

# 应用实测含水率剖面估算冬小麦相对根长密度分布

左 强, 孟 雷, 王 东

(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, 北京 100094)

摘 要: 根长密度是根系研究中不可缺少的一个参数, 但其适时准确的测定却存在相当的困难。该文应用平均根系吸水速率反求方法, 提出了在已知两个实测含水率剖面的条件下, 估算相对根长密度分布的方法, 并通过田间实验和土柱实验对该方法进行了检验, 结果表明: 该方法可以较好地估算相对根长密度的分布, 为土壤水分运移的连续模拟提供较为可靠的参数。

关键词: 冬小麦; 相对根长密度; 根系吸水速率; 土壤水; 反求方法

中图分类号: S152.7; S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)04-0001-06

## 0 引 言

由于根-土系统的复杂性, 至少到目前为止, 有关根系在土壤环境中的真实行为, 人们尚缺乏足够的认识<sup>[1]</sup>。然而, 根系在土壤中的形态、数量、分布及其生长发育规律对作物生长、土壤水分的再分布及化学物质在土壤中运移的作用又是极为重要的。根长密度作为根系研究的一个基本项目, 反映了根系生长发育的状况, 影响着作物对水分、矿质营养元素的吸收利用, 是众多根系吸收模型不可缺少的参数<sup>[2-7]</sup>。在假定植物最大根系吸水速率与根长密度分布成线性正比关系<sup>[2,8]</sup>的前提下, Wu 等<sup>[9]</sup>提出了相对根长密度的概念; Dirksen 等<sup>[10]</sup>、Homae<sup>[5]</sup>、Musters 和 Bouten<sup>[7]</sup>等给出了根系吸水模型中水分胁迫系数的不同表达形式; Coelho 和 Or<sup>[11]</sup>、Musters 和 Bouten<sup>[7]</sup>、Vrugt 等<sup>[12]</sup>等人应用不同的优化算法, 探讨了根系吸水模型中各参数的确定方法; 姚建文<sup>[13]</sup>、左强等<sup>[14,15]</sup>、Zuo 和 Zhang<sup>[16]</sup>等探讨了根系吸水速率的反求方法。

尽管根长密度并非不可测定, 但在田间适时准确地采集根系也绝非易事, 因而, 即便在已建立根系吸水模型的基础上, 由于适时适地根长密度分布参数的缺乏, 各类根系吸水模型的应用仍存在相当的困难。关于不同作物、各种环境条件下根长密度在土壤剖面上的分布规律, 国内外做了大量的研究工作<sup>[17-20]</sup>。但是, 由于根系的生长环境复杂, 影响因素众多, 即便处于同样地点、同一生育阶段的同一种作物, 其根长密度的分布常常也会呈现出较大的差异。因此, 探索根长密度分布的估算方法对于植物生长条件下土壤水分运移规律的模拟、根-冠关系的研究均具有十分重要的意义。

在土壤-植物系统中, 土壤含水率的分布是一个综合指标, 它反映了根系吸水、土壤环境、气象条件等因素

彼此间的相互关系, 也就是说, 土壤含水率分布的变化应包含根系吸水、根长密度分布的信息。本文将在引入相对根长密度概念<sup>[9]</sup>的基础上, 应用文献<sup>[15,16]</sup>提出的平均根系吸水速率的反求方法, 对相对根长密度分布的估算方法进行探讨, 并应用冬小麦栽培田间实验和土柱实验, 对估算方法进行检验。

## 1 材料与方 法

### 1.1 根系吸水模型

植物生长条件下, 处于蒸散过程的垂直一维土壤水分运移问题可描述为

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

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

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

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

式中  $h$ ——土壤水基质势, cm;  $C(h)$ ——容水度,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $K(h)$ ——非饱和水力传导度,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $S(z, t)$ ——根系吸水速率,  $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ , 表示单位时间单位土体内的根系吸水量;  $L$ ——模拟深度, cm, 且  $L > L_r, L_r$ ——最刁扎根深度, cm;  $E(t)$ ——土面蒸发强度,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $h_L(t)$ ——下边界土壤水基质势实测值, cm;  $z$ ——垂向坐标, cm, 向下为正;  $t$ ——时间, d。

对于根系吸水函数  $S(z, t)$ , 选用如下较为常用的形式<sup>[2,7-9]</sup>

$$S(z, t) = Y(h) S_{\max}(z) = Y(h) \frac{Tp}{L_r} L_{\text{rd}}(z) \quad (5)$$

$$L_{\text{rd}}(z) = \frac{Y(z)}{\int_{L_r}^L Y(z) dz} \quad (6)$$

$$Y(h) = \begin{cases} 0 & h(z, t) < h_1 \\ 1 - \left[ \frac{h(z, t) - h_2}{h_1 - h_2} \right]^\rho & h_1 < h(z, t) < h_2 \\ 1 & h(z, t) > h_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $S_{\max}$ ——最大根系吸水速率<sup>[2,8]</sup>,  $\text{d}^{-1}$ ;  $Tp$ ——潜在蒸腾强度,  $\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;  $L_{\text{rd}}(z)$ ——相对根长密度<sup>[9]</sup>;  $Y(z)$ ——根长密度,  $\text{cm} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $Y(h)$ ——水分胁迫系

收稿日期: 2003-05-22 修订日期: 2004-04-20

基金项目: 国家 863 项目 (2001AA 242031); 霍英东教育基金项目及中以国际合作项目的部分研究内容

作者简介: 左 强 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤物理与节水农业机理研究。北京 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。Email: qiangzuo@cau.edu.cn

数<sup>[7]</sup>,其中 $h_1$ 、 $h_2$ 分别为 $Y(h)$ 的临界值,cm,当 $h(z,t)$ 小于 $h_2$ 时, $Y(h)$ 随 $h(z,t)$ 的降低而减小,直至小于 $h_1$ 时, $Y(h) = 0$ ;  $\rho$ ——拟合参数。

上述根系吸水模型中, $T_p$ 与 $L_r$ 常通过实测确定或经验公式计算。针对水分胁迫系数 $Y$ ,Dirksen等<sup>[10]</sup>、Homae<sup>[5]</sup>等人的研究表明:为了避免土壤水分滞后效应的影响, $Y$ 不应表示为土壤含水率的函数<sup>[21]</sup>,而应表示为土壤水基质势 $h$ 的函数,即 $Y(h)$ ,且 $Y(h)$ 与 $h$ 的关系并非简单的线性关系<sup>[8]</sup>,而应以更为复杂的非线性函数来表征。因此,在综合大量已有研究成果的基础上,Musters和Bouten<sup>[7]</sup>提出了如式(7)所示的非线性函数,从而使水分胁迫系数的计算更符合实际。由于其中 $Y(h)$ 的阈值 $h_1$ 、 $h_2$ 均有较明确的物理意义,经过大量的统计、优化和实验验证,Musters和Bouten<sup>[7]</sup>得到上述阈值的取值结果分别为 $h_1 = -1500\text{cm}$ , $h_2 = -64\text{cm}$ ,而指数 $\rho$ 则随土壤、植物和气象条件等因素而变化,需根据具体情况优化确定。本文计算过程中, $h_1$ 和 $h_2$ 采用文献<sup>[7]</sup>的推荐值,指数 $\rho$ 按如下试算法优化获取:若已知两时刻基质势(或含水率)剖面的实测值及期间平均根长密度 $Y(z)$ 的分布,由于根系吸水模型(式(5))中除 $\rho$ 外的其它各参数均已确定,给定某一 $\rho$ 值,即可模拟两时刻内剖面土壤含水率的变化规律,从而计算各实测点含水率与模拟值的误差平方和( $SSE$ ),根据 $SSE$ 的大小,不断调整 $\rho$ 值,直至 $SSE$ 最小,此时 $\rho$ 的取值即为当地条件下指数 $\rho$ 的优化结果。通常情况下,含水率(或基质势)剖面的实测包括从上至下的若干个深度,由于根系吸水和土面蒸发的作用,根系层内的土壤含水率分布会呈现出较大的差异(多为上部土层含水率小,下部土层含水率大),即上述优化过程一般均包含较大的含水率(或基质势)范围,故优化所得的 $\rho$ 值应较为有效可靠。当然,该优化结果必须经严格地检验验证后方可用于实际。

## 1.2 相对根长密度 $L_{rd}(z)$ 的估算

给定两时刻( $t = 0, T$ )含水率剖面的实测值 $\theta(z, 0)$ 与 $\theta(z, T)$ ,则 $0 \sim T$ 时段内土壤剖面上的平均根系吸水速率 $\bar{S}(z, T)$ 可按文献<sup>[15, 16]</sup>推荐的方法求出。假定 $0 \sim T$ 时段内, $T_p$ 、 $L_r$ 及根长密度分布 $Y(z)$ 的变化不大,则由式(5)可得

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

$$\frac{T_p L_{rd}(z) [Y(h(z, 0))] + Y(h(z, T))}{L_r} \quad (8)$$

在已建立根系吸水模型的前提下,式(8)可用于估算相对根长密度的分布 $L_{rd}(z)$ 。

实际过程中,可按如下程序应用上述估算方法,使植物生长条件下土壤水分运移规律的模拟过程得以连续进行,而勿须费时费力地测定根长密度的分布。首先需获得两个实测含水率剖面 $\theta(z, 0)$ 与 $\theta(z, T)$ ;应用平均根系吸水速率的反求方法<sup>[15, 16]</sup>获得 $\bar{S}(z, 0 \sim T)$ ;应用式(8)估算 $0 \sim T$ 时段内的相对根长密度分布

$L_{rd}(z)$ ;假定 $0 \sim 2T$ 时段内, $T_p$ 、 $L_r$ 、 $L_{rd}(z)$ 的变化不大,估算获得的 $L_{rd}(z)$ 代入式(5)可构成 $0 \sim 2T$ 时段内的根系吸水模型;求解方程(1)~(4),预报 $2T$ 时刻的含水率分布 $\theta^*(z, 2T)$ ;至 $2T$ 时刻时,以实测值 $\theta(z, 2T)$ 校正 $\theta^*(z, 2T)$ ,应用 $\theta(z, T)$ 与 $\theta(z, 2T)$ 重复上述过程。于是,在勿须测定根系分布的条件下,土壤水分动态的预测预报可连续进行。

## 1.3 冬小麦(苗期)栽培室内土柱实验

为检验上述估算方法的近似程度,设置冬小麦室内土柱实验,土柱为高45 cm、内径10 cm的灰色PVC管,按 $1.64 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的干容重填装砂土,装填深度40 cm。部分土柱自土壤表面起,分别于5、10、15、25、35 cm处理设张力计,以测定土壤水基质势。为便于称重,张力计陶瓷头与测压牌之间的连接导管采用易拆卸的连接器连接。

实验在冬小麦苗期进行,供试品种为农大189,种子经处理后播于1.5~2.0 cm深度处,每柱4株,均匀分布,相当于大田常规种植密度 $450 \text{ 万株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。出苗后,土壤表面覆盖3 cm厚的石英砂,以尽可能防止或减少土面蒸发。实验进程如下:2001年4月27日播种,5月3日出苗,5月10日开始处理,6月8日结束。

实验共设置3个处理:对照处理R,保证土壤水分充分供应,每3 d浇营养液一次,称重法控制土壤含水率;水分胁迫处理W1,每6 d浇营养液一次,浇水量为同期对照R的50%;水分胁迫处理W2,每6 d浇营养液一次,浇水量为同期对照的70%。处理R与W1均设置13个重复,重复的内容如下:整个实验期内不破坏的土柱3个,供观测土壤水基质势的变化;5月10日开始处理后,每6 d破坏处理R及W1的土柱各2个,供获取根样,实验期内共取根样5次。处理W2设置3个重复,均埋设张力计,供验证根系吸水模型,至6月1日拆除时,取根样测定根长密度。各土柱均保证养分充分供应,无张力计的土柱每天称质量1次,埋设张力计的土柱每3 d称质量1次,以获取各处理的蒸散强度。

为保证冬小麦生长所需的温度和光照条件,分别采用空调控制室内温度、农艺钠灯补光,每天光照时间为10~12 h。

冬小麦根系的取样与测定方法如下:装填砂土之前,将供破坏的土柱沿轴向对半劈开,再用PVC胶粘好,以PVC板封底。取样时,用薄而锋利的小刀沿管缝将管卸开,按4 cm的深度间隔横向切割土体,然后冲洗挑根,将根系分层平铺于 $25 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的玻璃皿中,经SNAP SCAN 1236型扫描仪(德国AGFA公司生产)扫描后,采用WinRHIZO根系分析软件(加拿大Regent Instruments公司研制)对之进行分析,从而获得各处理不同阶段根长密度的分布资料。

经测定、检验后,确定本土柱实验中的各参数值如下:

1) 土面蒸发强度 $E$ :为了解土面蒸发强度的变化规律,另平行布置无作物处理R及W1各3个土柱。除不种植作物外,其它实验内容(如灌水量、灌水次数、覆

盖等)均与 R 与 W 1 相同。定期称重结果表明, 尽管覆盖了 3 cm 厚的石英砂, 土柱仍存在土面蒸发, 但蒸发强度 E 的变化不大, 整个实验期内基本处于每柱 2.4~3.3 g · d<sup>-1</sup> 之间。由于供试冬小麦处于苗期, 故取实验期内的平均土面蒸发强度  $E = 0.038 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$  作为各土柱的上边界条件。

2) 潜在蒸腾强度  $T_p$ : 各土柱实际称重测定的值为蒸散强度  $ET$ , 由于对照 R 为充分供水, 可认为从对照 R 的实测  $ET$  值中扣除土面蒸发强度  $E$  后即为潜在蒸腾强度  $T_p$ 。

3) 水分特征曲线: 采用 van Genuchten<sup>[22]</sup> 推荐的形式拟合,  $\theta_s = 0.406 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ,  $\theta_r = 0.0225 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ , 分别为饱和含水率及残余含水率;  $\alpha = 0.0478 \text{ cm}^{-1}$ ,  $n = 2.408$ ,  $m = 0.5847$ , 均为拟合参数, 其中  $m = 1 - 1/n$ 。

4) 非饱和水力传导度  $K(h)$ : 按 van Genuchten<sup>[22]</sup> 推荐的形式给定, 其中饱和水力传导度  $K_s = 280.8 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

### 1.4 冬小麦栽培田间实验

田间实验于 2002 年 3 月 15 日至 6 月 5 日在北京市通县永乐店北京市水利科学研究所节水试验站内进行, 种植作物为冬小麦。该实验的目的主要是研究污水灌溉条件下某些有害元素的迁移与转化规律, 共设置若干处理和小区(面积均为 2.0 m × 3.0 m), 小区周围以土工膜分隔, 以尽可能避免土壤水分的水平运移。部分小区中埋设有张力计和中子管, 以分别观测剖面土壤水基质势和含水率的变化规律, 其埋设(或观测)深度均为 10、20、30、40、50、70、90、120、150 和 180 cm, 张力计每天观测一次, 中子仪每 5 d 观测一次。本文的实验资料均取自其中的淡水灌溉对照小区(FW 1 处理, 2 次重复: 1 号、6 号小区), 实验期内共灌水 4 次, 灌水总量 180 mm, 施肥量与当地常规水平一致。

实验区 0~200 cm 间的土壤大致分为两层: 0~70 cm 为砂壤土, 70 cm 以下为粉砂土。相应的水力参数如表 1 所示, 其中各符号的意义同土柱实验。

表 1 田间实验两种土壤的水力参数\*

Table 1 Soil hydraulic parameters in the field experiment

深度/cm	土壤类型	$K_s/\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$	$\theta_s/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\theta_r/\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$
0~70	砂壤土	43.2	0.48	0.12	0.00689	2.171
70~200	粉砂土	86.0	0.50	0.10	0.00567	2.998

注: \* 表中参数由中国农业大学任理教授和黄冠华教授提供。

采用根钻法获取不同生育期冬小麦根长密度的分布, 实验期内共取根 4 次。根钻直径 10 cm, 高 15 cm。取根时, 按 15 cm 的间距分层往下钻取土样, 经冲洗、挑根后, 扫描分析各层次的根长密度, 具体测量分析方法同室内土柱实验。

田间实验中的其他参数还包括:

1) 土面蒸发强度  $E$ : 土面蒸发利用 Microlysimeter (MLs) 直接测定计算<sup>[14, 23]</sup>。每个小区设置三个重复, 分别布置在小区的不同位置。MLs 的材料、规格与测定方法与文献[14]所介绍的完全一致。所采用电子天平(型号: Sartorius Weender Landstrasse 94-108; 产地: 德国)的称重范围为 0~15 kg, 精度为: 7 kg 以下, ±0.2 g; 7 kg 以上, ±0.5 g。

2) 潜在蒸腾强度  $T_p$  的计算: 在已知相关气象观测资料的基础上, 根据改进的 Penman 公式分别计算潜在蒸散强度  $ET_p$ <sup>[24]</sup> 和潜在土面蒸发强度  $E_p$ <sup>[25]</sup>, 由  $T_p = ET_p - E_p$  计算获得。

## 2 结果与讨论

### 2.1 根系吸水模型的建立与检验

#### 2.1.1 土柱实验

选用 W 1 处理 5 月 27 日至 6 月 1 日之间的实测含水率剖面(图 1)及根长密度分布(图 2)优化式(7)水分胁迫系数中的指数  $\rho$ , 结果表明: 当  $\rho = 0.175$  时, 含水率实测值与模拟值之间的误差平方和最小。为进一步检

验所建立的根系吸水模型的可靠性, 将优化结果  $\rho = 0.175$  代入式(5), 应用同期的实测根长密度分布(图 2), 对 W 2 处理 5 月 27 日至 6 月 1 日期间剖面土壤含水率的变化规律进行了模拟, 模拟值与实测值的对比结果见图 1。图示表明: 优化所得的  $\rho$  值及所建立的根系吸水模型基本可靠, 可用于分析该土柱实验条件下冬小麦根系的吸水规律。

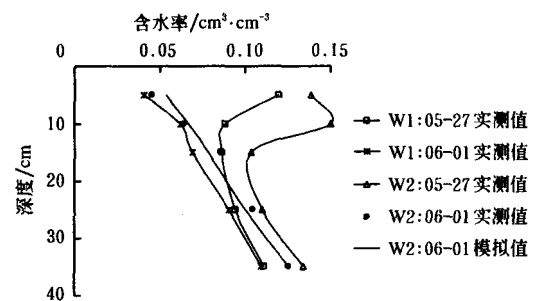


图 1 土柱实验处理 W 1 和 W 2 含水率剖面的实测值与处理 W 2 的模拟值

Fig. 1 Measured soil water content profiles for treatment W 1 and W 2 and the simulated one for treatment W 2 in the column experiment

#### 2.1.2 田间实验

根系吸水模型的建立与检验步骤, 程序同土柱实验。选用 1 号小区 5 月 27 日至 6 月 2 日的实测含水率剖面 and 根长密度分布优化式(7)中的指数  $\rho$ , 应用同期

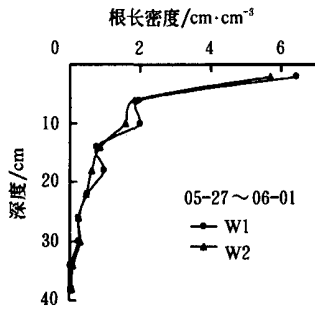


图2 土柱实验处理W1和W2的实测根长密度分布  
Fig. 2 Measured root length density distributions for treatment W1 and W2 in the column experiment

6号小区根长密度与含水率分布的实测资料对所得 $\rho$ 值进行检验,最终得优化结果为 $\rho = 0.35$ 。限于篇幅,给出5月27日至6月2日期间6号小区含水率剖面模拟值与实测值的对比结果如图3所示。

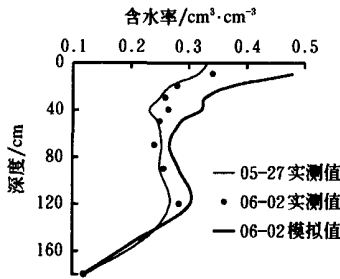


图3 田间实验6号小区含水率剖面模拟值与实测值的对比  
Fig. 3 Comparisons between the measured and the simulated soil water content distributions for Plot 6 in the field experiment

## 2.2 相对根长密度分布 $L_{\text{nr}}(z)$ 的估算

### 2.2.1 土柱实验(处理W1)

选用W1处理5月21日至6月7日之间的实测含水率剖面(图4),按照本文介绍的方法,对实验期内处理W1相对根长密度 $L_{\text{nr}}(z)$ 的变化情况进行了估算,估算值与实测值的比较见图5。图示结果表明:总体而言,两者的变化趋势大致吻合,但土柱上部部分点的偏差较大,这可能与式(8)的近似程度和近地表部分根系吸水功能的“退化”有关:一方面,由于上部土层中水分运动的变化剧烈,采用式(8)近似计算根系吸水速率在时段内的平均值可能会引起较大的误差;另一方面,由于近地表土层中的根系在经受持续的水分胁迫后,其中的部分根系可能出现老化或死亡的现象,已无法发挥吸水的功能,但根系的实际测定过程并无法区分哪些根系参与吸水——为有效根系,哪些根系为无效根系,而上述估算方法获得的相对根长密度 $L_{\text{nr}}(z)$ 分布中仅包括参与吸水的根系,因此,图5的结果显示出0~5 cm处 $L_{\text{nr}}(z)$ 的模拟值较实测值为小。另外,水分胁迫的作用使得土柱中的根系呈现向下生长的趋势,随着生长期的延长,土柱下部根系所占的比例逐渐增加,因而出现了0~10 cm内的相对根长密度渐次减小的现象。

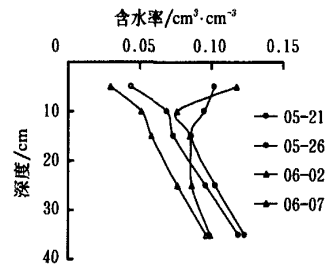


图4 土柱实验处理W1的实测含水率剖面  
Fig. 4 Measured soil water content distributions for treatment W1 in the column experiment

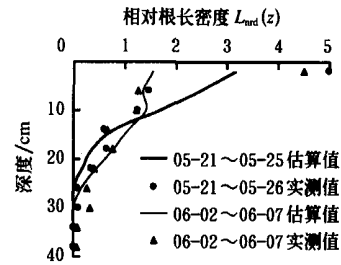


图5 土柱实验处理W1相对根长密度分布 $L_{\text{nr}}(z)$ 实测值与估算值的对比

Fig. 5 Comparisons between the measured and the estimated normalized relative root length density distributions for treatment W1 in the column experiment

### 2.2.2 田间实验

选用田间实验FW1处理6号小区4月3日至9日、4月21日至27日、5月19日至25日以及5月27日至6月2日的实测含水率剖面(图6,为便于分辨,图中仅绘出了4月3日、4月9日、5月19日和5月25日的实测含水率剖面),按照本文介绍的方法对上述几个时段内冬小麦的相对根长密度分布进行了估算,估算值与实测值的比较如图7所示,两者的偏离程度或吻合趋势与土柱实验结果基本相似。这更进一步地反映出本文所提出的相对根长密度的估算方法基本可靠,在缺少(或无法获取)根长密度实测资料的条件下,可用于植物生长条件下土壤水分运动规律的模拟,从而使得预测预报可以连续进行。

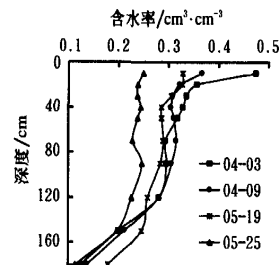


图6 田间实验6号小区的实测含水率剖面  
Fig. 6 Measured soil water content distributions for Plot 6 in the field experiment

尚有一点必须提请注意:应用本文方法估算的 $L_{\text{nr}}(z)$ ,应该理解为有效的相对根长密度,即仅包括参

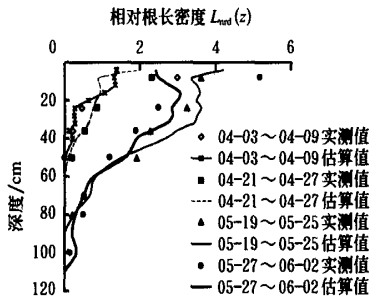


图7 田间实验6号小区相对根长密度分布实测值与估算值的对比

Fig 7 Comparisons between the measured and the estimated normalized relative root length density distributions for Plot 6 in the field experiment

与吸水的根系。作物在生长过程中, 由于土壤环境的影响, 其根系可能不断地经历生长、死亡等过程, 尤其是在近地表土层内, 这种生长-死亡的交替会更为频繁。另外, 部分根系仅仅只能承担输水任务, 并不起吸水作用, 也可能使得本文估算方法的估算结果与实测分布出现一些误差, 但这样的误差应该不至于影响土壤水分模拟的结果(将另文探讨), 因为只有“有效”根系才能参与吸水活动。关于植物有效、无效根系的划分有待于更进一步地研究。

### 3 结 语

本文在引入相对根长密度概念、应用平均根系吸水速率反求方法的基础上, 提出了相对根长密度分布的估算方法。在已知两个实测含水率剖面的前提下, 应用该方法, 可使植物生长条件下土壤水分运移的模拟过程得以连续进行, 避免了较为繁琐的根长密度的测定。为了检验该方法的可靠性, 本文设置了冬小麦栽培土柱实验与田间实验, 相对根长密度分布估算值与实测值的对比结果表明, 该方法可以较为有效地适时估算相对根长密度的分布, 为根系吸水模型的应用提供较为可靠的参数。

除可用于模拟植物生长条件下土壤水分的运动外, 本文所提出的方法还可供其它相关研究应用, 如用于分析根-冠关系、根系构型与功能之间的关系、有效根系及无效根系的区分等。关于“有效”根长密度的物理机制等尚有待更进一步地研究。

#### [参 考 文 献]

- [1] Gardner W R. Modeling water uptake by roots[J]. Irrig Sci, 1991, 12: 109- 114
- [2] Prasad R. A linear root water uptake model [J]. J Hydrology, 1988, 99: 297- 306
- [3] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论与应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994, 96~ 107.
- [4] 罗远培, 李韵珠, 等. 根土系统与作物水氮资源利用效率[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1996, 111- 160
- [5] Homae M. Root water uptake under non-uniform transient salinity and water stress [D]. Wageningen Agricultural University, the Netherland 1999, 41- 54
- [6] 邵明安, 黄明斌. 土-根系统水动力学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000, 131- 155
- [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] Feddes R A, Kowalik P J, Zarandy H. Water uptake by plant roots, In Simulation of Field Water Use and Crop Yield[M]. Ed Feddes R A, Kowalik P J and Zarandy H, John Wiley & Sons, Inc, New York 1978, 16- 30
- [9] 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.
- [10] Dirksen C, Kool J B, Koorevaar P, et al. HYSWASOR-Simulation model of hysteretic water and solute transport in root zone. In Water flow and solute transport in soils [M]. Ed Russo D and Dagan G. Springer Verlag, 1993, 99- 122
- [11] 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
- [12] Vrugt J A, van Wijk M T, Hopmans J W, et al. One-, two-, and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling[J]. Water Resour Res, 2001, 37: 2457- 2470
- [13] 姚建文. 作物生长条件下土壤含水率预测的数学模型[J]. 水利学报, 1989, 9: 32- 38
- [14] 左 强, 孙炎鑫, 杨培岭. 应用Microlysimeter研究作物根系吸水特性[J]. 水利学报, 1998, 6: 69- 76
- [15] 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
- [16] Zuo Q, Zhang R. Estimating root water uptake using an inverse method [J]. Soil Science, 2002, 167 (9): 561 - 571.
- [17] Rose D A. The description of the growth of root system [J]. Plant and Soil, 1983, 75: 405- 415
- [18] 杨培岭. 根系生长与水土关系的研究[J]. 中国农业大学, 1993, 1- 5
- [19] 冯广龙, 刘昌明. 冬小麦根系生长与土壤水分利用方式相互关系分析[J]. 自然资源学报, 1998, 13(3): 234- 240
- [20] Ephraïm J E, Silberbush M, Berliner P R. Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores[J]. Plant and Soil, 1999, 209: 201- 208
- [21] Feddes R A, Kowalik P J, Kolinska-Malinka K, et al. Simulation of field water uptake plants using a soil water dependent root extraction function [J]. J Hydrology, 1976, 31: 13- 26
- [22] Van Genuchten M T H. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892- 898
- [23] Evett S R, Warrick A W, Mathias A D. Wall material and capping effects on Microlysimeter temperature and evaporation[J]. Soil Sci Soc Am J, 1995, 59: 329- 336
- [24] Monteith J L. Evaporation and environment [A]. Proc

Symp Soc Exp Biol[C], 1965, 19: 205- 234  
[25] Ritchie J T. A model for predicting evaporation from a

row crop with incomplete cover[J]. Water Resour Res, 1972, 8: 1204- 1213

## Estimating normalized root length density distribution of winter wheat using measured soil water content profiles

Zuo Qiang, Meng Lei, Wang Dong

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

**Abstract:** It is very difficult, even not impossible, to measure root density timely and accurately, especially in the field. However, it is an essential parameter for root study. In this study, an approach to estimating the normalized root length density distribution was proposed, which was based on two measured soil water content profiles and the inverse method to estimate the average root water uptake rate. The approach was also used to estimate the normalized root length density distributions of winter wheat grown in soil columns and in the field. The results showed that the approach was reliable to estimate the normalized distributions of relative root length density, compared with the measured values. Therefore, the estimated effective root density parameter can be provided for root water uptake models and soil water flow can be simulated continuously even without any measured root density information.

**Key words:** normalized root density; root water uptake rate; soil water; inverse method