

158-163

5730(9)

# 土壤-植物-大气连续体水流阻力 分布规律的研究\*

康绍忠

(西北农业大学水利系, 陕西杨陵, 712100)

5181

**摘要** 本文依据田间实测资料, 分析了土壤-植物-大气连续体水流阻力的相对重要性。结果表明在连续体中的水流阻力主要分布于从叶气孔腔到大气的扩散过程和根系的吸水过程。叶-气之间的水流阻力比土-根之间要大50倍。最后, 讨论了控制连续体水流运动的气孔阻力的变化规律及其与环境因素之间的关系。

**关键词:** 土壤-植物-大气连续体, 水流阻力, 气孔, 相对重要性。土壤-植物-大气, 连续体,

土壤-植物-大气连续体(Soil-Plant-Atmosphere Continuum, 简称SPAC)中水分传输过程是农田生态系统水分迁移与能量转换中最重要的一环。研究SPAC中水流阻力的相对重要性及其变化规律对于定量计算其水流通量, 促进农田生态系统物质能量关系的研究, 具有十分重要的意义。

## 1 试验方法

为了分析SPAC水流阻力分布规律, 作者在西北农业大学灌溉试验站进行了田间小区试验, 试验区四周较为开阔, 能代表大田的气候条件。小区土壤质地为中壤。在试验过程中观测了土壤含水量与基质势、作物叶水势、气孔阻力、蒸腾速率、叶温、株高和叶面积指数、冠层顶太阳辐射和光照强度、空气温、湿度、风速等。

土壤含水量采用取土烘干法测定, 每次在地表、20、40、60、80、100 cm深度取土样3个进行烘干称重计算含水量。气孔阻力、蒸腾速率、叶温和光照强度均采用 LI-1600型稳态气孔计测定, 每次在各小区内随机抽样测6个叶片, 正、反两面都测, 测点在叶片的中上部, 每星期测定1次日变化过程(每小时测定1次), 早6:00开始, 晚8:00结束。由于冬小麦和玉米叶片两面均有气孔, 因此, 叶片总的气孔阻力用如下公式求得:

$$1/r_{t1} = 1/r_{t11} + 1/r_{t12} \quad (1)$$

式中:  $r_{t1}$  是叶片总的气孔阻力,  $r_{t11}$  与  $r_{t12}$  分别是叶片正面与反面的气孔阻力。

土壤基质势根据用压力膜测定的土壤水分特征曲线由土壤含水量计算。叶水势采用 ZLZ-4 型植物水分状况测定仪测定, 其取样和测定时间与气孔阻力和蒸腾速率的测定相同。大气水势由实测空气相对湿度用公式计算。

用阿斯曼通风干湿表在小区内测定离地面1.0 m 高度的干、湿球温度日变化, 然后通过《湿度查算表》查出相应的空气饱和和差。用三杯风速仪测定离地面1.0 m 高度的风速。这些

\* 国家自然科学基金资助项目。

本文于1991年7月23日收到, 修改稿1992年2月2日收到。

测定项目与气孔阻力、叶水势等的测定同步进行、用 DYM 1 型净全辐射仪测定作物全生育期内每日(每小时测定 1 次)的净辐射变化。

在全生育期内每旬测定 1 次作物的株高和叶面积。小区内的植株高度随机抽样测 10 株平均求得。整个试验在 1988—1991 年冬小麦和玉米生育期内进行。

水分通过 SPAC 遇到土-根系统、植物体和叶-气系统的阻力,如图 1 所示。水流要克服上述阻力而从土壤(水源)运移到大(水壑),必须要以消耗能量为代价。因此,在传输路径中水势将不断降低,这种水势梯度构成了 SPAC 中水流运动的驱动力。在一定程度上研究或计算 SPAC 中水流阻力的相对重要性能建立在 Van den Honert 假定<sup>[1]</sup>的基础上,即:

$$q = \frac{\Psi_r - \Psi_l}{R_{r,l}} = \frac{\Psi_r - \Psi_L}{R_{r,L}} = \frac{\Psi_L - \Psi_a}{R_{L,a}} \quad (2)$$

式中:  $q$  为 SPAC 中的水流量;  $\Psi_r$ 、 $\Psi_l$ 、 $\Psi_L$  和  $\Psi_a$  分别是土水势、根水势、叶水势与大气水势;  $R_{r,l}$ 、 $R_{r,L}$  与  $R_{L,a}$  分别是土壤到根表皮、从根表皮到叶气孔腔、通过气孔到达大气中的水流阻力。

由式(2)可见,测定各部分的水势差和水流量,估算各部分的水流阻力,即可在此基础上分析 SPAC 中各部分水流阻力的相对重要性。

## 2 SPAC 各部分水流阻力的计算

根据 SPAC 中水势和水流量等方面的实测资料,计算了 SPAC 中几个部分的水流阻力

### 2.1 土壤阻力 $R_s$

$R_s$  采用 Gardner-Cowan 公式<sup>[2]</sup>计算, 仅需土壤基质势资料, 应用方便, 即:

$$R_s = 125(\Psi_m/\Psi_{m0})^{2.57} \quad (3)$$

式中:  $\Psi_m$  是土壤基质势,  $\Psi_{m0}$  是土壤水分特征曲线上饱和点的进气值,  $R_s$  的单位是 s, 换算成通用单位  $\text{Pa} \cdot (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$  需乘以  $0.4 \times 10^{-6}$ 。

### 2.2 植物体的阻力 $R_p$

$R_p$  包括根系阻力、茎和叶肉的阻力。由式(2)可得:

$$R_p = \frac{\Psi_r - \Psi_L}{T} - R_s \quad (4)$$

式中:  $T$  是植物叶片的蒸腾速率。因此, 同步测定  $\Psi_r$ 、 $\Psi_L$  与  $T$  即可计算植物体阻力  $R_p$ 。

### 2.3 叶-气系统的水流阻力 $R_L$

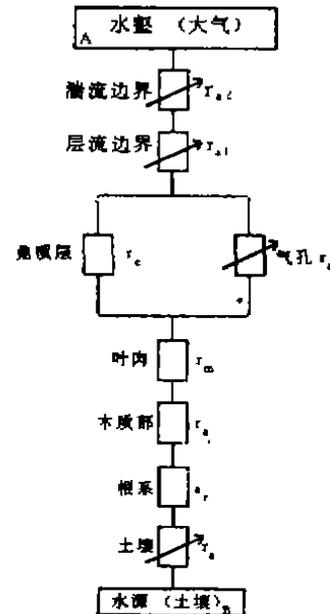


图 1 SPAC 中水流阻力分布示意图  
Fig.1 The distribution of hydraulic resistances in SPAC  
A Pool (Atmosphere)  
B Water source (Soils)

叶-气系统的总水流阻力 $R_L$ 由叶-气系统的水势差和蒸腾速率估算, 即:

$$R_L = \frac{\Psi_L - \Psi_s}{T} \quad (5)$$

在植物水分散失途径中, 角质层蒸腾很小, 主要是气孔蒸腾。在气孔蒸腾路径中, 叶肉阻力可忽略不计, 主要是气孔阻力、叶片层流边界层阻力及冠层上方湍流边界层的阻力。如前所述, 气孔阻力 $r_{s1}$ 采用 LI-1600型稳态气孔计测定。而叶层流边界层阻力 $r_{s1}$ 采用下式确定<sup>[3]</sup>:

$$r_{s1} = 0.151(l/u_{1.0})^{1/2} \quad (6)$$

式中:  $l$  为沿风向的叶长(m),  $u_{1.0}$  为 1.0 m 高处的风速(m/s),  $r_{s1}$  是由气体浓度估算的水流阻力, 其单位是 s/mm。冠层上方湍流边界层阻力  $r_{s2}$  采用 Thom 与 Oliver<sup>[4]</sup> 公式计算, 即:

$$r_{s2} = 4.72[\ln(\frac{z-d}{z_0})]^2 / (1 + 0.54u_z) \quad (7)$$

式中:  $u_z$  是  $z$  高度的风速(m/s),  $r_{s2}$  的单位是 s/m。  $Z_0$  与  $d$  分别是冠层粗糙度与零平面位移, 采用 Szeicz<sup>[6]</sup> 与 Stanhill<sup>[6]</sup> 公式计算, 即:

$$\log Z_0 = 0.997 \log H - 0.883 \quad (8)$$

$$\log d = 0.979 \log H - 0.154 \quad (9)$$

式中:  $H$  是植冠高度(m),  $Z_0$  与  $d$  的单位均为 m。

### 3 SPAC 中各部分水流阻力的相对重要性

根据各部分水流阻力的计算结果分析了其相对重要性。

#### 3.1 土壤阻力、植株体阻力和叶-气系统阻力的相对重要性

土壤阻力 $R_s$ 、植株体阻力 $R_p$ 和叶-气系统的水流阻力 $R_L$ 的计算结果分别列于表 1、表 2 和表 3。

从表 1 可见, 土壤基质势越低, 土壤阻力越高。当土壤饱和或接近饱和时, 其 $R_s$ 可忽略

表 1 不同土壤深度的土壤阻力 $R_s$  计算结果( $\text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ )

Table 1 Results of hydraulic resistances in different depth in soil profile

土层深度 Depth (cm)	1989年4月14日冬小麦 Winter wheat (1989, 4.14)				1989年5月4日冬小麦 Winter wheat (1989, 5.4)				1990年8月5日玉米 Corn (1990, 8.5)			
	干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.		干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.		干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.	
	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )	$\Psi_m$ ( $10^5$ Pa)	$R_s$ ( $10^2$ )
0	-19.72	7.37	-18.53	6.29	-11.12	1.69	-7.25	0.57	-7.58	0.53	-0.08	0.000053
20	-9.56	1.18	-7.26	0.57	-10.09	1.32	-2.09	0.02	-1.81	0.02	-0.08	0.000053
40	-7.82	0.88	-7.32	0.58	-9.05	1.00	-2.35	0.03	-1.46	0.009	-0.08	0.000053
60	-7.64	0.64	-5.35	0.26	-7.94	0.71	-2.25	0.03	-1.64	0.012	-0.39	0.00031
80	-7.07	0.53	-3.36	0.08	-6.61	0.44	-1.73	0.01	-1.42	0.009	-0.89	0.003
100	-6.51	0.43	-2.48	0.04	-5.24	0.24	-0.93	0.003	-1.17	0.005	-0.85	0.002
平均 mean	-9.74	1.20	-5.15	0.23	-7.86	0.69	-1.78	0.015	-2.75	0.05	-0.40	0.00033

表 2 不同时间作物株体的水流阻力计算结果 ( $\text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ )  
Table 2 Results of hydraulic resistances in crop in different time

时 间 Time (h)	1989年4月14日冬小麦 Winter wheat (1989.4.14)					
	干处理 Dry treat.			湿处理 Moist treat.		
	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )
7:00	-5.89	0.948		-4.16	1.003	
9:00	-9.89	0.890	0.068	-7.16	2.017	0.401
11:00	-13.31	5.150	0.268	-10.78	5.831	0.388
13:00	-14.03	5.687	0.298	-12.10	8.097	0.348
15:00	-12.59	4.015	0.278	-11.67	7.554	0.348
17:00	-11.87	3.625	0.228	-8.57	4.649	0.298
19:00	-7.52	0.953		-6.18	1.402	0.298
时 间 Time (h)	1989年5月4日冬小麦 Winter wheat (1989.5.4)					
	干处理 Dry treat.			湿处理 Moist treat.		
	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )
7:00	-6.87	0.961		-6.11	1.151	1.520
9:00	-12.33	1.795	1.003	-9.22	2.922	1.036
11:00	-17.33	4.280	0.893	-14.72	5.575	0.940
13:00	-22.30	5.890	0.983	-20.90	6.959	1.110
15:00	-20.16	4.183	1.183	-17.99	5.858	1.120
17:00	-18.15	3.085	1.343	-15.96	3.839	1.500
19:00	-6.38	1.031		-5.20	1.949	0.710
时 间 Time (h)	1990年8月6日玉米 Corn (1990.8.6)					
	干处理 Dry treat.			湿处理 Moist treat.		
	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-2}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )	$\Psi_L$ ( $10^5 \text{Pa}$ )	$T$ ( $\text{ugs}^{-1} \text{cm}^{-1}$ )	$R_p$ ( $10^4$ )
7:00	-2.80	0.113	0.178	-2.70	1.344	0.590
9:00	-8.20	1.724	0.807	-5.18	2.592	0.760
11:00	-12.70	2.876	1.395	-10.80	3.998	1.050
13:00	-12.10	3.191	1.181	-9.40	4.200	0.870
15:00	-11.50	2.277	1.549	-11.60	3.151	1.440
17:00	-11.90	2.083	1.771	-11.80	3.390	1.360
19:00	-9.20	1.418	1.834	-8.90	2.146	1.600

不计。在田间100 cm土层内的最大阻力可达 $120 \text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ ，不同土层的 $R_p$ 相差较大。从表2可看出，冬小麦和玉米的植株体水流阻力 $R_p$ 在相近的生育阶段无明显的差异。冬小麦抽穗灌浆阶段 $R_p$ 最大达 $1.50 \times 10^4 \text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ ；玉米抽雄灌浆阶段 $R_p$ 最大达 $1.80 \times 10^4 \text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ 。同一作物，如冬小麦在后期的 $R_p$ 大于前期的2—4倍。作物相同阶段缺水处理和充分供水处理的水流阻力差异不明显。 $R_p$ 具有明显的日变化，早晚小，11:00至15:00较低，傍晚 $R_p$ 比中午的大2—4倍。

从表 3 可见, 干处理叶-气系统水流阻力  $R_{L_s}$  明显大于湿处理的, 这主要是因为干处理的气孔阻力相对较大所致。 $R_{L_s}$  也具有明显的日变化, 早、晚较大, 中午较低。在不同生育阶段  $R_{L_s}$  不相同。后期的  $R_{L_s}$  大于前期的。

由表 1、表 2 和表 3 综合起来能看出, 在 SPAC 中的水流阻力主要分布在叶-气系统, 在该部分的水流阻力占整个 SPAC 总水流阻力  $R_{S_s}$  的 97% 以上, 叶-气系统的水流阻力是植株体内水流阻力 50 的倍, 是土壤阻力的几千倍。因此,  $R_{L_s}$  在控制 SPAC 水流传输中起关键作用。

3.2 叶-气系统中气孔阻力与空气边界层阻力的相对重要性

$r_{s1}$  与  $r_{s2}$  的计算结果分别列于表 4 与表 5。从表 4 可看出,  $r_{s1}$  随风速增大而降低, 随叶长增加而增加。在日平均风速为 1 m/s 时, 冬小麦的  $r_{s1}$  在前期为 10.0 s/m, 在后期达 60 s/m 左右。玉米的叶长大于冬小麦的, 其  $r_{s1}$  也会大于表 4 中的数值。

计算  $r_{s2}$  时, 以 1989 年冬小麦拔节期为例, 如 1989 年 4 月 6 日小麦冠层高度  $H = 38.40$  cm, 用式 (8) 与式 (9) 分别求得该日  $Z_0 = 0.05$  m,  $d = 0.275$  m, 不同风速时的  $r_{s2}$  如表 5 所示。

表 3 不同时间叶-气系统水流阻力的计算结果 ( $\text{Pa} \cdot (\text{w} \cdot \text{m}^{-2})^{-1}$ )  
Table 3 Results of hydraulic resistances in leaf-atmosphere path

时 间 Time (h)	1989年4月14日冬小麦 Winter wheat (1989.4.14)				1989年5月4日冬小麦 Winter wheat (1989.5.4)				1990年8月6日玉米 Corn (1990.8.6)			
	干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.		干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.		干处理 Dry treat.		湿处理 Moist treat.	
	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )	$\Psi_s$ ( $10^5 \text{ Pa}$ )	$R_{L_s}$ ( $10^3$ )
7:00	-123.96	5.040	-123.96	4.840	-227.55	9.300	-227.55	7.790	-13.26	39.410	-113.26	9.330
9:00	-201.17	8.700	-201.17	3.890	-264.14	6.680	-264.14	3.630	-532.41	21.526	-532.41	8.330
11:00	-201.17	1.480	-201.17	1.320	-463.78	4.220	-463.78	3.260	-832.78	11.497	-832.78	8.320
13:00	-282.42	1.910	-282.42	1.350	-633.35	4.200	-633.35	3.830	-975.81	12.177	-975.81	9.320
15:00	-422.67	4.140	-422.67	2.200	-725.71	6.830	-725.71	4.890	-1038.70	18.186	-1038.70	19.200
17:00	-217.37	2.300	-217.37	1.820	-677.58	8.650	-677.58	6.980	-957.89	21.832	-957.89	11.300
19:00	-140.53	6.650	-140.53	3.880	-390.23	15.070	-390.23	8.000	-579.96	18.229	-579.96	10.770

表 4 冬小麦不同叶长时的层流边界层阻力  $r_{s1}$  (s/m)

Table 4 Hydraulic resistances in Laminar boundary layer near leaf

叶 长 Leaf length (cm)	风速 $u_{1.0}$ Wind velocity (m/s)				
	0.01	0.1	1	2	3
1	151.00	47.75	15.10	10.88	8.72
5	337.65	106.77	33.76	23.88	19.49
10	477.50	151.00	50.08	38.76	27.57
15	584.82	184.94	58.48	41.35	33.78

表 5 冬小麦拔节期不同风速时的湍流边界层阻力  $r_{s2}$

Table 5 Hydraulic resistances in turbulent boundary layer above canopy

风 速 $u_{1.0}$ Wind velocity (m/s)	0.01	0.1	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	5.0
$r_{s2}$ (s/m)	33.57	33.02	26.57	21.92	18.65	16.23	14.88	12.88	9.12

对于不同冠层高度  $H$  时的  $r_{s2}$  不同。 $H$  越小  $r_{s2}$  愈大。如当  $H = 10$  cm 时,  $d = 0.074$  m,  $Z_0 = 0.013$  m, 则风速  $u_{1.0} = 1.0$  m/s 时,  $r_{s2} = 55.78$  s/m。从以上可见玉米  $H$  较大, 因此  $r_{s2}$  较小。但玉米和小麦  $r_{s1} + r_{s2}$  无显著差异。

在风速  $u_{1.0} = 1.0$  m/s 时,  $r_{s1} + r_{s2}$  接近于 100 s/m 的量级。当风速接近于 0 时,  $r_{s1} + r_{s2}$  超过 400 s/m。而作物叶气孔阻力一般在 50—100 s/m 范围之内。

气孔阻力与边界层阻力的相对重要性要视具体条件而定。在1.0 m/s的风速条件下叶气孔阻力与空气边界层阻力的比值在3—5左右,在土水势较低时此比值还会增大。

从上述分析可知,SPAC中的水流运动主要由气孔阻力控制。气孔阻力随环境因素(土壤基质势和微气象因素)而变化,在一定程度上反映了作物水分状况,而且可以通过人工措施(如施加气孔抑制剂或灌溉)调节。研究气孔阻力的变化规律对于田间水分管理实践具有指导作用。

#### 4 叶片气孔阻力的变化规律分析

根据实测资料分析,在充分供水条件下作物叶气孔阻力主要与气象因素有关。在气象因素中光照强度 $Q_e$ 对气孔阻力影响最大,其余依次为饱和差 $D$ 、气温 $T_a$ 和净辐射 $R_n$ 。

有光,气孔开放;无光,气孔关闭。日出后,气孔开放,气孔阻力急剧降低,傍晚光照减弱,气孔阻力增大。引起气孔开放的光照强度不高,在 $400 \mu\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ 下冬小麦气孔阻力已急剧降低。气孔阻力是受叶面与大气间的水汽相对状况的影响,这种水汽相对状况通常可用叶片和大气间的相对水汽压差 $\delta_e$ ( $\delta_e = e_s(T_L) - e_a$ )来表示, $e_s(T_L)$ 和 $e_a$ 分别是叶片温度为 $T_L$ 时的饱和水汽压和大气实际水汽压,许多研究表明 $\delta_e$ 与空气饱和差 $D$ 之间存在很好的线性关系,因此空气饱和差 $D$ 对气孔阻力 $r_{s,l}$ 有一定的影响。在气温小于 $28^\circ\text{C}$ 时,气孔阻力随气温的增加而降低;当气温高于 $28^\circ\text{C}$ 时,气孔阻力随气温增加而增加。气孔阻力与净辐射 $R_n$ 的关系是在一定范围内随 $R_n$ 增大而变小,其相关系数没有气孔阻力与光照强度、饱和差及气温密切。作者根据1988—1991年冬小麦和玉米生育期内的实测资料分析了气孔阻力与饱和差 $D$ 、净辐射 $R_n$ 和气温 $T_a$ 之间的复相关关系,即:

$$\text{冬小麦 } r_{s,l} = 0.02 D^{0.0347} T_a^{0.8722} R_n^{-0.1011} \quad (10)$$

其相关系数 $R = 0.9406$ ,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。

$$\text{玉米 } r_{s,l} = 80.592 + 1.111 D - 2.467 T_a - 0.0064 R_n \quad (11)$$

其相关系数 $R = 0.7950$ ,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。以上两式中 $R_n$ 的单位是 $\text{w/m}^2$ , $T_a$ 的单位是 $^\circ\text{C}$ , $D$ 的单位是 $\text{hPa}$ , $r_{s,l}$ 的单位是 $\text{s/cm}$ 。

在缺水条件下,作物根系吸水满足不了蒸腾需求,作物体内水分平衡失调,保卫细胞失水收缩,气孔开度减小、阻力增大。不同作物气孔阻力受土壤基质势的影响程度不同,同一作物其气孔阻力受土壤基质势的影响程度在不同天气条件下也不同。于是,分析了冬小麦相对气孔阻力 $r_{s,l}/r_{s,l}^{(?)}$ 与土壤基质势 $\Psi_m$ 的关系,其中 $r_{s,l}^{(?)}$ 是充分供水条件下叶片的最小气孔阻力, $r_{s,l}$ 是缺水条件下叶片的气孔阻力,结果表明在同一天内相同的 $\Psi_m$ 下,中午的 $r_{s,l}/r_{s,l}^{(?)}$ 比清晨的大,但相差范围较小。为了应用方便,仍把各种天气条件下的 $r_{s,l}/r_{s,l}^{(?)}$ 与 $\Psi_m$ 放在一起进行相关分析得如下经验公式:

$$r_{s,l}/r_{s,l}^{(?)} = 1.293 - 0.2222 \Psi_m + 0.0636 \Psi_m^2 \quad (12)$$

其相关系数 $R = 0.7917$ ,显著水平 $\alpha = 0.05$ 。

因此,气孔阻力 $r_{s,l}$ 能由土壤基质势 $\Psi_m$ 、饱和差 $D$ 、气温 $T_a$ 和净辐射 $R_n$ 来模拟。

## 5 结论

5.1 通过SPAC中水势梯度和蒸腾速率的同步测定,利用Van den Honert假定估算其水流阻力的分布,在植物体内贮水量变化较小的情况下具有可靠性。

5.2 在SPAC中的水流阻力主要分布在叶-气系统,在该部分的水流阻力占整个SPAC总水

流阻力  $R_s$  的 97% 以上, 叶-气系统的水流阻力是植株体内水流阻力的 50 倍, 是土壤阻力的几千倍。因此, 叶-气之间的阻力在控制 SPAC 水流传输中起关键作用。

**5.3** 在叶-气系统中气孔阻力  $r_s$ , 是边界层阻力  $r_{s1} + r_{s2}$  的 3—5 倍左右。气孔阻力与光照强度关系最密切。 $r_s$  能通过土壤基质势  $\psi_s$  和饱和差  $D$ 、气温  $T_s$  及净辐射  $R_n$  进行模拟。

**5.4** 对于 SPAC 水流速率变化较大的非稳定流条件下, 严格地说应在上述 Van den Honert 模式基础上, 考虑系统中水容的影响, 利用非稳定流模式估算其水流阻力分布。

### 参 考 文 献

- [1] Van den Honert T H. Water transport in plants as a catenary process. *Discussions of the Faraday Society*, 1948, 3:146-153
- [2] Cowan I R. Transport of water in the soil-plant-atmosphere system *J. Appl. Ecol.* 1965, 2:221-239
- [3] Monteith, J L. Coupling of plants to the atmosphere. in *Plant and their atmospheric environment*, 1981, 1-29 Oxford:Blackwells.
- [4] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1977, 103:345-357
- [5] Szeicz G. Aerodynamic and surface factors in evaporation. *Water Resources Res.* 1988, 5:380-394
- [6] Stanhill G A. Simple instrument for field measurement of turbulent diffusion flux. *J. Appl. Meteorol.* 1989, 8:509-513

## DISTRIBUTION OF HYDRAULIC RESISTANCE IN SOIL-PLANT-ATMOSPHERE CONTINUUM

Kang Shao-Zhong

(Northwestern Agricultural University, Yangling, Shanxi, 712100)

Based on the measured data of soil water potential, leaf water potential, air water potential, and transpiration rate in winter wheat and summer corn fields and the application of them to the Van den Honert (1948) steady-state flow equation, the magnitude, the variation with time and depth, and the relative importance of various resistances to water flow in soil-plant-atmosphere continuum (i.e. SPAC) were estimated.

The estimated results indicated that the main resistances to water flow in SPAC take place in the two symmetrical connecting "Chains" through which water enters the roots and emits out of the leaves of plants, the resistances from the leaves to atmosphere equal to 50 times that of soil-root system. So that the water flow in SPAC is controlled by leaf stomatal resistances and air boundary layer resistances.

Discussed also were the leaf stomatal varying laws and the relationships between leaf stomatal and environmental factors, such as soil matric potential, air temperature, net radiation and air vapour pressure deficit.

**Key words:** soil-plant-atmosphere, continuum, hydraulic resistance, stomata, relative importance.