

# 反求根系吸水速率方法的检验与应用

左 强, 王 东, 罗长寿  
(中国农业大学)

**摘 要:** 土壤含水率剖面实测时间间隔  $T$  与实测点间距  $SI$  是影响平均根系吸水速率反求方法的 2 个主要因子。通过数值实验, 首先探讨分析了  $T$  和  $SI$  的不同取值条件下, 平均根系吸水速率模拟值的误差效应, 从实际应用角度出发, 若设定平均根系吸水速率的最大绝对误差  $0.0015 \text{ d}^{-1}$ , 总体相对误差 15%, 则  $T$  和  $SI$  的选取最好能限制在如下范围之内:  $5 \text{ d} < T < 15 \text{ d}, SI < 20 \text{ cm}$ 。应用上述检验分析结果, 对两种水分胁迫条件下土柱实验中苗期冬小麦的根系吸水进行了模拟分析, 结果表明: 持续的水分胁迫将显著地降低冬小麦根系的吸水速率, 抑制其根系的生长; 当上部土层水分供应不足时, 小麦的自我调节功能可导致根系扩大其吸水范围, 向下部土层生长。

**关键词:** 平均根系吸水速率; 土壤水; 反求方法; 数值模拟

中图分类号: S607; S318

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0028-06

## 1 引言

SPAC 系统中的物质运移与能量传输、节水农业中水资源的利用与管理等均离不开土壤水分运移规律的研究, 而根系吸水规律的定量描述则是土壤-植物系统中土壤水分运移规律模拟研究的基础。植物根系吸收水分的特性常用根系吸水速率  $S(z, t)$ ——即 Richards 方程的源汇项来加以表征<sup>[1-5]</sup>, 而根-土系统的复杂性则使得  $S(z, t)$  的构造方式多种多样, 其中许多模型<sup>[1,2,5,6]</sup> 都包含一些难以测定的参数, 如根水势、根-土界面阻力、根系中的水流阻力、根长密度等。由于根系吸水速率分布  $S(z, t)$  尚无法实际测定, 为了获取根系吸水模型中的参数, 验证分析根系吸水与各影响因子之间的关系, 或探索植物利用土壤水分的一般规律, 常常采用优化或反求方法来推求  $S(z, t)$  在时空上的分布, 即在已知不同时刻基质势(或含水率)剖面分布的前提下, 通过极大似然估计<sup>[7]</sup> 或遗传算法<sup>[8]</sup> 等优化方法来估算  $S(z, t)$  中的参数, 或求解土壤水分运动方程的反问题<sup>[9,10]</sup> 从而得到  $S(z, t)$ 。

在分析总结两种现有根系吸水速率反求方法的基础上, 左强等<sup>[11]</sup> 提出了一种新的数值迭代反求方法, 该方法给出了一种思路, 但要求实测的含水率剖面必须足够准确、光滑, 而实际过程中, 含水率(或基质势)的测定只能在有限的几个深度处进行, 且必然会存在一定的测量误差; 另外, 其数值实验所选用的理论吸水速率仅仅只是深度的函数, 没有考虑随时间的变化情况, 因而缺乏一般性。本文应用该文所提出的思路, 从实用的角度出发, 对这种根系吸水速率反求方法的准确性和稳定性

进行更一般的探讨; 在此基础上, 对土柱实验中冬小麦(苗期)根系吸水速率的变化规律作一简要分析。

## 2 材料与方法

### 2.1 平均根系吸水速率反求方法的检验

植物生长条件下, 土壤水分运移方程可表示为<sup>[1-3,5,7,9,10]</sup> (取地表为原点,  $z$  向下为正):

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

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

$$\left[ -K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right]_{z=0} = -E(t) \quad t > 0 \quad (3)$$

$$h(L, t) = h_l(t) \quad t > 0 \quad (4)$$

式中  $C(h) = d\theta/dh$ ——容水度,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $\theta$ ——体积含水率,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $h$ ——土壤水基质势,  $\text{cm}$ ;  $K(h)$ ——非饱和水力传导度,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $S(z, t)$ ——根系吸水速率, 表示植物根系单位时间从单位土体中吸收的水分体积,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $h_0(z)$ ——初始时刻基质势在剖面上的分布,  $\text{cm}$ ;  $E(t)$ ——土面蒸发强度,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $L$ ——模拟区域垂向总深度,  $\text{cm}$ , 且  $L = L_r, L_r$  为最大扎根深度,  $\text{cm}$ ;  $h_l(t)$ ——不同时间下边界实测基质势值,  $\text{cm}$ ;  $z, t$ ——空间(垂直)坐标,  $\text{cm}$  和时间坐标,  $\text{d}$ 。

若已知  $0 \sim T$  时刻土壤含水率剖面的实测值  $\theta(z, 0)$  和  $\theta(z, T)$ , 应用左强等<sup>[11]</sup> 一文中的方法 3, 可估算出  $0 \sim T$  时段内的平均根系吸水速率  $\bar{S}(z, T)$ , 即

$$\bar{S}(z, T) = \frac{1}{T} \int_0^T S(z, t) dt \quad (5)$$

#### 2.1.1 实测含水率剖面的处理

事实上, 无论是室内还是田间, 我们都不可能获得土壤剖面全部深度处的含水率值, 而且测量值都可能存在一定的误差, 而上述数值迭代方法则要求实测含水率剖面必须连续、光滑且足够准确, 尤其是  $\theta(z, T)$ 。假定剖面上共设置有  $N$  个实测点  $z_1, z_2, \dots, z_N$ , 为了保证实测含水率剖面分布  $\theta(z_i, T)$  连续可导, 采用最小二乘法多项式拟合公式对实测值  $\theta(z_i, T)$  进行拟合, 公式如下<sup>[12]</sup>

收稿日期: 2002-04-17 修订日期: 2002-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011709); 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2001AA 242031); 霍英东高等院校青年教师基金项目

作者简介: 左 强, 博士, 教授, 从事土壤物理和节水农业, 北京市海淀区圆明园西路 2 号 中国农业大学资源环境学院, 教育部植物-土壤相互作用重点实验室, 100094



$$P_m(z) = a_1 + a_2(z - \bar{z}) + a_2(z - \bar{z})^2 + \dots + a_m(z - \bar{z})^{m-1} \quad \bar{z} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i \quad (6)$$

式中  $P_m(z)$  ——  $\theta(z, T)$  的  $m - 1$  次多项式;  $a_1, a_2, \dots, a_m$  —— 拟合参数。拟合过程中, 式(6) 中的指数  $m$  从 3 开始逐次增加, 至全部实测值与拟合值间的最大绝对误差  $PMAE$  小于量测仪器的精度  $\epsilon_p$  为止, 即

$$PMAE = \max_{i=1,2,\dots,N} |P_m(z_i) - \theta(z_i, T)| < \epsilon_p \quad (7)$$

### 2.1.2 数值实验步骤

由于根系吸水速率无法实测, 本文采用数值实验方法检验上述平均根系吸水速率反求方法的准确性与稳定性, 实验步骤如下:

输入水分运移参数, 初始、边界条件及理论根系吸水速率函数  $S(z, t)$ 。  $S(z, t)$  采用如下较为通用的形式<sup>[3,7,13,14]</sup>:

$$S(z, t) = Y(h)S_{\max}(z, t) = Y(h) \frac{T_p}{L_r} L_{\text{nr}}(z) \quad (8)$$

$$Y(h) = \begin{cases} 0 & h(z, t) < h_1 \\ 1 - \left[ \frac{h(z, t) - h_2}{h_1 - h_2} \right]^\rho & h_1 < h(z, t) < h_2 \\ 1 & h(z, t) > h_2 \end{cases} \quad (9)$$

$$L_{\text{nr}}(z) = \frac{Y(z)}{\int_0^{L_r} Y(z) dz} \quad (10)$$

$$Y(z) = \begin{cases} Y(0) \exp\left[-\frac{z^2}{\beta}\right] & z < L_r \\ 0 & z > L_r \end{cases} \quad (11)$$

式中  $Y(h)$  —— 水分胁迫条件下根系吸水速率的衰减因子<sup>[7]</sup>;  $h_1, h_2$  —— 衡量水分对根系吸水速率影响的两个基质势阈值, cm, 当基质势低于  $h_2$  时,  $Y(h)$  随  $h(z, t)$  的降低而逐渐减小, 当基质势降至  $h_1$  时, 根系吸水将不再发生, 即  $Y(h) = 0$ ;  $S_{\max}(z, t)$  —— 无水分胁迫条件下的最大根系吸水速率<sup>[13,14]</sup>,  $d^{-1}$ ;  $T_p$  —— 潜在蒸腾强度,  $cm \cdot d^{-1}$ ;  $Y(z)$  —— 根长密度,  $cm \cdot cm^{-3}$ ;  $Y(0)$  —— 地表处的根长密度;  $\rho, \beta(cm^2)$  —— 优化参数<sup>[7]</sup>;  $L_{\text{nr}}(z)$  —— 相对根密度分布函数<sup>[3]</sup>。

采用数值法求解方程<sup>[1-4]</sup>, 得不同时刻  $T$  的基质势分布  $h(z, T)$  及相应的含水率分布  $\theta(z, T)$ 。

根据不同的空间步长(如 5、10、20 或 30 cm, 与田间实测点的布设类似) 从  $\theta(z, T)$  中选取  $N$  个值  $\theta^*(z_i, T)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ )。考虑到实际过程中测量误差的存在, 含水率“实测值”  $\theta(z_i, T)$  按如下方式产生:

$$\theta(z_i, T) = \theta^*(z_i, T) + \text{rand}[\epsilon_p] \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

式中  $\epsilon_p$  —— 土壤水分测定装置(如 TDR、中子仪、负压计等)的量测精度;  $\text{rand}$  —— 随机算子,  $\text{rand}[\epsilon_p] \in [-\epsilon_p, \epsilon_p]$ 。

利用式(6)、(7) 对“实测值”  $\theta(z_i, T)$  进行拟合, 获得  $T$  时刻连续而平滑的含水率分布。

采用式(5) 计算出理论平均根系吸水速率  $\bar{S}(z, T)$ 。

应用反求方法和步骤 所产生的“实测”含水

率剖面模拟平均根系吸水速率  $\hat{S}^*(z, T)$ 。

分析比较平均根系吸水速率理论分布(步骤 ) 与模拟值(步骤 ) 间的误差。

### 2.1.3 平均根系吸水速率理论分布与模拟值的误差

平均根系吸水速率理论分布  $\bar{S}(z, T)$  与模拟值  $\hat{S}^*(z, T)$  间的误差可以两种方式来表示: 其一为最大绝对误差  $MAE$ , 即:

$$MAE = \max_{i=1,2,\dots,N} |\hat{S}^*(z_i, T) - \bar{S}(z_i, T)| \quad (13)$$

其二为总体相对误差  $ORE$ , 即:

$$ORE(T) = \left| \frac{Ta^*(T) - Ta(T)}{Ta(T)} \right| = \left| 1 - \frac{Ta^*(T)}{Ta(T)} \right| \quad (14)$$

$$Ta(T) = \int_0^{L_r} \bar{S}(z, T) dz = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^{L_r} S(z, t) dt dz \quad (15)$$

$$Ta^*(T) = \int_0^{L_r} \hat{S}^*(z, T) dz \quad (16)$$

式中  $Ta(T), Ta^*(T)$  —— 0 ~  $T$  时段内平均蒸腾强度的理论值和模拟值,  $cm \cdot d^{-1}$ 。

## 2.2 土柱实验简介

本文选用冬小麦(苗期)的土柱实验结果来模拟分析其根系吸水规律。土柱实验于 2001 年 4~ 6 月在室内进行, 目的是为了探索冬小麦(苗期)根系形态与功能间的关系。为保证冬小麦生长所需的光、热条件, 采用空调控制室内温度、农艺钠灯补光, 每天光照时间 10~ 12 h。实验用土柱为灰色 PVC 管, 高 45 cm, 内径 10 cm, 按  $1.64 g \cdot cm^{-3}$  的干容重装填细沙土, 装填高度 40 cm, 分别于 5、10、15、25、35 cm 处理设负压计。参照 Hom aee<sup>[14]</sup> 的做法, 待小麦出苗后, 在沙土表面覆盖 3 cm 厚的石英砂, 以尽可能减少或防止土面蒸发。

实验在冬小麦苗期进行, 供试品种为农大 189。每个土柱内定株 4 棵, 相当于大田常规密度 450~ 500 万株  $\cdot hm^{-2}$ , 小麦出苗后开始不同的水分处理, 实验过程进行的具体时间如下: 4 月 27 日播种, 5 月 3 日出苗, 5 月 10 日开始处理, 6 月 8 日实验结束。共设置 1 个对照处理  $R$ 、2 个水分胁迫处理  $W_1$  和  $W_2$ , 每个处理 3 次重复。对照  $R$  保证水分充分供给, 每 3 d 浇水 1 次, 灌水量根据土柱的水分消耗情况确定; 处理  $W_1$  和  $W_2$  每 6 d 浇水 1 次, 灌水量分别为 6 d 内对照  $R$  灌水总量的 70% 和 50%。实验过程中, 各处理均保证养分充足。实验结束后的根系测定结果表明: 各处理中小麦根系的根深度均在 35 cm 以内。

为了具体了解石英砂覆盖层对土面蒸发的影响, 另设置 3 个土柱, 装填情况同上(石英砂覆盖 3 cm, 装填细沙土干容重  $1.64 g \cdot cm^{-3}$ ), 无作物, 供水比例与上述 3 种处理类似, 每天称重获取土面蒸发量。

## 3 结果与讨论

本文采用隐式差分法求解各定解问题, 求解方程(1)~ (4)的数值迭代控制标准取相对误差 1%, 取等空间步长  $\Delta z = 1 cm$ , 时间步长  $\Delta t^{j+1} = 1.25\Delta t^j$ , 其中  $j$  与  $j + 1$  均表示时间步长的序数。数值方法、程序及土柱实验的水分运移参数均经过了严格的检验, 限于篇幅,

这里不再给出检验结果。

### 3.1 平均根系吸水速率反求方法的检验

#### 3.1.1 数值实验参数

水分运移参数和根系吸水参数均选自Musters和Bouten<sup>[7]</sup>一文。 $\theta = 0.26 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\theta_r = 0.03 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , 分别为饱和、残余含水量;  $K_s = 90 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 为饱和导水率;  $\alpha = 0.058 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n = 1.88$ ,  $m = 1 - 1/n = 0.468$  均为 van Genuchten<sup>[15]</sup> 公式拟合参数; 式(8)~(11)中的参数包括:  $T_p = 0.6 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $h_1 = -1500 \text{ cm}$ ,  $h_2 = -64 \text{ cm}$ ,  $\rho = 0.34$ ,  $\beta = 4600 \text{ cm}^2$ ,  $L_r = 150 \text{ cm}$ ; 考虑到式(10), 地表处的根长密度  $\gamma(0)$  无须给定。

数值实验中的其它参数设定为: 当  $t \leq 5 \text{ d}$  时  $E(t) = 0.02 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $t > 5 \text{ d}$  时  $E(t) = 0$ ; 平均根系吸水速率反求方法的迭代控制标准<sup>[11]</sup> 取为  $\epsilon = 10^{-4}$ ; 参照文献[7]所述 TDR 的测量误差, 取量测精度  $\epsilon_p = 0.005 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$  (式(7), (12)); 初始条件取为土壤水分入渗剖面(见图1); 含水率剖面“实测值”的选取: 首先设定模拟深度  $L = 300 \text{ cm}$ , 下边界条件取为  $h(L, t) = 0$ , 按

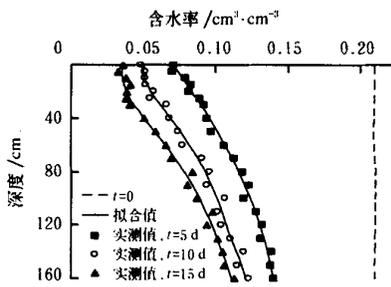


图1 不同时刻含水率剖面“实测值”及拟合分布

Fig. 1 Randomly generated ('measured' values) and fitted soil water content profiles at different times

2.1.2节步骤, 模拟获得不同时刻的理论含水率剖面分布, 然后按步骤 形成含水率剖面“实测值”; 在模拟平均根系吸水速率时, 模拟区域深度  $L$  被重新设定为  $160 \text{ cm}$ , 相应的下边界条件则取为该深度处所产生的“实测值”。不同时刻含水率剖面“实测值”及按步骤所得的拟合含水率剖面如图1所示。

#### 3.1.2 检验结果与讨论

影响平均根系吸水速率数值迭代反求方法准确性、稳定性、收敛性的因素众多, 但实测(平均)时间间隔  $T$  和实测空间(深度)步长  $SI$  无疑是两个极为重要的影响因子, 以下主要探讨  $T$  和  $SI$  对该反求方法的影响。应用上述数值实验参数, “实测”含水率剖面及反求方法, 在不同时间间隔  $T$  和不同空间步长  $SI$  的条件下, 对平均根系吸水速率的分布进行了模拟反求, 其理论分布与模拟值的对比结果分别如图2a, 2b, 2c所示, 相应的最大绝对误差  $MAE$ 、总体相对误差  $ORE$  及反求迭代次数见表1。

表1 不同算例模拟所得平均根系吸水速率分布的最大绝对误差  $MAE$ 、总体相对误差  $ORE$  及反求迭代次数

Table 1 Maximal absolute error ( $MAE$ ) and overall relative errors ( $ORE$ ) of the estimated average root water uptake rates, and the iteration number of the numerical examples

算例 (图名)	空间步长 $SI/\text{cm}$	平均时段 $T/\text{d}$	$MAE$ $/\text{d}^{-1}$	$ORE$ $\%$	迭代 次数
2a	5, 10	5	0.0011	13.7	4
		10	0.0012	9.8	4
		15	0.0006	3.8	4
2b	5, 20	5	0.0009	12.6	4
		10	0.0015	13.1	4
		15	0.008	1.4	5
2c	5, 30	5	0.0005	3.5	4
		10	0.0019	21.9	4
		15	0.0012	9.2	4

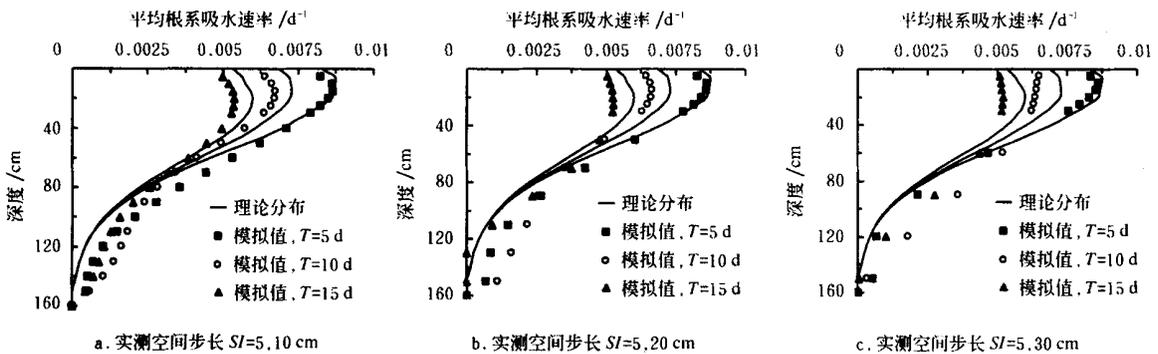


图2 平均根系吸水速率理论分布与模拟值的对比

Fig. 2 Comparison of estimated and theoretical distributions of the average root water uptake rate with different spatial interval  $SI$  and different time interval  $T$

实测点间隔  $SI$  越小, 所反映的含水率剖面的信息越准确, 但为了尽量减少工作量, 人们又常常希望能以较少的测量点来表征整个剖面的含水率变化规律, 所

以, 关于  $SI$  取值的探讨具有重要的实际意义。由于测量仪器(探头)的限制,  $SI$  很难被设定在  $5 \text{ cm}$  以内, 考虑到近地表处根系吸水变化强烈, 本数值实验中, 当  $0 < z$

30 cm 时, 取  $SI = 5$  cm; 当  $z > 30$  cm 时,  $SI$  分别设定为 10, 20 和 30 cm。数值实验结果(图 2 和表 1) 表明: 总体上来讲,  $SI$  值越小, 反求方法的模拟准确度越高, 当  $SI = 20$  cm 时, 平均根系吸水速率模拟值的最大绝对误差  $MAE$ 、总体相对误差  $ORE$  均在  $0.0015 d^{-1}$  和 15% 以内。具体应用上述反求方法时, 在根系吸水较为强烈的深度(如地表) 附近, 建议最好选用  $SI = 5 \sim 10$  cm; 若根系扎根较深(如树根), 为了减轻劳动强度, 可在根系吸水较弱的地方设定  $SI = 20$  cm。

田间实际监测含水率时, 实测时间间隔  $T$  通常取为 1, 2, 5, 10 和 15 d。当  $T = 1, 2$  d 时, 由于测量误差  $\epsilon_p = 0.005 cm^3 \cdot cm^{-3}$  的存在, 平均根系吸水速率模拟值的误差可能分别高达  $0.005 d^{-1}$  和  $0.0025 d^{-1}$  [11], 因此, 本文仅讨论  $T = 5, 10, 15$  d 时的情形。数值实验结果表明: 当  $SI = 5 \sim 10$  cm 时, 平均时段取值的增加可以适当地减小模拟值的误差(图 2a 和表 1), 这可能是由于平均时段的延长有助于“抹平”中间的变化过程, 从而使得模拟值与理论值间的误差从平均水平上呈现逐渐减小的趋势。但当  $T > 10$  d 时, 平均根系吸水速率的模拟对于定量描述根系层土壤水分变化动态的意义已不是十分显著。有鉴于此, 实际应用上述数值迭代方法反求平均根系吸水速率时, 最好选择平均时段  $T$  介于  $5 \sim 10$  d 之内。

### 3.2 平均根系吸水速率反求方法的应用

#### 3.2.1 土柱实验参数

水分运移参数仍按 van Genuchten [15] 推荐的公式给定:  $\theta = 0.4068 cm^3 \cdot cm^{-3}$ ,  $\theta_r = 0.0225 cm^3 \cdot cm^{-3}$ ,  $K_s = 280.8 cm \cdot d^{-1}$ ,  $\alpha = 0.0478 cm^{-1}$ ,  $n = 2.4080$ ,  $m = 0.5847$ , 各符号意义同上。尽管各土柱均覆盖石英砂 3 cm, 但无作物土柱称重结果表明, 各处理仍然存在土面蒸发, 每个土柱蒸发强度的大小基本介于  $2.4 \sim 3.3 g \cdot d^{-1}$  之间, 由于实验阶段处于冬小麦苗期, 取无作物土柱蒸发强度全部实测数据的平均值  $3.0 g \cdot d^{-1}$  作为本模型的上边界条件, 即  $E(t) = 0.038 cm \cdot d^{-1}$ 。模拟深度取为  $L = 35$  cm。平均根系吸水速率反求方法的迭代控制标准  $\epsilon$  和量测精度  $\epsilon_p$  仍分别取为  $10^{-4}$  和  $0.005 cm^3 \cdot cm^{-3}$ 。

对照  $R$  每 3 d 浇水 1 次, 含水率剖面实测时间间隔无法满足上述反求方法对平均时段的要求, 本文仅对处理  $W1$  和  $W2$  的根系吸水进行模拟分析。5 月 15 日至 6 月 7 日期间, 处理  $W1$  和  $W2$  土柱中实测含水率的变化情况分别如图 3a, 3b 所示(为使图形线条容易分清, 图 3a 和 3b 中均略去了 5 月 27 日和 6 月 1 日的含水率数据)。

#### 3.2.2 反求方法应用结果与分析

在拟合实测含水量剖面的基础上, 应用上述参数及反求方法, 对土柱实验处理  $W1$  和  $W2$  不同时间的平均根系吸水速率分布进行了模拟反求, 模拟结果分别如图 4a, 4b 所示(注: 由于实验在温室条件下进行, 小麦的根系吸水速率要大大高于田间情况)。

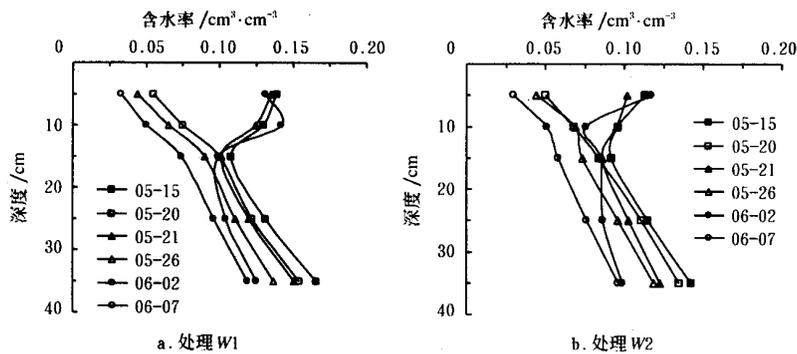


图 3 不同时刻含水量剖面实测分布(土柱实验)

Fig 3 Measured soil water content profiles at different times in the soil column experiment

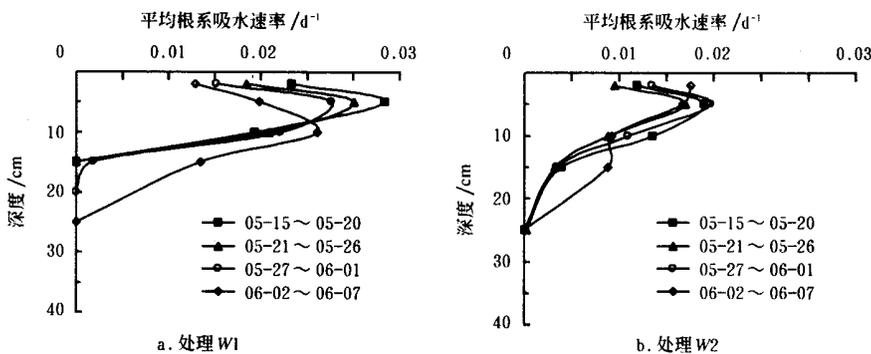


图 4 不同时间平均根系吸水速率模拟分布(土柱实验)

Fig 4 Simulated average root water uptake rate distributions at different times in the soil column experiment

比较图 4a 和 4b 的模拟结果可以发现: 由于供水频繁, 本土柱实验中, 苗期冬小麦的吸水高峰基本位于 5~15 cm 之间; 整体上, 处理 W 1 的根系吸水速率均大大高于处理 W 2 的同期水平, 表明水分的持续胁迫(如处理 W 2) 可能抑制根系的生长, 降低根系的吸收功能。就处理 W 1 而言(图 4a), 早期(5 月 15 日~ 6 月 1 日)的水分供应相对较为充分(图 3a), 根系的吸水范围和吸水高峰主要集中于土层上部 0~15 cm, 但水分胁迫的持续作用仍使得根系的吸水速率渐次降低。随着小麦的生长和水分胁迫的继续, 从 6 月 2 日至 6 月 7 日, 上部 0~10 cm 土层的水分已无法满足作物生长的需要, 从而导致其根系吸水速率明显减小, 吸水高峰下移, 吸水范围扩大, 引起下部土层水分消耗量的增加。

水分胁迫对处理 W 2 的影响则更为显著(图 4b), 其吸水高峰和吸水量均大大低于处理 W 1, 但吸水范围却较处理 W 1 的同期区间为大。频繁的灌水可能使得该处理土柱中的小麦根系仍然大量集中在 0~15 cm 土层内。尽管苗期冬小麦根系具有更高的吸水能力(参见图 4a), 但因该处理供应的水量毕竟相当有限, 因而实验期内处理 W 2 中 0~15 cm 土层内不同时段平均根系吸水速率的差异并不十分显著, 只是后期(6 月 2 日~ 6 月 7 日) 15~25 cm 土层内的吸水量增加幅度较大。

#### 4 结 语

通过数值实验方法, 本文对左强等<sup>[11]</sup>提出的平均根系吸水速率的数值迭代反求方法进行了检验, 结果表明: 该方法的准确性和稳定性依赖于剖面土壤含水率的实测时间间隔  $T$  和实测点间距  $SI$ , 当  $5\text{ d} < T < 15\text{ d}$ ,  $SI < 20\text{ cm}$  时, 平均根系吸水速率的最大绝对误差和总体相对误差分别在  $0.0015\text{ d}^{-1}$  和 15% 以下。为了尽可能减少误差并顾及到土壤水分动态变化的跟踪, 实际应用该反求方法时, 建议取平均时段  $T = 5 \sim 10\text{ d}$ , 实测空间步长  $SI = 5 \sim 10\text{ cm}$ , 若植物扎根深度较大, 在根系吸水变化不太强烈的深度附近, 可设置  $SI = 20\text{ cm}$ 。

在检验的基础上, 本文还应用该数值迭代反求方法, 对水分胁迫条件下土柱实验中苗期冬小麦根系的吸水规律进行了模拟分析, 模拟结果表明: 持续的水分胁迫可能显著地抑制小麦根系的生长, 降低其吸水功能; 由于较频繁地从土柱上部浇水(每 6 d 灌 1 次), 其根系吸水仍优先发生于根系较为密集的上部, 只有当上部土层水分不足时, 其吸水范围才渐次往下扩大。

除可直接用于模拟分析根系吸水速率分布外, 该反

求方法还可以更进一步地应用于检验各种根系吸水模型、估算吸水函数中的参数、探索根系吸水与各影响因子间的关系等方面。

#### [参 考 文 献]

- [1] Molz F J. Models of water transport in the soil plant system: A review [J]. *Water Resour Res*, 1981, 17: 1245~1260
- [2] Gardner W R. Modeling water uptake by roots [J]. *Irrig Sci*, 1991, 12: 109~114
- [3] Wu J Q, Zhang R D, Gui S X. Modeling soil water movement with water uptake by roots [J]. *Plant and Soil*, 1999, 215: 7~17
- [4] 邵明安, 陈志雄. SPAC 中的水分运动 [A]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊 [C], 1991, 13: 3~12
- [5] 邵明安, 黄明斌. 土-根系统水动力学 [M]. 陕西西安: 陕西科学技术出版社, 2000, 134~155
- [6] 邵明安, 康绍忠, 蔡焕杰. 植物根系轴向水流阻力的研究 [A]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊 [C], 1991, 13: 52~56
- [7] Musters P A D, Bouten W. A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model [J]. *J Hydrology*, 2000, 227: 273~286
- [8] Coelho F E, Or D. A parametric model for two-dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1996, 60: 1039~1049
- [9] 姚建文. 作物生长条件下土壤含水量预测的数学模型 [J]. *水利学报*, 1991, (9): 32~38
- [10] 邵明安. 植物根系吸收土壤水分的一个简化模式 [A]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊 [C], 1991, 13: 33~37
- [11] 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
- [12] 徐士良. 常用算法及 FORTRAN 程序集 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995, 197~210
- [13] Feddes R A, Bresler E, Neuman S P. Field test of a modified numerical model for water uptake by root system [J]. *Water Resour Res*, 1974, 10: 1199~1206
- [14] Homae M. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress [D]. Wageningen Agricultural University, the Netherlands, 1999, 41~54
- [15] Van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1980, 44: 892~898

## Accuracy and stability of the inverse method to estimate the average root-water-uptake rate and its application

Zuo Qiang, Wang Dong, Luo Changshou

(College of Resources and Environment, and Key Laboratory of Plant-Soil Interactions,  
Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The accuracy and convergence of the inverse method to estimate the average root-water-uptake rate, which was proposed by Zuo, et al (2001), are mainly dependent on the following two factors: the time interval ( $T$ ) between the two successive measurements of soil water content distributions, and the spatial interval ( $SI$ ) of the measured data along the soil profile. Examples of the numerical experiment were taken to examine the effect of different  $T$  and  $SI$  on the accuracy and stability of the method in this paper. In practice, it is recommended to choose  $5 \text{ d} < T < 15 \text{ d}$  and  $SI < 20 \text{ cm}$  so as to keep the maximal absolute error and the overall relative error between the estimated and the real average root-water-uptake rate within  $0.0015 \text{ d}^{-1}$  and  $15\%$ , respectively. Furthermore, the inverse method was applied to simulate the average root-water-uptake rate distributions of winter wheat at seedling stage under water stress. Winter wheat was planted in the soil columns and the experiment was conducted in a greenhouse with 2 water stress levels. The simulated results showed that water stress reduced root-water-uptake of winter wheat remarkably and probably inhibited the roots growth as well. The scope of winter wheat root-water-uptake was adjusted by itself to the lower soil layer where soil moisture was appropriate when soil water supply in the upper soil layer was deficient.

**Key words:** average root-water-uptake rate; soil water; inverse method; numerical simulation

### 本刊 2002 年第 6 期和 2003 年第 1~ 2 期 各期所刊论文中的优秀英文摘要

综合专家审稿意见、科技论文英文摘要的写作要求及本刊聘请的外教的评审意见, 选出 2002 年第 6 期(第 45 页)和 2003 年第 1 期(第 53 页)及第 2 期(第 159 页)各期所刊论文中最优秀的英文摘要分别为:

1. **Title:** Field Evaluation of Sprinkler Efficiency Under Arid Conditions

**Authors:** Li Jiusheng, Rao Minjie, Zhang Jianjun

2. **Title:** Optimal choice of mass absorption coefficient and analysis of its influence

on measured error in algorithm of using gamma ray to measure runoff sediment concentration

**Authors:** Lei Tingwu, Liu Qingkun,

Huang Xingfa, Zhao Jun, Wang Hui

3. **Title:** Microscopic structure of rough rice after sun drying

**Authors:** Li Dong, Mao Zhihui

(本 刊)