

夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究

王健, 蔡焕杰, 陈凤, 陈新民

(西北农林科技大学 旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 本文利用2年的大型称重式蒸渗仪和小型棵间蒸发器的测定资料, 研究了不同灌水(2001年灌140mm、2002年灌65mm)条件下夏玉米生长期间的逐日蒸发蒸腾和棵间蒸发过程。结果表明, 2年夏玉米生长期间棵间蒸发占总蒸发蒸腾量的比例分别为43.69%和48.12%。分析得出夏玉米出苗前利用小型棵间蒸发器实测蒸发的修正系数为0.96。同时, 分析了棵间蒸发占蒸发蒸腾的比例随叶面积指数(LAI)和表层土壤含水量的变化关系。

关键词: 大型称重式蒸渗仪; 小型蒸发器; 蒸发蒸腾量; 棵间蒸发量

中图分类号: S152.7 **文献标识码:** A

作物蒸发蒸腾量的变化过程是作物田间用水管理的主要依据。现有的许多方法, 如水量平衡法、蒸渗仪法、能量平衡法等只能测定或计算农田总蒸发蒸腾量, 无法将其分解为蒸腾与蒸发两部分。利用大型称重式蒸渗仪与小型(棵间)蒸发器相结合的方法^[1-4], 可准确地监测逐日蒸发蒸腾、蒸发过程。

夏玉米是我国北方主要粮食作物之一, 实现夏玉米生长过程的节水, 对北方地区的农业节水具有重要意义。本文的目的是通过夏玉米蒸腾与棵间蒸发的研究, 得到夏玉米生长过程中蒸发蒸腾与棵间蒸发的变化规律, 为夏玉米合理适时地灌溉提供依据。

1 试验概况和方法

1.1 试验概况 试验于2001~2002年在西北农林科技大学节水灌溉试验站进行。该站内地形较为平整, 土层深厚, 土壤类型为中壤, 有机质含量较高。站内有建于田间的大型称重式蒸渗仪可自动测定蒸发蒸腾量, 而且蒸渗仪四周20m内作物水分处理一致。夏玉米是该地区主要农作物之一, 夏玉米平均产量在6.0~7.5t/hm²。试验用夏玉米品种为陕单9, 于6月10日左右播种, 9月30日左右收获, 播种密度为7株/m²。并根据控制条件进行了灌水, 2年的灌水量分别为140mm和65mm; 2001年灌3水, 灌水日期为6月12日、7月6日、7月19日, 2002年在苗期-拔节期适当亏水, 全生育期只灌了1水, 灌水日期为7月22日。试验区田间管理与当地大田水平一致, 2001年2002年生育期间的总降水量分别为276mm和270mm。

1.2 观测项目 (1)利用钢尺测定叶片的长(a_i)和宽(b_i), 每个小区随机选定3株, 每7d测1次, 先算平均 a_i 、 b_i , 其叶面积指数由式(1)求得

$$LAI = 0.75 \rho_{\text{种}} \sum_{i=1}^n (a_i \times b_i) \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{种}}$ 为夏玉米种植密度。

收稿日期: 2003-07-30

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2002AA2Z4031); 高等学校博士点基金项目(20020712020)

作者简介: 王健(1976-), 男, 陕西子洲人, 实验师, 学士, 主要从事作物需水规律与节水灌溉的研究。

(2) 土壤含水量, 每7d测定1次, 有降水或灌水时加测, 所用仪器2001年为TDR土壤水分测定仪, 2002年为Di Viner 2000土壤水分测定仪。

(3) 蒸发蒸腾量用建于田间的大型称重式蒸渗仪自动测定, 测定时间间隔为15min/次; 大型称重式蒸渗仪壁厚5mm, 表面积为 $2.5\text{m} \times 2.5\text{m} = 6.25\text{m}^2$, 深3.0m, 测量精度感量为0.032mm。

(4) 气象要素(降水、大气温度、湿度、风速和辐射强度等)用与大型称重式蒸渗仪配套的自动气象站测定。

(5) 用地温计测定小型棵间蒸发器、大型称重式蒸渗仪和气象站内不同深度(5cm、10cm、15cm、20cm)的土壤温度。

(6) 棵间蒸发采用置于玉米行与植株中间的小型棵间蒸发器, 用精度千分之一克的电子天平每日上午9:00测量1次, 小型梯间蒸发器的重量每减少1g相当于0.2147mm的土面蒸发水量, 为试验结果更加精确, 2个小型棵间蒸发器为1组, 每组测量1周, 每天取2个的平均值为实测值。

1.3 小型棵间蒸发器特征及试验布设 小型棵间蒸发器是由外桶(直径110mm、高200mm不封底)和内桶(内径78mm、高200mm、壁厚2mm, 测量时封底)两部分组成, 材料为PVC管。外桶是固定的, 测量时放置内桶; 内桶是可移动的, 主要用其测定棵间蒸发量。根据刘钰、刘昌明、樊引琴等运用的棵间蒸发器的特点^[2-4], 该试验研究采用的小型棵间蒸发器在埋设布置方面做了调整。在玉米播种后, 即沿距大型称重式蒸渗仪四周约5m左右将40个外桶, 45个内桶(为防止从土中取出时有损坏, 所以内桶比外桶多布置5个)垂直压入试验区土中, 并使其顶面与地面齐平。测量时每周更换一个测量位置, 以减小试验人员每日进入试验区同一地点对作物生长条件的影响和埋设小型棵间蒸发器时对作物根系的破坏, 保证了小型棵间蒸发器内土壤特性和降水与灌溉引起土壤含水率的变化与大田水平一致, 内桶压入前先将试验内桶壁均匀打孔, 不封底。测量时先取出外桶内的土, 然后从试验区中挖出内桶, 用小刮刀将底部的土刮平, 再用折叠好的塑料薄膜(4层)封底, 并用透明胶带封住桶壁小孔, 放入取出土后的外桶中, 即为1个装有原状土的小型棵间蒸发器。小型棵间蒸发器使用一周后, 使用下一组, 并将下一组外桶内取出的土回填到上一组外桶中。

2 结果与分析

2.1 逐日蒸发蒸腾量与棵间蒸发量的变化过程 2001年和2002年夏玉米生长期间的气象条件属正常年份, 大型称重式蒸渗仪测定的夏玉米生长期间的逐日蒸发蒸腾量和小型棵间蒸发器测定的棵间蒸发量及降水(灌水)量的变化分别见图1和图2。从图中可以看出, 播种-拔节期日蒸发蒸腾量均相对较低; 拔节-灌浆期, 夏玉米的日蒸发蒸腾量迅速增加, 最高可达 9.81mm/d (2001年8月1日)和 9.56mm/d (2002年8月4日); 灌浆-蜡熟期呈下降趋势, 蜡熟-收获期由于气温降低, 叶片逐渐变黄, 蒸发蒸腾量降到最低水平如表1所示。小型棵间蒸发器测定的棵间蒸发量在玉米出苗期较大, 玉米拔节后, 棵间蒸发量随玉米的生长而逐渐降低。

分析表明, 夏玉米的耗水高峰期在抽穗后, 特别是在抽穗-灌浆期间(7月底~8月底), 仅29d的蒸发蒸腾量占生育期总耗水量的36.62%(2001年)和37.98%(2002年)。

2001年和2002年总蒸发蒸腾量分别为415.51mm和356.26mm; 总蒸发量分别为181.52mm和171.43mm。总蒸腾量分别为233.99mm和184.84mm。分析了这2年夏玉米生长期间的气象因素(6月1日~9月30日), 发现2年的总降水量基本相等(约为270mm)、有效降水量分别为267.5mm和248.8mm, 总水面蒸发量2002年比2001年大(E601型蒸发器分别为588mm和538mm)、2002年日平均温度比2001年大(分别为27.6和26.9),

公顷单产2002年比2001年略大(分别为6.7t和6.3t)。利用Penman-Monteith公式计算了2年玉米生长期的参照蒸发量 ET_0 (表1),2年总蒸发蒸腾占总参照蒸发蒸腾量的比例分别为1.25和0.97,表明在不影响作物生长的情况下减少灌水量可降低总蒸发蒸腾量和总蒸腾量,但对总棵间蒸发量影响较小(只减小10mm左右)。而且减少灌溉水量虽然降低了总蒸发蒸腾量和总蒸腾量,但产量并没有降低,节水效果明显。

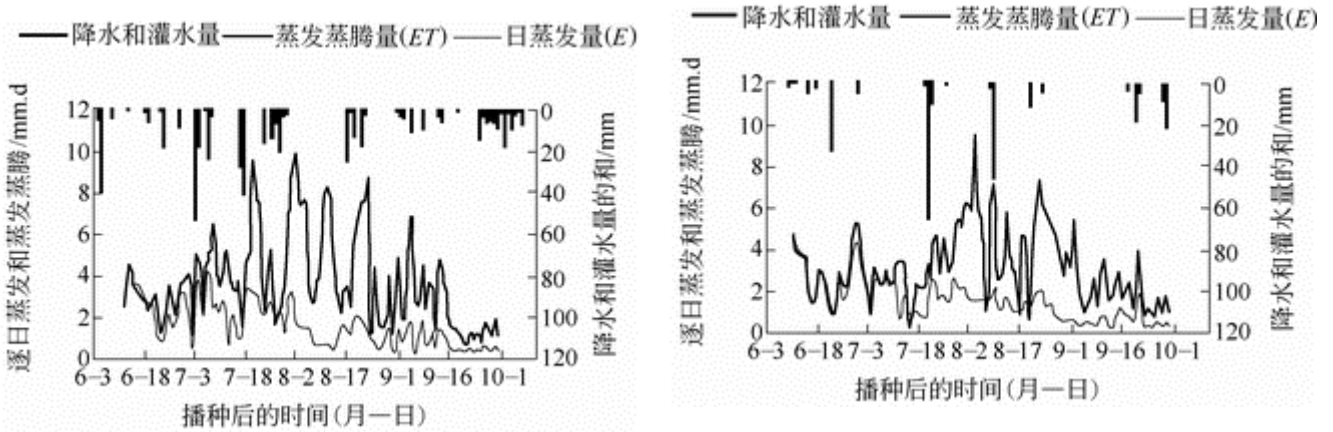


图1 2001年逐日蒸发、蒸发蒸腾和降水的变化过程

图2 2002年逐日蒸发、蒸发蒸腾和降水

从图1和图2还可以看出,降水或灌溉后晴天时,日蒸发蒸腾和蒸发有明显的上升趋势(如2001年6月25日、8月11日;2002年7月30日、8月14日等),这说明半干旱地区旱作农田的蒸发蒸腾和蒸发耗水不仅与能量有关,而且与水分供应也有密切的关系。

2.2 夏玉米生长期蒸腾量(T)和棵间蒸发量(E)与蒸发蒸腾(ET)的关系 夏玉米的生育期内蒸发蒸腾量是由棵间土壤蒸发E与叶面蒸腾量T组成。在不同生育阶段,它们之间的比值变化很大,作物蒸发蒸腾量中叶面蒸腾与棵间蒸发的分摊是农田水分循环以及土壤-植物-大气连续体水分传输动态模拟研究中主要工作之一,同时也是一件十分困难的事情^[7]。从播种到拔节(6月中旬~7月上旬),气温高,大气干燥,此时植株矮小,叶面积指数小,叶面蒸腾量很低,棵间土壤蒸发量(E)占蒸发蒸腾量的比例较大,达80%以上(见表1),而棵间蒸发量对产量形成基本上无影响,应当采取适当的栽培措施,尽量降低它所占的比例。拔节-抽穗期E和T基本相同;抽穗后以蒸腾耗水(T)为主,蒸腾量占蒸发蒸腾量的比值达70%左右。从全生育期看,2年玉米棵间蒸发量占总需水量分别为43.69%和48.12%;蒸腾耗水量占总蒸发蒸腾的比例分别为56.31%和51.88%。

表1 2001、2002年夏玉米生长期间各阶段蒸发蒸腾、蒸发量

生长阶段	播种~出苗	出苗~拔节	拔节~抽穗	抽穗~灌浆	灌浆~蜡熟	蜡熟~收获	全期
起止日期	6.11~6.21	6.22~7.10	7.11~7.30	7.31~8.28	8.29~9.16	9.17~9.30	6.11~9.30
阶段天数	11	20	20	29	19	14	113
平均 LIA	2001	0.00	0.20	1.60	4.50	4.14	2.56
	2002	0.00	0.17	1.41	3.79	3.45	2.21
ET_0/mm	2001	42.74	84.69	52.67	87.52	45.12	332.32
	2002	48.15	75.25	80.80	94.00	43.48	366.78
ET/mm	2001	28.50	65.97	87.82	152.14	64.00	415.51

	2002	31.16	54.29	63.48	134.40	49.45	23.49	356.26
ET/(mm/d)	2001	2.59	3.30	4.39	5.25	3.37	1.22	3.68
	2002	2.83	2.71	3.17	4.63	2.60	1.68	1.84
E/mm	2001	29.57/28.50	46.27	42.32	37.37	20.62	6.44	181.52
	2002	32.53/31.16	45.10	31.84	42.18	11.77	9.38	171.43
T/mm	2001	0.00	19.70	45.50	114.77	43.38	10.64	233.99
	2002	0.00	9.19	31.64	92.22	37.68	14.11	184.84
E/(mm/d)	2001	2.59	2.31	2.12	1.29	1.09	0.46	1.62
	2002	2.83	2.25	1.59	1.45	0.62	0.67	1.53
ET/ET _{TOTAL} (%)	2001	6.86	15.88	21.14	36.62	15.40	4.11	
	2002	8.75	15.24	17.82	37.73	13.88	6.59	
ET/ET ₀	2001	0.67	0.78	1.67	1.74	1.42	0.87	1.25
	2002	0.65	0.72	0.79	1.43	1.14	0.94	0.97
T/ET(%)	2001	0.00	29.86	51.81	75.44	67.78	62.30	56.31
	2002	0.00	16.93	49.84	68.62	76.20	60.07	51.88
E/ET(%)	2001	100.00	70.14	48.19	24.56	32.22	37.70	43.69
	2002	100.00	83.07	50.16	31.38	23.80	39.93	48.12

注：ET₀为参照腾发量；ET为大型称重式蒸渗仪实测蒸发蒸腾量；E为小型棵间蒸发器实测棵间蒸发量；T为蒸腾量；表中玉米在播种-出苗期的棵间蒸发量28.50和31.16为实测值乘以修正系数0.96所得（见表3），生长期棵间蒸发总量为玉米在播种-出苗期修正后的值

2.3 地温对蒸发蒸腾和蒸发的影响 从表1看出，玉米出苗前小型棵间蒸发器测定的蒸发量大于蒸渗仪测定的蒸发蒸腾量，主要原因可能是由于小型棵间蒸发器的边界效应的影响。表2和图3是2001年在夏玉米田间测定的地温变化。从表2看出，在玉米拔节前小型棵间蒸发器0~20cm的地温比大型称重式蒸渗仪0~20cm的地温平均高出1.02~1.70℃，而拔节后由于玉米叶面覆盖率的增加及平均气温的降低，小型棵间蒸发器与大型称重式蒸渗仪地温相差逐渐减小，一般在气温较高的晴天小型棵间蒸发器的地温较高，阴、雨天小型棵间蒸发器的地温较低；从表2还可以看出，小型棵间蒸发器和大型称重式蒸渗仪0~20cm的地温在玉米拔节前均大于气象园0~

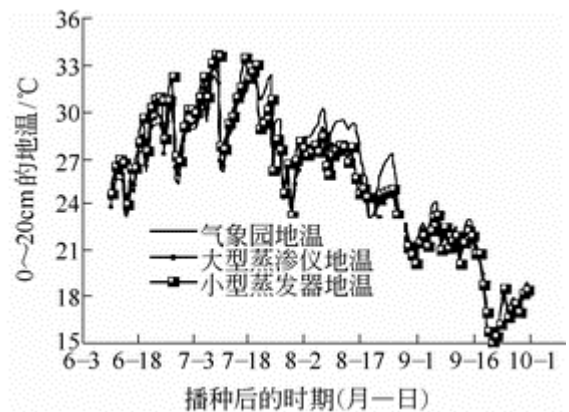


图3 大型蒸渗仪、小型蒸发器和常规气象站0~20cm逐日地温变化

20cm的地温，可能原因是蒸渗仪土壤温度除受进入土壤的热通量影响外，还受蒸渗仪周围环境因素的影响^[5]。而在玉米拔节后均小于气象园，这是因为玉米在拔节后叶面覆盖率的不断增加、进入土壤的热通量减少、空气流动减缓等因素所致。

2.4 玉米出苗前棵间蒸发量的修正 在玉米出苗前10d，利用大型称重式蒸渗仪和小型棵间蒸发器测定的土壤蒸发量并不相等，计算了2001年和2002年二者的比值（表3）。2001年的变化范围为0.93~1.00，2002年变化范围为0.93~0.99，2年平均值均约为0.96；因此，利用自制的PVC小型棵间蒸发器测定夏玉米的棵间蒸发量，在出苗前用修正系数0.96即可计算出棵间实蒸发量。

表2 2001年夏玉米各生长阶段气象园、大型蒸渗仪、小型蒸发器0~20cm地温变化
(单位:)

生长阶段	播种~出苗	出苗~拔节	拔节~抽穗	抽穗~灌浆	灌浆~蜡熟	蜡熟~收获
气象园	25.71	27.59	29.25	27.27	22.46	17.64
大型蒸渗仪	26.09	27.99	28.80	25.91	21.93	17.60
小型蒸发器	27.79	29.01	29.22	26.12	22.05	17.62
L-W	0.38	0.41	-0.45	-1.36	-0.53	-0.04
M-W	2.08	1.43	-0.03	-1.15	-0.41	-0.02
M-L	1.70	1.02	0.42	0.21	0.12	0.02

注: L_W 为大型称重式蒸渗仪内地温减气象站内地温的差值; M_W 为小型棵间蒸发器内地温减气象站内地温的差值; M_L 为小型棵间蒸发器内地温减大型称重式蒸渗仪内地温的差值。

表3 大型称重式蒸渗仪和小型棵间蒸发器测定的土壤蒸发量及其比值

年份	项目	播种后天数										均值
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2001	E_L	2.99	2.46	4.34	3.66	3.50	3.48	3.01	2.62	2.20	2.82	3.11
	E_M	3.20	2.62	4.60	3.68	3.65	3.62	3.24	2.66	2.30	2.83	3.24
	E_L/E_M	0.93	0.94	0.94	0.99	0.96	0.96	0.93	0.98	0.96	1.00	0.96
2002	E_L	4.50	3.80	3.60	3.56	3.60	1.40	1.30	1.80	3.20	2.90	2.97
	E_M	4.80	4.00	3.80	3.68	3.65	1.50	1.32	1.90	3.30	3.12	3.11
	E_L/E_M	0.94	0.95	0.95	0.97	0.99	0.93	0.98	0.95	0.97	0.93	0.96

注: E_L 为大型称重式蒸渗仪测定的土壤蒸发量; E_M 为小型棵间蒸发器测定的土壤蒸发量。

2.5 土壤蒸发占蒸发蒸腾的比例 (E/ET) 与叶面指数 (LAI) 的关系 水分供应充分的条件下,作物棵间蒸发占蒸发蒸腾量的比例主要受叶面积指数 (LAI) 和土壤水分条件的影响^[6],如图4, E/ET 依夏玉米生育期的变化,随叶面积指数的增加, E/ET 减小显著;从图中还可以看出2年的 LAI 与 E/ET 的变化都有一定的规律,且2001年的 LAI 大于2002年的 LAI ,而2002年的 E/ET 大于2001年的 E/ET (2002年9月降水多,使2002年9月中旬的 E/ET 大于2001年同期值),说明控制灌水量可使 E/ET 与 LAI 的关系发生变化。考虑两者的极限条件,由实测资料回归分析得出两者存在指数函数关系如图5,回归关系式2001年为: $E/ET = 0.9845e^{-0.345LAI}$, $R^2 = 0.93$, 2002年为: $E/ET = 0.978e^{-0.378LAI}$, $R^2 = 0.77$ 。从回归关系式可以看出,2001年的相关系数为0.93,2002年的相关系数为0.77,这说明在水分供应充分的条件下夏玉米生育期内 E/ET 与 LAI 的相关性好,同时说明夏玉米生育期内减少灌水量可使 E/ET 与 LAI 的相关关系降低。由此可得出,在水分供应充分的条件下 E/ET 与 LAI 的相关关系式: $E/ET = 0.9845e^{-0.345LAI}$, $R^2 = 0.93$ 。

2.6 土壤蒸发占蒸发蒸腾的比例 (E/ET) 与0~10cm土壤含水量的关系 表层土壤含水量对 E/ET 有显著影响。 E/ET 随表层土壤含水量的变化可分为以下几个阶段,当土壤表层含水量维持在田间持水量左右, E/ET 保持稳定,然后是随着水分的散失而缓慢降低;当土壤表层含水量达到毛管断裂水量时, E/ET 随着土壤表层水分的散失而急剧降低,当土壤表层含水量降低至一定水平时, E/ET 将维持在低而稳定的水平^[7]。由于作物蒸腾耗水由整个作物根层土壤水分供应,而棵间蒸发主要受表层土壤水分控制,例如当灌水或降水后,土壤水分条件能充分满足 ET 和 E 的要求,随着表层土壤水分的散失,棵间蒸发速率迅速下降,从而 E/ET 也随着表层土壤水分的减少而降低。图6是叶面积指数在等于或大于1时 E/ET 随土壤表

层(0~10cm)体积含水量的变化。根据测定结果,分析得出表层土壤含水量与E/ET存在如下回归关系:

$$E/ET = 3.4637 \theta_v - 0.1854, R^2 = 0.8092$$

式中 θ_v 代表土壤表层体积含水量 ($\theta_v > 0.14$)。

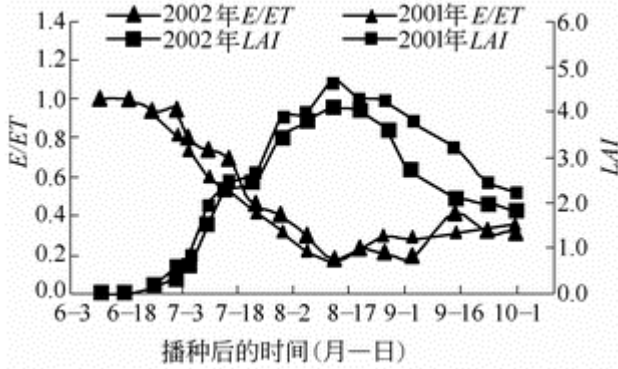


图4 2001年、2002年夏玉米E/ET与LAI的变化过程

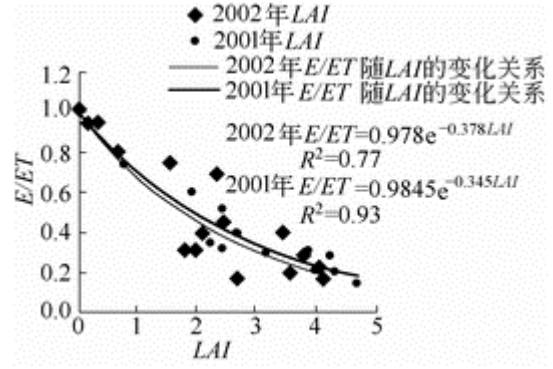


图5 2001年、2002年夏玉米E/ET随LAI的变化关系

3 结论

根据试验结果的分析,得出以下结论:(1)据大型蒸渗仪和小型棵间蒸发器的观测结果,得出夏玉米在充分灌溉(2001年)和非充分灌溉(2002年)条件下,生育期棵间蒸发量占蒸发蒸腾量的比例,分别为43.69%和48.12%。非充分供水比充分供水降低了总蒸发蒸腾量和总蒸腾量,但产量并未降低,其节水效果明显。充分供水对总棵间蒸发量影响较小。(2)分析表明0~20cm地温对小型棵间蒸发器测定的土壤蒸发有一定的影响,利用小型棵间蒸发器测定夏玉米出苗前实测蒸发的修正系数为0.96。(3)初步建立了夏玉米生育期内E/ET与LAI函数关系式

$$E/ET = 0.9845e^{-0.345LAI}; E/ET \text{ 与 } 0 \sim 10\text{cm} \text{ 土壤体积分含水量的关系为 } E/ET = 3.4637 \theta_v - 0.1854.$$

4 讨论

本试验研究用小型棵间蒸发器实测的资料计算了夏玉米生育期2年的蒸发量,虽然在以前研究的基础上对研究方法有了一些改进,但由于试验人员每天进入试验区测量引起覆盖度发生一定程度的变化,因此可能造成数据偏差;另外,本试验所测数据均是布置于玉米行与株中间的数据也可能会引起数据不能完全代表棵间蒸发表面的平均状况。这些问题以及夏玉米田的棵间蒸发与其它参数的关系有待进一步研究。

参考文献:

[1] Carl C, et al. Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils[J]. Agr. and For. Met., 1993, (65): 159-173.
 [2] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸发蒸腾的研究[J], 水利学报, 1998, (10):

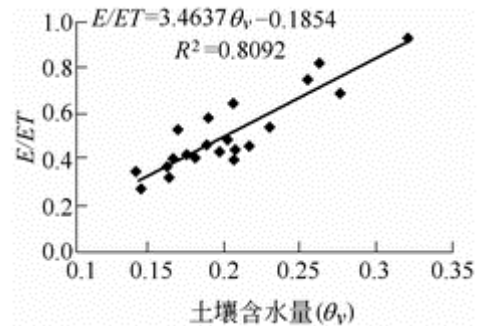


图6 E/ET与0~10cm土壤含水量的关系

36-39.

- [3] 樊引琴, 蔡焕杰, 王健. 冬小麦田裸间蒸发的试验研究[J]. 灌溉排水, 2000, (4): 1-4.
- [4] 刘钰, Fernando R M, Pereira L S. 微型蒸发器田间实测麦田与裸地土面蒸发强度的试验研究[J]. 水利学报, 1999, (6): 45-49.
- [5] 许亚群, 王少华, 黄永忠. 蒸渗器厚壁对土壤热状况的影响及对策[J]. 灌溉排水, 2001, (3): 59-62.
- [6] Doorenbos J, Pruitl W. Crop water requirements[M]. 2ndEd, Rome: FAO, 1977.
- [7] Nadine Bri sson, Bernard Seguin, Patrick Bertuzzi. Agrometeorologi cal soil water balance for crop simulati on models[J]. Agri. and For. Meter, 1992, (59): 267-278.

Experimental study on evapotranspiration and soil evaporation in summer maize field

WANG Jian, CAI Huan-jie, CHEN Feng, CHEN Xin-min

(Northwestern Science and Technology University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China)

Abstract: The daily changes of evapotranspiration and soil evaporation for summer maize field were analyzed according to the observation data using large weighing lysimeters and micro-lysimeters in the period of growing season in 2001 and 2003. The result shows that the ratio of soil evaporation to evapotranspiration is 43.95% and 48.82% respectively, which is correlated to the irrigation condition. Soil evaporation can be calculated by using the soil evaporation measured by micro-lysimeter by multiplying a coefficient of 0.96. The variation of the ratio of soil evaporation to evapotranspiration following the changes of leaf area index and surface soil moisture is also analyzed.

Key words: large weighing lysimeter; micro-lysimeter; evapotranspiration; evaporation; summer maize field