

# 土壤-植物系统中稳态水流阻力和瞬态水流阻力的差异性

黄明斌 邵明安

(中国科学院 水利部 西北水土保持研究所, 712100)

## 摘 要

本文以田间试验和生长箱内的模拟试验资料,分别讨论了土壤-植物系统(含冬小麦和玉米)中稳态水流阻力和瞬态水流阻力的差别,结果指出,在瞬变环境条件下,用稳态流来近似是不准确的,瞬态流的描述应受重视。

**关键词** 水流阻力, 稳态流, 瞬态流, 土壤-植物系统

土壤-植物系统中水流的电模拟模型,目前较为常用的有稳态流模型和瞬态流模型。稳态流模型以水势差拟电势差,以水流通量拟电流强度,以水流阻力拟电流阻力,定义水势差与水流通量之比为不变的水流阻力。该模型自 Van den Honert<sup>[6]</sup>(1948)首次运用以来,一直沿用至今。但是,用该模型来描述系统中的水流常存在缺陷:一是对水流阻力随水流速率、时间或二者而变的事实无法解释;二是把系统中的瞬态流视为稳态流存在理论上的缺陷。瞬态流模型建立在对系统中水流的深刻认识的基础上,以阻-容网络代替了稳态流中的纯电阻电路。水流阻力随水流通量的增加而减小<sup>[1]</sup>,以及水势差与蒸腾速率间的滞后关系<sup>[2]</sup>,都可在模型中引入水容来描述。

水容的定义为储水量随水势差的变化率<sup>[3]</sup>。充、放水特性是水容的基本性质。水容对系统内水流阻力的影响是通过改变系统内的水流通量来实现的。因此,在同一瞬变环境条件下,用稳态流模型和瞬态流模型分别计算系统内的水流阻力必然存在差异,该差异的大小与水容的大小一致,并且不同的植物,同一植物的不同部位,同一部位的不同生育期,其差异性也不同。本文的目的就是以冬小麦和玉米为研究对象来分析这种差异性。

## 1 模型简述

Van den Honert<sup>[6]</sup>提出的稳态流模型为

$$Q = \frac{\psi_s - \psi_x}{R_{xs}} = \frac{\psi_x - \psi_l}{R_{lx}} \quad (1)$$

式中,  $Q$  是水流通量,  $\psi_s$ 、 $\psi_l$ 、 $\psi_x$  分别是土水势、叶水势和茎水势,  $R_{lx}$ 、 $R_{xs}$  分别是植物地上

和地下部分的水流阻力。

上述模型忽略了系统内的水容效应, 后由 Wallace 等 (1984)<sup>[7]</sup> 提出, 并由邵明安等 (1991)<sup>[1]</sup> 完善的瞬态流方程更为通用。其表达式如下:

$$Q_{(t)} = \frac{\psi_B - \psi_l}{R} + \frac{d}{dt} [C \cdot (\psi_B - \psi_l)] \quad (2)$$

式中,  $C$  是水容,  $t$  为时间,  $\psi_B$  为有效土壤水势,  $R$  是瞬态水流阻力, 其它符号同前。如求植物地上部分水流阻力, 可将 (2) 式中的  $\psi_B$  换为  $\psi_x$  (茎水势) 即可,  $C$  则为植物地上部分的水容。(2) 式求解可参考文献[1]。

## 2 材料和方法

试验分田间试验和生长箱内的模拟试验两种, 作物有冬小麦和玉米。田间试验不作水分处理, 与大田作物生长环境一致。冬小麦播于 92 年 9 月 25 日, 玉米播于 93 年 6 月 20 日, 土壤为武功重壤土。

生长箱内的模拟试验分别设有三种水分处理、分别为田间持水量的 85—100%、70—85%、55—70%, 四次重复。生长箱内的模拟试验作物播种于直径为 20cm、高 50cm、四周打有测湿孔、中间设有夹层的塑料管内。土壤是过 2mm 筛, 按规定的容重装入的 (冬小麦, 土壤容重为  $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ ; 玉米, 土壤容重为  $1.40\text{g}/\text{cm}^3$ )。生长箱内的温度, 小麦是  $18^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ , 玉米是  $28^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ; 湿度是  $65 \pm 5\%$ , 光强是  $400\text{Wa}/\text{m}^2$ 。冬小麦播于 93 年 3 月 6 日, 土壤为黑垆土; 玉米播于 93 年 5 月 7 日, 土壤为重壤土。

抑制蒸腾用湿布法; 田间冬小麦和玉米, 用离体快速称重法测其蒸腾速率; 土柱试验的蒸腾速率 (土壤表面盖有一层致密的石英砂) 用感量为 1 克的杆秤称重; 叶水势用叶水势仪测定。冬小麦全生育期共测定了 10 次; 玉米仅观测出苗—拔节期, 共 9 次; 田间试验为对照试验, 玉米观测了 5 次, 冬小麦测定了 6 次。

## 3 结果与讨论

### 3.1 土壤-植物系统中水流阻力的日变化及其差异性

稳态流模型与瞬态流模型计算土壤-植物系统中水流阻力的差值  $\Delta R$ , 其大小是由系统中水容的时间变化率和水势差的时间变化率共同决定的, 其符号与叶水势和蒸腾速率的变化过程有关。上午, 蒸腾速率逐渐增大, 由水势梯度所决定的根系吸水速率小于蒸腾速率, 植物组织释水, 由稳态流模型所计算的水流阻力 ( $R'$ ) 小于由瞬态流模型所计算的水流阻力 ( $R$ ),  $\Delta R = R - R' > 0$ ; 下午, 蒸腾速率逐渐减小, 由水势梯度所决定的根系吸水速率大于蒸腾速率, 植物组织充水,  $R' > R$ ,  $\Delta R < 0$ ; 而在这一更替时刻,  $R' = R$ ,  $\Delta R = 0$ , 这个时刻大约发生在 13 点左右 (图 1)。由图还可看出,  $R$  与  $R'$  的差别, 早、晚较大, 中午较小。这是因为水容和水势差早、晚变化大, 中午变化较小。

### 3.2 土壤-植物系统中水流阻力的长期变化及其差异性

研究显示土壤-植物系统中的水容, 其值较大, 在植物生长过程中的变化也较剧烈<sup>[4]</sup>, 同时还受有效土壤水势的影响。因此, 水容对系统内水流的调节作用也必将随植物生长

过程而变化,  $R'$  与  $R$  的差别也会发生变化。下面我们将分别予以讨论。

因为生长箱内生长的冬小麦和玉米, 我们仅观测了上午叶水势的降低过程, 由图 1  $R$  与  $R'$  的日变化过程可知, 此时  $R-R'$  总是大于零的 (见表 1(a) 和 (b))。

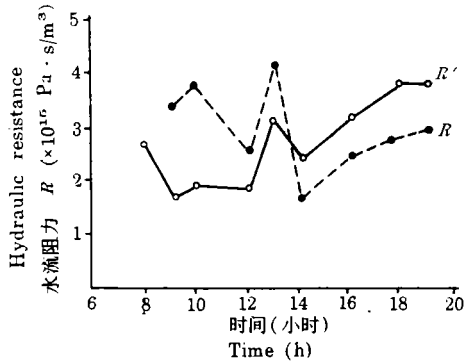


图 1 两种方法计算田间土壤-冬小麦系统中水流阻力的日变化

Fig.1 Daily changes of hydraulic resistance in field Soil-winter wheat system calculated by the two models

表 1(a) 两种方法计算土壤-冬小麦系统总水流阻力 ( $R$ ) 的差异性

Table 1(a) Differences between calculated total hydraulic resistances ( $R$ ) of soil-winter wheat system by the two models

$\bar{\psi}_b$		时间(天)									
		Time (day)									
		9	17	26	37	47	57	61	72	80	88
-1.088	$R$	57.90	32.20	8.66	10.81	10.94	5.89	6.86	10.12	5.36	4.24
	$R'$	48.57	23.85	7.34	9.34	4.07	3.21	3.83	4.91	3.01	2.79
-1.601	$R$	112.34	76.51	13.09	11.62	16.24	8.30	5.35	11.27	5.88	8.43
	$R'$	81.53	36.77	9.96	10.83	5.64	3.45	2.97	7.46	2.19	4.28
-2.492	$R$	133.61	75.24	24.63	12.82	12.16	11.23	8.61	9.08	7.53	4.01
	$R'$	76.01	49.34	16.25	10.08	5.54	7.67	4.61	8.44	6.13	3.16

注:  $\bar{\psi}_b$  的单位是  $\times 10^5 \text{Pa}$ ;  $R, R'$  的单位是  $\times 10^{15} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

由表可知, 冬小麦全生育期内, 两种模型计算土壤-植物系统内的水流阻力, 其差别是苗期和抽穗期大, 成熟期小; 不同的水分处理,  $R$  与  $R'$  的大小及差别均存在明显差异, 总的看来是中等水分处理  $\Delta R$  的差别最大。玉米在出苗期—拔节期内,  $R$  与  $R'$  的差别随着时间的增大而减小; 不同的水分处理,  $R$  与  $R'$  的大小及差别也存在明显区别, 充分供水,  $R$  与  $R'$  的差别最大; 水分胁迫,  $R$  与  $R'$  的差别最小。

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、茎叶传导阻力。因为各部分的水容大小不同, 对系统内水流的调节作用不一样, 两种模型计算各部分的水流阻力必将存在明显的差异。现仅就中等水分条件下, 冬小麦和玉米植物部分的水流阻力和植物地下部分的水

表 1(b) 两种方法计算土壤-玉米系统中总水流阻力( $R$ )的差异性Table 1(b) Differences between the calculated hydraulic resistances ( $R$ ) of soil-corn system by two models

		时间(天)								
		Time (day)								
$\bar{\psi}_b$		12	16	22	26	30	33	37	42	46
-0.699	$R$	15.07	14.17	5.89	4.93	6.55	5.72	3.14	1.1	0.83
	$R'$	9.06	4.75	3.80	2.33	5.45	4.34	2.30	0.81	0.49
-1.312	$R$	36.20	30.76	9.14	9.84	9.91	10.26	5.11	3.14	2.27
	$R'$	24.13	16.92	7.39	7.79	5.71	7.55	3.39	2.26	1.54
-2.252	$R$	22.94	27.62	21.77	14.41	17.09	17.32	4.50	3.76	3.20
	$R'$	19.56	18.67	17.20	11.92	15.59	11.64	3.53	2.59	2.61

注:  $\bar{\psi}_b$  的单位是  $\times 10^5 \text{Pa}$ ;  $R, R'$  的单位是  $\times 10^{14} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

表 2(a) 两种方法计算冬小麦植物部分( $R_{lr}$ )和地下部分( $R_{ss}$ )水流阻力的差异Table 2(a) calculated hydraulic resistances of plant (from leaves to roots,  $R_{lr}$ ) and underground part (from stem to soil,  $R_{ss}$ ) in the soil winter wheat system by two models

		时间(天)									
		Time (day)									
$\bar{\psi}_b$		9	17	26	37	47	57	61	72	80	88
-1.601	$R_{lr}$	105.47	70.97	11.99	9.77	15.23	7.63	4.72	9.86	5.49	7.61
	$R'_{lr}$	74.66	31.22	8.65	8.98	4.63	2.78	2.13	6.09	3.82	3.45
-1.601	$R_{ss}$	78.20	57.83	7.94	10.40	8.99	5.21	4.46	6.38	3.21	3.63
	$R'_{ss}$	71.87	22.42	5.68	5.95	2.71	1.89	2.04	4.05	0.18	1.58

注:  $\bar{\psi}_b$  的单位是  $\times 10^5 \text{Pa}$ ;  $R_{lr}, R'_{lr}, R_{ss}, R'_{ss}$  的单位是  $\times 10^{15} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

表 2(b) 两种方法计算玉米植物部分( $R_{lr}$ )和地下部分( $R_{ss}$ )水流阻力的差异Table 2(b) calculated hydraulic resistances of plant (from leaves to roots,  $R_{lr}$ ) and underground part (from stem to soil,  $R_{ss}$ ) in the soil-corn system by the two models

		时间(天)								
		Time (day)								
$\bar{\psi}_b$		12	16	22	26	30	33	37	42	46
-1.312	$R_{lr}$	36.03	29.27	8.58	9.32	9.57	9.33	4.64	2.77	2.16
	$R'_{lr}$	22.41	14.50	6.83	7.27	5.37	6.61	2.93	1.88	1.28
-1.312	$R_{ss}$	27.48	18.25	6.17	8.11	6.89	6.86	2.54	2.11	1.39
	$R'_{ss}$	16.16	8.96	4.19	4.73	3.61	4.90	2.15	1.41	0.97

注:  $\bar{\psi}_b$  的单位是  $\times 10^5 \text{Pa}$ ;  $R_{lr}, R'_{lr}, R_{ss}, R'_{ss}$  的单位是  $\times 10^{14} \text{Pa} \cdot \text{s} / \text{m}^3$ 。

流阻力列于表 2(a)、(b),以作参考。同时表 3 列出了冬小麦和玉米各部分水流阻力的平均增大百分率(增大百分率 =  $\frac{R - R'}{R'} \times 100\%$ )。

表 3 两种方法计算冬小麦和玉米各部分水流阻力的差异性(平均值)

Table 3 The differences among various calculated hydraulic resistances of winter wheat and corn (on the average) by two models

作物 Crop	有效土壤水势 ( $\times 10^5$ Pa) Available soil water potential	总阻力增大 百分率 Increment of total resistance	植物部分阻力 增大百分率 Increment of plant resistance	地下部分阻力 增大百分率 Increment of underground part resistance
冬	-1.088	37.01	45.12	43.00
小	-1.601	63.11	73.99	57.34
麦	-2.492	59.67	77.47	66.73
玉	-0.699	72.25	62.76	79.69
	-1.312	52.24	61.64	69.49
米	-2.252	28.34	30.37	35.65

由以上诸表可知,用稳态流模型和瞬态流模型计算土壤-植物系统中各部分的水流阻力,其值差别较大。冬小麦的总水流阻力最大差别可达 63.11%,植物部分的水流阻力最大差别可达 66.73%;玉米的总水流阻力最大差别可达 72.25%、植物部分的水流阻力最大差别可达 62.76%、地下部分的水流阻力最大差别可达 79.69%。不同的水分处理,系统内水流阻力的不同部位,同一部位的不同生育期,其改变程度也有很大差别,且较复杂,涉及到植物水势的改变,又涉及到水容的大小及随时间的变化率,而且不同的植物不一样。但无论是系统内总水流阻力,还是植物体内各部分的水流阻力,其大小及差值  $\Delta R$  随时间的变化规律是一致的,苗期大,而后减小,拔节后又增大,成熟后又逐渐减小。

总之,由上述分析,可得出一个相当重要的结论,即稳态流的近似是不准确的,瞬态流的描述应受重视。

## 4 小结

用稳态流模型和瞬态流模型计算土壤植物系统中各部分阻力,其值差别很大。一般规律是:上午,叶水势逐渐降低,由瞬态流模型计算的水流阻力、大于由稳态流计算的水流阻力;下午,叶水势逐渐恢复,由瞬态流计算的水流阻力小于由稳态流计算的水流阻力。不同的水分条件,系统内不同的部位,差别不一样,关系较为复杂。冬小麦三种水分处理,  $R_{\text{总}}$  平均增大百分率为 53.25%、植物部分水流阻力平均增大百分率为 65.54%、地下部分的水流阻力平均增大百分率是 52.36%;玉米三种水分处理,  $R_{\text{总}}$  的平均增大百分率为 50.94%、植物部分的水流阻力平均增大百分率为 51.59%、地下部分水流阻力平均增大百

分率是 61.61%。因此, 我们认为在瞬变环境条件下, 用稳态流来近似是不确切的, 瞬态流的描述应受重视。

## 参 考 文 献

1. 邵明安, 1991: 论土壤-植物系统中水电模拟时间常数的变异性, 科学通报, 第36卷24期, 1890—1893页。
2. 黄明斌, 邵明安, 1995: 冬小麦叶水势-蒸腾速率关系的滞后效应, 科学通报, 第40卷12期, 1137—1139页。
3. 邵明安, L. P. Simmonds, 1992: 土壤-植物系统中的水容研究, 水利学报, 第6期, 1—8页。
4. 黄明斌, 邵明安, 1994: 土壤-植物系统中非稳态流研究进展, 土壤学进展, 第22卷3期, 20—26页。
5. 邵明安, L. P. Simmonds, 陈志雄, 1991: Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant system, *Pedosphere*, 1(3): 193—206.
6. Van den Honert, T. H., 1948: Water transport in plants as a catenary process, *Discussions of the Faraday Society*, 3: 146—153.
7. Wallace, J. S. and Biscoe, P. V. 1983: Water relations of winter wheat 4: Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant system, *Journal of Agricultural Science*, 100(3): 591—600.

# HYDRAULIC RESISTANCE DIFFERENCES BETWEEN STEADY WATER FLOW AND UNSTEADY WATER FLOW IN THE SOIL PLANT SYSTEMS

Huang Mingbin and Shao Mingan

(Northwestern Institute of soil and water conservation, Academia Sinica and Ministry of Water Conservancy, China 712100)

## Summary

Based on the experimental data obtained from winter wheat and corn in field and growth box, the differences of hydraulic resistance between steady water flow and unsteady water flow in the soil winter wheat and soil-corn system were studied in this work. The results indicated that under unsteady environmental conditions the model of steady water flow was not accurate, but, instead, the model of unsteady water flow should be valued.

**Key words** Hydraulic resistance, Steady water flow, Unsteady water flow, Soil plant system