

土壤—植物系统中水流阻力的变性

黄明斌 邵明安

(中国科学院 西北水土保持所, 712100)
水利部

摘 要

本文依据生长箱内模拟试验资料,借助于瞬态流方程,从蒸腾速度的日变化和长期变化两个方面,分析了冬小麦和玉米水流阻力的变性。最后指出冬小麦和玉米的水流阻力随蒸腾速率的增大而减小,呈指数函数关系,且当蒸腾速率增大到某一定值时,水流阻力为一常数。同时,本文还讨论了有效水势对水流阻力的影响。

关键词 水流阻力,蒸腾速率,变性

土壤—植物系统中的水流阻力,根据水分在该系统中流动所经过的主要环节,可分为土壤阻力、土根接触阻力、根系吸收和传导阻力、基叶传导阻力。土壤阻力的大小主要由土壤含水量决定,无论是稳定或者瞬变环境条件,均可由相应的公式计算^[2-3]。土壤—植物系统中水流阻力的变性主要是指土根接触阻力、根系吸收和传导阻力、基叶传导阻力随水流速率、时间而变化。但是日常分析时,由于土根界面水势很难直接测定,往往将土壤—植物系统作为一整体进行讨论。水流阻力随时间的变化已为众多研究者所公认,而水流阻力随水流速率的变性,则存在着许多歧异。

Dube等(1975)^[4]在稳变环境下,即环境变化后,植物蒸腾速率发生相应的变化,直到稳定,然后测定玉米叶水势与蒸腾速率,并借助于Van Den Honert(1948)^[5]提出的稳态流方程进行分析,指出玉米的水流阻力为一常数,不随水流速率而变化。Ackerson等(1977)同样借助于稳态流方程,分析田间生长的玉米、棉花、高粱的叶水势与蒸腾速率,发现玉米的水流阻力为一常数;棉花的水流阻力随蒸腾速率的增大而减小,并趋于一定值;高粱的水流阻力受土壤水分条件影响,干旱土壤,水流阻力为一常数,湿润土壤,水流阻力随蒸腾速率的增大而减小。Denmead(1976)^[6]、Jones(1978)^[7]均借助于稳态流方程,研究同一作物小麦,得出相反的结论,Denmead等认为小麦水流阻力为一常数, Jones认为小麦水流阻力随蒸腾速率的增大而减小。

上述研究者在分析土壤—植物系统中水流阻力的变性时,存在三点不足:第一,在瞬变环境条件下,以稳态流为基础讨论水流阻力的变性,忽略了系统中水溶效应。经我们研究发现,土壤—植物系统中水容很大,充、放水特性明显,对水流阻力的改变冬小麦可达63%,玉米可达76%。第二,在稳态水流下,以稳态流方程为基础讨论水流阻力的变性,理论上可行,但无普遍意义,因为植物大多生长在瞬变环境下。第三,以上研究者所得出

的结论,大多以植物生长的某一天或几天的观测资料为依据,缺乏代表性,因为水流阻力不仅随水流速率、时间而变,而且受有效土壤水势的影响。鉴于上述之不足,本文拟以冬小麦和玉米为研究对象,考虑植物蒸腾速率的日变化和季节变化,进一步讨论土壤—植物系统中水流阻力的变异性。

1 材料与方 法

本试验在生长箱内进行,所种作物为冬小麦和玉米。冬小麦于 1993 年 2 月 24 日播于直径为 20cm、高 50cm 的四周打有测湿孔的塑料管内,作三种水分处理(含水量分别为田间持水量的 85—100%、70—85%、55—70%),四次重复,供试土壤为轻壤土。玉米于 1993 年 7 月 5 日播于同样的塑料管内,作三种水分处理,四次重复,供试土壤为武功重壤土。

生长箱内的温度,种冬小麦时为 $18^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$,种玉米时为 $26 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。湿度、光强度分别为 $65 \pm 5\%$ 、400 瓦/平方米。

抑制蒸腾用湿布法;冬小麦和玉米的蒸腾速率用称重法(土壤表面盖有一层石英砂,时间间隔为 20—25 分钟(在测定蒸腾速率的日变化时,用快速称重法);叶水势用叶水势仪测定;冬小麦的根水势用分层根法,玉米的根水势用水势仪测气根而得。

上述各项,在冬小麦整个生育期内共测了 10 次,且在出苗后的第 28 天加测叶水势和蒸腾速率的日变化;在玉米出苗—拔节期内共测了 9 次,在出苗后的第 52 天加测叶水势、蒸腾速率的日变化。

2 模型简述

在瞬变环境条件下, Van Den Honert (1948) 提出的稳态流方程似欠不足。后来,人们在深刻分析系统中水流运行的机理上,由 Wallace 等 (1980)^[8] 提出,邵明安等 (1991)^[11] 完善的瞬态流方程更为通用。其表达式如下:

$$Q_{(t)} = \frac{\psi_b - \psi_e}{R} + \frac{d}{dt} (C \cdot (\psi_b - \psi_e)) \quad (1)$$

式中, $Q_{(t)}$ 为水流通量, ψ_b 为有效土壤水势^[9], ψ_e 为叶水势, R 为水流阻力, C 为水容, t 为时间。

在一给定的较短时间内, R 、 C 、 Q 可认为不变, (1) 式可变为:

$$\psi_b - \psi_e = RQ + \beta e^{-\frac{t}{RC}} \quad (2)$$

式中 β 为常数,可由初终条件确定。 RC 常用抑制蒸腾的方法,由下式计算:

$$\psi_e(t) = (\psi_e(0) - \psi_b) e^{-\frac{t}{RC}} + \psi_b \quad (3)$$

3 结果与讨论

3.1 水流速率对土壤—植物系统中水流阻力的影响

为了系统地分析土壤—植物系统中水流阻力与水流速率的关系,我们从两方面进行了研究;一是在冬小麦出苗后的第 28 天、玉米出苗后的第 52 天,测定了植物叶水势与蒸腾速率的关系(图 1);二是测定了冬小麦全生育期、玉米出苗—拔节期植物叶水势、蒸腾

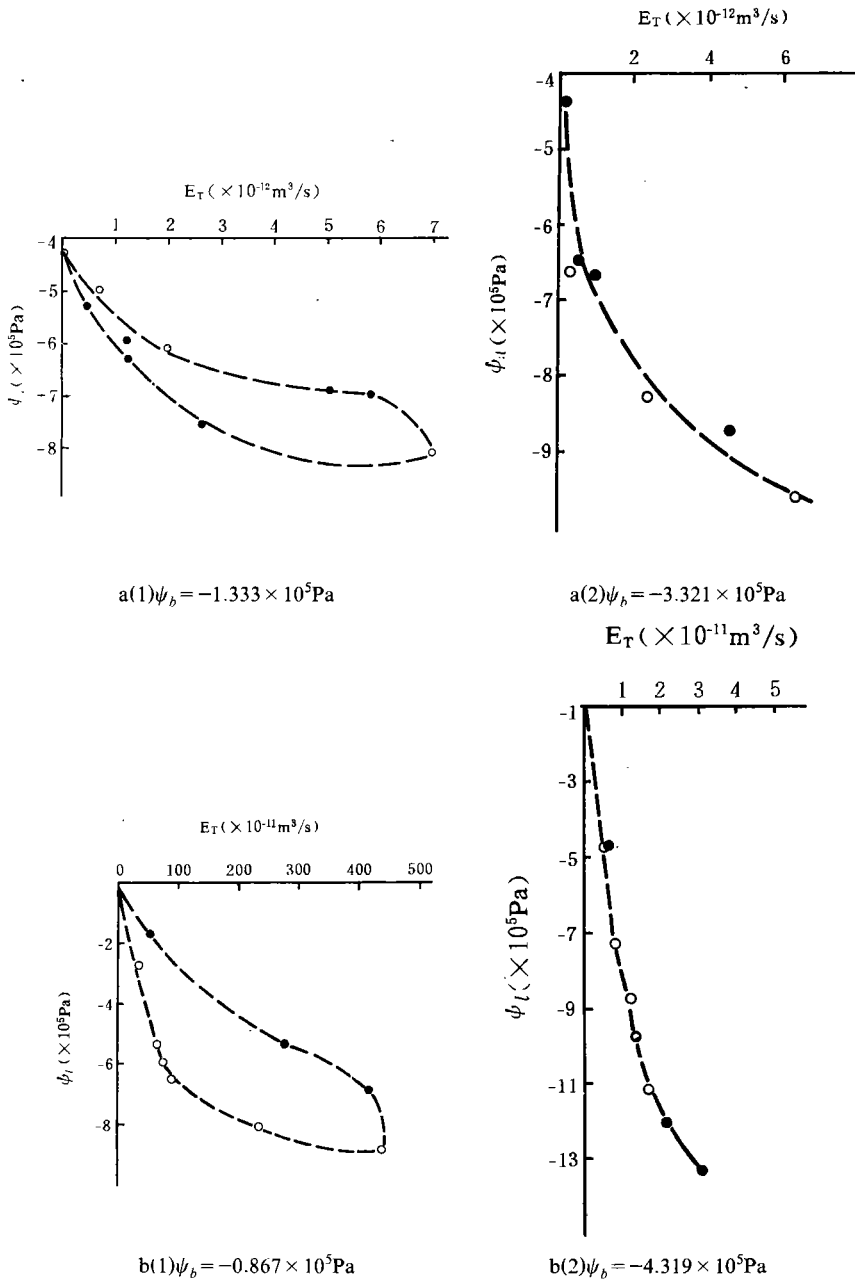
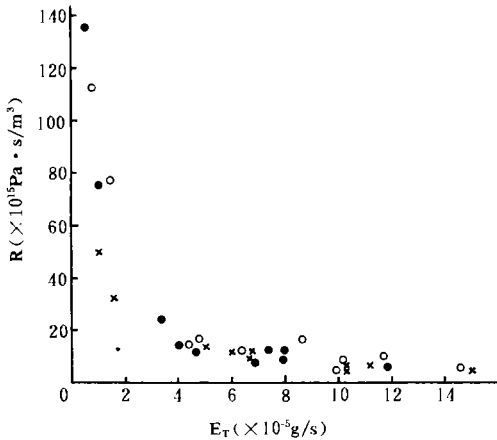


图 1 冬小麦(a)、玉米(b)在不同有效土壤水势下叶水势与蒸腾速率的关系

Fig.1 The relationbetween Low and E_T of winter wheat(a) and corn(b) under conditions of different effective soil water potentials

速率以及叶水势的恢复过程,并利用(1)一(3)式计算了水流阻力,蒸腾速率与水流阻力的关系(图2)。

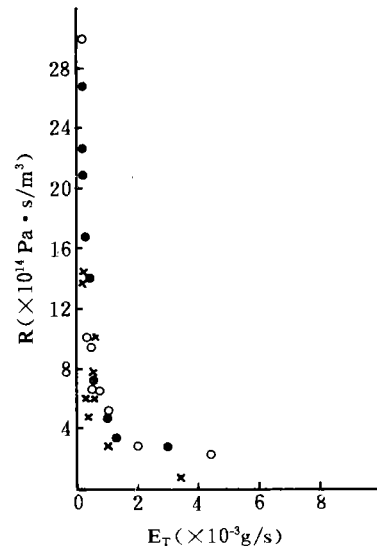
由图1可见,冬小麦和玉米,叶水势与蒸腾速率的关系比较复杂,而非简单的线性或非线性关系。当有效土壤水势较高时,即植物生长不受水分限制,叶水势与蒸腾速率间存在滞后现象。等蒸腾速率相同时,上午的水流阻力小于下午,这一结果主要是由于系统中水容的调节作用引起的¹⁾。但是无论是上午或者下午,系统内的水流阻力均随蒸腾速率的增大而减小,呈指数关系。当有效土壤水势较低时,植物生长受水分的限制,叶水势与蒸腾速率间不存在滞后现象,在相同的水势下,上午和下午有相同的水流阻力,且水流阻力随蒸腾速率的增大而减少,呈指数函数关系。不过由于测定时,冬小麦为三叶期,玉米为拔节期,叶面积小,蒸腾速率小,因此,在两种水分条件下,两种植物均未观测到水流阻力为一定值的现象。植物在全生育期或者某几个生育期内,系统内的水流阻力不仅受蒸腾速率的影响,而且还随时间而变化。水流阻力随时间而变化主要表现在植物自身节律的变化对水分运行的影响,如根系的木栓质化、细胞渗透调节的变化、组织分化、导管内活的内含物的增减等。而这一变化总导致系统内水流速率发生相应的变化,很难将二者对水流阻力的影响分割开来。



$$\begin{aligned} \times \times \times \times \bar{\psi}_b &= -1.088 \times 10^5 \text{ Pa} \\ \dots \bar{\psi}_b &= -1.601 \times 10^5 \text{ Pa} \\ \dots \bar{\psi}_b &= -2.492 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

图2(a) 冬小麦水流阻力与蒸腾速率的关系

Fig.2(a) The relationship between hydraulic resistance and E_T of winter wheat



$$\begin{aligned} \times \times \times \times \bar{\psi}_b &= -0.699 \times 10^5 \text{ Pa} \\ \dots \bar{\psi}_b &= -1.312 \times 10^5 \text{ Pa} \\ \dots \bar{\psi}_b &= -2.252 \times 10^5 \text{ Pa} \end{aligned}$$

图2(b) 玉米水流阻力与蒸腾速率的关系

Fig.2(b) The relationship between hydraulic resistance and E_T of corn

图2(a)和(b)分别是冬小麦和玉米在不同的水分处理下,土壤—植物系统水流阻力与蒸

1) 黄明斌、邵明安:不同有效土壤水势下植物叶水势与蒸腾速率的关系。水利学报,备刊。

腾速率的相互关系。由图可见,当蒸腾速率较小时,系统内有较高的水流阻力,而后随着蒸腾速率的增大,水流阻力明显降低,且前期快,后期慢;当蒸腾速率继续增大时,水流阻力变化不明显,逐渐趋于一定值。不同的水分处理,系统内水流阻力的大小存在明显差异。总的趋势是,有效土壤水势愈低,水流阻力愈大,水流阻力趋于一定值所需的蒸腾速率愈小。

3.2 有效土壤水势对水流阻力的影响

有效土壤水势与土壤基质势相比更能反映植物生存的水分环境¹⁾,它不仅直接影响土壤阻力的大小,还间接影响土根接触阻力、根系吸收阻力、根系传导阻力、基叶传导阻力。土根接触阻力随有效土壤水势的降低而增大,最大可达土根总阻力的 70%以上;根系吸收阻力是植物固有的生理特性,随有效土壤水势的变化改变较小;根系传导阻力、茎叶传导阻力均随有效土壤水势的降低而增大(表 1)。表 1 是冬小麦全生育期,玉米出苗—拔节期各水流阻力的平均值。

表 1 冬小麦和玉米各部分水流阻力随土壤有效水势的变化

Table 1 Hydraulic resistance changes of winter wheat and corn with available soil water potential

冬小麦				
Winter wheat				
有效土壤水势 Available soil water potential ($\times 10^5 \text{Pa}$)	茎叶传导阻力 Stem-leaf resistance ($\times 10^{15} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	根系阻力 Root resistance ($\times 10^{15} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	土壤阻力 Soil resistance ($\times 10^{11} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	土根接触阻力 Soil-root contact resistance ($\times 10^{15} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)
-1.088	6.424	7.179	1.7194	0.453
-1.601	6.879	19.830	4.1075	2.046
-2.492	11.274	14.309	17.347	4.298
玉米				
Corn				
有效土壤水势 Available soil water potential ($\times 10^5 \text{Pa}$)	茎叶传导阻力 Stem-leaf resistance ($\times 10^{14} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	根系阻力 Root resistance ($\times 10^{14} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	土根接触阻力 Soil-root contact resistance ($\times 10^{14} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$)	土壤阻力 Soil resistance
-0.699	2.258	3.788	0.339	0.882
-1.312	2.854	7.505	0.745	2.874
-2.252	5.992	7.649	1.061	7.111

4 小结

1. 在蒸腾速率的日变化过程中,冬小麦和玉米土壤—植物系统中的水流阻力均随蒸

1) 同前。

腾速率的增大而减小,呈指数函数关系。当有效土壤水势较高时,由于系统内水容的调节作用,在同一蒸腾速率下,下午的水流阻力大于上午。

2.在蒸腾速率的季节性变化过程中,冬小麦和玉米的水流阻力受蒸腾速率和时间的影 响,水流阻力随蒸腾速率的增大而减小,并趋于一定值;不同水分处理下,水流阻力趋于一定值所需的蒸腾速率不一样。

3. 土壤—植物系统中的水流阻力还受有效土壤水势的影响,总的规律是,有效土壤水势愈低,土壤阻力、土壤接触阻力、根系吸收和传导阻力、茎叶传导阻力均愈大。

参 考 文 献

1. 邵明安等,1992:土壤—植物系统中的水容研究.水利学报,6: 1—8.
2. Gardner, W. R., 1960: Dynamic aspects of water availability to plants. *Soil Sci.* 89: 63—73.
3. Moldrup, P. *et al.*, 1992: A simple mechanistic model for soil resistance to plant water uptake. *Soil Sci.* 2: 87—92.
4. Dube, P. A. *et al.*, 1975: Steady state erasistance to water flow in corn well watered conditions. *Can. J. Plant Sci.* 55: 941—948.
5. Van Den Honert, T.H., 1948: Water Transport in plants as a catenary process. *Discussion of the Frady Sor.* 3: 146—153.
6. Denmead, O. T. *et al.*, 1976: Water transport in wheat plants in the field. *Agron. J.* 68: 297—303.
7. Jones, H. G., 1978: Modelling diurnal trends of leaf water potential in transporting wheat. *J. Appl. Ecol.* 15: 613—626.
8. Wallace, J. S. *et al.*, 1983: Water reations of winter wheat, 4. Hydraulic resistance and capacitance in the soil—plant system. *J. of Agric. Sci. Cambridge.* 100: 591—600.
9. Campell, P.S., 1985: *Soil physics with BASIC.* Elsevier, Amsterdam. pp. 129—131.

VARIABILITY OF HYDRAULIC RESISTANCE IN SOIL—PLANT SYSTEM

Huang Mingbin and Shao Mingan

(Northwestern Institute of Soil and Water Conservation,
Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources)

Summary

Based on the simulated experiment data of winter wheat and corn in growth boxes, the variability of hydraulic resistance in the soil—plant system was analysed from aspects of diurnal changes and long—term changes of transpiration rates in this paper. The results indicated that hydraulic resistances in the plant were relatively large at low transpiration rates, decreased as transpiration rates increased and approached a constant value at higher transpiration rates. The effect of effective soil water potential on hydraulic resistances was also studied.

Key words Hydraulic resistance, Transpiration rate, Variability