

根系吸水的 最小能量模型 的实验验证与评价

谭红朝, 李秧秧

(中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 根系吸水的定量模拟是土—根系统水分动力学研究的难点之一。现有根系吸水模拟模型往往是在特定条件下建立的, 缺乏对根系吸水机制的了解, 因而其应用受到限制。根系吸水的 最小能量模型 是基于植物为适应生存, 用于根系吸收水分消耗的能量 最小 这一物理概念上提出来的, 是否能真实反映根系吸水情况值得进一步研究。采用土柱实验, 对该模型进行了实验验证。发现正常水分条件下, 最小能量模型 模拟精度高, 而在土壤干旱条件下模拟精度较差, 可能与干旱条件下植物体内的生物调节机制有关。

关键词: 根系吸水; 最小能量模型 ; 玉米

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2008)01-0050-04

中图分类号: Q945.17

Experimental Validation and Evaluation of Minimum Energy Model on Root Water Exaction

TAN Hong-chao, LI Yang-yang

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The quantitative modeling of root water exaction is difficult in research on soil-root hydraulic dynamics. Present models were constructed under certain ideal conditions and based on poor understandings of the mechanisms of root water exaction and thus their applications were rather limited. The minimum energy model was presented based on the physical concept that plant would consume minimum energy for root water exaction in order to survive. But it is not clear if this theory could truly reflect root water exaction. In this research, a soil column experiment was conducted to validate the model. Results indicate that the model had a higher modeling precision under normal water condition, while the modeling precision decreased under drought condition. The reason may be related with the biological mechanism inside plant themselves.

Keywords: root water exaction; minimum energy model; corn

根系吸水的定量模拟是土—根系统水分动力学研究的重点和难点, 因而一直是土壤物理学家研究的重要领域之一。经过近 40 a 余的研究, 涌现出了大量的根系吸水模型。这些模型可分为微观和宏观模型两类。微观模型在一定程度上刻画了根系吸水的机理, 但难以实际应用。宏观模型又包括势流理论模型和将蒸腾量按权重因子在剖面上分布的数学模型两类; 前者如 Gardner 模型、Hillel 模型等常包含了根水势、土壤和根系水流阻力等参数, 因而尽管其机理性较强, 应用也并不广泛; 后者的经验性较强, 权重因子通常为根长密度、土壤含水量、土水势、导水率和

扩散率等的函数, 应用性较强, 如 Feddes 模型和 van Genuchten 模型。在后一种模型构建中, 常将根系吸水按根系沿剖面分布的方式分配。但是, 实际观察中的根系吸水并不常常符合上述有关根系吸水的假设。在湿土中, 根系吸水方式似乎只遵循根系分布方式^[1]。当表土变干时, 根系吸水深度增加, 在这种条件下影响根系吸水的主导因素主要是土壤或土—根界面水分特征而非根数目或其发布。此外, 根系在空间上不均匀地扩展可能导致根长密度与根系吸水并不相吻合, 那些建立在根长密度与根系吸水关系基础上的根系吸水模型可能会失败。从这些分析可以看

收稿日期: 2007-05-14 修回日期: 2007-07-28

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(40001010)

作者简介: 谭红朝(1982-), 男(汉族), 湖北省襄樊市人, 硕士, 主要研究方向为植物水分生理生态学。E-mail: skythc@gmail.com。

出, 尽管几十年来在根系吸水的数学模拟方面取得了一定的进展, 但这些模型往往是在特定条件下建立的, 缺乏对作物根系吸水机制的了解, 其应用受到限制, 因而需要更综合的、应用更广的与根系吸水过程有关的机理性模型。

植物根系吸水是一个需要消耗能量的过程^[2]。Adiku 等(1999)认为, 为便于植物在各种土壤水分条件下的生存, 根系吸水支出的能量将最小, 即最小能量模型^[3]。在本研究中, 我们试图通过严格控制条件下的土柱实验, 对根系吸水最小能量模型进行验证, 目的在于验证最小能量模型是否可以准确模拟根系的吸水状况, 从而揭示根系吸水的机理。

1 理论^[3]

1.1 模型介绍

一维土体的水流连续方程是在 Darcy - Richards 方程后加上一个根系吸水项

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial J_w}{\partial Z} - r_z \quad (1)$$

式中: θ —— 体积含水量 (m^3/m^3); t —— 时间 (s); Z —— 垂直距离 (m); r_z —— 根系吸水速率 (s);

J_w —— Darcy 流, $J_w = -k \frac{d\Psi_h}{dZ}$ (k 为导水率 m/s , Ψ_h 为土壤基质势和重力势之和)。

解上述方程的关键是确立根系吸水函数 r_z 。Gardner(1960)提出了一个计算单位根长根系吸水速率的方程^[5]。该方程的一个表达形式为

$$q_z = 4\pi k \left[\frac{\Psi_{r_z} - \Psi_{m_z}}{\ln \left(\frac{c^2}{r^2} \right)} \right] \quad (2)$$

$$c = (\pi L_v)^{-0.5} \quad (3)$$

式中: q_z —— 根系吸水速率 [$\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{s})$]; Ψ_{r_z} , Ψ_{m_z} —— 分别为根和土壤水势; r —— 根半径; L_v —— 根长密度 (m/m^3)。

在任意深度内, 单位时间单位土体积内根系吸水的体积 Q_z [$\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$] 为

$$Q_z = q_z L_v \quad (4)$$

单位面积单位时间根系吸水的质量 U_z ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) = $Q_z \times \rho_w$ (水的密度, kg/m^3) $\times dZ$ (m), 即

$$U_z = Q_z \cdot \rho_w \cdot dZ \quad (5)$$

在任意深度内水流从土壤到根都要经过一个水势下降梯度, 该水势下降梯度即为单位数量的水穿过水势梯度时所做的功。在任意深度内根系吸水的能量支出效率即为

$$dW_z/dt = U_z (\Psi_z - \Psi_x) \quad (6)$$

$\frac{dW_z}{dt}$ —— 单位面积上的能量支出 (W/m^2)。由

于 Ψ_z 难以确定, 常用叶木质部水势 (Ψ_x) 替代。

根系吸水总的能量支出为:

$$\int_0^{Z_r} \frac{dW_z}{dt} dt = \int_0^{Z_r} U_z (\Psi_z - \Psi_x) dZ \quad (7)$$

植物生存的策略便是使根系吸水过程中的能量支出最小化, 因此可将根系吸水按最小化问题解决。解这个问题的条件为

$$(1) 0 \leq r_z \leq Q_z$$

(2) $\sum_{r_z} \rho_w dZ (\Psi_z - \Psi_x)$ 为所有求和方式中的最小值

$$(3) \int_0^{Z_r} r_z dZ = T_a \leq T_p$$

解决这一最优化问题的目标函数为

$$\min \Psi_x \rho_w \int_0^{Z_r} r_z (\Psi_z - \Psi_x) dZ \quad (8)$$

该目标函数的非线性约束条件为

$$0 \leq r_z \leq Q_z \quad (9)$$

线性约束条件为

$$\int_0^{Z_r} r_z dZ \leq T_p \quad (10)$$

1.2 模型实施

最小化问题通常用一个动态的编程方法求解, 用有限差分法解方程(1)。整个程序包用 Fortran77 编写, 由 Adiku 教授本人提供。

模型中需要输入的参数如下。(1) 气象资料。包括降雨或灌水量、日最高和最低温度、潜在蒸腾蒸发量;(2) 土壤资料。包括 Campbell(1974)提出的有关水分特征曲线幂函数表达中的 $b^{[4]}$ 、饱和导水率、空气进气值、饱和含水量、初始含水量、风干土含水量及根长密度;(3) 木质部水势资料。主要包括 30 min 雨强资料和根木质部水势的日变化, 由于根木质部水势难以测定, 用叶水势代替。

2 实验

2.1 土柱试验

土柱为直径 15 cm, 高 110 cm 的 PVC 管, 用机器划开两半并用胶带纸密封, 底部加一浇水弯管。在 PVC 管上每隔 10 cm 打两排孔(直径 1.2 mm)用以测定土壤含水量。所用土壤为风干过筛后的瘠土(风干后含水量为 6.34%), 该土的田间持水量为 21.62%(环刀法测定), 水分特征曲线见图 1, 根据水分特征曲线可模拟求得 Campbell 幂函数中的 b 及空气进气值。饱和含水率用定水头垂直入渗法测定, 为

$1.83 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。土壤分层按 1.20 g/cm^3 的容重装入,上下两头浇水至田间持水量后并平衡 10 d(上用塑料薄膜覆盖以防止蒸发),土柱置于田间挖好的槽内以减少温度的影响。等各土层基本达到平衡后,每柱中播筛选的陕单九号玉米种子 3 粒,出苗后土面上覆盖 5 cm 厚的珍珠岩以阻止土面蒸发,三叶期间苗仅留下 1 株。处理前土壤含水量均不低于田间持水量的 80%,生长至拔节期开始控制水分,处理 25 d。

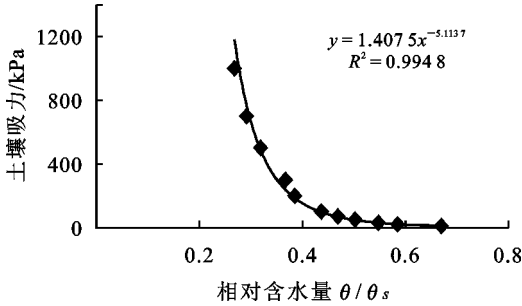


图 1 供试土壤的水分特征曲线

2.2 试验处理

(1) 充分供水处理。每日浇水使水分一直维持到田间持水量,主要用来测定潜在蒸腾蒸发量;(2) 正常水分处理。水分控制在田间持水量的 80%~85%,维持 25 d;(3) 干旱处理。水分处理期内不浇水,胁迫 25 d。这 3 个处理的土柱数分别为 3, 6 和 6 柱,均每日称重以计算潜在蒸腾蒸发量或实际蒸腾量(根系吸水量);隔 3 d 左右从侧壁小孔取土或打开土柱测定土壤含水量。叶木质部水势用 3005 型压力室测定,共测定 4 个日变化,用内插法分配。25 d 处理结束后打开土柱,冲根并用网格法^[5]测定根长密度。气象资料由附近气象站提供。

3 结果与讨论

3.1 正常水分状况下根系吸水的模拟

图 2 为用最小能量模型模拟的正常水分状况下的日蒸腾速率。从图 2 可看出,模拟的日蒸腾速率和测定值非常接近,表明根系吸水的最小能量模型能较精确地模拟正常水分状况下根系的水分吸收。

图 3 为土壤含水量的模拟值和实际测定值。正常水分处理在整个模拟时段内,其含水量剖面分布的差异不是很大,测定值和模拟值存在一定的误差。水分处理 6, 15 和 25 d 时,整个剖面的平均相对误差均低于 10%,各土层的最大相对误差为 11.97%,说明最小能量模型在一定程度上反映了根系吸水的机理,但与实际吸水剖面仍存在一定的误差,土层上部的模拟误差大于下部。

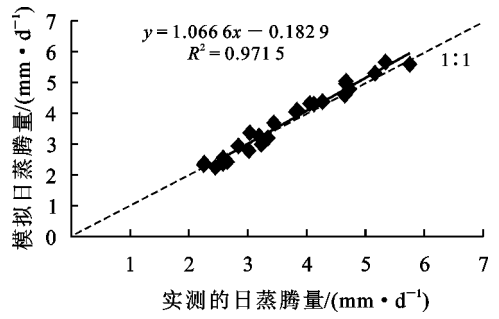


图 2 用最小能量模型模拟的正常水分处理的日蒸腾速率

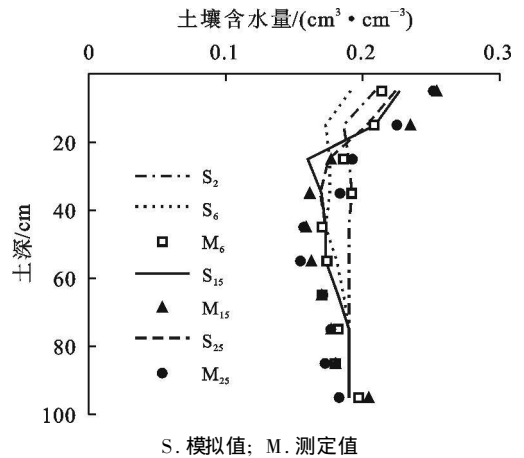


图 3 正常水分下用最小能量模型模拟的土壤含水量剖面分布与实测值的比较

用最小能量模型模拟的根系吸水剖面只局限在表层 30 cm(图 3),尽管土体 30~90 cm 均有根系的存在,但用最小能量模型模拟的结果表明,这些根系几乎不参与吸水,这与最小能量模型假设根系只在能量最小的根层中吸收水分有关。最小能量模型能较好地模拟日蒸腾速率及土壤含水量的变化,表明正常水分下根系吸水主要来自表层 30 cm 是正确的,根系吸水遵循能量最低这一原则。

3.2 土壤干旱条件下根系吸水的模拟

图 4 为土壤干旱条件下用最小能量模型模拟的土壤含水量的剖面分布及测定的实测值。从图 4 中可看出,随土壤干旱时间的延长,整个土壤剖面的含水量在不断降低。

在模拟初期的土壤的含水量与实测值(干旱第 6 d)比较接近,而干旱中期与后期模拟值与实测值之间存在一定的差异。

模拟中期和后期整个剖面的平均相对误差分别为 18.20% 和 14.57%,说明根系吸水的最小能量模型在一定程度上体现了根系吸水的机制,但不能很好地模拟较长时期内根系的吸水状况,这可能与干旱条件下土体下部根长密度增大有关。

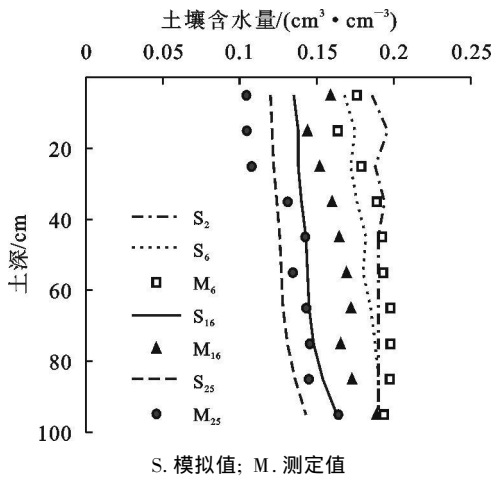


图 4 土壤逐渐干旱条件下模拟与实测土壤含水量剖面分布

干旱处理的第 2 d, 根系的吸水仅限于表层 30 cm 且以上层 10 cm 根系吸水速率为最大; 干旱第 6 d, 根系吸水已发展到 70 cm, 整个剖面的根系吸水速率几乎相同; 干旱 12 d 后, 根系吸水速率在剖面上的分布方式相同, 上层 90 cm 的根系吸水速率小且变化

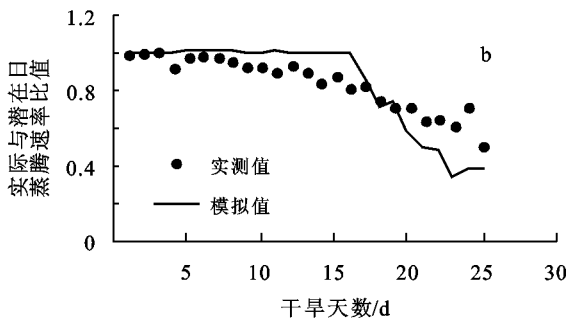
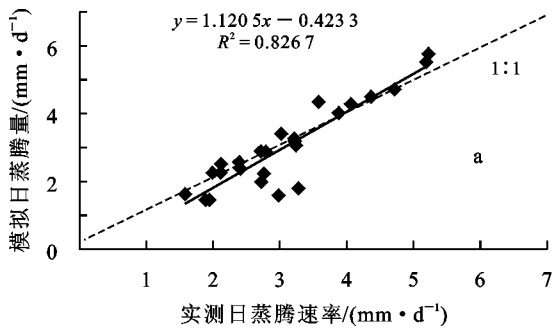


图 5 土壤干旱条件下模拟与实测的实际日蒸腾速率比较

综上所述, 最小能量模型在一定程度上反映和刻画根系吸水的机理。但最小能量模型模拟日蒸腾速率的过快下降, 根系吸水速率峰值的过快下延以及在日蒸腾速率还未下降时根系吸水速率峰值已达底层与测定值不符; 同时随模拟时间延长, 模拟精度变差, 这些均表明干旱条件下根系吸水的最小能量模型难以全部刻画根系吸水的机理, 干旱条件下植物体内存在生物调节机制, 它与最小能量模型刻画的物理机制一起可能共同控制着植物在干旱条件下的水分吸收。

[参 考 文 献]

- [1] Olson K A, Rose C W. Patterns of water withdrawal beneath an irrigated peach orchard on a red brown earth [J]. Irrigation Science, 1988, 9: 89—104.
- [2] Wadleigh C H. The integrated soil moisture stress upon

不大, 根系吸水速率在 90 cm 以下达到最大。用最小能量模型模拟的随干旱的发展, 根系吸水速率逐渐向下发展及干旱增大深层根系吸水速率似与实际情况相符^[6], 但干旱初期根系吸水速率的过快下延及后期根系吸水速率在最下层达到最大与实际情况不符。

图 5a 为模拟与实测的实际日蒸腾速率的比较, 右图为模拟与实测的实际日蒸腾速率/潜在日蒸腾速率比值随干旱程度加剧的变化过程。左图表明模拟与实测的日蒸腾速率较为接近, 但在低蒸腾速率时存在一定的误差。

从图 5b 可看出, 干旱 13 d 前, 模拟值与实测值比较接近; 13~16 d 之间, 模拟值高于实测值; 而 20 d 后, 模拟值明显低于实测值。干旱 13 d 后, 模拟根系相对吸水速率下降幅度明显大于实测值。植物在渐进干旱过程中, 可能形成一套调节与适应干旱的机制以使其吸水速率不致下降过快, 根系吸水的最小能量模型似难以反映作物的适应与调节机制, 导致模拟的根系吸水速率下降过快。

a root system in a large container of saline soil [J]. Soil Science, 1945, 6: 225—238.

- [3] Adiku S G K, Rose C W, Braddock R D, et. al. On the simulation of root water extraction: examination of a minimum energy hypothesis [J]. Soil Science, 2000, 165 (3): 226—236.
- [4] Campbell G S. A simple method for determining the unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil Science, 1974, 117: 311—314.
- [5] Tennant D. A test of a modified line intersect method of estimating root length [J]. Journal of Ecology, 1975, 63: 995—100.
- [6] Sharp R E, Davies W J. Root growth and water uptake by maize plants in drying soil [J]. Journal of Experimental Botany, 1985, 36(9): 1441—1456.