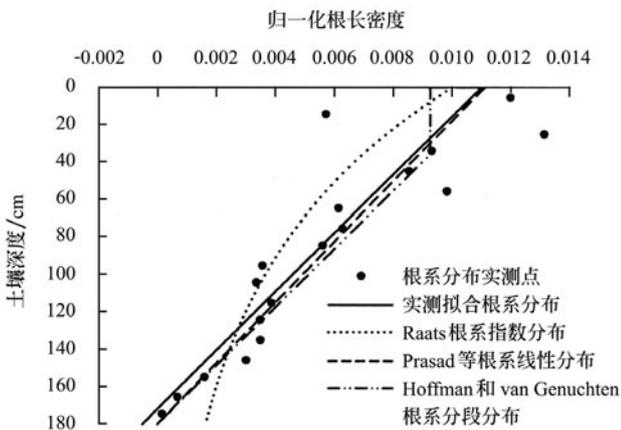


图 2 经验根长密度分布、由实测数据拟合的根长密度分布与实测根长密度的比较

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

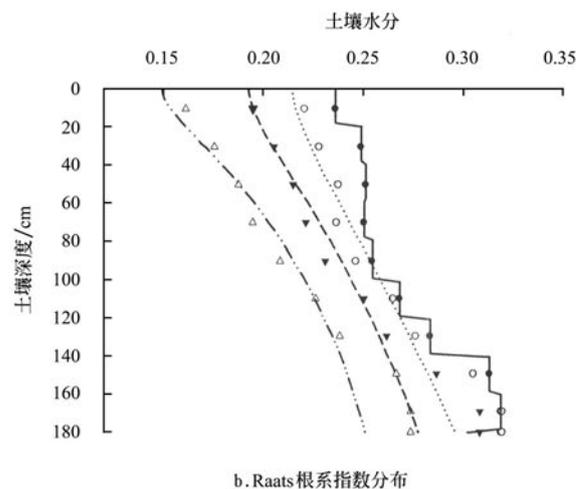
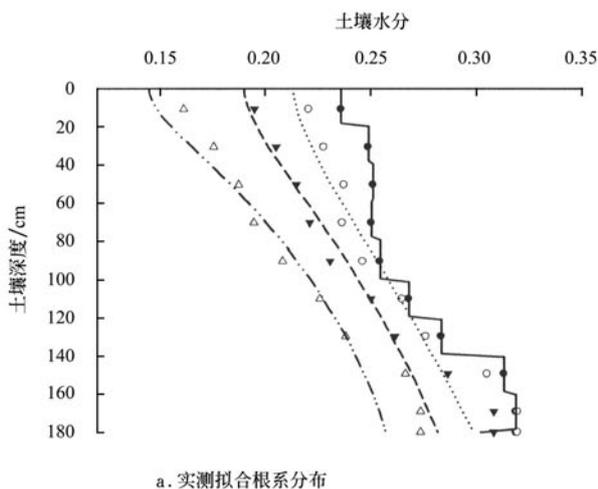
植物根系分布受环境因子和遗传因素两方面影响^[23]。Gale 等提出的渐近线根系分布最初是描述树木根系分布的，其后不少学者研究了野外不同植物和立地条件下的参数值 β ，具有较好的代表性^[20]。Raats 指数分布

和 Gale 和 Grigal 提出的渐近线根系分布具有一致性，本研究表明其适用范围均具有一定局限性。本研究中土柱水分处理为非胁迫水分条件，苜蓿根系在此条件下生长发育后，实际根长密度剖面基本呈线性分布 (图 2)，与 Prasad、Hoffman 和 van Genuchten 根系分布模式区别不大，因此在缺乏根系试验资料的情况下，可采用这两种经验根系分布函数来反映根系分布状态。

3.3 土壤水分数值模拟结果分析

将以上根系分布函数分别应用于 Feddes 等的根系吸水模型，并采用 Hydrus-1D 进行土壤水分的数值模拟，结果与实测土壤水分剖面进行对比分析 (图 3)。结合图 2、图 3 可以看出，4 种根系分布模式下模拟的土壤水分剖面 and 实测剖面总体变化趋势一致，这和左强等发现不同根系密度函数可模拟出相似的土壤水分剖面的结论^[11]相同。图 3 表明 140 cm 以下的土壤水分模拟值和实测值均相差较大，较高估计了土柱下部的根系吸水，这可能是由于模拟阶段前期根系扎根实际浅于假定条件，下层根系密度高于假定条件，因此也造成了土壤水分模拟值总体偏低。但总体上 4 种根系分布模式下土壤水分模拟值和实测值平均相对均方根误差在 3.5% 以下 (表 3)。另外由图 3 可看出，后期实测土壤下层水分剖面变化较大，说明苜蓿根系有很强的向深层土壤伸展的能力。

通过不同根系密度分布下土壤水分模拟剖面的误差分析 (表 3) 得出，Hoffman 和 van Genuchten 根系分布下的土壤水分模拟剖面 and 实测值最大误差、相对误差和相对均方根差平均值均最小，其次是 Prasad 的误差均值，而 Raats 分布和实测拟合分布的误差均值相对较大。总体上，这 4 种根系分布模式的模拟水分和实测水分误差值均相差不大，40~140 cm 之间和实测值误差最小，相对均方根误差在 3.5% 以下，较好的模拟了土壤水分剖面，而在 140 cm 以下模拟水分和实测值相差最大，这可能和采用模拟后期的根系深度和密度分布有关。总之，Hoffman 和 van Genuchten 以及 Prasad 经验根系分布函数对于苜蓿非胁迫条件下的根系分布函数具有适用性，且这两种经验根系分布函数参数只需要最大扎根深度即可，参数获取简单，实际应用较为方便。



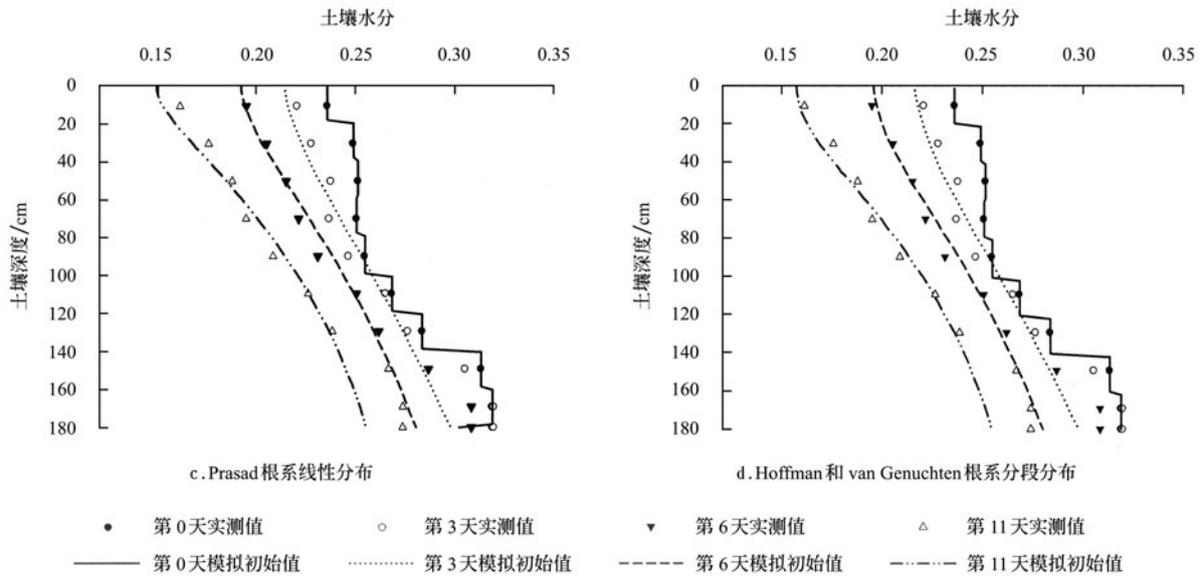


图3 不同根系分布模式下的土壤水分模拟值与水分实测值比较

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

表3 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 3 Error analysis of simulated and measured values of soil moisture under different root distribution patterns

土壤深度/cm	最大误差				相对误差/%				相对均方根误差/%			
	实测拟合分布	指数分布	线性分布	分段函数分布	实测拟合分布	指数分布	线性分布	分段函数分布	实测拟合分布	指数分布	线性分布	分段函数分布
0~20	0.013	0.007	0.008	0.003	3.6	2.1	2.3	1.3	4.2	2.6	2.6	1.3
20~40	0.010	0.005	0.008	0.007	3.2	1.5	2.4	1.9	3.5	1.8	2.7	2.2
40~60	0.006	0.004	0.005	0.006	1.7	1	1.3	1.5	1.9	1.2	1.6	1.8
60~80	0.006	0.008	0.006	0.005	2.6	3.3	2.6	2.2	2.6	3.3	2.6	2.2
80~100	0.008	0.009	0.008	0.007	3.4	3.4	3.2	2.8	3.4	3.4	3.2	2.8
100~120	0.003	0.001	0.001	0.001	0.4	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.3	0.3
120~140	0.001	0.003	0.002	0.002	0.3	1.1	0.5	0.8	0.3	1.1	0.5	0.8
140~160	0.020	0.024	0.021	0.022	6.4	7.6	6.8	7.1	6.5	7.6	6.9	7.1
160~180	0.030	0.034	0.031	0.032	8.2	9.6	8.7	8.9	8.3	9.7	8.8	9
平均值	0.011	0.011	0.010	0.009	3.3	3.3	3.1	3.0	3.5	3.4	3.2	3.1

4 结论

拟合的根系分布、Prasad 与 Hoffman 和 van Genuchten 经验根系分布与 36 cm 以下的根长密度实测值较为吻合, Raats 根系分布与实测值及其他分布模式差别较大。非胁迫条件下, 两种经验根系分布模型 (Prasad 与 Hoffman 和 van Genuchten) 可近似反映紫花苜蓿根系实际分布状态。因此在缺乏根系测定资料情况下, 可通过经验根系线性分布确定其分布模式。通过土壤水分动态模拟和实测水分剖面的对比及误差分析, 经验根系分布函数下土壤水分模拟剖面 and 实测值的平均相对均方根误差在 3.5% 以下, 进一步验证了经验根系分布模型 (Prasad、Hoffman 和 van Genuchten) 可近似反映根系实际分布状态, 且这两种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 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 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 CSAE, 2004, 20(4): 1-6. (in Chinese with English abstract)

[4] Homae M, Feddes R A. Quantification of root water extraction under salinity and drought[M]. Developments in plant and soil science, 2001, 92: 367-377.

[5] 罗 毅, 于 强, 欧阳竹, 等. 利用精确的田间实验资料对几个常用根系吸水模型的评价与改进[J]. 水利学报,

- 2000, (4): 73—80.
- Luo Yi, Yu Qiang, Ouyang Zhu, et al. The evaluation of water uptake models by using precise field observation data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, (4): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [6] 许迪. 典型经验根系吸水函数的田间模拟检验及评价[J]. *农业工程学报*, 1996, 13(3): 37—42.
- Xu Di. Field test and evaluation of empirical root uptake functions in soil water movement models[J]. *Transactions of the CSAE*, 1996, 13(3): 37—42. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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, 189.
- [8] 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.
- [9] Zuo Q, Jie F, Zhang R, et al. A generalized function of wheat's root length density distributions[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, 3(1): 271—277.
- [10] 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.
- [11] Prasad R. A linear root water uptake model[J]. *J Hydrol*, 1988, 99: 297—306.
- [12] 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]. Madison, WI: American Society of Agronomy, 1983: 73—85.
- [13] 杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [14] Homaee M, Dirksen C, Feddes R A. Simulation of root water uptake I: Non-uniform transient salinity using different macroscopic reduction functions[J]. *Agri Water Mana*, 2002, 57: 89—109.
- [15] Homaee M, Feddes R A, Dirksen C. Simulation of root water uptake II: Non-uniform transient water stress using different reduction functions[J]. *Agri Water Mana*, 2002, 57: 111—126.
- [16] Hao X, Zhang R, Kravchenko A. Effects of root density distribution models on root water uptake and water flow under irrigation[J]. *Soil Science*, 2005, 170 (3): 167—174.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Gale M R, Grigal D F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status[J]. *Can J For Res*, 1987, 17: 829—834.
- [20] Raats P A C. Uptake of water from soils by plant roots[J]. *Transp Porous Media*, 2007, 68: 5—28.
- [21] Li K Y, De Jong R, Coe M T, et al. Root-water-uptake based upon a new water stress reduction and asymptotic root distribution function[J]. *Earth Interact*, 2006, 10: 1—22.
- [22] Cook F J, Kelliher F M. Determining vertical root and microbial biomass distributions from soil samples[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70: 728—735.
- [23] Salgado E, Cautin R. Avocado root distribution in fine and coarse-textured soils under drip and microsprinkler irrigation[J]. *Agri Water Mana*, 2008, 95: 817—824.

Simulation and verification of soil moisture of root distribution functions for alfalfa

Qi Libin^{1,3}, Fan Jun^{1,2}, Shao Ming'an^{1,2*}, Wang Wanzhong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and the Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Root distribution has a significant impact on soil moisture and nutrient uptake. It is time and effort consuming to measure root distribution, but it is easy to study root distribution by empirical functions. Soil column experiments in field were conducted to measure alfalfa root distribution. Empirical root distribution functions were compared with measured data, and they were respectively incorporated in the Hydrus-1D software to simulate soil water movement. Consequently, the applicability of empirical root distribution functions and the effect of empirical root distribution functions on soil moisture dynamic change were verified and analyzed by comparing of measured and simulated values of soil moisture. The results showed that the simulated values of root density by functions of fitting root distribution, Prasad distribution and Hoffman and van Genuchten distribution were coincide well with measured values below 36 cm. The value of Raats root distribution was different with other distribution function values and the measured values. Different distribution functions resulted in nearly identical soil moisture, and the average relative root mean square error were below 3.5%. Raats root distribution, Prasad distribution and Hoffman and van Genuchten distribution all can describe the practical root distribution of alfalfa under non-stress growth condition

Key words: soil moisture, root distribution function, verification, numerical simulation