

干旱季节不同耕作制度下红壤-作物-大气 连续体水流阻力变化规律*

张 斌 丁献文** 张桃林 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘 要 确定水流阻力不仅有助于定量土壤-作物-大气连续体 (SPAC) 描述的水分传输过程, 而且对建立减少水流阻力的节水农业措施, 解决红壤区季节性干旱有重要意义。本文研究了不同耕作制度下作物气孔阻力日变化及其与蒸腾速率、土壤基质势、作物叶水势的关系, 并分析了水流阻力的分布及其日变化规律。结果表明气孔阻力和蒸腾速率受作物种类和耕作制度影响, 气孔阻力随着 70cm 土层以上土壤基质势的变化而变化; SPAC 中叶气系统水流阻力为 $10^9 \sim 10^{10}$ S, 是作物体水流阻力的 1000 倍, 而后者又是 70cm 以上土层土壤水流阻力的 100 倍; 作物体水流阻力大小顺序为: 大豆 > 花生 > 玉米 > 甘薯, 除甘薯外, 其它作物体水流阻力有明显的日变化; 此外, 耕作制度也影响作物体水流阻力。

关键词 水流阻力, 气孔阻力, 水势, 红壤, 耕作制度

中图分类号 S152.75

水分在土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中的传输过程, 也是植物的蒸腾失水过程。该过程中水流阻力的确定不仅有助于定量描述 SPAC 的水分传输过程, 而且对建立减少水流阻力的节水农业措施有重要的意义。因此, 关于水流过程中阻力的大小和分布、与水势间的关系等问题一直是研究的焦点^[1], 但仍未取得统一的认识。我国目前相关的研究工作主要集中在北方干旱、半干旱地区, 且多着重于单一作物的定量定性描述^[2, 3]。我国南方红壤区存在严重的季节性干旱^[4, 5], 关于热带亚热带地区干旱季节 SPAC 水流阻力的研究鲜见报道。前文报道了田间条件下作物-土壤水势关系及其对干旱胁迫的响应^[6]。本文旨在研究不同耕作制度下水流阻力的变化规律, 以从水流阻力角度深入理解南方季节性干旱中作物对干旱胁迫的响应特征, 为评价和建立不同抗旱利用方式提供理论依据。

1 试验设计与实验方法

本试验在中国科学院红壤生态试验站进行。该站位于江西省余江县境内 ($166^{\circ}55' E, 28^{\circ}15' N$), 平均气温 $17.6^{\circ}C$, 平均降水量 1797.7mm, 且 50% 左右集中在 4~6 月, 伏秋旱频繁发生^[7]。该站气候和土壤

* 国家自然科学基金项目 (49701008), 中科院重大项目 (KT95-04-01-15) 和国家攻关项目 (96-004-03) 资助

** 现工作单位: 江西省鹰潭市土地局

收稿日期: 1999-10-10; 收到修改稿日期: 2000-09-21

代表广大红壤低丘岗地类型。

本试验区的原始植被为稀疏马尾松林,坡度7°,相对高度45m左右,于1992年开垦为100m²标准径流小区。试验以来各小区利用方式保持不变。供试土壤为第四纪红粘土发育的普通红壤,1995年11月采样测定的土壤理化性质见表1。相同种植制度处理施肥量相同,但土壤管理方式不同^[7]。处理A:当地传统耕作制度花生接茬肥田萝卜;处理B和D:甘薯间作大豆后接茬荞麦,冬作物为油菜,处理B为常规耕作,处理D为免耕覆盖;处理C和E:甘薯间作大豆后种植冬作物油菜,处理C为窄垄耕作,处理E为宽垄耕作。供试品质为大豆(*Glycine max*),矮脚青;玉米(*Zea mays*),腋单4号;甘薯(*Ipomoea batatas*),枫叶薯;荞麦(*Fagopyrum esculentum*),甜荞;油菜(*Brassica spp.*),饶油1号;花生(*Arrachis hypogaea*),粤油551。

表1 5种耕作制度处理的土壤理化性质

Table 1 Some physical and chemical properties of the soils under five treatments of farming systems

处理 Treatment	土壤耕作 Soil tillage	粘粒 Clay	粉砂粒 Silt	砂粒 Sand	总量 Total			速效量 Available			pH		
		<0.002 mm	0.05- 0.002 mm	0.05-2 mm	有机 质 O.M.	全 氮 N	全 磷 P	全 钾 K	水 解 氮 N	速 效 磷 P	速 效 钾 K	H ₂ O	KCl
		g/kg			g/kg			mg/kg					
A 花生-肥田萝卜	传统耕作	40.8	33.2	26.0	14.4	0.84	1.05	9.48	52.4	11.89	105.1	5.4	3.9
B 玉米+大豆-荞麦→油菜	常规耕作	38.1	34.5	27.4	9.0	0.56	0.77	11.55	35.1	2.95	166.0	5.6	4.3
C 甘薯+大豆→油菜	窄垄耕作	42.0	34.1	23.9	14.0	0.83	0.96	10.45	64.3	7.53	102.5	5.6	4.2
D 玉米+大豆-荞麦→油菜	免耕覆盖	40.8	34.9	24.3	12.2	0.76	0.98	9.74	47.4	6.55	179.9	5.8	4.3
E 甘薯+大豆→油菜	宽垄耕作	40.9	35.7	23.4	13.8	0.81	1.13	10.24	59.5	9.38	141.1	5.5	4.1

1995年7月7日前降水量为79.7mm。田间测定在1995年7月8—20日,此间无降水。每小区中间安装一组负压计,埋设深度为10,20,30,40,70,90,110,130,150cm。土壤基质势用U型负压计测定。土壤基质势为土壤吸力的负值。

在8:30,10:30,12:30,14:30,16:30等5个时间段内同时测定大气湿度、温度,叶水势、气孔阻力、蒸腾强度。大气湿度采用干湿温度计测定,湿度计安置与作物高度的二分之一处。采用ZLZ-4型植物水分状况测定仪(压力室)测定植物叶片水势,LI-1600型稳态气孔计测定叶片气孔阻力,蒸腾速率和叶面温度等。试验过程中,在各小区内设置4~5个样方,每个样方取样重复2~3次以上。玉米取自顶端起3~4叶位上的正常叶片,大豆取自顶端起的3~4分枝上的正常叶片,甘薯、花生取顶部的生长正常的展开叶片。测定各小区植物固定叶位叶片的水势,求其算术平均,代表相应时间内植物叶水势;每样方取10片叶片测定气孔阻力和蒸腾速率,求其算术平均,代表相应时间内作物气孔阻力和蒸腾速率。每种作物的测定控制在半小时内,相同种植制度处理中的同一种作物同时测定。

大气水势由水势的定义出发,可由大气的相对湿度计算,即:

$$\Psi_a = \frac{RT}{V_w} \ln RH = 4.6182 \times 10^5 T \ln RH \quad (1)$$

式中, R ,普适气体常数,8.3127Pa·m³/(mol·K); T ,大气绝对温度(K); V_w ,水偏摩尔体积(cm³/mol); RH ,相对湿度(%)。

土壤阻力 R_s 用 Gardner-Lowan 公式计算即:

$$R_s = \sum R_{si} = \sum 5.0 \times 10^{-4} (\Psi_{mi} / \Psi_{mo})^{2.57} \quad (2)$$

式中: R_{si} , 第 i 层土壤阻力 (S), 单位 S 换算成通用单位 $\text{Pa}/(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$ 或 (ms^{-1}) 需乘以 0.4×10^{-5} ; Ψ_{mi} , 第 i 层土壤基质势 (cm 水柱高); Ψ_{mo} , 土壤水分特征曲线上饱和点的进气值 $\Psi_{mo} = -800\text{cm}$ 水柱高。因为红壤区植物根系集中在 70cm 土层内, 所以 i 取 70cm 土层以上。

植物的阻力 R_p 包括根系阻力、茎和叶的阻力, 根据 Van den Honert 的水流公式, 可得:

$$R_p = (\Psi_s - \Psi_L) / T - R_s \quad (3)$$

式中: T 植物叶片的蒸腾速率 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$); Ψ_s, Ψ_L 分别是土壤基质势 (Pa) 和植物叶水势; R_p, R_s 分别是植物体阻力 (S) 和土壤阻力 (S)。

叶气系统的水流阻力 R_{La} 由下列公式计算:

$$R_{La} = (\Psi_L - \Psi_a) / T \quad (4)$$

式中: R_{La}, Ψ_L, Ψ_a 分别是叶水势 (Pa) 和大气水势 (Pa); R_{La} , 叶气系统水流阻力 (S); T , 蒸腾速率 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{s}^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 作物蒸腾速率、气孔阻力日变化

不同处理作物的蒸腾速率日变化规律不同 (表 2)。玉米的蒸腾速率在 10:30 最大, 上午大于下午; 常耕处理 B 大于免耕处理 D, 且上午的差异更大。大豆的蒸腾速率日变化在各处理间趋势基本相同, 最大值出现在上午 10:30, 且上午高, 下午低; 处理 C、E 的蒸腾速率大于处理 B、D, 且日变幅更大; 处理 B、D 蒸腾速率差异较小, 处理 C 小于处理 E。甘薯蒸腾速率远大于其它植物, 除处理 E 的下午 16:30 时略有下降外, 几乎无日变化, 处理 E 略大于处理 C。花生蒸腾速率早晨迅速下降后, 上午 10:30 开始保持不变直至下午 16:30 有所回升。所有作物的气孔阻力的日变化趋势与其蒸腾速率的日变化相反 (表 2)。总之, 作物蒸腾速率和气孔阻力及其日变化结果说明, 甘薯能抵御一定的干旱胁迫, 玉米和大豆水

表 2 不同处理中作物蒸腾速率和气孔阻力的日变化

Table 2 Diurnal variation of leaf transpiration rate and stomatal resistance of crops in five treatments

日期 (月/日/年) Date (m/d/y)	作物 Crop	处理 Treatment	蒸腾速率 Transpiration rate ($\mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$)					气孔阻力 Stomatal resistance (s/cm)				
			8:30 ¹⁾	10:30	12:30	14:30	16:30	8:30	10:30	12:30	14:30	16:30
			7/11/95	玉米	B	24.37	39.20	21.81	13.96	13.06	1.04	0.69
		D	12.67	31.37	21.07	19.76	8.58	2.09	0.92	1.51	1.59	3.41
7/12/95	大豆	B	13.77	17.77	16.83	11.30	10.55	1.97	1.49	2.16	3.54	3.56
		D	17.77	13.16	11.73	9.73	16.26	1.60	2.02	3.38	4.05	2.38
7/13/95	大豆	C	25.91	22.08	18.56	11.65	14.31	0.71	1.32	1.90	3.05	2.66
		E	29.00	34.96	18.49	15.34	13.08	0.69	0.75	1.68	2.35	2.76
7/14/95	甘薯	C	33.25	36.28	41.21	41.57	42.23	0.62	0.54	0.41	0.60	1.01
		E	37.14	37.15	45.95	46.16	33.42	0.53	0.59	0.37	0.60	0.69
7/15/95	花生	A	38.08	13.93	14.58	12.70	16.19	0.63	1.84	2.05	2.43	1.82

1) 为测定时间: 时: 分。

分调节阈值较低,抵御干旱的能力小于甘薯和花生;与对应处理相比,免耕覆盖处理 D 和窄垄耕作处理 C 中作物的气孔阻力增加,蒸腾速率下降,受干旱胁迫更严重。

2.2 气孔阻力与土壤、植物叶水势的关系

虽然大量研究结果表明,气孔阻力和叶水势之间具有很好的线性负相关^[2],但这些研究都是在土壤水分条件充足、叶水势较大时进行的。本试验结果表明(表 3):干旱季节虽然所有作物都表现随着叶水势减小气孔阻力增大的趋势。但只有单作花生和间作中的高秆作物大豆气孔阻力与叶水势显著相关。叶水势和气孔阻力不仅受气象因素,如饱和水汽差、净辐射、气温和光照强度的影响,而且受作物本身生理过程的调节。干旱季节,不同间作处理形成不同的微生态气候条件,且作物对干旱胁迫产生一系列生理反应,可能导致气孔调节形成的气孔阻力变化与叶水势变化不同步,对干旱胁迫作出响应不同。

表3 气孔阻力 y (s/cm)与植物叶水势 x (MPa)的关系

Table 3 Relationship between leaf stomatal resistance (y , s/cm) and leaf water potential (x , MPa)

作物	处理	日期(月/日/年)	相关方程	相关系数
Crop	Treatment	Date(m/d/y)	Correlation	coefficient
花生	A	7/15/95	$y = -0.2893x^2 - 2.7881x - 2.4316$ $-2.28 \leq x \leq -1.27$ MPa	0.9944**
大豆	C	7/13/95	$y = -0.9067x^2 - 8.4926x - 11.169$ $-2.20 \leq x \leq -1.70$ MPa	0.9794**
大豆	E	7/13/95	$y = 9.0151x^2 + 29.11x + 23.886$ $-2.13 \leq x \leq -1.77$ MPa	0.9063**

**代表 $p < 0.01$ 水平的显著性

干旱季节,某时间测定气孔阻力的平均值与其土壤基质势的相关分析($n=5$)结果表明,气孔阻力随土壤基质势增大而增大,不同作物以及不同利用方式下的同一作物气孔阻力受土壤基质势的影响强度不同(表 4)。处理 A 中花生气孔阻力仅与 40cm 以上土壤基质势相关,处理 B、D 玉米气孔阻力仅受 20—30cm 土层土壤基质势的影响,其它作物的气孔阻力与土壤基质势的作用深度达 70cm,比植物水势与土壤基质势的作用深度更深,说明气孔阻力比植物水势更适宜于作为土壤干旱胁迫指标。

2.3 不同 SPAC 的水流阻力日变化及分布

根据 Gardner 和 Gardner-Lowan 的定义^[2,8],土壤阻力 R_s 与土壤水吸力呈非线性正相关关系,与土壤导水率成反比,与根系半径成正相关。红壤的非饱和导水率随土壤含水量的变化很大,当土壤容积含水量分别为 30%, 24%, 18%, 12% 和 6% 时,其导水率比近饱和导水率(土壤基质势为 0)分别下降 1~3, 3~4, 6~7, 9~10 和 11~13 个数量级。干旱季节随着植物根系吸收消耗土壤水分,土壤导水率急剧下降,其下降速度远超过根系生长的速度。本文所计算得 70cm 土层以内土壤阻力在 10^5 S 数量级,日变化有不断上升的趋势(表 5)。此外,土壤阻力也存在层次性,即表层土壤阻力大,向下则越小(数据未列)。虽然表 5 中的土壤阻力不可以作横向比较,但仍可以看出干旱季节土壤阻力随时间推移而增大。

作物体水流阻力包括根系水流阻力、茎叶水流阻力。不同作物体水流阻力存在差异^[2]。由表 5 可见,作物体水流阻力有日变化。其变化范围为 $10^6 \sim 10^7$ S,大小顺序为:甘薯

表4 气孔阻力 (s/cm) 与土壤基质势 (MPa) 的关系

Table 4 Relationship between leaf stomatal resistance (y, s/cm) and soil water potential (x, MPa)

作物	处理	日期	土层	相关方程	x取值范围	相关系数
Crop	Treat- ment	(月/日/年) Date(m/d/y)	Soil layer (cm)	Correlation	Range of x (kPa)	Coefficient
花生	A	7/15/95	10	$y = -24689x^2 - 3186.8x - 100.63$	$-68.75 \leq x \leq -53.17$	0.9776**
			20	$y = -24689x^2 - 3186.8x - 100.63$	$-7326 \leq x \leq -49.80$	0.9636**
			30	$y = -129337x^2 - 8706.6x - 29.88$	$-37.32 \leq x \leq -30.39$	0.8123*
			40	$y = -9 \times 10^6 x^2 - 405440x - 4384.7$	$-22.71 \leq x \leq -21.35$	0.9669**
玉米	B	7/11/95	10	$y = -201197x^2 - 11934x - 174.54$	$-36.56 \leq x \leq -25.75$	0.9695**
			20	$y = 301758x^2 + 11337x + 107.24$	$-22.28 \leq x \leq -18.01$	0.9000*
	D	7/11/95	10	$y = 429710x^2 + 22407x + 293.37$	$-35.63 \leq x \leq -26.00$	0.9704**
			30	$y = 3 \times 10^6 x^2 + 91324x + 611.93$	$-15.33 \leq x \leq -13.40$	0.9563**
大豆	B	7/12/95	10	$y = 449336x^2 + 35169x + 689.9$	$-51.07 \leq x \leq -30.23$	0.9568**
			20	$y = 371858x^2 + 17973x + 218.95$	$-27.94 \leq x \leq -23.18$	0.8379*
			30	$y = 4 \times 10^7 x^2 + 10^6 x + 13150$	$-19.93 \leq x \leq -17.35$	0.8347*
			40	$y = 5 \times 10^6 x^2 + 151337x + 1074.8$	$-16.31 \leq x \leq -13.59$	0.9532**
	D	7/12/95	10	$y = 563327x^2 + 40473x + 728.95$	$-3679 \leq x \leq -33.95$	0.8949*
			20	$y = 2 \times 10^6 x^2 + 101829x + 1116.9$	$-25.24 \leq x \leq -20.87$	0.9851**
			70	$y = 3 \times 10^6 x^2 + 54772x + 267.5$	$-10.95 \leq x \leq -8.70$	0.9839**
	C	7/13/95	10	$y = -111729x^2 - 11241x - 279.89$	$-60.89 \leq x \leq -38.78$	0.9565**
			20	$y = -42577x^2 - 3860.5x - 83.763$	$-45.75 \leq x \leq -36.26$	0.9820**
			30	$y = -557508x^2 - 29321x - 382.43$	$-28.98 \leq x \leq -23.72$	0.9910**
			70	$y = -6 \times 10^6 x^2 - 141971x - 867.54$	$-12.50 \leq x \leq -11.35$	0.8725*
	E	7/13/95	10	$y = -2 \times 10^6 x^2 - 251756x - 8304.8$	$-73.22 \leq x \leq -61.18$	0.9881**
20			$y = -90868x^2 - 8670.2x - 203.96$	$-56.70 \leq x \leq -42.80$	0.9854**	
40			$y = 2 \times 10^7 x^2 + 744930x + 6579.1$	$-18.73 \leq x \leq -16.93$	0.9874**	
70			$y = 2 \times 10^6 x^2 + 50751x + 289.67$	$-13.70 \leq x \leq -10.54$	0.9228**	
甘薯	C	7/14/95	20	$y = 15586x^2 + 1401.5x + 31.976$	$-52.69 \leq x \leq -40.10$	0.9647**
			30	$y = 217240x^2 + 13027x + 195.8$	$-34.12 \leq x \leq -29.12$	0.8241*
			40	$y = 1 \times 10^6 x^2 + 47884x + 474.17$	$-22.11 \leq x \leq -19.41$	0.9929**
			70	$y = 6 \times 10^6 x^2 + 153016x + 990.62$	$-12.50 \leq x \leq -11.35$	0.9929**

* 代表0.05水平的极显著性; **代表0.01水平的极显著性。

< 玉米 < 花生 < 大豆。作物平均比水容结果表明这几种作物的比水容变化范围在 $0.0258 \sim 0.6935 \text{mPa}^{-1}$ 之间, 大小顺序为: 甘薯叶 > 大豆叶 > 花生叶 > 玉米叶, 花生茎 > 甘薯茎 > 大豆茎, 且叶片比水容大于茎的比水容^[9]。比较两者结果可见比水容越大的作物, 其水流阻力越小。水容表示单位水势变化引起的植物组织内含水量的变化, 与植物水势呈非线性关系^[9, 10]。植物体水流阻力随水流通量的增加而减小, 且受植物体内含物的影响而变化^[11]。此外, 植物体的比水容和水流阻力受土壤水分状况影响且随其生育期变化

表5 5种处理作物SPAC水流阻力日变化

Table 5 Diurnal variation of crop hydraulic resistances in SPACs in five treatments

日期(月/日/年)	作物	处理	水流阻力	测定时间(时:分) Timech:min					平均
Date(m/d/y)	Crop	Treatment	Hydraulic resistance(S) ¹⁾	8:30 ²⁾	10:30	12:30	14:30	16:30	Average
07/11/95	玉米	B	土壤(10 ⁵)	0.22	0.23	0.23	0.26	0.28	0.24
			作物体(10 ⁷)	1.22	0.98	1.90	3.03	2.99	2.02
			叶-气(10 ¹⁰)	0.68	0.82	1.26	2.10	2.36	1.45
			SPAC总和(10 ¹⁰)	0.69	0.82	1.27	2.10	2.37	1.45
	D	土壤(10 ⁵)	0.21	0.19	0.18	0.20	0.23	0.20	
		作物体(10 ⁷)	2.63	1.32	2.03	2.21	4.57	2.55	
		叶-气(10 ¹⁰)	1.31	1.03	1.31	1.48	3.59	1.75	
		SPAC总和(10 ¹⁰)	1.13	1.03	1.31	1.48	3.60	2.55	
07/12/95	大豆	B	土壤(10 ⁵)	0.47	0.49	0.51	0.52	0.55	0.51
			作物体(10 ⁷)	2.47	2.07	2.91	4.30	4.45	3.24
			叶-气(10 ¹⁰)	1.56	1.80	1.83	2.89	3.67	2.35
			SPAC总和(10 ¹⁰)	1.56	1.80	1.83	2.90	3.68	2.36
	D	土壤(10 ⁵)	0.37	0.36	0.35	0.33	0.39	0.36	
		作物体(10 ⁷)	2.34	3.29	3.61	4.84	2.8	3.38	
		叶-气(10 ¹⁰)	1.21	2.42	2.64	3.38	2.39	2.41	
		SPAC总和(10 ¹⁰)	1.21	2.43	2.65	3.38	2.39	2.41	
07/13/95	大豆	C	土壤(10 ⁵)	0.89	0.90	0.98	1.10	1.12	1.00
			作物体(10 ⁷)	1.59	2.05	2.61	4.66	3.49	2.88
			叶-气(10 ¹⁰)	0.78	1.30	1.92	2.84	2.53	1.87
			SPAC总和(10 ¹⁰)	0.78	1.31	1.92	2.84	2.53	1.88
	E	土壤(10 ⁵)	1.67	1.66	1.77	1.82	1.75	1.73	
		作物体(10 ⁷)	1.48	1.32	2.7	3.21	4.01	2.54	
		叶-气(10 ¹⁰)	0.70	0.82	1.92	2.07	2.76	1.65	
		SPAC总和(10 ¹⁰)	0.70	0.82	1.93	2.07	2.77	1.65	
07/14/95	甘薯	C	土壤(10 ⁵)	1.64	1.67	1.75	1.74	1.92	1.74
			作物体(10 ⁷)	0.77	0.89	0.81	0.71	0.80	0.80
			叶-气(10 ¹⁰)	0.78	0.84	0.71	0.79	0.81	0.79
			SPAC总和(10 ¹⁰)	0.70	0.85	0.71	0.79	0.82	0.79
	E	土壤(10 ⁵)	2.13	2.28	2.43	2.39	2.57	2.36	
		作物体(10 ⁷)	0.67	0.87	0.7	0.67	1.21	0.82	
		叶-气(10 ¹⁰)	0.69	0.83	0.64	0.71	1.03	0.78	
		SPAC总和(10 ¹⁰)	0.70	0.83	0.64	0.71	1.03	0.78	
07/15/95	花生	A	土壤(10 ⁵)	1.74	2.24	2.61	2.83	3.20	2.52
			作物体(10 ⁷)	0.90	3.31	3.36	4.42	2.96	2.99
			叶-气(10 ¹⁰)	0.52	1.92	1.99	2.34	1.94	1.74
			SPAC总和(10 ¹⁰)	0.52	1.93	1.99	2.35	1.94	1.75

1) 单位 S=4 × 10⁻⁶ m/s; 2) 为测定时间: 时: 分。

而变化^[2,10],植物体水流阻力不仅与植物水容有关,而且受土壤水容的影响。所以植物水容和水流阻力的关系非常复杂,可能存在负相关关系,但有待深入研究。

不同耕作制度也影响植物体水流阻力。处理 D 中玉米和大豆的水流阻力大于处理 B;处理 B、D 中大豆水流阻力又大于处理 C、E,处理 C 中大豆水流阻力大于处理 E;处理 C、E 甘薯水流阻力相差较小。除甘薯水流阻力的日变化不明显外,其它作物水流阻力都有明显的日变化,下午最大值是早晨最小值的 2~4.5 倍。由于作物体水流阻力主要分布在根系部分,且根系吸收阻力仅与其生物特性有关而与土壤条件无关^[8],因此土根接触阻力是植物体阻力的主要变异项。红壤失水后土壤迅速收缩可能会引起土根接触阻力迅速增加。

叶气阻力的变化范围在 $10^9 \sim 10^{10} S$ 之间(表 5),是植物体阻力的 10^3 倍,是土壤阻力的 10^5 倍,因而,叶气阻力是 SPAC 总的水流阻力的 99% 以上。所以,在 SPAC 中叶气阻力对控制系统的水流运动起着主导作用。叶气阻力中,气孔阻力又是空气边界层阻力的 3~5 倍^[2],因而气孔阻力就成为 SPAC 中水流运动的主要控制因素。

虽然土壤阻力在 SPAC 总的水流阻力中比例很小,但由前文可知气孔阻力受到土壤水分状况的反馈调节作用和土壤水分物理性质的影响较大。因此南方季节性干旱不仅与气候有关,而且是植物、土壤与大气条件共同作用的结果。

3 结 论

1. 作物蒸腾速率和气孔阻力及其日变化结果说明,花生和甘薯能抵御一定的干旱胁迫,玉米和大豆水分调节阈值较低,抵御干旱的能力小于甘薯和花生;与对应处理相比,免耕较常耕和窄垄较宽垄中作物的蒸腾速率降低,气孔阻力提高。

2. 气孔阻力随土壤基质势增大而增大,较植物水势更适宜于作为土壤干旱胁迫指标;处理 A 中花生气孔阻力仅与 40cm 以上土壤基质势相关,处理 B、D 玉米气孔阻力仅受 20~30cm 土层土壤基质势的影响,其它作物的气孔阻力与土壤基质势的作用深度达 70cm;干旱季节虽然所有作物都表现随着叶水势减少气孔阻力增加的趋势,但只有单作花生和间作中的高秆作物大豆气孔阻力与叶水势显著相关。

3. SPAC 的叶气系统中的水流阻力变化范围在 $10^9 \sim 10^{10} S$ 之间,是作物体阻力的 1000 倍,而作物体水流阻力又是 70cm 土层土壤阻力的 100 倍;干旱季节土壤阻力受土壤水分状况影响随时间推移而增大;作物体水流阻力大小顺序为:大豆 > 花生 > 玉米 > 甘薯,除甘薯外,其它作物体水流阻力有明显的日变化;不同耕作制度影响作物体水流阻力。

致 谢 陈树元、柳建国在田间试验提供帮助,王兴祥参加田间管理工作并提供土壤养分资料。在此一并致谢。

参 考 文 献

1. 冷石林,石培华. SPAC 水流阻力的确定. 中国农业气象, 1993, 14(6): 43~46
2. 康绍忠. 土壤-植物-大气连续体水流阻力分布规律的研究. 生态学报, 1993, 13(2): 157~163

3. 张喜英. 冬小麦、夏玉米叶水势、蒸腾和液态水流阻力的田间试验研究. 地理学报, 1997, 52
4. 张 斌, 张桃林. 南方东部丘陵区季节性干旱成因及其对策研究. 生态学报, 1995, 15(4): 413~419
5. 王明珠, 姚贤良, 张佳宝等. 低丘红壤伏秋旱的成因、特征及抗旱体系的研究. 自然资源学报, 1997, 12(3): 250~255
6. 张 斌, 张桃林, 赵其国. 干旱季节不同耕作制度下作物-红壤水势关系及其对干旱胁迫响应. 土壤学报, 1999, 36(1): 101~110
7. 张 斌, 张桃林. 新垦红壤旱地耕作制度的比较研究. 见: 中国科学院红壤生态实验站主编红壤生态系统研究(第二集). 南昌: 江西科学技术出版社, 1993. 118~124
8. 邵明安, 杨文治, 李玉山. 植物根系吸收土壤水分得数学模型. 土壤学报, 1986, 24(4): 295~304
9. 张 斌, 张桃林, 柳建国, 柯建国. 植物的水容特征与其耐旱性的关系. 植物资源与环境, 1996, 5(5): 23~27
10. Shao Ming-an, Simmonds L P, Chen Zhi-xiong. Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant systems. Pedosphere, 1991, 1(3): 193~206
11. 黄明斌, 邵明安. 土壤-植物系统中非稳态流研究进展. 土壤学进展, 1994, 3: 20~26

VARIATION OF HYDRAULIC RESISTANCES IN RED SOIL-CROP-AIR CONTINUUMS IN DIFFERENT FARMING SYSTEMS IN DRY SEASON

Zhang Bin Ding Xian-wen Zhang Tao-lin, Zhao Qi-guo

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of sciences, Nanjing 210008)

Summary

Estimation of hydraulic resistances of soil-plant-climate continuum (SPAC) is important both for describing water movement in the continuum and for adopting practical water-saving measures in agriculture to find the solutions to seasonal drought in the area of Red Soil of China. The diurnal variation of stomatal resistance of crops in dry season was observed and its relation to transpiration rate and water potentials of crop leaf and soil in different farming systems was also studied. Results indicated that stomatal resistance and transpiration rate were different for each crop in different farming systems. Stomatal resistance was related to soil water potentials within the soil layers of 70cm. The hydraulic resistances of the leaf-air interface in SPACs ranged from 10^9 to 10^{10} S, which was 1000 times higher than those of crop body. The resistance of crop body was 100 times as much as that within the soil layer of 70cm. In dry season, soil resistance increased with the depletion of soil water. Resistance of crop body fell in the order: soybean > peanut > corn > sweet potato, which experienced dramatically diurnal variation except that of sweet potato. Resistance of crop also varied with cropping systems.

Key words Hydraulic resistance, Stomatal resistance, Water potential, Red soil farming system