

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0133

陈立, 王文科, 赵明, 等. 宏观根系吸水补偿模型研究进展[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 122-127. CHEN L, WANG W K, ZHAO M, et al. A review of studies on macroscopic compensated root water uptake model[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 122-127. (in Chinese)

宏观根系吸水补偿模型研究进展

陈立^{1,2}, 王文科^{1,2}, 赵明^{1,2}, 王周锋^{1,2}

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 西安 710054; 2. 长安大学 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710054)

摘要: 根系吸水模型是研究植被耗水规律的关键要素, 尤其在干旱半干旱地区, 土壤经常出现水分胁迫状态, 使得根系吸水过程更为复杂。为准确描述根系的吸水过程, 吸水补偿模型在1989年被概念化并成为一个重要的研究方向, 国外进行了大量的研究探索, 而国内在该领域鲜有研究。虽然根系吸水补偿模型已取得一定的进展, 但其模型本身仍然存在一定的物理缺陷, 因此, 总结并综合分析根系吸水补偿模型发展历程, 指出补偿吸水模型忽视了水分胁迫抑制根系吸水的物理机制, 以及植物胁迫指数判定是否进行吸水补偿有一定局限性。在此基础上, 提出根系吸水补偿模型应考虑潜在蒸腾量和土壤可利用水量供需关系、植物根系生长环境, 补偿模型应耦合植物胁迫函数、土壤水分分布及地下水动态特征。

关键词: 根系吸水; 宏观模型; 补偿机制

中图分类号: Q945 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2018)05-0122-06

A review of studies on macroscopic compensated root water uptake model

CHEN Li^{1,2}, WANG Wenke^{1,2}, ZHAO Ming^{1,2}, WANG Zhoufeng^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effects in Arid Region, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: The root water uptake model is essential to the study of vegetation evapotranspiration. In arid and semi arid regions, the soil often has water stress, which makes the root water uptake process even more complicated. In order to describe the root water uptake more accurately, the compensated root water uptake model was conceptualized in 1989 and became an important research direction. There are many explorations abroad, but few in China. Although certain progress has been made on the compensated root water uptake model, it still has some physical defects. This paper summarizes and analyzes the development history of the compensated root water uptake model. It points out that the compensated water uptake model overlooks the physical mechanism of water stress restraining the root water uptake and that using plant stress index to judge whether there is compensated water uptake has certain limitations. Based on comprehensive analysis, this paper proposes that the compensated root water uptake model should consider the growing environment of plant roots and the supply demand relationship between potential transpiration and available soil moisture. The compensated model should couple the plant stress function, the characteristics of soil moisture distribution, and the dynamic characteristics of groundwater.

Key words: root water uptake; macroscopic model; compensation mechanism

植物蒸腾是土壤水进入大气的主要途径, 在旱区生态耗水研究中举足轻重。植物根系吸水在

收稿日期: 2018-05-14 修回日期: 2018-08-13 网络出版时间: 2018-08-25
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180824.1007.002.html>
基金项目: 国家自然科学基金(41230314)
Fund: National Natural Science Foundation of China (41230314)
作者简介: 陈立(1987-), 男, 湖北天门人, 博士, 主要从事旱区地下水文过程研究。E-mail: chenli_gw@chd.edu.cn

SPAC(土壤-植物-大气连续体)中扮演重要角色,是土壤水均衡模型中最难的问题之一,合适的吸水模型对于旱区农业用水、水资源及生态环境管理等十分重要^[1]。

根系吸水是一个复杂的过程,目前主要有两种方法来模拟包气带根系吸水的水文过程。(1)微观模型:把单根看成一个无限长、半径均匀的圆柱体,用 Richards 方程在柱坐标内来描述,根系界面水通量由土根界面处的水势梯度计算^[2]。(2)宏观模型:把根系吸水看作一个汇项引入 Richards 方程,潜在蒸腾量按根系密度分布和土壤水分胁迫函数呈比例的分配到根区^[3]。微观模型有两个优点:在单根尺度上能逼真的模拟土根交互作用,有生物物理机制;在水分胁迫下根系通过局部水势梯度自动调节吸水位置和通量。由于微观模型中包含难以获得的参数,包气带水分运移研究通常采用计算简单的宏观模型,但该方法忽视了根系几何学和植物的生物物理机制,导致宏观根系吸水模型还存在概念上的不足。

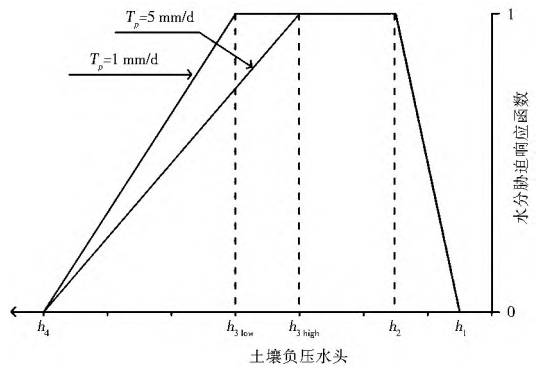
许多学者已经证明当土壤表层可利用水分降低时,蒸腾量能够从更深的、根系稀少的、但湿润的根区获得补偿,根系吸水短时间的垂向分布并不同于根系密度,植物自行通过加强补偿调节吸水模式适应含水率的不均一分布^[4,6]。Skaggs^[7]得出补偿机制在模拟灌溉条件下出现不均匀水分亏缺的水分运移中起到一个平衡的作用,忽略补偿机制,尤其对于非天然作物,将会低估植物蒸腾量。因此需要一种概念化的模型来刻画根系吸水的补偿机制,提高包气带水分运移模拟研究的精度。

1 补偿模型概念的提出

1.1 宏观根系吸水模型的不足

宏观吸水模型通常采用线性或非线性根系分布函数^[8,12]结合 Feddes 模型^[3]提出的水分胁迫响应函数(图 1 所示)来考虑根系吸水的均匀性,模型间的区别在于潜在蒸腾量的分配方式不同。这些经验吸水模型在特定状态下能够得到与野外观测相一致的结果:在均一湿润土层中,根系吸水主要发生在根系密度最大的土壤表层。但水分胁迫发生时,宏观吸水模型不能准确地模拟出由于水分状态不均一造成的吸水位置改变的过程。Feddes 模型^[3]认为局部根区吸水不受其他根区土壤水势的影响,然而根系是一个相互联系的系统,根区间的吸水会相互影响,这显然是一个非局部的问题。另外由于大多数模型采用的假设条件过于简化,尤其是理想化的

初始和边界条件(均一的初始含水率、零补给、恒定蒸发量等),经验宏观模型被认为缺少生物物理机制,致使不能精确描述根系吸水过程。



注: h_1 代表含水率过高导致出现缺氧环境; h_4 代表凋萎时的水势,超过 h_1 、 h_4 这两个阈值都会导致根系活性达到最小值; h_2 和 h_3 代表根系吸水的最佳状态,当处于两者之间时吸水达到最大值;其他条件下吸水呈线性变化。

图 1 Feddes 水分胁迫函数^[3]

Fig. 1 Water stress function (Feddes, 1978)

1.2 根系吸水补偿概念的提出

Jarvis^[13]通过未补偿实际蒸腾量和潜在蒸腾量的比值计算植物胁迫指数函数 ω ,把宏观补偿吸水模型概念化。

在不考虑补偿的情况下,实际蒸腾量可以表述为:

$$T_u = T_p \int_0^{L_r} \beta(z) \alpha(h) dz$$

式中: T_u 为未补偿实际蒸腾量; T_p 为潜在蒸腾量; $\alpha(h)$ 为水分胁迫指数函数; $\beta(z)$ 为根系密度分布函数; L_r 为最大根系深度。

植物胁迫指数函数:

$$\omega = \frac{T_u}{T_p} = \int_0^{L_r} \beta(z) \alpha(h) dz$$

根系吸水就可以表示为:

$$S(z) = \beta(z) \alpha(h) T_p \varphi$$

$$\varphi = \begin{cases} \frac{1}{\omega}; & \omega > \omega_c \\ \frac{1}{\omega_c}; & \omega < \omega_c \end{cases}$$

式中: φ 是补偿吸水函数; ω_c 是植物胁迫指数的临界值。

考虑补偿的情况下,实际蒸腾量 T_a 可以表述为:

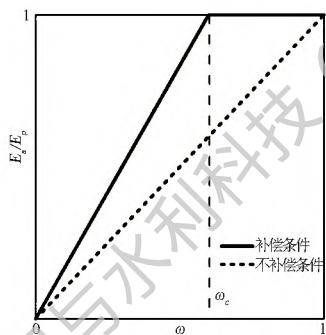
$$\frac{T_a}{T_p} = \begin{cases} 1 & \omega_c < \omega < 1 \\ \frac{\omega}{\omega_c} & \omega < \omega_c \end{cases}$$

式中: T_a 为未考虑补偿的实际蒸腾量。

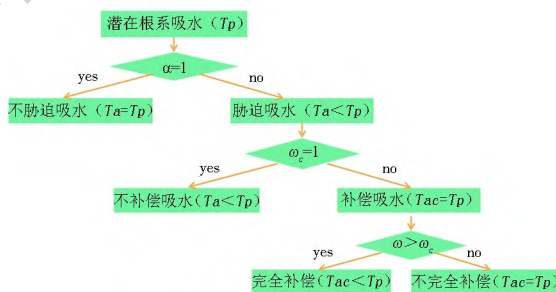
当 $\omega > \omega_c$ 时,一些区域的吸水减少量将会在另一区域完全补偿,使得实际蒸腾量等于潜在蒸腾量;当 $\omega < \omega_c$ 时,不完全补偿,但实际蒸腾量比不补偿情

况下蒸腾量提高 $1/\omega_c$ 倍,如图 2(a)。这样就通过引入一个“加强因子” ω ,提高植物的蒸腾量。补偿机

制如图 2(b),可以看出只要存在水分胁迫补偿吸水就会发生,而水分胁迫函数和局部水势有关。



(a) 补偿后的蒸腾量



(b) 补偿机制结构(修改自文献 [14])

图 2 植物胁迫指数函数影响下的补偿模式

Fig. 2 The compensation model under the influence of plant stress exponential function

2 补偿模型的研究进展

Jarvis 模型经常应用到试验和数值模拟中: Simunek 等^[14]将这个补偿吸水函数模块应用到 Hydrus 1D 中,并取得很好的结果,使得补偿机制进一步面向应用; Peter^[15]用 Hydrus 1D 模拟地下水位浅层条件下的根系吸水,其数值解很好地与试验结果相匹配; Pang 等^[16]用一个相似的阈值来计算局部吸水补偿,认为只要有一个地方的含水率高于给定的胁迫阈值,植物的蒸腾量就会维持在潜在水平; Coelho^[17-18]提出水分追踪的吸水模型,把大的吸水强度分配到较湿润

的土壤区域; Adiku^[19]从不同的角度出发,认为根系吸水遵循最小耗能原则,在均一湿润土壤剖面,根系吸水主要发生在根系密度最大的地方,在土壤逐渐变干的过程中,相对于旱的土壤表层根系吸水减少将由深部根系吸水进行补偿,此时与根系分布就无关了。

Lai and Katul 和 Li K. Y. 模型^[20, 21]把吸水项表达成潜在蒸腾量的线性函数:

$$S(z, t) = \alpha_1(\theta, z) \alpha_2(\theta, z) g(z) T_p$$

式中: $\alpha_1(\theta, z)$ 是补偿机制函数; $\alpha_2(\theta, z)$ 是水分胁迫函数; $g(z)$ 是根系密度函数。两个模型中各函数的选取见表 1。

表 1 Lai and Katul 模型和 Li K. Y 模型参数对比

Tab. 1 The parameters of Lai and Katul (2000) model and K. Y. Li (2001) model

模型	α_1	α_2	$g(z)$
Lai and Katul ^[20]	$\text{Max}(\frac{\theta}{\theta_s - \theta_{wilt}}, \frac{\int_0^z \theta(y, t) dy}{\int_0^R \theta(y, t) dy})$	$(\frac{\theta - \theta_{wilt}}{\theta_s})^{\frac{y}{\theta_{wilt}}}$	Hoogland et al. ^[8] Jackson et al. ^[21]
Li K. Y. ^[12]	$\frac{\alpha_2(\theta, z) G(z)^{\lambda-1}}{\sum_{z=0}^z \alpha_2(\theta, z) G(z)^{\lambda}}$	Feddes ^[3]	Campbell et al. ^[22]

Lai and katul 模型的补偿机制通过局部含水率和整体根区水分储存量的最大值来描述,以确保深部的水分是有效的,即在表层含水率趋近于凋萎含水率时可以调节到深部进行吸水。Li K. Y. 模型的补偿机制通过一个与根系分布和土壤水分胁迫函数有关的加权胁迫函数来描述,模型结果与实测值拟合较好,尤其在土层的深部;而且对于干旱状态或成熟时期的作物,考虑补偿吸水机制的模拟值与实测值的相对误差比只考虑根系影响的吸水机制小 1/3。Lai and katul 模型中的水分胁迫函数通过凋萎含水率和饱和含水率来描述, γ 一般取 0.01,其效果与 Li K. Y. 模型中的水分胁迫函数^[3]近似相同,所以两个模型的区别在于补偿函数的不同。Braud^[23]比

较了 Lai and katul 和 Li K. Y. 两个模型,结果显示两者的模拟结果都很好,其中 Lai and katul 模型的水分胁迫函数对土壤水力参数很敏感,而 Li K. Y. 模型不是很敏感,因此可将 Li K. Y. 模型纳入到大尺度水文模型中; Varado^[24]对比分析了多种土壤类型,指出 Lai and katul 模型的与土壤特性有关的补偿函数在砂性土中很小,导致补偿功能变弱,从而阻止了根系补偿吸水的正确行为。

de Jong van Ier^[25]提出有物理基础的吸水模型,并引入与基质势有关的吸水函数:

$$M = \int_{h_w}^h K(h) dh$$

式中: M 为基质势通量; h 和 h_w 为实际压力水头和

凋萎压力水头; K 为水力传导系数。

潜在吸水项就可以表述为:

$$S_i = \alpha(M - M_0)$$

式中: S_i 为第 i 层的吸水量; α 是与根长和根半径有关的参数; i 为土壤第 i 层; M_0 为根表面基质势。

则土壤水分状态决定下的实际蒸腾量:

$$E_a = \sum_i S_i \Delta z_i$$

式中: E_a 为实际蒸腾量; Δz_i 为第 i 层的厚度。

土壤水状态决定下最大的可能蒸腾量为:

$$E_{\max} = \sum_i \rho_i M_i \Delta z_i$$

式中: E_{\max} 为最大的可能蒸腾量; M_i 为第 i 层的基质势通量。

那么实际蒸腾量:

$$E_a = \min(E_{\max}, E_p)$$

de Jong van Lier 弃用植物胁迫指数函数 Ta/Tp , 考虑了实际根系吸水能力和潜在蒸腾量的供需关系: 当吸水能力强于潜在蒸腾时, 实际蒸腾量为潜在蒸腾量; 当吸水能力弱于潜在蒸腾时, 实际蒸腾量为水分胁迫下的蒸腾量。Liu N^[26] 也提出补偿机制需要综合考虑土壤供水能力和潜在蒸腾量供需关系, 而非仅仅由植物胁迫函数决定。Jarvis^[27] 从数学上证明 de Jong van Lier 模型和自己 1989 年提出的补偿模型具有相同的概念基础。Simunek^[28] 认为不考虑补偿时对根系分布的先验才是有效的, 考虑补偿时吸水依赖于根系空间分布的效果减弱; Couvreur^[29] 提出有物理机制的宏观根系吸水模型, 把水力胁迫函数从补偿中去耦合, 补偿吸水被看作是由于土根界面水头分布不均导致的根系吸水重新分配。大量的经验补偿吸水模型也把水分胁迫函数从补偿中去耦合, 但是这些模型仍高度依赖根系密度^[30-31]。Albasha^[32] 试图通过更加详细地刻画根系密度分布来描述根系吸水行为, 通过对比分析得出不同湿润过程中补偿模型的效果并不一致, 并认为 Jarvis 模型虽然起到补偿的效果, 但它并没有完全在正确的部位进行补偿; Albasha 进一步指出补偿应该表达成对土壤水分状态不均一的响应, 并独立于植物胁迫指数^[33]。Andre Peters^[34] 提出一个改进的根系吸水补偿概念模型, 本质上只是削弱了不完全补偿情况下的补偿力度, 相当于增大了 α 的值, 降低补偿能力, 使得修正后模型的蒸腾量介于不补偿和补偿^[13] 之间。

3 存在的问题

尽管 Jarvis 模型经常被使用, 它仍存在概念上的缺点: 如果土壤水势在剖面均匀分布, 即整个根区

有同样的吸力(或基质势), 那么当相应的吸力(或基质势)都小于植物胁迫指数函数临界值时, 根系吸水会整体补偿, 比水分胁迫函数制定的速率提高 $1/\omega$ 倍, 这违背了水分胁迫函数的初始意义。Jarvis^[13, 27] 归结水分胁迫函数是水分胁迫造成的局部吸水降低, 补偿函数是整个植物对水分胁迫的响应。Jarvis 模型忽视了水分胁迫函数抑制根系吸水的功能, 通过人为地增加一个补偿系数, 加强整个根区的吸力, 使整个植物的蒸腾量维持在较大水平, 这显然缺少一定的物理依据。

由于植物胁迫函数是根系密度和水分胁迫函数在根区的积分, 因此补偿依赖于根系密度和局部水势, 但研究表明当根系吸水发生补偿时, 对根系密度的依赖会大大减少, 显然只用植物胁迫指数来判定是否补偿是不合理的, 这也是 α 无法量化的原因。Skaggs 指出 α 的取值问题很少有文献研究, 导致取值的任意性甚至弃用补偿机制^[7, 35]。Schneider 等^[36-37] 认为 Jarvis 模型过于简化, 失去了根系吸水的物理意义。几乎所有模型都解释不了一个问题: 潜在蒸腾量较小时(例如阴天), 植物胁迫函数小于 ω , 土壤剖面整体受到水分胁迫, 但潜在蒸腾量很小, 根系吸水依旧能够满足蒸腾的需求, 即不需要补偿就能达到潜在蒸腾量。如果采用 Jarvis 的解释, 在这种情况下由于不完全补偿, 并不能达到潜在水平, 这就和实际情况出现了偏差。Viliam 等^[38] 指出根系吸水速率受根区的土壤水势和土壤水力传导系数的影响, 实际蒸腾量需要考虑潜在蒸腾量和土壤含水率的关系。从这个角度出发, “可利用的土壤水”依赖于为满足植物蒸腾所需的根系吸水速率, 蒸腾速率同时也受气象要素的影响, 所以在同一土壤水分状态下会出现蒸腾速率较低时水分是能满足利用, 而蒸腾速率相对较高时水分不能满足利用的情形。

4 未来展望

植物根系连接土壤包气带和大气两个系统, 构成了一个完整的连续体, 根系吸水不是局部水分状态问题, 而是整体土水势不均一的问题。因此根系吸水补偿是对土壤水势分布不均一的响应, 不再依赖根系密度决定根系吸水量。补偿不是为了达到潜在蒸腾量, 而是整体考虑潜在蒸腾量和土壤可利用水量的供需关系上可达到的最大蒸腾量, 根据植物胁迫指数函数来补偿蒸腾量忽略了这种供需关系。因此补偿模型应耦合植物胁迫指数函数、弱化根系密度对吸水的影响、综合考虑土壤与大气水分状态。

我国西北干旱区, 地下水位的波动对植物生长

具有显著影响^[39], 水位波动既可能是促进因子, 也可能是限制因子, 这与水位波动幅度和植物种类有关^[40], 地下水湿生植物根系的垂直分布与动态对水环境变化极为敏感^[41-42]。受水分条件影响, 植物根系在垂直和水平方向上都呈现一定的差异性。地下水依赖型植物通过根系在垂向上的快速生长, 从而适应持续下降的地下水环境^[43-44]。反之, 在地下水水位回升情况下, 水位以下部分的根系由于缺氧而无法进行呼吸作用, 从而导致这部分根系死亡^[45], 但在靠近地面处能产生许多新生的不定根, 增加吸水量^[46]。不同的植物面对水淹所采取的适应策略不同, 有的植物通过加速地上部分的生长以逃离水淹环境^[47], 有的植物则减缓生长以保存生长所需的能量^[48]。在水位波动期间, 根区微生物量、地表冠幅等均会发生变化, 涉及生态学、微生物学及农业生态学等学科, 过程十分复杂, 因此, 宏观根系吸水补偿模型应朝着大气环境、地下水动态、包气带含水率及植物根系分布特征的耦合模型发展。

参考文献(References):

- [1] WANG W K, ZHANG Z Y, YE H T C J, et al. Flow Dynamics in Vadose Zones with and without Vegetation in an Arid Region [J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 106: 68-79. DOI: 10.1016/j.advwatres.2017.03.011.
- [2] GARDNER W R. Dynamic aspects of water availability to plants [J]. *Soil Science*, 1960, 89(2): 63-73. DOI: 10.1146/annurev.pp.16.060165.001543.
- [3] FEDDES R A, ZARADNY H. Model for simulating soil water content considering evapotranspiration Comments [J]. *Journal of Hydrology*, 1978, 37(3): 393-397. DOI: 10.1016/0022-1694(78)90030-6.
- [4] ARYA L M, BLAKE G R, FARRELL D A. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: II Effect of plant growth on soil water pressure and water loss patterns [J]. *Proceedings Soil Science Society of America*, 1975, 39(3): 430-436. DOI: 10.2136/sssaj1975.03615995003900030022x.
- [5] ARYA L M, BLAKE G R, FARRELL D A. A field study of soil water depletion patterns in presence of growing soybean roots: III Rooting characteristics and root extraction of soil water [J]. *Proceedings Soil Science Society of America*, 1975, 39(3): 437-444. DOI: 10.2136/sssaj1975.03615995003900030023x.
- [6] NNYAMAH J U, BLACK T A. Rates and patterns water uptake in a Douglas fir forest [J]. *Proceedings Soil Science Society of America*, 1977, 41(5): 972-979. DOI: 10.2136/sssaj1977.03615995004100050033x.
- [7] SKAGGS T H, GENUCHTEN M T V, SHOUSE P J, POSS J A. Macroscopic approaches to root water uptake as a function of water and salinity stress [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 86(1): 140-149. DOI: 10.1016/j.agwat.2006.06.005.
- [8] HOOGLAND J C, FEDDES R A, BELMANS C. Root water uptake model depending on soil water pressure head and maximum extraction rate [J]. *Acta Hort*, 1981, 36(19): 119-123. DOI: 10.17660/ActaHortic.1981.119.11.
- [9] HOFFMAN G J, VAN GENUCHTEN M. Soil properties and efficient water use: water management for salinity control [M]. *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*, 1983: 73-85. http://www.ans.usda.gov/SP2UserFiles/Place/20360500/pdf_pubs/P0701.pdf.
- [10] PRASAD R. A linear root water uptake model [J]. *Journal of Hydrology*, 1988, 99(3): 297-306. DOI: 10.1016/0022-1694(88)90055-8.
- [11] HAYHOE H, DE JONG R. Comparison of two soil water models for soybeans [J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1998, 30(1): 5-11. http://www.csbe-scgab.ca/docs/journal/30/30_1_5_ocr.pdf.
- [12] LI K Y, DE J R, BOISERT J B. An exponential root-water uptake model with water stress compensation [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 252(1): 189-204. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00456-5.
- [13] JARVIS N. A simple empirical model of root water uptake [J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 107(1): 57-72. DOI: 10.1016/0022-1694(89)90050-4.
- [14] SIMUNEK J, HOPMANS J W. Modeling compensated root water and nutrient uptake [J]. *Ecological Modeling*, 2009, 220(4): 505-521. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004.
- [15] PETER J S, JAMES E A, SIMUNEK J. Simulating root water uptake from a shallow saline groundwater resource [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(5): 784-790. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.08.016.
- [16] PANG X P, LETEY J. Development and evaluation of ENVIRO-GRO, an integrated water, salinity, and nitrogen model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(5): 1418-1427. DOI: 10.2136/sssaj1998.03615995006200050039x.
- [17] COELHO E F. A parametric model for two dimensional water uptake intensity by corn roots under drip irrigation [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(4): 1039-1049. DOI: 10.2136/sssaj1996.03615995006000040012x.
- [18] COELHO E F. Root distribution and water uptake patterns of corn under surface and subsurface drip irrigation [J]. *Plant Soil*, 1999, 206(2): 123-136. DOI: 10.1023/A:1004325219804.
- [19] 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. DOI: 10.1097/00010694-20000300000005.
- [20] LAI C T, KATUL G. The dynamic role of root water uptake in coupling potential to actual transpiration [J]. *Advances in Water Resource*, 2000, 23(4): 427-439. DOI: 10.1016/S0309-1708(99)00023-8.
- [21] JACKSON R B, CANADELL J, EHLERINGER J R, et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes [J]. *Oecologia*, 1996, 108(3): 389-411. DOI: 10.1007/BF00333714.
- [22] CAMPBELL C A, CAMERON D R, NICHOLAICHU K W, et al. Effects of fertilizer N and soil moisture on growth, N content, and moisture use by spring wheat [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1977, 57(3): 289-310. DOI: 10.4141/cjss77-035.
- [23] BRAUD I, VARADO N, OLIOSSO A. Comparison of root water uptake modules using either the surface energy balance or

- potential transpiration [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 301 (1): 267-286. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.06.033.
- [24] VARADO N, BRAUD I, ROSS P J. Assessment of an efficient numerical solution of the 1D Richards' equation on bare soil[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 323(1): 244-257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.052.
- [25] DE JONE VAN LIER Q, VAN DAM J C, METSELAAR K, et al. Macroscopic root water uptake distribution using a matrix flux potential approach[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(3): 22. DOI: 10.2136/vzj2007.0083.
- [26] LIU N, GUAN H, LU O Z, et al. Examination of a coupled supply- and demand-induced stress function for root water uptake modeling[J]. *Hydrology Research*, 2017, 48(1): 66-76. DOI: 10.2166/nh.2016.173.
- [27] JARVIS N. Comment on "Macroscopic Root Water Uptake Distribution Using a Matrix Flux Potential Approach" [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 499-502. DOI: 10.2136/vzj2009.0148.
- [28] SIMUNEK J, VAN GENUCHTEN, MT, SEJNA M. Development and applications of the Hydrus and Stanmod software packages and related codes[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(9): 587-600. DOI: 10.2136/vzj2007.0077.
- [29] COUVREUR V, VANDERBORGHT J, JAVAUX M. A simple three dimensional macroscopic root water uptake model based on the hydraulic architecture approach[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2012, 16(8): 2957-2971. DOI: 10.5194/hess-16-4943-2012.
- [30] BOUTEN W, HEIMOVAARA T J, TIKTAK A. Spatial patterns of through fall and soil water dynamics in a Douglas fir stand[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28(12): 3227-3233. DOI: 10.1029/92WR01764.
- [31] MARIUS H. Compensation in Root Water Uptake Models Combined with Three Dimensional Root Length Density Distribution[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13(2): 373-373. DOI: 10.2136/vzj2013.08.0149.
- [32] ALBASHA R, MAILHOL J C, CHEVIRON B. Compensatory uptake functions in empirical macroscopic root water uptake models: Experimental and numerical analysis[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 155(2008): 22-39. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.03.010.
- [33] JAVAUX M, COUVREUR V, VANDERBORGHT J, et al. Root water uptake: from three dimensional biophysical processes to macroscopic modeling approaches[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4): 108-112. DOI: 10.2136/vzj2013.02.0042.
- [34] ANDRE P. Modified conceptual model for compensated root water uptake: A simulation study[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 534: 1-10. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.047.
- [35] 王玉阳, 陈亚鹏. 植物根系吸水模型研究进展[J]. *草业学报*, 2017, 26(3): 214-225. (WANG Y L, CHEN Y P. Research progress in water uptake models by plant roots[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(3): 214-225. (in Chinese)) DOI: 10.11686/CYXB2016146.
- [36] SCHNEIDER C L, ATTINGER S, DELFS J O, et al. Implementing small scale processes at the soil-plant interface: the role of root architectures for calculating root water uptake profiles[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2010, 14(2): 279-289. DOI: 10.5194/hess-14-279-2010.
- [37] JAVAUX M, SCHRÖDER T, VANDERBORGHT J. Use of a Three Dimensional Detailed Modeling Approach for Predicting Root Water Uptake[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(7): 1079-1088. DOI: 10.2136/vzj2007.0115.
- [38] VILIAM N, HAVRILA J. Method to estimate the critical soil water content of limited availability for plants[J]. *Biologia*, 2006, 61(19): 289-293. DOI: 10.2478/s11756-006-0175-9.
- [39] KEELAND B D, SHARITZ R R. The Effects of Water Level Fluctuations on Weekly Tree Growth in a Southeastern USA Swamp[J]. *American Journal of Botany*, 1997, 84(1): 131-139. DOI: 10.2307/2445890.
- [40] 韦颖. 三种植物对水位变化的形态和生理响应[D]. 南京: 南京大学, 2015. (WEI Y. The morphological and physiological response of three plants to the water level variation[D]. Nanjing: Nanjing University, 2015. (in Chinese)).
- [41] 井家林. 极端干旱区绿洲胡杨根系空间分布特征及其构型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014. (LIN J J. Research on the root system distribution and architecture of *Populus euphratica* in the extremely arid region[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014. (in Chinese)).
- [42] 徐贵青, 李彦. 共生条件下三种荒漠灌木的根系分布特征及其对降水的响应[J]. *生态学报*, 2009, 29(1): 130-137. (XU G Q, LI Y. Roots distribution of three desert shrubs and their response to precipitation under co-occurring conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(1): 130-137. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-0933.2009.01.016.
- [43] ORELLANA F, VERMA P, LI S P L, et al. Monitoring and modeling water-vegetation interactions in groundwater dependent ecosystems[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50(3): RG3003. DOI: 10.1029/2011rg000383.
- [44] VONLANTHEN B, ZHANG X, BRUELHEIDE H. On the run for water: Root growth of two phreatophytes in the Taklamakan Desert[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(12): 1604-1615. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2010.07.004.
- [45] NAUMBURG E, MATA-GONZALEZ R, HUNTER R G, et al. Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation[J]. *Environmental Management*, 2005, 35(6): 726-740. DOI: 10.1007/s00267-004-0194-7.
- [46] 王文泉, 张福锁. 高等植物厌氧适应的生理及分子机制[J]. *植物生理学报*, 2001, 37(1): 63-70. (WANG W Q, ZHANG F S. The Physiological and Molecular Mechanism of Adaptation to Anaerobiosis in Higher Plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 2001, 37(1): 63-70. (in Chinese)) DOI: 10.13592/j.cnki.ppj.2001.01.028.
- [47] VOESENEK L A, COLMER T D, PIERIK R, et al. How plants cope with complete submergence[J]. *New Phytologist*, 2006, 170(2): 213-226. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2006.01692.x.
- [48] LUO F L, ZENG B, CHEN T, et al. Response to simulated flooding of photosynthesis and growth of riparian plant *Salix variegata* in the Three Gorges Reservoir Region of China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, 31(5): 910-918. DOI: 10.17521/cjpe.2007.0115.