

# 基于 Hydrus-1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析

吴元芝<sup>1,2,4</sup>, 黄明斌<sup>1,3\*</sup>

(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. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学, 临沂 276005;  
3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 4. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 为探索土壤质地、植物生长状况和气象条件对不同土壤水分条件下根系吸水速率的影响机理, 该文以相对根吸水速率与土壤含水率的关系衡量土壤水分有效性, 利用 Hydrus-1D 模型模拟了 3 种土壤(壤黏土、黏壤土和砂壤土)中不同玉米生长状况(包括叶面积指数、根系深度和根系剖面分布)或蒸发力条件下根系吸水速率随含水率的动态变化, 确定了不同条件下根系吸水速率开始降低的临界含水率。结果表明: 土壤质地、植物的叶面积指数和根系分布及大气蒸发力都对根系吸水动态曲线的临界含水率有一定影响, 其中根系深度和根系分布形状还影响根系吸水速率与含水率关系曲线的形状, 但在 3 种土壤中, 根系吸水速率的动态变化对植物生长和大气蒸发力的响应不同。总体而言, 3 种土壤临界含水率的大小是壤黏土>黏壤土>砂壤土; 临界含水率随大气蒸发力的升高而升高, 随根系深度和深层根系分布的增加而降低; 各因子对玉米根系吸水影响程度的大小是土壤质地>根系分布形状>根系深度>大气蒸发力>叶面积指数。

**关键词:** 模型, 土壤水分, 根系吸水速率, 土壤质地, 气象条件, 叶面积指数, 根系深度, 根系分布

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.z2.014

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-Supp.2-0066-08

吴元芝, 黄明斌. 基于 Hydrus-1D 模型的玉米根系吸水影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 66-73.

Wu Yuanzhi, Huang Mingbin. Analysis of influential factors for maize root water uptake based on Hydrus-1D model[J].

Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 66-73. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

土壤水分对植物的有效性是一个动态变化过程, 即随着土壤含水率的变化, 植物生长、根系吸水、蒸腾等生理过程呈现不同的变化。随着对 SPAC 系统(土壤-植物-大气连续体系, Soil-plant-atmosphere continuum)研究的深入, 人们逐渐认识到土壤水分对植物的有效性不仅是土壤含水率或水势的函数, 它还受土壤、植物和气象条件的影响。研究表明: 土壤水分有效性动态变化过程中存在一个临界含水率, 植物生理过程在土壤含水率高于临界含水率时保持稳定, 而之后随土壤含水率的减少而逐渐受限; 土壤质地、植物根系密度和大气蒸发力都对这一过程有影响<sup>[1-3]</sup>, 但已有研究结果差异很大, 如:

Robertson 和 Fukai<sup>[4]</sup>发现砂土的临界含水率低于黏土, 但是 Hammer 和 Muchow<sup>[5]</sup>发现临界含水率不受土壤质地影响。在试验中影响土壤水分有效性的因子往往同时存在, 不同试验结果很难直接对比。邵明安等<sup>[6]</sup>建立了根系吸水的动力学模式, 指出可用相对根系吸水速率与土壤含水

率的关系来衡量土壤水分对植物的有效性。但该模型比较复杂, 实际应用多有不便。

本文将美国国家盐改中心(US Salinity laboratory)设计的 Hydrus-1D 模型用于模拟黄土高原 3 种典型土壤中玉米根系吸水速率与土壤含水率的关系, 探索土壤、植物和气象因子对根系吸水动态变化过程的影响机理, 为衡量不同土壤的水分有效性提供依据。

## 1 Hydrus-1D 模型组成

该模型用于模拟计算一维垂直非饱和流和溶质运移, 考虑了植物根系吸水和土壤持水能力的滞后效应, 加入气象模块, 适用于各种恒定或非恒定的边界条件<sup>[7]</sup>。

### 1.1 水分运动方程

以地表为基准面, 垂直一维水分运动的定解问题可表示为(坐标轴向下为正):

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ k(h) \frac{\partial h}{\partial z} - k(h) \right] - s(z, t) \quad (1)$$

式中,  $c(h)$ 为比水容量,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $h$ 为压力水头,  $\text{cm}$ ;  $k(h)$ 为非饱和导水率,  $\text{cm/d}$ ;  $s(z, t)$ 为根系吸水速率,  $\text{cm/d}$ ;  $z$ 为土壤深度,  $\text{cm}$ ;  $t$ 为时间,  $\text{d}$ 。非饱和导水率由 Van Genuchten 模型计算<sup>[8]</sup>:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[ 1 + |\alpha h|^m \right]^m} \quad h < 0 \quad (2)$$

$$K(h) = K_s S_e^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad h < 0 \quad (3)$$

收稿日期: 2010-07-15 修订日期: 2011-03-20

基金项目: 陕西长武耕地保育与持续高效现代农业试点工程(KSCX1-YW-09-07); 国家自然科学基金项目(40671083)。

作者简介: 吴元芝(1982-), 女, 山东济南人, 讲师, 主要从事土壤水分物理研究。临沂 临沂大学山东省水土保持与环境保育重点实验室, 276000。Email: wuyuanzhi05@163.com。

\*通信作者: 黄明斌, 男, 湖北钟祥人, 研究员, 博士生导师, 主要从事生态水文和土壤物理研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: hmbd@nwsuaf.edu.cn

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

式中,  $S_e$  为无量纲的有效水分含量;  $\theta$  为土壤体积含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_r$  和  $\theta_s$  分别为残留和饱和土壤含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\alpha[\text{cm}^{-1}]$ ,  $n$  和  $m$  分别为 van Genuchten 模型参数,  $m=1-1/n$ ;  $K_s$  为饱和导水率,  $\text{cm}/\text{d}$ 。

### 1.2 玉米根系吸水速率

Hydrus-1D 软件采用 Feddes 模型计算根系吸水速率<sup>[9]</sup>, 即:

$$s(z, t) = \alpha(h, z) \cdot \beta(z) \cdot T_p \quad (5)$$

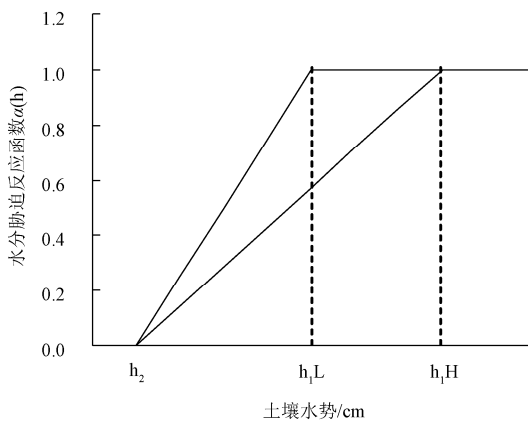
式中,  $\alpha(h, z)$  为水分胁迫反应函数, 无量纲;  $\beta(z)$  为标准化的根系吸水分布函数, 描述根系吸水的空间变异, 无量纲;  $T_p$  为作物潜在蒸腾速率,  $\text{cm}/\text{d}$ 。且水分胁迫反应方程通常概化为如下方程 (图 1)。

$$\alpha(h) = \begin{cases} 1 & h_1 \leq h < 0 \\ \frac{h-h_2}{h_2-h_1} & h_2 \leq h < h_1 \\ 0 & h \leq h_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $h_1$ 、 $h_2$  分别为根系吸水速率从 1 开始降低和降低为 0 的土壤水势,  $\text{cm}$ 。 $h_1$  因潜在蒸腾速率而不同<sup>[9]</sup>, 当蒸散速率为  $0.5 \text{ cm}/\text{d}$  时, 临界土壤水势是  $h_1H$ ; 当潜在蒸腾速率为  $0.1 \text{ cm}/\text{d}$  时, 临界土壤水势是  $h_1L$ 。标准化根系吸水分布函数  $\beta(z)$  计算方程如下:

$$\beta(z) = \frac{\beta'(z)}{\int \beta'(z) dz} \quad (7)$$

式中,  $\beta'(z)$  实测或模拟的根系分布函数, 反映根系在土壤剖面上的分布状况, 可以是常数, 可以是线性递减函数<sup>[9-10]</sup>, 也可以是指数递减函数<sup>[11-12]</sup>或分段函数<sup>[13]</sup>。



注:  $h_2$  为根系吸水速率降低为 0 时的土壤水势,  $\text{cm}$ ;  $h_1H$  为蒸散速率等于  $0.5 \text{ cm}/\text{d}$  时的临界土壤水势,  $\text{cm}$ ;  $h_1L$  当潜在蒸腾速率等于  $0.1 \text{ cm}/\text{d}$  时的临界土壤水势,  $\text{cm}$

图 1 水分胁迫反应函数  $\alpha(h)$  示意图

Fig.1 Schematic of the plant water stress response function,  $\alpha(h)$

### 1.3 潜在蒸腾速率的计算

作物潜在蒸腾速率  $T_p$  可由公式 (8) <sup>[11]</sup> 计算, 其中  $ET_0$  是参考作物蒸散量,  $\text{cm}$ , 可以由 FAO 推荐的 Penman-monteith 方法计算<sup>[14]</sup>。

$$T_p = ET_0(1 - e^{-kLAI}) \quad (8)$$

式中,  $LAI$  是叶面积系数, 无量纲;  $k$  是植物灌层辐射衰减系数, 无量纲, 对于玉米而言,  $k$  常取  $0.4$ <sup>[15]</sup>。

## 2 模型输入

### 2.1 边界条件

本文以天为单位, 模拟田间玉米地  $150 \text{ cm}$  土层深度范围内的土壤水分运动过程, 确定不同土壤水分条件下的土壤剖面上总的根系吸水速率。因植物蒸腾和土壤蒸发都影响土壤水分运移, 选用上边界是具有作物覆盖的大气边界层。黄土高原土层深厚无地下水补给, 下边界设为渗漏边界  $h=0$ 。

### 2.2 土壤条件

本文选取黄土高原 3 种典型土壤 (塬土、黑垆土、黄绵土) 研究不同土壤中根系吸水速率随土壤含水率的动态变化。3 种土壤分别从杨凌农地、长武农业生态站、神木试验站采集而来, 用环刀法测定饱和和导水率, 用日本 HITACHI 公司生产的 CR21G 离心机测定特征曲线, 并用 RETC 软件拟合 van Genuchten 模型的土壤水分特征曲线参数。3 种土壤的质地及 van Genuchten 模型特征参数如表 1 所示。按照国际制质地分类标准, 3 种土壤分别是壤黏土、黏壤土和砂壤土。因已有研究证明 Hydrus-1D 模型对壤黏土、黏壤土和砂壤土含水率的模拟精度都很高<sup>[15-17]</sup>, 本文直接利用该模型对 3 种土壤中根系吸水速率随含水率的动态变化进行模拟。

表 1 3 种土壤的质地及 van Genuchten 模型特征参数  
Table 1 Soil texture and the parameters of the van Genuchten model of three soils

土壤类型	土壤质地	van Genuchten 模型参数				
		$\theta_r/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\theta_s/(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	$\alpha/\text{cm}^{-1}$	$n$	$K_s/(\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$
塬土	壤黏土	0.042	0.519	0.0216	1.255	64.80
黑垆土	黏壤土	0.047	0.497	0.0176	1.314	112.32
黄绵土	砂壤土	0.055	0.459	0.0164	1.844	360.00

注:  $\theta_r$  为残留含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\theta_s$  为饱和含水量,  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $\alpha$  为进气吸力的倒数,  $\text{cm}^{-1}$ ;  $n$  为孔隙大小分布, 无量纲;  $K_s$  为饱和导水率,  $\text{cm}/\text{d}$ 。

土壤水分胁迫反应方程的 2 个临界土壤水势  $h_1$ 、 $h_2$  所对应的土壤含水率分别为  $\theta_{k1}$ 、 $\theta_{k2}$ , 而这 2 个临界含水率的关系如下<sup>[18]</sup>

$$\theta_{k1} = \frac{1}{-2.27 \cdot T_p + 17.5} + \theta_{k2} \quad (9)$$

其中,  $T_p$  是潜在蒸腾速率;  $\theta_{k1}$ 、 $\theta_{k2}$  分别是根系吸水速率开始降低的临界含水率和干旱使根系不能吸水时的土壤含水率, 二者都因植物和土壤而不同,  $\theta_{k2}$  可以由试验获得, 而  $\theta_{k1}$  还受大气蒸发力的影响。当蒸腾速率为  $0.5 \text{ cm}/\text{d}$  时, 此临界含水率  $\theta_{k1}$  所对应的临界水势是  $h_1H(\text{cm})$ ; 当潜在蒸腾速率是  $0.1 \text{ cm}/\text{d}$  时, 此临界含水率  $\theta_{k1}$  所对应的临界水势是  $h_1L(\text{cm})$ 。利用已有试验结果<sup>[19]</sup>获得  $\theta_{k2}$ , 然后通过式 (9) 和 (2) 计算 3 种土壤根系吸水函数参数

数如表 2 所示。

表 2 土壤水分胁迫方程参数

Table 2 Parameters of the water stress function

土壤质地	$h_1H/cm$	$h_1L/cm$	$h_2/cm$
壤黏土	542	3 750	32 400
黏壤土	607	4 385	64 920
砂壤土	164	509	66 555

注： $h_1H$  为潜在蒸腾速率等于  $0.5 \text{ cm d}^{-1}$  时的临界土壤水势， $\text{cm}$ ； $h_1L$  为潜在蒸腾速率是  $0.1 \text{ cm d}^{-1}$  时的临界土壤水势， $\text{cm}$ ； $h_2$  干旱使植物停止吸水时的土壤水势， $\text{cm}$ 。

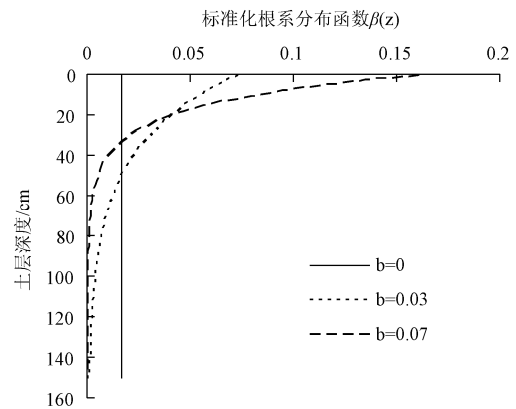
2.3 气象条件

本文考虑黄土高原地区夏玉米生育期内的气象条件，选择 3 种大气蒸发力不同的典型天气进行模拟，输入  $ET_0$  分别为  $0.2$ 、 $0.4$  和  $0.6 \text{ cm/d}$ 。

2.4 植物生长状况

影响蒸腾的植物因素有地上和地下 2 部分。地上部分的叶面积指数 LAI 影响叶面蒸腾量与棵间蒸发量的比例，本文根据黄土高原地区玉米生育期叶面积指数的动态变化<sup>[20]</sup>，分别选择玉米播种后 30 d (苗期)、60 d (拔节期)、90d (吐丝期) LAI=1.0、3.0、5.0 时研究根系吸水速率的变化。因地下部分的根系深度与根系剖面分布形状都会对标准化根系分布函数  $\beta(z)$  产生影响，本文对根深和根系剖面分布变化对根系吸水速率的影响分别进行研究。王昆等和张喜英研究表明根系剖面分布参数  $b$  值随着生育期降低，苗期为  $0.156$ ，乳熟期为  $0.0269$ <sup>[21-22]</sup>；而刘晶淼等的研究发现，吐丝期和乳熟后期  $b$  值差异不大，约为  $0.0185$ <sup>[23]</sup>；李朝海研究表明不同质地土壤中拔节期  $b$  值在  $0.045\sim 0.068$  范围内，灌浆期  $b$  值在  $0.039\sim 0.051$  范围内<sup>[24]</sup>。为模拟玉米需水关键期（拔节-吐丝）不同根系分布密度

对根系吸水速率的影响，设置  $b$  为  $0.03$ 、 $0.07$  以代表吐丝期和拔节期根系生长状况，并以根系在剖面上均匀分布 ( $b=0$ ) 作为对照。3 种条件下标准根系分布密度如图 2。根系密度在剖面上均匀分布在大田中是不存在的，但是研究土壤水分有效性常用的小盆钵中，根系随土壤的深度变化不明显，因此以根系均匀分布作为参照。为研究根系深度对整个土壤剖面根系吸水速率的影响，假定根系在土壤剖面上均匀分布，研究 3 个根系深度 ( $90$ 、 $120$ 、 $150 \text{ cm}$ ) 条件下根系吸水情况，从而消除根系密度对根系吸水的影响。根系分布密度函数  $b$  值取  $0.03$  时，约 99% 的根系分布在  $120 \text{ cm}$  以上土层，可以与根系均匀分布、根深  $120 \text{ cm}$  条件下的根系吸水速率变化进行对比。



注： $b$  为根系分布密度指数函数的系数

图 2 3 种典型标准化根系密度分布曲线

Fig.2 Three typical curves of normalized root density distribution.

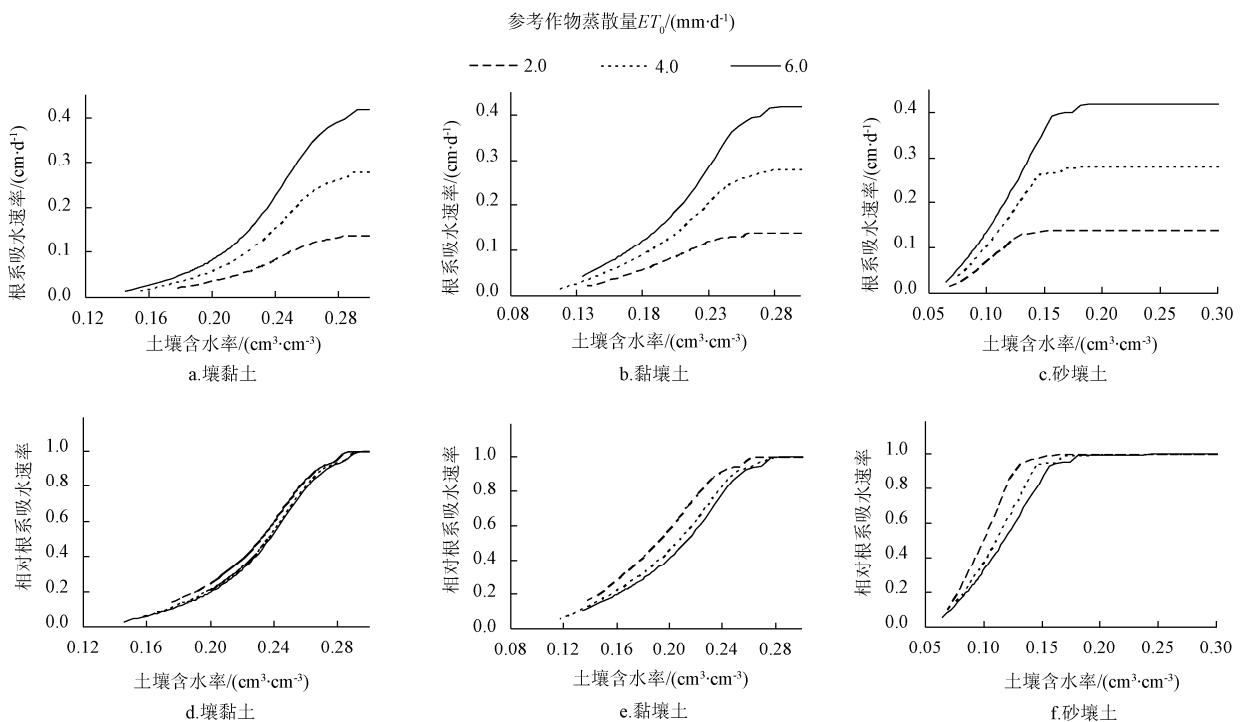


图 3 不同土壤中根系吸水速率或相对根系吸水速率在 3 种  $ET_0$  条件下随土壤含水率的动态变化过程

Fig.3 Dynamic changes of root water uptake rate and relative water uptake rate in response to soil moisture content under three evaporative demand in three soils

### 3 结果与分析

#### 3.1 不同 $ET_0$ 条件下根系吸水速率动态变化过程

图 3 是在 3 种大气蒸发力水平下 ( $ET_0=0.2、0.4、0.6 \text{ cm/d}$ ), 同时  $LAI=3$ 、根系深度  $150 \text{ cm}$ 、根系分布密度函数  $b=0.03$  时, 3 种土壤中根系吸水速率或相对根系吸水速率(以土壤含水率为  $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  根系吸水速率作为参考, 不同土壤水分条件下的根系吸水速率都除以这个参考值) 随土壤含水率动态变化的模拟结果。从图 3 中可以看出玉米根系吸水速率随着土壤含水率的变化开始保持在较高的水平, 然后随着土壤含水率的进一步降低而迅速降低, 可以近似为存在一个临界值的分段函数(图 1)。在 3 种土壤中根系吸水速率的绝对值都明显受  $ET_0$  的影响(图 3a-c), 且相对根系吸水速率受  $ET_0$  的影响也略有不同(图 3d-f), 砂壤土和黏壤土中 3 种蒸发力水平下根系吸水速率开始降低的临界含水率差异明显(图 3e 和 3f), 随着  $ET_0$  增加根系吸水速率开始降低的临界含水率也逐渐增加, 而壤黏土中 3 种蒸发力水平下的临界含水率差异不明显(图 3d)。这说明 3 种土壤中玉米根系吸水

速率对气象条件的响应存在差异。

#### 3.2 不同 LAI 条件下根系吸水速率动态变化过程

叶面积指数影响植物蒸腾与棵间蒸发的比例, 进而影响根系吸水速率, 如式 (8) 和 (5) 所示。图 4 是在 3 种土壤中模拟出的 3 种 LAI 条件下 ( $LAI=1.0、3.0、5.0$ ,  $ET_0=0.4 \text{ cm/d}$ , 根系深度  $150 \text{ cm}$ , 根系分布密度函数  $b=0.03$  时) 根系吸水速率和相对根系吸水速率随土壤含水率的动态变化, 该动态变化曲线也可以近似为图 1 所示的分段函数。从图 4 可以看出: 在  $ET_0$ 、根系剖面分布形状和土壤含水率一致的情况下, 3 种土壤中的根系吸水速率都随着叶面积指数的增加而增加(图 4a-c), 但是 3 种土壤中相对根系吸水速率随土壤含水率的动态变化的表现却不同(图 4d-e)。在壤黏土中, 随着叶面积指数的增大临界含水率变化不明显(图 4d), 但在黏壤土和砂壤土中, 叶面积指数的增大从 1.0 升高到 3.0 时临界含水率增大较明显, 但叶面积指数从 3.0 升高到 5.0 时临界含水率变化不明显(图 4e-f)。这说明 3 种土壤中根系吸水速率对叶面积指数的响应也有差异。

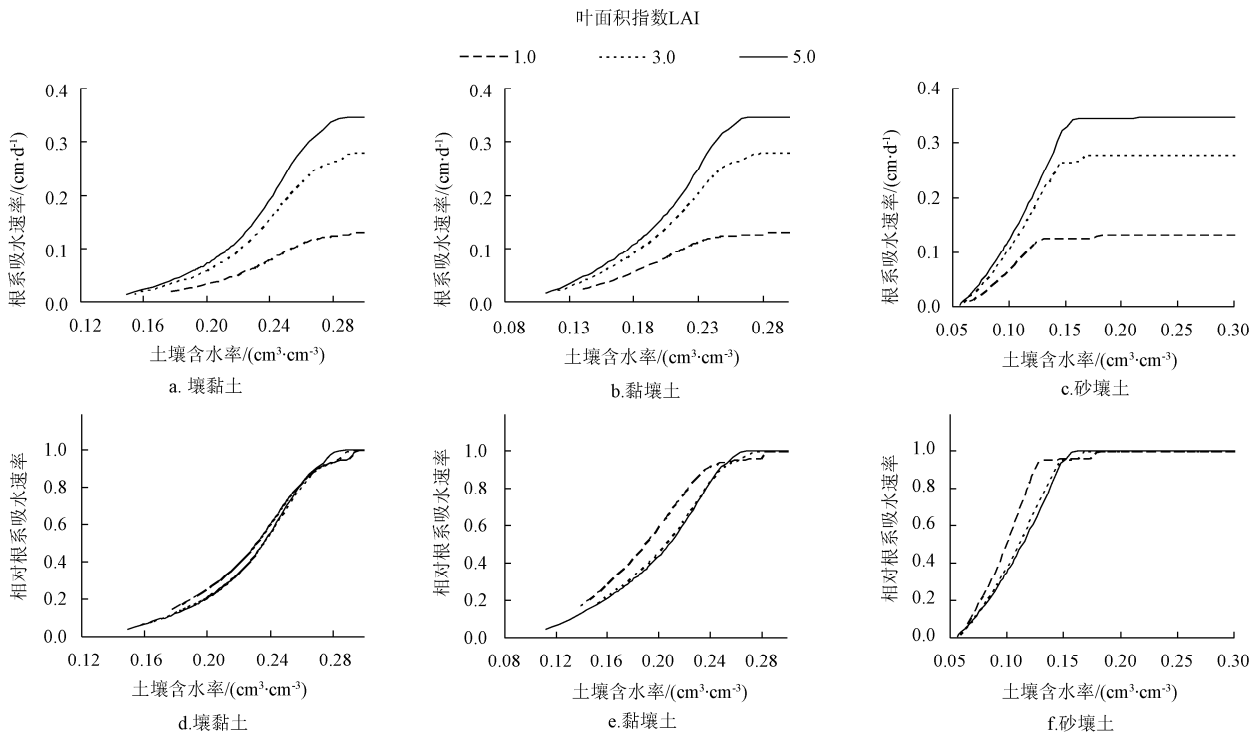


图 4 不同土壤中根系吸水速率或相对根系吸水速率在 3 种 LAI 条件下随土壤含水率的动态变化过程  
Fig.4 Dynamic changes of root water uptake rate and relative water uptake rate in response to soil moisture content with three LAI levels in three soils

#### 3.3 不同根深条件下根系吸水速率动态变化过程

根深直接影响根系的吸水范围, 从图 5 可以看出,  $ET_0=0.4 \text{ cm/d}$ 、 $LAI=3$ 、剖面根系均匀分布 ( $b=0$ ) 时, 在土壤含水率较高时根深对根系吸水速率的绝对值影响不大, 但随着土壤含水率的降低, 根深  $90 \text{ cm}$  时根系吸水速率首先受到限制, 根系吸水速率先缓慢降低后迅速降低, 最后又缓慢降低; 根深  $150 \text{ cm}$  时根系吸水速率最后受到限制, 根系吸水速率先缓慢降低然后迅速降低直到 0

为止。说明根深影响根系吸水速率随土壤含水率动态变化的曲线形状, 根系分布较深时曲线是凸型的, 根系分布较浅是曲线变化由凸到凹(凸-凹型)。根深一致时, 3 种土壤中根系吸水速率降低的临界含水率也有差异。

#### 3.4 不同根系剖面分布条件下根系吸水速率动态变化过程

根系分布密度涉及单位体积范围内根系的吸水强度, 从图 6 可以看出,  $ET_0=0.4 \text{ cm/d}$ 、 $LAI=3$ 、根深  $150 \text{ cm}$

的条件下土壤含水率较高且接近田间持水率时,根系吸水速率的绝对值也都不受根系分布影响,但随着土壤含水率的降低,根系剖面分布形状不同时,根系分布密度函数系数  $b=0.07$ ,即浅层根系分布较多时,根系吸水速率开始降低的临界含水率最高,且在土壤含水率低于临界值时迅速降低,然后在土壤含水率很低时缓慢降低; $b=0.03$ 时,根系吸水速率开始降低的临界含水率也较高,但在土壤含水率低于临界值时降低速率比  $b=0.07$  时低;根系在整个剖面上均匀分布时 ( $b=0$ ),根系吸水速率开始降低的临界含水率最低,在土壤含水率低于临界值时根系吸水速率先缓慢降低最后迅速降低直到 0 为止。这说明根系分布状况也影响根系吸水速率动态变化曲线的

形状,且不同土壤中的差异也比较大。根系剖面分布均匀时,动态变化曲线是凸型的;根系在浅层分布较多时 ( $b=0.03、0.07$ ),曲线是由凸到凹变化的;在壤黏土中深层根系分布较少时曲线是凹型的,在砂壤土中曲线的凸凹变化不明显。在根系剖面分布相同条件下,3种土壤中的临界含水率也有差异。根系分布密度函数系数  $b=0.03$  时 99% 的根系集中在 120 cm 土层内,与根深 120 cm 根系在土壤剖面上均匀分布的情况(图 5)相比, $b=0.03$  时的根系吸水速率在土壤含水率较高时就开始降低,但降低速率逐渐变小(图 6)。这说明根系分布形状比根深对根系吸水速率动态变化的影响大。

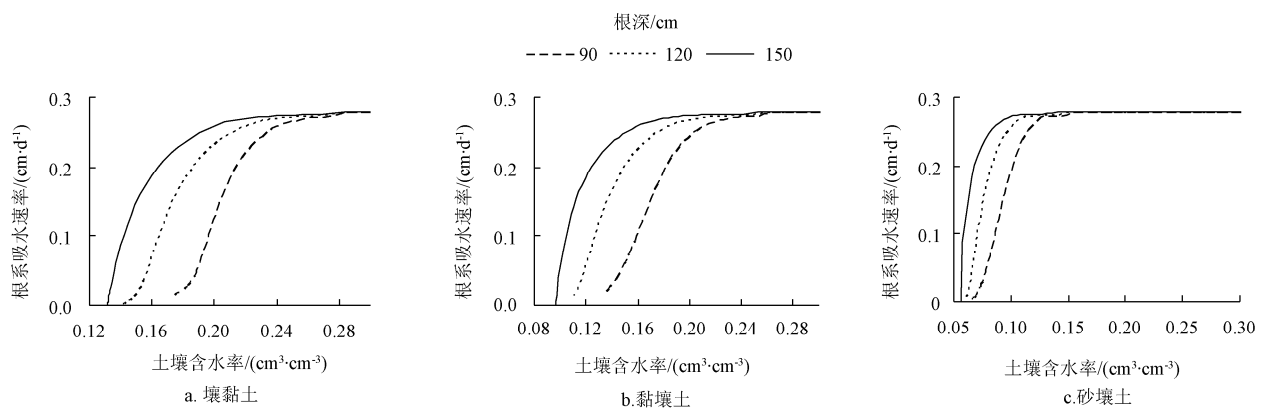
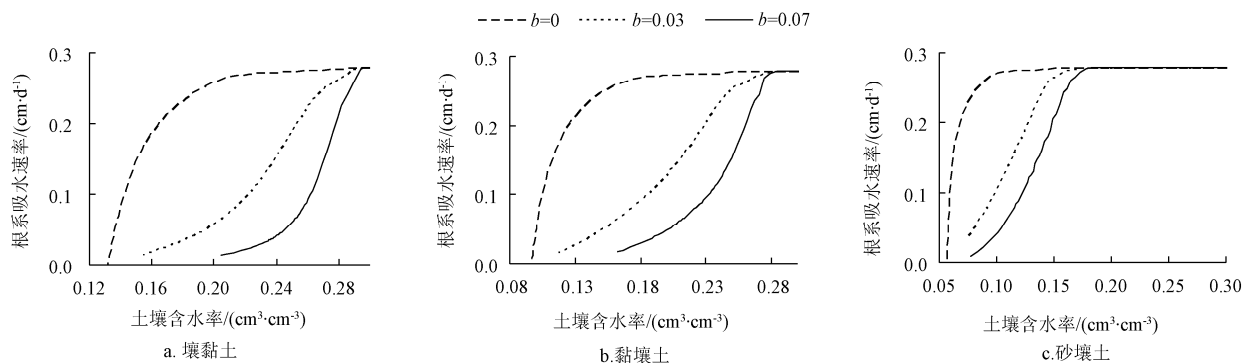


图 5 不同土壤中根系吸水速率在 3 种根深条件下随土壤含水率的动态变化过程

Fig.5 Dynamic changes of root water uptake rate and relative water uptake rate in response to soil moisture content under three root depth in three soils



注:  $b$  为根系分布密度指数函数的系数,随着  $b$  增大,下层根系分布减少, $b=0$  时根系均匀分布。

图 6 不同土壤中根系吸水速率或相对根系吸水速率在 3 根系分布条件下随土壤含水率的动态变化过程

Fig.6 Dynamic changes of root water uptake rate and relative water uptake rate in response to soil moisture content under three root distribution in three soils

### 3.5 不同土壤、气象和植物条件下的临界含水率

根据以上不同土壤、气象和植物条件下根系吸水速率随土壤含水率动态变化的模拟结果,以相对根系吸水速率降低到 95% 时的土壤含水率作为临界含水率,计算得到了 3 种土壤、3 种蒸发力条件下植物生长状况不同时的临界含水率(见表 3)。从表 3 中可以看出在蒸发力、叶面积指数、根系深度、根系分布形状相同时 3 种土壤的临界含水率都是:壤黏土 > 黏壤土 > 砂壤土,这与我们的试验结果一致<sup>[19]</sup>。壤黏土的临界含水率在 0.204 ~

0.290  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  之间,相当于田间持水率的 72%~103%,平均为 0.260  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;黏壤土的临界含水率在 0.162 ~ 0.282  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$  之间,相当于田间持水率的 60%~100%,平均为 0.233  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ;砂壤土的临界含水率在 0.086 ~ 0.190  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ,相当于田间持水率的 38%~85%,平均为 0.131  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。说明随着黏粒含量增加或砂粒含量减少,土壤的临界含水率增加,与已有试验结果一致<sup>[4]</sup>。

随  $ET_0$  的升高,临界含水率都升高,但不同土壤中不同植物生长状况下升高程度不同(表 3)。在壤黏土中,

其临界含水率只有在根深 150 cm、根系分布函数参数  $b=0$  和 0.03 条件下随  $ET_0$  升高有较明显升高, 增加量分别为  $0.018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  和  $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 而在其他条件下临界含水率随  $ET_0$  的升高而增加不明显, 增加量不足  $0.010 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。在黏壤土中, 各种条件下随  $ET_0$  升高临界含水率都明显增加, 增加量  $0.014 \sim 0.018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。在砂壤土中, 随  $ET_0$  升高, 3 种 LAI 条件下的临界含水率分别升高  $0.022$ 、 $0.033$ 、 $0.033 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 随 LAI 增加气象条件对临界含水率的影响变大; 随  $ET_0$  升高, 3 种根深和根系剖面分布条件下临界含水率分别升高  $0.024$ 、 $0.015$ 、 $0.012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  和  $0.051$ 、 $0.033$ 、 $0.012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 即随着根系深度加深和深层根系量的增加, 大气蒸发力对临界含水率的影响变小。因此, 大气蒸发力对临界含水率的影响同时还取决于植物的叶面积指数和根系深度或根系剖面分布形状。

表 3 3 种土壤中不同条件下的临界含水率

Table 3 Critical soil moisture content under different conditions in three soils.

影响因子	土壤	$ET_0=0.2 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$	$ET_0=0.4 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$	$ET_0=0.6 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$
LAI=5 $b=0.03$ $H=150 \text{ cm}$	壤黏土	0.272	0.276	0.280
	黏壤土	0.245	0.256	0.263
	砂壤土	0.132	0.151	0.165
LAI=3 $b=0.03$ $H=150 \text{ cm}$	壤黏土	0.278	0.282	0.285
	黏壤土	0.253	0.263	0.270
	砂壤土	0.131	0.150	0.164
LAI=1 $b=0.03$ $H=150 \text{ cm}$	壤黏土	0.285	0.286	0.287
	黏壤土	0.250	0.260	0.264
	砂壤土	0.122	0.133	0.142
LAI=3 $b=0$ $H=150 \text{ cm}$	壤黏土	0.204	0.208	0.222
	黏壤土	0.162	0.170	0.179
	砂壤土	0.086	0.092	0.098
LAI=3 $b=0$ $H=120 \text{ cm}$	壤黏土	0.223	0.227	0.237
	黏壤土	0.183	0.192	0.199
	砂壤土	0.097	0.105	0.112
LAI=3 $b=0$ $H=90 \text{ cm}$	壤黏土	0.244	0.246	0.254
	黏壤土	0.207	0.217	0.225
	砂壤土	0.108	0.121	0.132
LAI=3 $b=0.07$ $H=150 \text{ cm}$	壤黏土	0.287	0.291	0.290
	黏壤土	0.268	0.277	0.282
	砂壤土	0.149	0.169	0.190

注: LAI 为叶面积指数, 无量纲;  $H$  为根深, cm;  $b$  为根系分布密度指数函数的系数, 无量纲, 随着  $b$  增大下层根系分布较多,  $b=0$  时根系均匀分布。

从表 3 还可以看出, LAI 由 1.0 升高到 3.0 时, 黏壤土和砂壤土的临界含水率在 3 种  $ET_0$  下都升高; LAI > 3.0,  $ET_0=0.2$ 、 $0.4 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时 3 种土壤的临界含水率没有增加甚至降低; 这说明玉米叶面积达到郁闭之前 (LAI < 3.0), 随 LAI 增加玉米对水分亏缺的敏感性增加, 而玉米叶面积达到郁闭之后, 随 LAI 增加玉米对土壤水分亏缺的敏感性不变甚至减小。但是各种  $ET_0$  水平下, 壤黏土的临界含水率都随叶面积升高而降低, 但是  $ET_0=0.4$  和  $0.6 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时临界含水率降低不足  $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 而  $ET_0=0.2 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时临界含水率降低  $0.013 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 这主要是因为  $ET_0$  较低时大气内水汽压较高, 土壤水分只有在土水势较高时才

能被植物吸收。总的来讲, 3 种土壤中拔节期土壤水分有效性低于吐丝期, 拔节期玉米对水分亏缺敏感。

另外随着根系深度增加, 3 种大气蒸发力条件下临界含水率都降低,  $ET_0=0.4 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时壤黏土、黏壤土和砂壤土的临界含水率分别降低  $0.038$ 、 $0.047$ 、 $0.029 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (表 3); 随着深层根系分布的增加, 3 种大气蒸发力条件下临界含水率也都降低,  $ET_0=0.4 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时 3 种土壤的临界含水率分别降低  $0.083$ 、 $0.107$  和  $0.077 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (图 3)。这说明不同土壤中根系吸水速率都受根系深度和根系分布形状的影响。另一方面,  $b=0.03$  和  $0.07$  可分别代表吐丝期和拔节期, 所以拔节期土壤水分有效性低于吐丝期, 这与不同 LAI 条件下的模拟结果一致, 只是不同生育期根系分布的差异较 LAI 对水分有效性的影响大。值得注意的是当根系分布密度函数  $b=0.07$  时, 根系集中分布在 65 cm 以上土层, 壤黏土和黏壤土的临界含水率都在田间持水率附近, 在低于田间持水率的 80% 时根系吸水速率随土壤含水率降低缓慢 (图 6a), 且不同  $ET_0$  条件下差异也不大 (小于  $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ) (表 2), 这与邵明安等<sup>[5]</sup>利用壤土进行试验获得结果非常一致。

通过不同土壤质地、气象、叶面积指数、根系深度和根系分布形状条件下临界含水率的变化量可以看出, 各个因子对根系吸水速率的动态变化影响程度的大小顺序是土壤质地 > 根系分布形状 > 根系深度 > 气象因子 > 叶面积指数。因此, 如果要研究某种土壤的土壤水分有效性, 必须明确根系分布状况。

## 4 结 论

本文利用 Hydrus-1D 模型模拟 SPAC 系统水分运动, 研究了壤黏土、黏壤土和砂壤土 3 种质地土壤中根系吸水速率随土壤含水率的动态变化过程, 并研究了大气蒸发力、叶面积指数、根系深度和根系剖面分布形状的影响。得出如下结论:

1) 大气蒸发力和叶面积指数对根系吸水速率动态变化曲线的形状影响不明显; 而根系深度和根系分布形状不仅对其曲线形状有明显影响。

2) 壤黏土、黏壤土和砂壤土的临界含水率平均为  $0.260$ 、 $0.233$ 、 $0.131 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , 壤黏土 > 黏壤土 > 砂壤土。随着大气蒸发力升高临界含水率降低, 砂壤土的降低最大, 为  $0.033 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 随叶面积指数增加 3 种土壤的临界含水率有升高也有降低, 但都不超过  $0.022 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;  $ET_0=0.4 \text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$  时, 随根系加深临界含水率降低, 黏壤土降低最多, 为  $0.047 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ; 随着深层根系分布的增加, 3 种土壤的临界含水率都降低, 最高降低  $0.077 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

3) 各因子对根系吸水动态变化影响程度的大小顺序是土壤质地 > 根系分布形状 > 根系深度 > 大气蒸发力 > 叶面积指数。

### [参 考 文 献]

- [1] Sadras V O, Milroy S P. Soil-water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: A review[J]. Field Crops Research, 1996, 47(2/3): 253—266.
- [2] Denmead O T, Shaw R H. Availability of soil water to plants

- as affected by soil moisture content and meteorological conditions[J]. *Agronomy Journal*, 1962, 54(5): 385—390.
- [3] Metselaar, K. and Jong van Lier, Q. de. The shape of the transpiration reduction function under plant water stress[J]. *Vadose Zone Journal*, 2007, 6(1): 124—139.
- [4] Robertson M J, Fukai S. Comparison of water extraction models for grain sorghum under continuous soil drying[J]. *Field Crops Research*, 1994, 36(2): 145—160.
- [5] 邵明安, 杨文治, 李玉山. 黄土区土壤水分有效性的动力学模式[J]. *科学通报*, 1987, 32(18): 1421—1423. Shao Ming'an, Yang Wenzhi, Li Yushan. A dynamic model of soil moisture availability to plants in the loessial region[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1987, 32(18): 1421—1423. (in Chinese with English abstract)
- [6] Hammer, G L, Muchow, R C. Quantifying climatic risk to sorghum in Australia's semiarid tropics and subtropics: model development and simulation. Muchow R C, Bellamy J A. (Eds.) *Climatic risk in crop production: models and management for the semi-arid tropics and subtropics*[M], 1990, 205—232. Wallingford: C.A.B. International.
- [7] Simunek J, Sejna M, van Genuchten M Th. The Hydrus-1D software package for simulating the one 2-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media [R]. U. S. Salinity Laboratory, 1998.
- [8] Van Genuchten M Th. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44(5), 892—898.
- [9] Feddes R A, Kowalik P J, Zaradny H. *Simulation of field water use and crop yield* [M]. John Wiley and Sons, New York, NY, 1978.
- [10] Raats P A C. Steady flows of water and salt in uniform soil profiles with plant roots[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1974, 38(5): 717—722.
- [11] Prasad R. A linear root water uptake model[J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 99(3/4): 297—306.
- [12] 王淑芬, 张喜英, 裴冬. 不同供水条件对冬小麦根系分布、产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 27—32.  
Wang Shufen, Zhang Xiying, Pei Dong. Impacts of different water supplied conditions on root distribution, yield and water utilization efficiency of winter wheat[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(2): 27—32. (in Chinese with English abstract)
- [13] Hoffman G J, van Genuchten M Th. Soil properties and efficient water use: Water management for salinity control. In: Taylor H M, Jordan W R, Sinclair T R, (eds.), *Limitations and Efficient Water Use in Crop Production* [M]. Madison, American Society of Agronomy, 1983: 73—85.
- [14] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirement, *FAO Irrigation and Drainage Paper 56* [M]. 1998, Rome, Italy.
- [15] 刘群昌, 谢森传. 华北地区夏玉米田间水分转化规律研究[J]. *水利学报*, 1998(1): 62—68.
- Liu Qunchang, Xie Senchuan. A study on field soil water balance for summer corn in north China plain[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, (1): 62—68. (in Chinese with English abstract)
- [16] 曹巧红, 龚元石. 应用 Hydrus-1D 模型模拟分析冬小麦农田水分氮素运移特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(2): 139—145.  
Cao Qiaohong, Gong Yuanshi. Simulation and analysis of water balance and nitrogen leaching using Hydrus-1D under winter wheat crop[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2003, 9(2): 139—145. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李亮, 史海滨, 贾锦凤, 等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 31—35.  
Li Liang, Shi Haibin, Jia Jinfeng, et al. Simulation of water and salt transport of uncultivated land in Hetao Irrigation District in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [18] Novák V, Havrila J. Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants [J]. *Biologia*, 2006, 61(19): S289—S293.
- [19] 吴元芝, 黄明斌. 土壤质地对玉米不同生理指标水分有效性的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 82—88.  
Wu Yuanzhi, Huang Mingbin. Effect of soil texture on soil water availability for different maize physiological indices [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(2): 82—88. (in Chinese with English abstract)
- [20] Kang S Z, Gu G B, Du T S, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter and maize in a semi-humid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2003, 59(3): 239—254.
- [21] 王昆, 莫兴国, 林忠辉, 等. 植被界面过程 VIP 模型的改进与验证[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(2): 387—394.  
Wang Kun, Mo Xingguo, Lin Zhonghui, et al. Improvement and validation of vegetation interface process model[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(2): 387—394. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张喜英. 作物根系与土壤水利用[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [23] 刘晶淼, 安顺清, 廖荣伟, 等. 玉米根系在土壤剖面中的分布研究[J]. *中国生态农业学报*, 2009, 17(3): 517—521.  
Liu Jingmiao, An Shunqing, Liao Rongwei, Ren Sanxue, et al. Temporal variation and spatial distribution of the root system of corn in a soil profile[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(3): 517—521. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李朝海, 李胜利, 王群, 等. 不同质地土壤对玉米根系生长动态的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1334—1340.  
Li Chaohai, Li Shengli, Wang Qun, et al. Effect of different textural soils on root dynamic growth in corn[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(9): 1334—1340. (in Chinese with English abstract)

## Analysis of influential factors for maize root water uptake based on Hydrus-1D model

Wu YuanZhi<sup>1,2,4</sup>, Huang MingBin<sup>1,3\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Soil Conservation and Environmental Protection, Linyi University, Linyi 276005, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 4. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to investigate the mechanism of the influence of soil texture, growing state and weather conditions on the root water uptake under various soil moisture conditions, the relationship between root water uptake rate and soil moisture content was used to evaluate soil moisture availability and a Hydrus-1D model was used to analyzed the dynamic changes of root water uptake with various water content with maize growing with different leaf area index, root depth and root density distribution in three soil textural types (loam clay, clay loam and sandy loam) under three weather conditions. Results showed that the root water uptake rate in various conditions remained constant until soil moisture content decreased below a critical value and then declined in a different way under different conditions with further soil moisture depletion. The critical values were different for different soil texture, plant leaf area index and evaporative demand, among which root depth and root density distribution also had significant influence on the relationship between root water uptake and soil moisture content. However, the dynamic change of root water uptake for maize to plant growing state and weather condition was different in the three soils. In general, the critical soil moisture content declined with soil texture in the order: loam clay > clay loam > sandy loam, increased as evaporative demand increasing and decreased as root depth and root density distributed in the deep depth increasing. The effects of various factors on maize root water uptake decreased in the order: soil texture > root density distribution > root depth > evaporative demand > leaf area index.

**Key words:** model, soil moisture, root water uptake, soil textures, weather condition, leaf area index, root depth, root distribution