

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*

张斌 张桃林 赵其国

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要 季节性干旱是南方红壤地区旱地农业生产中的主要障碍因素。本文报道了田间条件下作物土壤水势关系及其对干旱胁迫响应。结果表明 SPAC 中水势梯度为: 叶气系统 > 叶土系统 > 70cm 以上土层, 且约以 100 倍左右递减。水势日变化结果表明免耕较常耕, 窄垄较宽垄叶土水势差下降, 水分胁迫更强; 花生的耐旱性较强, 大豆和玉米的则较弱; 作物叶水势与土壤基质势呈正相关, 可以用二项式表示。作物叶水势与不同土层土壤基质势关系表明, 垄作处理作用层次更深, 免耕处理仅与表层土壤基质势相关。土壤基质势和叶水势都随环境温度提高而降低; 不同耕作制度改变了土壤温度和微气候, 进而影响了水势的温度效应。结果说明高温和水分胁迫导致并加剧了红壤季节性干旱胁迫。

关键词 土壤基质势, 叶水势, 水势温度效应, 红壤

中图分类号 S154.4

我国南方的季节性干旱主要是伏秋旱, 高温少雨。干旱胁迫不仅表现在水分胁迫, 而且有高温胁迫。植物叶水势既是植物许多生理过程的重要影响因素, 也是土壤水分能态和植物水分和高温胁迫的反映。有关植物生长发育对土壤水分和温度各自的胁迫响应的报道较多^[1,2], 但在植物对他们共同胁迫响应方面的研究报道则较少。土壤温度升高不仅影响土壤水分能态, 影响水分有效性^[3], 而且影响土壤水分保持^[4], 提高水分扩散能力^[5], 土壤水分蒸发强烈, 加剧水分胁迫。不同利用方式其微气候环境不同, 所以即使是相同植物在不同的生境中对干旱胁迫的响应也不同。本文拟在田间条件下, 研究不同利用方式下作物-土壤基质势间的关系及其与环境温度的关系, 以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。

* 国家自然科学基金项目(批准号49701008), 中科院重大项目(KT95-04-01-15)和国家“九五”攻关项目(项目号96-004-03-09)资助

收稿日期: 1997-11-12; 收到修改稿日期: 1998-08-20

1 试验设计与方法

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°55′ E, 28°15′ N), 平均气温 17.6℃, 平均降水量 1797.7mm, 且 50% 左右集中在 4—6 月, 伏秋旱频繁发生^[6,7]。该站气候和土壤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^[8]。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。供试品种为大豆 (*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 Treatments	土壤管理 Soil tillage	粘粒 Clay	粉砂粒 Silt	砂粒 Sand	有机质 O.M.	总量 Total			速效量 Available			pH	
						全氮 N	全磷 P	全钾 K	水解氮 N	速效磷 P	速效钾 K	KCl	H ₂ O
		<0.002	0.05—	0.05—2		0.002							
		mm	mm	mm		g/kg			mg/kg			1:2.5	
		g/kg				g/kg			mg/kg				
A 花生-肥田萝卜	传统耕作	408	33.2	26.0	14.4	0.84	1.05	9.48	52.4	11.89	105.1	6.06	4.38
B 玉米+大豆-荞麦→ 油菜	常规耕作	381	34.5	27.4	9.0	0.56	0.77	11.55	35.1	2.95	166.0	5.66	4.1
C 甘薯+大豆→油菜	窄垄耕作	420	34.1	23.9	14.0	0.83	0.96	10.45	64.3	7.53	102.5	6.20	4.26
D 玉米+大豆-荞麦→ 油菜	免耕覆盖	408	34.9	24.3	12.2	0.76	0.98	9.74	47.4	6.55	179.9	5.79	4.18
E 甘薯+大豆→油菜	宽垄耕作	409	35.7	23.4	13.8	0.81	1.13	10.24	59.5	9.38	141.1	6.20	4.26

1995 年 7 月 7 日的降水量为 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。土壤温度用水银温度计观测, 安装深度为 0, 5, 10, 15, 20cm。除日常观测土壤温度 (8:00, 12:00, 20:00), 土壤基质势 (8:00) 外, 在此期间每间隔 1h 或 2h 测定一次土壤不同深度的土壤基质势和土壤温度。在 8:30, 10:30, 12:30, 14:30, 16:30 等 5 个时间点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, 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 为普适气体常数, $8.3127 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为大气绝对温度 (K); V_w 为水偏摩尔体积 (cm^3 / mol); RH 为相对湿度。

2 结果与讨论

2.1 土壤、植物、大气水势的日变化规律

2.1.1 土壤基质势的日变化 干旱季节所有处理 40cm 土层以上土壤吸力随时间快速上升,且表层土壤吸力上升速度最快,而 70—150cm 土层的土壤吸力变化非常小(如图 1 所示处理 A)。不同处理土壤吸力表现明显日变化的层次不同;处理 B、C 为 0—20cm,处

表2 对应处理C和E相同时间(8:30)70cm深度以上土层土壤基质势差异

Table 2 Variation of soil matric potential in the soil layers above 70cm between treatments C and E at 8:30

处理	日期(月/日)	土壤基质势				
		Soil matric potential MPa				
Treatment	Date (m/d)	10cm	20cm	30cm	40cm	70cm
C	7/13	-0.04622	-0.03702	-0.02423	-0.01748	-0.01173
E	7/13	-0.06489	-0.04293	-0.02243	-0.01757	-0.01183
C	7/14	-0.06268	-0.04177	-0.02937	-0.02005	-0.01276
E	7/14	-0.06476	-0.05682	-0.02602	-0.01963	-0.01259

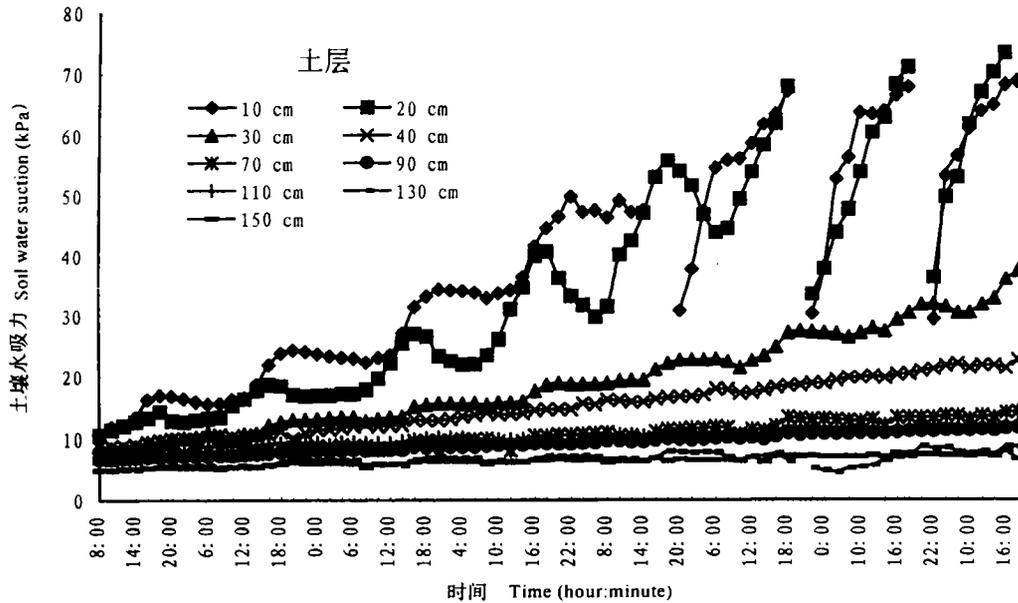


图1 A处理土壤水吸力的日变化(7/8—7/15/1995)。

Fig.1 Diurnal variation of soil water suction in Treatment A from 8 to 15 July, 1995

理 A 为 0—30cm。同一时间不同处理土壤基质势的比较结果表明: 10cm、20cm、30cm 土层土壤, $D > B$; 10cm、20cm 处, $C > E$; 30cm 处, $E > C$; 40—70cm 以下, 对应处理间的差异较小(如表 2 所示处理 C 和 E)。

2.1.2 大气水势和植物叶水势的日变化 干旱季节大气水势具有较强的日变化(表 3)。早晨大气水势 Ψ_a 也高达 $-60 \sim -80\text{MPa}$, 随后一直下降, 在下午 16:30 时达到 $-120 \sim -160\text{MPa}$ 。

表3 5种处理中大气水势和作物叶水势的日变化

Table 3 Diurnal variation of water potentials of air and crop leaves under five farming systems

作物	处理	日期(月/日/年)	水势	时间	Time				
Crop	Treatment	Date (m/d/yr)	Water potential (MPa)	8:30	10:30	12:30	14:30	16:30	
玉米	B	7/11/95	大气水势	-67.82	-130.56	-112.07	-118.86	-124.96	
			叶水势	-1.22	-1.58	-1.68	-1.72	-1.58	
			叶水势	-1.35	-1.68	-1.73	-1.77	-1.58	
大豆	B	7/12/95	大气水势	-87.41	-129.36	-125.49	-133.09	-157.03	
			叶水势	-1.38	-1.50	-1.98	-1.97	-1.90	
			叶水势	-1.68	-1.75	-1.72	-1.90	-1.85	
大豆	D	7/13/95	大气水势	-82.85	-116.82	-144.38	-131.66	-146.61	
			叶水势	-1.70	-1.85	-1.98	-2.20	-2.03	
			叶水势	-1.77	-1.90	-2.03	-2.00	-2.13	
甘薯	C	7/14/95	大气水势	-104.39	-124.00	-118.41	-132.01	-138.97	
			叶水势	-1.10	-1.37	-1.42	-1.27	-1.45	
			叶水势	-1.07	-1.38	-1.38	-1.35	-1.70	
花生	A	7/15/95	大气水势	-80.79	-108.86	-117.88	-121.18	-127.33	
			叶水势	-1.27	-1.88	-2.00	-2.28	-1.97	

植物叶水势日变化与大气水势日变化趋势并不一致, 且其规律因作物种类和利用方式而异。这可能与作物叶水容有关, 花生和甘薯的比水容较大^[9], 所以花生和甘薯叶水势与大气水势日变化相对一致。玉米叶水势上午 10:30 下降后略有上升, 叶水势变幅为处理 $B > D$; B、D、C、E 四处理中大豆叶水势从早晨至傍晚的变化呈下降趋势, 叶水势变幅为处理 $B > D > C、E$ 。处理 A 花生叶水势早晨下降后至傍晚 16:30 略有上升日变化趋势; 甘薯叶水势日变化较小, 水势大于其他植物, 叶水势变幅为处理 $C < E$ 。处理间相同作物叶水势存在明显的差异。结果表明花生、玉米叶具有较强的水势调节恢复能力; 甘薯叶具有较强的抗旱能力, 而大豆叶水势的恢复和抗旱能力小于其它植物。免耕覆盖处理使作物叶水势降低, 说明受干旱胁迫更严重。此外, 间作方式影响植物叶水势。

2.2 SPAC 中水势分布规律

由表 4 可见, SPAC 的叶气系统中的水势梯度是叶土系统水势梯度的 100 倍左右, 而叶土系统水势梯度又是 70cm 土层内土壤基质势梯度的 100 倍左右。不同处理下植物的水势分布略有不同。D 处理的玉米和大豆的叶土水势差大于 B 处理; 而 E 处理的大豆和甘薯的叶土水势差大于 C 处理; 与玉米间作的大豆叶土壤基质势梯度小于与甘薯间作的大豆叶土水势梯度; 花生的叶土水势梯度仅次于与甘薯间作的大豆。水势梯度越大, 说明根系

吸水需要消耗更多的能量,或干旱时所受的胁迫更严重。结果表明水流在 SPAC 中运移时,其能量主要消耗在叶气界面,这是因为在这一系统中水分发生了相变,这一过程主导着植物的被动吸水过程;其次消耗在土根界面,这一过程主导着植物的主动吸水,反映了植物吸水能力和对干旱的自我调节能力^[10-12]。

表4 5种处理土壤—作物—大气中水势梯度

Table 4 Differences of water potentials between soil, crop leaves and air under five farming systems

作物 Crop	处理 Treatment	日期(月/日/年) Date(m/d/yr)	$\Delta \Psi_{aL} \pm SE(\text{MPa})$	$\Delta \Psi_{LS} \pm SE(\text{MPa})$	$\Delta \Psi_{Sv} \pm SE(\text{MPa})$
玉米	B	7/11/95	109.25±24.82	1.55±0.20	0.018±0.0012
	D		109.28±24.93	1.61±0.17	0.018±0.0006
大豆	B	7/12/95	124.58±24.89	1.74±0.28	0.030±0.0011
	D		124.85±24.98	1.77±0.09	0.025±0.0007
	C	7/13/95	123.06±26.32	1.94±0.19	0.036±0.0019
	E		121.95±25.69	1.96±0.14	0.054±0.0014
甘薯	C	7/14/95	122.13±13.10	1.31±0.14	0.049±0.0006
	E		122.29±13.12	1.36±0.22	0.056±0.0028
花生	A	7/15/95	109.33±17.93	1.87±0.37	0.049±0.0043

注: $\Delta \Psi_{aL}$, 叶气水势差; $\Delta \Psi_{LS}$, 叶土(10cm)水势差; $\Delta \Psi_{Sv}$, 70与10cm土壤基质势差; SE, 标准差。

2.3 土壤—植物水势间的关系

在充分供水的条件下,作物叶水势受其生理过程控制,但当土壤水受到限制时,作物根系吸水满足不了蒸腾需要时,叶水势与土壤基质势有密切的相关。8:30, 10:30, 12:30, 14:30, 16:30等5个时间内测定各小区植物固定叶位叶片水势与对应时间的土壤基质势的关系可以用二项式方程表示(表5):

$$\Psi_L = \pm (a\Psi_s^2 - b\Psi_s + c) \quad (2)$$

式中, Ψ_L , Ψ_s 分别为植物叶水势和土壤基质势, Mpa; a, b, c 为方程系数, 均大于零。系数 a 前的正负号仅表示单调区间的不同。

结果表明,在本试验条件下,当土壤基质势减小,叶水势降低;大多作物叶水势仅与40cm土层以上土壤基质势相关。不同利用方式下不同作物叶水势与不同深度的土壤基质势相关,间接说明作物根系吸水深度的不同。处理B、D中作物的吸水根系较浅,主要分布在表层土壤(30cm以上),处理B较处理D的略深;处理C、E中作物的吸水根系可达到70cm,处理C较处理E深;处理C、E中大豆根系吸水深度大于处理B、D。处理D长期免耕导致亚表层的压实^[8],垄作增加了疏松土层厚度,不同耕作方式影响作物根系分布深度,因而在干旱季节强烈蒸腾条件下,导致不同处理中相同作物受不同深度土壤水分的胁迫不同。

2.4 土壤—作物水势与环境的的关系

2.4.1 土壤基质势与土壤温度 干旱季节当土壤温度大于25℃时,所有处理10cm或20cm土层的土壤吸力与土壤温度都可以用线性方程(3)拟合;20cm土层土壤吸力与土壤温度用幂函数方程(4)拟合,相关系数比用线性方程的显著提高(表5)。

$$S = a + bt \quad (3)$$

表5 植物叶水势 (MPa) 与土壤基质势 (MPa) 的关系

Table 5 Relationship of water potentials of crop leaves (MPa) and the soil matric potentials (MPa)

叶	处理	日期(月/日)	土层	相关方程	相关系数
Leaf	Treatment	Date(m/d)	Layer (cm)	Relation	Coefficient
花生	A	7/15	10	$\Psi_L=11717 \Psi_S^2+1525.9 \Psi_S+47.561$	0.9627**
			20	$\Psi_L=3037.1 \Psi_S^2+423.17 \Psi_S+12.643$	0.9544**
			30	$\Psi_L=70573 \Psi_S^2+4766 \Psi_S+78.135$	0.8450*
			40	$\Psi_L=5 \times 10^6 \Psi_S^2+213669 \Psi_S+2309.4$	0.9315**
大豆	B	7/12	10	$\Psi_L=148278 \Psi_S^2+12102 \Psi_S+244.96$	0.9308**
			20	$\Psi_L=74542 \Psi_S^2+3984.9 \Psi_S+51.292$	0.8844*
			30	$\Psi_L=-2 \times 10^7 \Psi_S^2-562036 \Psi_S-4930.5$	0.9838**
	D	7/12	10	$\Psi_L=-157337 \Psi_S^2-11036 \Psi_S-195.22$	0.8607*
			20	$\Psi_L=-296126 \Psi_S^2-12839 \Psi_S-140.85$	0.8609*
	C	7/13	10	$\Psi_L=34393 \Psi_S^2+3406 \Psi_S+82.185$	0.9274**
			20	$\Psi_L=3777 \Psi_S^2+400.58 \Psi_S+7.9163$	0.9842**
			30	$\Psi_L=149912 \Psi_S^2+7819.2 \Psi_S+99.749$	0.9902**
	E	7/13	70	$\Psi_L=3 \times 10^6 \Psi_S^2+67979 \Psi_S+408.08$	0.8648*
			10	$\Psi_L=422931 \Psi_S^2+55779 \Psi_S+1836.8$	0.9392**
			20	$\Psi_L=39132 \Psi_S^2+3548.6 \Psi_S+78.367$	0.8482*
	玉米	B	7/11	30	$\Psi_L=117935 \Psi_S^2+4837.5 \Psi_S+47.369$
40				$\Psi_L=-3 \times 10^6 \Psi_S^2-115185 \Psi_S-1013$	0.8785*
10				$\Psi_L=332709 \Psi_S^2+13678 \Psi_S+138.85$	0.9974**
D	7/11	30	$\Psi_L=3 \times 10^6 \Psi_S^2+87329 \Psi_S+678.03$	0.8630*	
		10	$\Psi_L=101117 \Psi_S^2+3417.7 \Psi_S+27.126$	0.9413**	
甘薯	E	7/14	10	$\Psi_L=-4292.3 \Psi_S^2-516.85 \Psi_S-16.548$	0.8933*
			20	$\Psi_L=80142 \Psi_S^2+9582.8 \Psi_S+284.65$	0.9764**
			30	$\Psi_L=-53529 \Psi_S^2-2515 \Psi_S-30.392$	0.8702*
			70	$\Psi_L=10^6 \Psi_S^2+27101 \Psi_S+178.62$	0.8767*

注: *, **分别代表0.05和0.01水平的显著性; 叶片水势取值范围见表3, 土壤水势为负压计量程范围。

$$S = at^b \quad (4)$$

式中: S , 土壤吸力, kPa; t , 土壤温度, $^{\circ}\text{C}$; a, b , 方程系数。

土壤基质势受土壤温度的影响可以用土壤基质势温度效应的概念表示^[6,13], 即在一定含水量下单位温度变化所引起的土壤基质势变化量, 即方程(3)和方程(4)的微商:

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{dS}{dt} = -b; \quad (5)$$

$$\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{dS}{dt} = -ab \times t^{b-1} \quad (6)$$

如表5所示, $b > 0$, 即土壤基质势的温度效应小于零。结果表明不同利用方式下土壤基质势随土壤温度的升高而降低。稀疏草地土壤基质势温度效应值最小, 松树下的最大, 各耕作制度则介于其中。不同耕作制度中, 土壤基质势温度效应值 10cm 处处理 B 大于处理 D, 20cm 处结果则相反; 处理 A 的大于处理 B、D; 因缺少土壤温度资料, 缺处理 E 资料,

而处理 C 的大于其它处理。由表 6 还可见不同处理下土壤温度变幅影响土壤基质势的温度效应, 土壤温度昼夜变幅较大时土壤基质势的温度效应值较小。此外, 20cm 土层土壤基质势的温度效应不是定值, 结果表明随着土壤温度升高, 土壤基质势温度效应值增大, 可能与 20cm 土层根系分布较密集有关。该土层温度变化较大, 土壤基质势因作物根系吸水变化较激烈。所以土壤基质势温度效应随温度升高而增大。

表6 土壤吸力(kPa)与土壤温度(°C)的相关关系 (n=58)

Table 6 Relationship of soil water suction (kPa) and soil temperature (°C) (n=58)

处理 Treatment	10cm模拟方程 Equation in 10cm	10cm相关系数 Coefficient in 10cm	20cm模拟方程 Equation in 20cm	20cm相关系数 Coefficient in 20cm
A	$S=3.873t-73.381$	0.3899**	$S=12.548t-310.28$	0.6326**
	$25.5 \leq t \leq 32.8$		$S=2 \times 10^{-16} t^{11.928}$	
B	$S=2.5585t-42.156$	0.3490**	$S=5.3678t-42.156$	0.6329**
	$25.4 \leq t \leq 35.5$		$S=9 \times 10^{-9} t^{7.1337}$	
C	$S=5.5029t-118.13$	0.3942**	$S=2 \times 10^{-12} t^{9.1347}$	0.4993**
	$25.4 \leq t \leq 31.0$		$S=8.0981t-192.37$	
D	$S=2.4789t-39.047$	0.3003*	$S=6.7314t-162.65$	0.7396**
	$26.0 \leq t \leq 34.0$		$S=6 \times 10^{-13} t^{9.3897}$	
F	$S=1.3507t-14.943$	0.2876*	$S=3.0285t-73.221$	0.7043**
	$26.0 \leq t \leq 36.5$		$S=25.7 \leq t \leq 32.4$	
G	$S=11.602t-274.08$	0.5756**	$S=17.063t-425.9$	0.7288**
	$25.7 \leq t \leq 29.5$		$S=10^{-24} t^{17.766}$	
			$25.0 \leq t \leq 28.0$	

注: 处理F,G分别为稀疏草地, 稀疏松树地, 为开垦前的利用方式; *, **分别代表0.05和0.01水平的显著性。

本文结果与闵安成等人^[3]的结果不一致。闵安成等的研究表明, 在田间条件下土壤温度较低(4—28°C)时, 土壤基质势的温度效应为正值, 且表明在高含水量时土壤基质势温度效应受土壤温度变幅的影响较大。理论上讲, 温度升高不仅降低水分的粘滞系数, 水分表面张力减小, 对土水系统而言土壤基质对水分的吸力减小, 水势提高, 土壤基质势的温度效应为正值。但是该文中四个耕作处理中仅一个处理温度与水势显著相关。本研究中土壤温度较高, 变幅大(25—36°C)。高温可能使作物蒸腾和土壤蒸发迅速增加, 土壤含水量迅速下降, 导致土壤基质势下降; 同时高温可能导致土壤水分部分相变后, 影响其气态扩散系数^[5], 所以土壤基质势温度效应更加显著^[13], 且表现为负效应。此外, 温度对土壤基质势的影响还依赖于土壤类型^[4, 14]。所以南方红壤区土壤温度对土壤基质势的影响及其影响因素有待深入研究。

2.4.2 植物叶水势与温度、湿度的关系

如表 7 所示, 除处理 D 中大豆和处理 C 中的甘薯外, 植物叶水势与大气温度、叶温呈

表7 植物叶水势(MPa)与温度(°C)的关系

Table 7 Relationship of water potentials of crop leaves (ψ , MPa) and air temperature or leaf temperature (x , °C)

植物叶 Leaf	处理 Treatment	日期(月/日) Date (m/d)	相关方程及相关系数 Relation and its coefficient	
			气温 Air temperature	叶温 Leaf temperature
花生	A	7/15	$\Psi_L=0.0207t^2-1.6389t+29.896$ 0.9982**	$\Psi_L=0.0188t^2-1.5759t+30.481$ 0.9985**
玉米	B	7/11	$\Psi_L=0.1201t^2-8.7498t+157.66$ 0.9466**	$\Psi_L=0.1274t^2-9.755t+185.06$ 0.9553**
	D	7/11	$\Psi_L=0.0328t^2-2.4650t+44.582$ 0.9999**	$\Psi_L=0.0395t^2-3.1016t+59.072$ 0.9997**
大豆	B	7/12	$\Psi_L=0.0562t^2-4.1527t+74.767$ 0.9463**	$\Psi_L=0.0542t^2-4.2175t+79.979$ 0.9510**
	C	7/13	$\Psi_L=-0.009t^2+0.5583t-10.361$ 0.9507**	$\Psi_L=-0.0089t^2+0.584t-11.318$ 0.9681**
	E	7/13	$\Psi_L=0.0215t^2-1.6102t+28.03$ 0.9383**	$\Psi_L=0.0217t^2-1.7063t+31.422$ 0.9387**
甘薯	E	7/14	$\Psi_L=0.0436t^2-3.0004t-50.163$ 0.8504*	$\Psi_L=0.0376t^2-2.7617t+50.163$ 0.9037*

注: *, **分别代表0.05和0.01水平的显著性。

表8 植物叶水势(MPa)与相对湿度(%)和大气水势的关系

Table 8 Relationship of water potentials of crop leaves(MPa) and air relative humidity(%) and air water potential (MPa)

植物叶 Leaf	处理 Treatment	日期(月/日) Date (m/d)	与相对湿度的方程及相关系数	与大气水势的相关方程及相关系数
			Relation to RH and its relative coefficient	Relation to Ψ_A and its relative coefficient
花生	A	7/15	$\Psi_L=0.002x^2-0.1556x+0.9231$ 0.8871*	$\Psi_L=0.0002\Psi_A^2+0.063\Psi_A+2.19333$ 0.8923*
玉米	B	7/11	$\Psi_L=0.0024x^2-0.2293x+3.7532$ 0.9871**	$\Psi_L=0.0003\Psi_A^2+0.0627\Psi_A+1.6854$ 0.9863**
	D	7/11	$\Psi_L=0.0019x^2-0.1799x+2.5345$ 0.9367**	$\Psi_L=0.0002\Psi_A^2+0.0483\Psi_A+0.9117$ 0.9330**
大豆	C			$\Psi_L=9 \cdot 10^{-5}\Psi_A^2+0.0267\Psi_A-0.1009$ 0.8110*
	E	7/13	$\Psi_L=-0.0005x^2+0.0628x-3.7022$ 0.9690**	$\Psi_L=-3 \cdot 10^{-5}\Psi_A^2-0.002\Psi_A-0.7173$ 0.9765**
甘薯	E	7/14	$\Psi_L=0.0532x^2-3.6065$ 0.9034*	$\Psi_L=-6 \cdot 10^{-5}\Psi_A^2-0.0004\Psi_A-0.4406$ 0.8973*

注: *, **分别代表0.05和0.01水平的显著性。

显著负相关,即温度升高叶水势下降。两者可用二项式方程描述,其一阶导数方程(7),表示植物叶水势的温度效应:

$$\frac{d\Psi_L}{dt} = 2at - b \quad (7)$$

结果表明干旱高温季节,植物水势温度效应随着气温升高而下降,植物水势调节能力下降,植物干旱胁迫程度越大,说明高温也是季节性干旱的成因之一。不间作作物花生和间作中的高秆作物叶水势与大气湿度、大气水势显著相关,表现的关系也可用二项式方程描述(表 8)。结果表明,干旱季节,由于大气温度升高或空气较为干燥,因而大气水势降低,叶气系统水势梯度增大,导致植物蒸腾加快,进而叶水势降低;间作改变了系统微环境的温度、相对湿度,因而造成间作中矮秆植物叶水势与大气湿度无显著相关关系。

3 结 论

1. SPAC 的叶气系统中的水势梯度是叶土系统水势梯度的 100 倍左右,而叶土系统水势梯度又是 70cm 土层内土壤基质势梯度的 100 倍左右;不同耕作制度影响水势的日变化,免耕较常耕,窄垄较宽垄叶土水势差下降,水分胁迫更强;水势日变化结果表明花生的耐旱性和抗旱性较强,大豆和玉米的则较弱。

2. 南方红壤地区干旱季节作物叶水势与土壤基质势显著相关,土壤基质势下降叶水势降低;垄作处理中作物叶水势与较深层次的土壤基质势相关;免耕处理亚表层土壤压实导致叶水势仅与表层土壤基质势相关。

3. 干旱季节,不同耕作制度下,土壤基质势随土壤温度的升高而降低;不同利用方式影响土壤基质势温度效应,昼夜温差越大土壤基质势温度效应值越小;20cm 土壤随温度升高,该层土壤基质势温度效应值增大。

4. 叶水势随温度升高而降低;间作改变了作物群体内的大气湿度,从而导致间作中矮秆作物的叶水势与大气湿度或大气水势无显著相关关系;随着气温或叶温的升高,叶水势温度效应值下降,作物干旱胁迫程度加剧。

综上所述,南方红壤区高温和土壤水分胁迫共同作用导致季节性干旱胁迫,高温加剧了水分胁迫;种植制度和耕作方法影响作物对干旱胁迫的响应主要表现在作物根系或群体小环境的影响。高温对土壤基质势及干旱胁迫的影响有待深入研究。

致谢:陈树元研究员,柳建国硕士在田间试验过程中提供帮助,王兴祥硕士参加田间管理工作并提供土壤养分资料,在此一并感谢。

参 考 文 献

1. 荆家海,陈 凯. 温度和水分状况对几种不同类型植物叶片水势和延伸生长的影响. 植物生态学与地植物学报, 1989, (3): 49—57
2. 李德全,邹 琦. 土壤水分胁迫对小麦叶片的渗透调节与延伸生长的影响. 植物学报, 1992, 34(2): 120—125
3. 闵安成,张一平,朱铭莪等. 田间土壤的水势温度效应. 土壤学报, 1995, 32(2): 235—240
4. 张富仓,张一平,张君常. 温度对土壤水分保持影响的研究. 土壤学报, 1997, 34(2): 160—169
5. 闵安成,张一平. 土壤气态水扩散特征初探. 西北农业大学学报, 1994, 22(2): 16—21
6. 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
7. 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

8. 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
9. 张 斌, 张桃林, 柳建国等. 植物的水容特征与其耐旱性的关系. 植物资源与环境, 1996, 5(2): 23—27
10. 邵明安, 杨文治, 李玉山. 植物根系吸收土壤水分的数学模型. 土壤学报, 1987, 24(4): 295—305
11. 邵明安, 杨文治, 李玉山. 土壤—植物—大气连续体中的水流阻力及相对重要性. 水利学报, 1986, (9): 8—14
12. Shao M A, Simmonds L P, Chen Zhi-xiong. Hydraulic resistance and capacitance in the soil-plant system. *Pedosphere*, 1991, 1(3): 193—206
13. 朱祖祥主编. 土壤学(上册). 北京: 农业出版社, 1993. 112
14. Hopmans J W, Dane J H. Temperature dependence of soil retention curve. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1986. 50: 562—567

RELATIONSHIP BETWEEN WATER POTENTIALS OF RED SOIL AND CROP LEAVES UNDER FIVE FARMING SYSTEMS AND THEIR RESPONSES TO DROUGHT STRESS IN DRY SEASON

Zhang Bin Zhang Tao-ling Zhao Qi-guo

(*Institute of Soil Science, Academia Sinica, Nanjing 210008*)

Summary

Seasonal drought is one of the main constraints to agricultural development of upland in the area of red soil of China. The responses of crops under five farming systems to drought stress are reported in this paper. The differences of water potentials between air and crop leaves were about 100 times higher than those between crop leaves and soil in the surface layer of 10cm. The differences between the latter were around 100 times higher than those between soils in the layers of 10cm and 70cm as well. The differences of water potentials were lower in the treatments of minimum tillage and narrow ridge tillage than those in the treatments of conventional tillage and wide ridge tillage respectively, indicating the serious water stress in former treatments. The results of diurnal variation of water potentials in soil-plant-atmosphere continuum (SPAC) indicated that peanut is more tolerant to drought than soybean and corn. Leaf water potential decreased with the increase of soil water potential and its relationship could be expressed by binomial equations. In the treatments of ridge tillage, leaf water potential was more related to the water potential of soil in deeper layers than to that of soil surface in the treatment of minimum tillage. Water potentials of soils or leaves increased with the increase of soil and air temperatures respectively. The effect of temperature on water potentials of soils and leaves were affected by farming practices and crop communities. Results showed that seasonal drought in the region is caused by integration of water stress and high temperature.

Key words Soil water potential, Leaf water potential, Effect of temperature on water potential, Red soil