

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.031

基于双作物系数法的新疆覆膜滴灌夏玉米蒸散量估算

李丰琇 马英杰

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052)

摘要: 为评估双作物系数法计算干旱区部分覆膜滴灌条件下夏玉米蒸散量的可靠性,于2016—2017年在新疆阿克苏地区开展了夏玉米蒸散量测坑试验研究,试验根据定灌水周期(W1、W2、W3)和变灌水周期(W4、W5)共设置5个处理,并分别采用稳定碳同位素法和水量平衡法,对双作物系数模型计算的夏玉米蒸腾量和蒸散量进行了验证。结果表明,双作物系数法计算的蒸散量与水量平衡法测定的蒸散量呈现出较好的相关性,全生育期蒸散量模拟值与实测值的均方根误差在10 mm左右。双作物系数法计算的蒸腾量与稳定碳同位素法测得的耗水量亦呈现出较好相关性,模拟值与实测值的均方根误差在20 mm左右。通过回归系数(b)、一致性指数(d)及均方根误差(RMSE)的分析,认为双作物系数法可以估算并区分局部覆膜滴灌条件下干旱区夏玉米蒸散量,且2016年和2017年夏玉米全生育期内估算土壤蒸发量分别占蒸散量的21.33%和23.97%,作物蒸腾量分别占蒸散量的78.67%和76.03%。

关键词: 夏玉米; 覆膜滴灌; 蒸散量; 作物蒸腾量; 稳定碳同位素技术

中图分类号: S161.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0268-07

Evapotranspiration Estimation of Summer Maize with Plastic Mulched Drip Irrigation Based on Dual Crop Coefficient Approach in Xinjiang

LI Fengxiu MA Yingjie

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to evaluate the reliability of dual crop coefficient approach on calculating evapotranspiration of summer maize with mulched drip irrigation in arid region, the evapotranspiration of maize was measured by stable carbon isotope technique and water balance methods in measurement pits in 2016 and 2017. Five treatments were set up according to fixed irrigation cycle (W1, W2 and W3) and variable irrigation cycle (W4, W5) and the corresponding values were also calculated by dual crop coefficient approach. Experimental results showed that evapotranspiration calculated by dual crop coefficient approach had positive correlation with those values obtained by water balance methods, and the root mean square error was about 10 mm. The crop transpiration calculated by dual crop coefficient approach also had positive correlation with those values obtained by stable carbon isotope technique, and the root mean square error was about 20 mm. By calculation and analysis on the root mean square error, regression coefficient and consistency index, it can be concluded that dual crop coefficient approach was an effective method to calculate and distinguish evapotranspiration of summer maize with partial mulched drip irrigation in arid region. In whole growing season of summer maize, the simulated soil evaporation accounted for 21.33% and 23.97% of evapotranspiration and plant transpiration accounted for 78.67% and 76.03% of evapotranspiration in 2016 and 2017, respectively.

Key words: summer maize; mulched drip irrigation; evapotranspiration; crop transpiration; stable carbon isotope technique

0 引言

蒸散(Evapotranspiration, ET)主要由土壤蒸发

(E)和作物蒸腾(T)组成,是唯一既出现在地表能量平衡又出现在水量平衡中的要素^[1]。其不仅在能量循环和水循环过程中起着极其重要的作用,也

收稿日期: 2018-08-01 修回日期: 2018-09-11
基金项目: 新疆水利科技专项(2018G01)和新疆高校创新团队项目(XJEDU2017T004)
作者简介: 李丰琇(1990—),女,博士生,主要从事干旱区水资源高效利用研究,E-mail: 1075214992@qq.com
通信作者: 马英杰(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事干旱区灌溉排水理论与技术研究,E-mail: 342834436@qq.com

是连接生态与水文过程的重要纽带^[2]。因此联合国粮农组织(Food and agricultural organization,FAO)利用 ET_0 基于作物系数法估算农田 ET ^[3]。作物系数法可分为单作物系数法和双作物系数法,双作物系数法能够区分计算 E 和 T ,能评估降雨、灌溉和覆膜等对土壤水分的影响^[4],并且在许多地区得到了广泛的应用。樊引琴等^[5]发现,在地面未被植株完全覆盖的条件下,双作物系数法比单作物系数法更接近实测值。冯禹等^[6]利用叶面积指数修正双作物系数法,计算了黄土高原地区春玉米 ET ,并认为该方法可以准确地估算和区分 ET 。全国栋等^[7]将液流法测得的蒸散量和双作物系数法计算出的蒸散量进行对比,认为双作物系数法是估算桃树蒸散量的有效方法。宿梅双等^[8]利用称重式蒸渗仪,校验了双作物系数法模拟喷灌条件下冬小麦和糯玉米的需水规律,发现实测值和模拟值吻合良好。李毅等^[9]通过单、双作物系数法计算砾石覆盖条件下小麦蒸散量,发现该模型具有一定适用性。

稳定碳同位素技术是植物生理生态学研究中的新方法,其可靠和稳定性已得到充分证实^[10-14]。陈平等^[15]运用稳定碳同位素法和茎流计对核桃-菘蓝/决明子复合模式不同生长时期的水分利用效率和耗水量进行了研究,发现复合模式比单作系统耗水量少。何春霞等^[16]测算了核桃-小麦间作系统和单作小麦不同组分的稳定碳同位素组成和核桃树干液流,并计算出水分利用效率和耗水量,结果表明单作小麦比间作小麦的总耗水量高。

目前,利用双作物系数法估算和区分作物 ET 的研究,多在湿润及半湿润地区进行,且以水量平衡法、大型称重式蒸渗仪及茎流计等方法验证模型在完全覆膜或裸地条件下的准确性。但在干旱地区,对部分覆膜滴灌条件下,采用双作物系数法估算和区分作物 ET 的研究,以及应用稳定碳同位素技术对模型进行验证的研究仍较少。

本研究于 2016 年和 2017 年在新疆阿克苏地区开展测坑试验,通过对部分覆膜滴灌夏玉米的生长指标、土壤含水率及叶片稳定碳同位素等进行实际观测,验证 FAO-56 双作物系数法在新疆阿克苏地区的适用性,并对该方法估算和区分夏玉米 ET 的模拟结果进行分析,以期为该地区农田水分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2016 年和 2017 年 6—10 月在阿克苏地区温宿县红旗坡新疆农业大学林果实验基地内进行(东经 80°20′,北纬 41°16′)。试验地气候类型为暖温干旱气候,降雨量稀少、蒸发量大、气候干燥,光热资源丰富,年日照 2 800 ~ 3 000 h,无霜期每年有 200 ~ 220 d,多年平均降雨量 80.4 mm,地下水埋深 10 m 以上。试验区土壤质地如表 1 所示。

表 1 试验区土壤质地
Tab.1 Soil texture of experimental plots

土层/ cm	密度/ (g·cm ⁻³)	土壤粒径比例/%				土壤 性质
		0 ~ 0.002 mm	0.002 ~ 0.05 mm	0.05 ~ 2 mm	> 2 mm	
0 ~ 20	1.38	7.0	56.5	36.5	0	粉砂壤土
20 ~ 40	1.42	7.2	67.9	24.9	0	粉砂壤土
40 ~ 60	1.40	2.9	15.8	81.3	0	壤砂土
60 ~ 80	1.38	0.1	1.7	98.2	0	细砂
80 ~ 100	1.35	0.2	8.0	91.8	0	细砂

1.2 试验设计

供试玉米品种为新玉 9 号。种植在 3 m × 2.2 m × 2 m 的无底测坑内,采用人工点播,株行配置为 (30 cm + 40 cm + 30 cm + 60 cm) × 25 cm,采用一膜两管四行的膜下滴灌灌溉方式,两行玉米中间布一根滴灌带,滴头流量为 0.8 L/h,滴头间距 0.1 m。一个测坑内共种植 8 行玉米(图 1)。每个测坑均有 1 个水表控制灌溉水量(精度为 0.001 m³)。

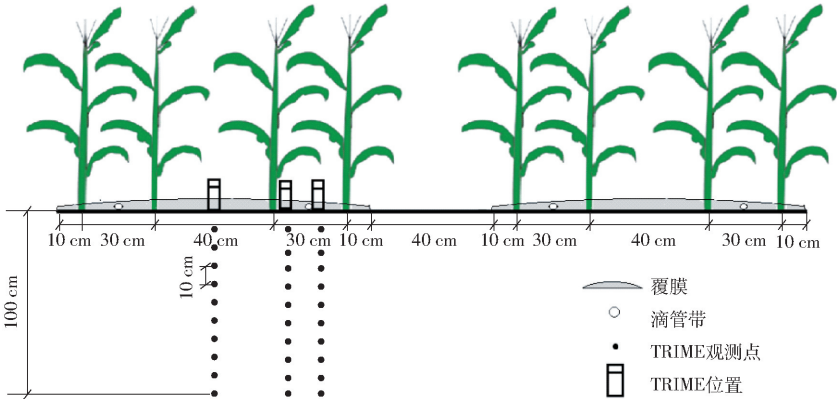


图 1 小区布置图

Fig.1 Diagram of plot arrangement

2016 年和 2017 年试验中,为保证出苗,均在玉米播种前对所有测坑漫灌 1 次,6 月 20 日统一播种。试验根据定灌水周期(W1、W2、W3)和变灌水周期(W4、W5)共设置 5 个处理,每处理 3 次重复,随机布置在 15 个测坑内。各处理的施肥方式一致。

2016 年 7 月 20 日开始滴灌试验,9 月 14 日停水,10 月 14 日收获,其中 W1、W2、W3 的灌水周期均为 8 d,灌水定额分别为 45、37.5、30 mm,灌溉定额分别为 316、256、196 mm;W4、W5 的灌水周期分别为 10、6 d,灌水定额分别为 49.5、30 mm,灌溉定额均为 256 mm。

2017 年 7 月 23 日开始滴灌试验,9 月 1 日因水泵故障停水,10 月 3 日收获,其中 W1、W2、W3 的灌水周期均为 8 d,分别按照 120% ET (每个灌水周期内的 ET 按照 $ET = K_c ET_0$ 计算获得,其中各生育期内作物系数 K_c 值参照梁文清^[17]的研究成果)、100% ET 和 80% ET 进行灌溉,灌溉定额分别为 181、151、121 mm;W4、W5 的灌水周期分别为 10、6 d,均按照 100% ET 进行灌溉,灌溉定额均为 151 mm。由于各处理在 2017 年比 2016 年少灌 1 ~ 2 次水,导致 2017 年比 2016 年灌溉量减少。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤含水率

土壤体积含水率通过 TRIME 管式 TDR 系统测定,每小区布置 3 根 TRIME 管,分别位于两滴灌带中间、玉米旁和行间。每次灌水前测一次,遇降雨时加测,测试深度为 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm、50 ~ 60 cm、60 ~ 70 cm、70 ~ 80 cm、80 ~ 90 cm、90 ~ 100 cm,共 10 层。

1.3.2 气象数据

试验区所有气象数据从距离试验测坑 300 m 处的气象站(Watchdog)获得,包括太阳能辐射、温度、相对湿度、风速、大气压强和降雨量等。数据每 1 h 记录一次,存储在记录仪中,以便定期下载。

1.3.3 稳定碳同位素和植物耗水量

于玉米 6 叶期、12 叶期、吐丝期、灌浆期和成熟期 5 个时期,待各处理作物所选定叶片的水分生理指标测定完毕后,采摘各处理同一位置处无病虫害且色泽相对一致叶片,在 70℃ 干燥箱内干燥 48 h,粉碎过 80 目筛,样品密封保存后,送实验室用于测定 $\delta^{13}C$ 值并计算 WUE。根据文献[10 - 14, 18 - 22]等所述方法,应用试验所测数据计算夏玉米单位面积的实际耗水量。

1.3.4 生理指标

(1)株高:分别于夏玉米拔节期、喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期,对每个处理取地上部植株 3

株,用直尺测定株高。

(2)干物质量:分别于夏玉米拔节期、喇叭口期、吐丝期、灌浆期和成熟期,对每个处理取地上部植株 3 株,分别按叶、茎、穗在 105℃ 杀青,80℃ 干燥至恒定质量后进行称量。

1.4 双作物系数法

运用 FAO - 56 中的双作物系数法计算试验地夏玉米的蒸散量,公式为

$$ET_c = (K_s K_{cb} + K_e) ET_0 \quad (1)$$

式中 ET_c ——作物蒸散量,mm

ET_0 ——参考作物蒸散量,mm

K_{cb} ——基础作物系数

K_e ——土壤蒸发系数

K_s ——水分胁迫系数

ET_0 根据气象数据由 Penman - Monteith 公式计算^[3], K_{cb} 和 K_s 的计算过程参考 FAO - 56 方法^[3]。

土壤蒸发系数(K_e)可以用来描述作物蒸散量 ET_c 中的土壤蒸发部分,一般表示为

$$K_e = K_r (K_{c(\max)} - K_{cb}) \leq f_{ew} K_{c(\max)} \quad (2)$$

式中 $K_{c(\max)}$ ——灌溉或降雨后 K_c 的最大值

K_r ——土壤衰减系数

f_{ew} ——土壤表层裸露和湿润部分的百分比

式(2)中的 $K_{c(\max)}$ 和 K_r 两个参数,计算过程已在 FAO - 56 中详细给出^[3],本文不再赘述。

由于本试验为局部覆膜,故土壤蒸发系数的计算由膜孔蒸发和裸土蒸发两部分构成,根据覆膜和不覆膜的面积比例关系,本文构建了计算 K_e 的表达式

$$K_e = \frac{3}{4} K_{e_1} + \frac{1}{4} K_{e_2} \quad (3)$$

式中 K_{e_1} ——膜孔蒸发系数

K_{e_2} ——裸土蒸发系数

K_{e_1} 和 K_{e_2} 分别通过式(2)计算得出。但在用式(2)计算 f_{ew} 时,由于本试验是局部覆膜滴灌条件,因此 f_{ew} 的计算公式为

$$f_{ew} = \min \left(1 - f_c, \left(1 - \frac{2}{3} f_c \right) f_w \right) \quad (4)$$

式中 f_c ——植被覆盖占表层土壤面积的比例

f_w ——土壤表面的湿润比例

在计算 K_{e_2} 时,式(4)中的 f_w 取 1。在计算 K_{e_1} 时,由于在覆膜条件下还应考虑通过膜孔蒸发的量,因此,式(4)中的 f_w 表达式为

$$f_w = \alpha N A_h / A_{total} \quad (5)$$

式中 α ——膜孔有效面积系数

N ——膜孔数量

A_h ——单个膜孔的面积, m^2

A_{total} ——小区覆膜总面积, m^2

1.5 统计参数

采用回归系数(b)^[23]、一致性指数(d)^[23]及均方根误差(RMSE)^[23]来检验模型的模拟效果,其中 b 和 d 值越接近于 1,表明模拟值和实测值吻合度越高,RMSE 越小,模型偏差越小。

表 2 双作物系数法计算夏玉米蒸散参数

Tab.2 Parameters for dual crop coefficient approach to estimate summer maize evapotranspiration				
变量	参数	推荐值	取值	来源
基础作物系数	$K_{cb}(ini)$	0.15	0.15	校正
	$K_{cb}(mid)$	1.15	1.20	校正
	$K_{cb}(end)$	0.50	0.87	校正
土壤蒸发层深度	Z_e	0 ~ 0.15	0.10	FAO-56 推荐 ^[3]
能量限制阶段累积蒸发量	REW	8 ~ 11	9	校正
最大累积蒸发量	TEW	18 ~ 25	20	校正
膜孔有效面积系数	α	2 ~ 8	6	文献[24]

玉米蒸散量进行模拟,模型模拟的蒸散量与基于水量平衡法计算出 5 个处理各灌水周期的作物蒸散量对比如图 2a 所示。实测与模拟蒸散量(ET)之间对比统计结果详见表 3。

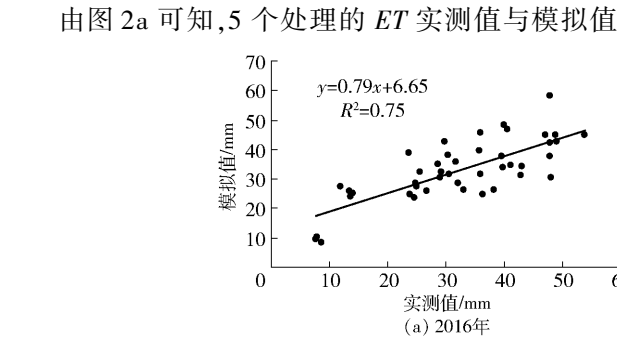


图 2 2016 年和 2017 年 ET 模拟值与实测值拟合相关图

Fig.2 Fitting correlation diagrams of observed and simulated evapotranspiration in 2016 and 2017

表 3 2016 年和 2017 年 ET 模拟值与实测值对比

Tab.3 Statistics of comparable parameters of observed and simulated evapotranspiration in 2016 and 2017				
年份	处理	RMSE/mm	b	d
2016	W1	8.12	0.93	0.99
	W2	7.52	0.91	0.99
	W3	7.59	0.92	0.99
	W4	6.95	0.99	0.99
	W5	10.66	1.06	0.98
2017	W1	4.59	1.03	0.99
	W2	11.37	1.06	0.89
	W3	12.56	1.06	0.86
	W4	10.15	1.12	0.99
	W5	11.75	1.03	1.00

2.2 模型验证

2.2.1 基于水量平衡法的模型验证

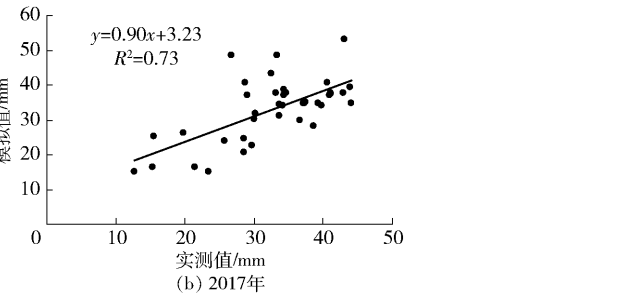
将调试后的模型参数代入双作物系数模型中,

2 结果与分析

2.1 双作物系数法参数率定

运用 2016 年夏玉米的试验数据进行参数校正,2017 年的试验数据进行模型验证。各参数见表 2。根据以上参数运用双作物系数法,对 2016 年夏

基本落在 1:1 线范围内,决定系数 $R^2 = 0.75$ 。由表 3 可知,2016 年 5 个处理夏玉米 ET 均方根误差 RMSE 的变化范围在 6.95 ~ 10.66 mm,回归系数 b 在 0.91 ~ 1.06 内变化,拟合度 d 的变化范围在 0.98 ~ 0.99,拟合效果较优。



计算 2017 年 5 个处理各灌水周期的作物蒸散量(ET),并与实测蒸散量进行对比,图 2b 为 2017 年夏玉米 ET 的实测值和模拟值拟合相关图,误差统计结果如表 3 所示。

验证结果显示,率定后的模型可以很好地模拟试验区夏玉米生育期内的 ET 。从图 2b 可以看出,生育期内夏玉米 ET 实测值和模拟值基本落在 1:1 线范围内,决定系数 R^2 为 0.73。各处理生育期内 ET 实测值和模拟值的 RMSE 为 4.59 ~ 12.56 mm, b 为 1.03 ~ 1.12, d 为 0.86 ~ 1.00。以上结果说明,参数校验后的模型可以较好地模拟试验区内夏玉米生育期内蒸散量变化过程。

2.2.2 基于稳定碳同位素技术的模型验证

图 3 为运用稳定碳同位素法计算 2017 年 5 个处理夏玉米各生育期实测和模拟作物蒸腾量拟合相关图,误差统计结果如表 4 所示。

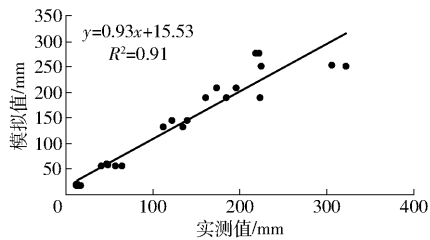


图3 2017年作物蒸腾量模拟值与实测值拟合相关图

Fig. 3 Fitting correlation diagrams of observed and simulated transpiration in 2017

表4 2017年作物蒸腾量模拟值与实测值对比
Tab. 4 Statistics of comparable parameters of observed and simulated transpiration in 2017

处理	RMSE/mm	<i>b</i>	<i>d</i>
W1	17. 83	1. 14	0. 98
W2	22. 62	1. 23	0. 97
W3	14. 21	1. 14	0. 98
W4	18. 02	0. 91	0. 98
W5	25. 44	0. 82	0. 97

验证结果显示,率定后的模型可以很好地模拟

试验区夏玉米生育期内作物蒸腾量。从图3和表4可看出,生育期内夏玉米实测和模拟作物蒸腾量的拟合度较好,决定系数 R^2 为0.91, RMSE为14.21~25.44 mm, b 为0.82~1.23, d 为0.97~0.98。以上结果说明,参数校验后的模型可以较好地模拟试验区内夏玉米生育期内蒸腾量的变化过程,同时也可表明稳定碳同位素技术在分析干旱区夏玉米腾发量的有效性。

通过2016年和2017年夏玉米实测蒸散量与模拟值之间的对比和验证表明:双作物系数法可以比较准确地模拟新疆阿克苏地区夏玉米生育期内作物蒸散量和蒸腾量,在该地区具有一定的适用性。

2.3 夏玉米蒸散变化

如表5所示,综合5个处理的实测结果表明,2016年和2017年双作物系数法在快速生长期和生长后期均低估了 ET ,在生长中期高估了 ET 。夏玉米生长中期的耗水量最大,约占全生育期的40%左右,其次是快速生长期,其耗水量约占全生育期的35%左右。

表5 夏玉米各生长阶段 ET 实测值和模拟值对比 Tab. 5 Comparison of observed and simulated ET for maize at each growth stage												mm
年份	生育阶段	W1		W2		W3		W4		W5		
		实测值	估算值	实测值	估算值	实测值	估算值	实测值	估算值	实测值	估算值	
2016	初期	60.00	69.35	58.00	63.66	63.00	58.92	56.00	62.20	55.00	58.92	
	快速生长期	165.50	142.96	149.16	130.03	150.79	118.02	135.62	124.92	132.31	119.42	
	中期	183.35	219.17	176.37	199.18	151.95	179.22	167.81	188.93	129.61	179.22	
	后期	58.40	31.22	50.53	28.88	39.87	25.52	40.81	26.92	67.62	25.50	
	全生育期	467.25	462.69	434.05	421.76	405.62	381.68	400.25	402.97	384.54	383.05	
2017	初期	69.52	70.01	62.57	67.09	55.71	63.01	56.00	68.48	65.61	63.00	
	快速生长期	129.55	132.52	145.98	131.20	146.12	120.54	133.61	123.67	116.58	120.49	
	中期	176.18	174.90	152.38	174.81	119.67	159.13	140.53	159.47	140.09	159.47	
	后期	14.33	13.27	8.25	13.21	8.93	12.04	11.10	12.14	6.75	12.05	
	全生育期	389.58	390.71	369.17	386.31	330.43	354.72	346.12	363.75	329.03	355.02	

2.4 夏玉米蒸散区分

图4为夏玉米生育期 ET 、 T 和 E 变化情况(以W1处理为例)。可以看出,在两个生长季,估算 ET 均有较为相似的变化趋势。在作物生长初期, ET 均

相对较小,随着作物的生长逐渐变大,在作物生长中期增长至较高水平,在后期逐渐减小。在2个生长季估算 T 的变化趋势与 ET 的变化趋势较为一致,在初期均较小,在发育期呈增长趋势,至中期达到最大,在后

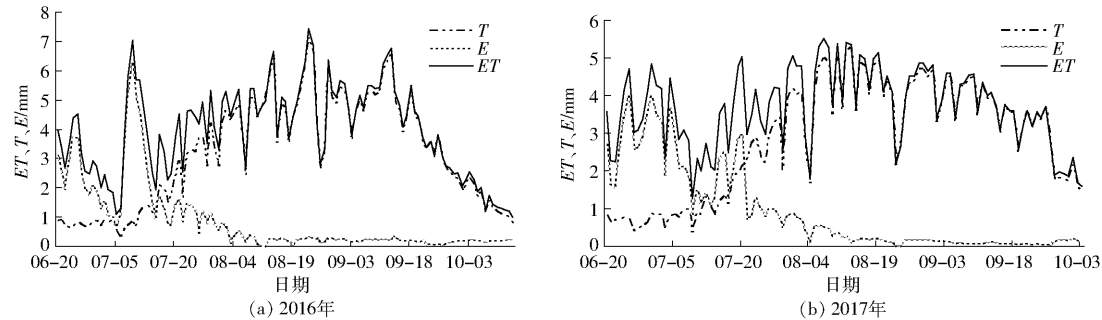


图4 夏玉米生育期 ET、T 和 E 变化
Fig. 4 Seasonal variations of evapotranspiration, evaporation and transpiration during summer maize growing seasons

期呈现降低趋势。然而 E 的变化规律与 T 相比呈相反的变化趋势,即在初期的变幅较大,随着作物的生长,至中期后逐渐变小,后期较中期的变化趋势不大。

运用双作物系数可以分别推求出棵间蒸发量 (E) 和叶面蒸腾量 (T),从而可以计算出作物生育期内叶面蒸腾占作物蒸散量比例 (T/ET) 和棵间蒸发占蒸散量比例 (E/ET),见表 6(由于篇幅有限,本文以处理 W1 为例)。2016—2017 年夏玉米各个生

育阶段 E 和 T 的变化趋势一致。在作物生长初期, T 较小,随着作物的生长,叶面积指数变大, T 随之变大,至中期达到最大值,在后期呈下降趋势。而 E 和 T 的变化趋势正好相反,在初期 E 最大,随着作物的生长,植株覆盖地表程度逐渐变大,至中期覆盖度达 100% 时, E 达最小值。2016—2017 年,整个生育期内 T/ET 分别为 78.67% 和 76.03%, E/ET 分别为 21.33% 和 23.97%。

表 6 夏玉米各生育阶段 T 、 E 、 T/ET 及 E/ET 变化
Tab.6 Changes of T , E , T/ET and E/ET of summer maize in different growth periods

生育阶段	2016 年				2017 年			
	T/mm	E/mm	$T/ET/\%$	$E/ET/\%$	T/mm	E/mm	$T/ET/\%$	$E/ET/\%$
初期	15.35	54.00	22.13	77.87	15.00	55.01	21.43	78.57
快速生长期	109.36	33.59	76.50	23.50	99.15	33.36	74.82	25.18
中期	210.97	8.19	96.26	3.74	170.64	4.26	97.56	2.44
后期	28.31	2.91	90.69	9.31	12.25	1.02	92.29	7.71
全生育期	364.00	98.69	78.67	21.33	297.04	93.66	76.03	23.97

3 结论

(1) 双作物系数法能够较为准确估算夏玉米各生育期 ET ,综合 5 个处理,2016 年和 2017 年 RMSE 均在 10 mm 左右;回归系数 b 均约为 1;一致性指数 d 分别在 0.98 ~ 0.99 和 0.86 ~ 1 范围内,与实测值

均较为一致。
(2) 运用双作物系数法可以较为准确地区分夏玉米 ET ,覆膜条件下,2016 年和 2017 年全生育期内估算土壤蒸发量分别占 ET 的 21.33% 和 23.97%;估算作物蒸腾量分别占 ET 的 78.67% 和 76.03%。

参 考 文 献

1 XU C Y, SINGH V P. Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. Journal of Hydrology, 2005, 308: 105 – 121.

2 张宝忠,许迪,刘钰,等. 多尺度蒸散发估测与时空尺度拓展方法研究进展[J]. 农业工程学报,2015,31(6):8 – 16.

ZHANG Baozhong, XU Di, LIU Yu, et al. Review of multi-scale evapotranspiration estimation and spatio-temporal scale expansion [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 8 – 16. (in Chinese)

3 ALLEN R G, PEREIRAL L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 1998.

4 ZHANG Baozhong, LIU Yu, XU Di, et al. The dual crop coefficient approach to estimate and partitioning evapotranspiration of the winter wheat-summer maize crop sequence in North China Plain[J]. Irrigation Science, 2013, 31(6): 1303 – 1316.

5 樊引琴,蔡焕杰. 单作物系数法和双作物系数法计算作物需水量的比较研究[J]. 水利学报,2002,33(3):50 – 54.

FAN Yinqin, CAI Huanjie. Comparison of crop water requirements computed by single crop coefficient approach and dual crop coefficient approach[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(3): 50 – 54. (in Chinese)

6 冯禹,崔宁博,龚道枝,等. 基于叶面积指数改进双作物系数法估算旱作玉米蒸散[J]. 农业工程学报,2016,32(9):90 – 98.

FENG Yu, CUI Ningbo, GONG Daozhi, et al. Estimating rainfed spring maize evapotranspiration using modified dual crop coefficient approach based on leaf area index[J]. Transactions of the CSAE,2016,32(9):90 – 98. (in Chinese)

7 全国栋,刘洪禄,李法虎,等. 双作物系数法计算华北地区桃树蒸散量的可靠性评价[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6): 154 – 162. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160620&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.020.

TONG Guodong, LIU Honglu, LI Fahu, et al. Reliability evaluation of dual crop coefficient approach on evapotranspiration calculation of peach tree in North China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(6): 154 – 162. (in Chinese)

8 宿梅双,李久生,饶敏杰. 基于称重式蒸渗仪的喷灌条件下冬小麦和糯玉米作物系数估算方法[J]. 农业工程学报,2005, 21(8):25 – 29.

SU Meishuang, LI Jiusheng, RAO Minjie. Estimation of crop coefficients for sprinkler-irrigated winter wheat and sweetcorn using a weighing lysimeter[J]. Transactions of the CSAE,2005,21(8): 25 – 29. (in Chinese)

- 9 李毅,付亚亚,唐德秀,等. 砂石覆盖条件下冬小麦蒸散量的单、双作物系数法估算[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(3): 261–270. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180331&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.03.031.
- LI Yi, FU Yaya, TANG Dexiu, et al. Estimation of evapotranspiration of winter wheat based on single and dual crop coefficient approaches under sand-gravel mulching conditions[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018, 49(3):261–270. (in Chinese)
- 10 FARQUHAR G D, EHLERINGER J R, HUBICK K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology,1989,40(1): 503–537.
- 11 FARQUHAR G D, O'LEARY M H, BERRY J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves[J]. Australian Journal of Plant Physiology,1982,9(2):121–137.
- 12 YAN C R, HAN X G, CHEN L Z. Water use efficiency of six woody species in relation to micro-environmental factors of different habitats[J]. Acta Ecologica Sinica,2001,21(11):1952–1956.
- 13 ANYIA A O, SLASKI J J, NYACHIRO J M, et al. Relationship of carbon isotope discrimination to water use efficiency and productivity of barley under field and greenhouse conditions[J]. Journal of Agronomy and Crop Science,2007,193(5): 313–323.
- 14 CHEN J, CHANG S X, ANYI A O. The physiology and stability of leaf carbon isotope discrimination as a measure of water-use efficiency in barley on the Canadian prairies[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2011,197(1):1–11.
- 15 陈平,孟平,张劲松,等. 华北低丘山区2种林药复合模式的水分利用[J]. 东北林业大学学报,2014,42(8):52–56,78.
- CHEN Ping, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al. Water use of intercropping system of tree and two herbal medicine in the low hilly area of north china[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014,42(8):52–56,78. (in Chinese)
- 16 何春霞,孟平,张劲松,等. 基于稳定碳同位素技术的华北低丘山区核桃-小麦复合系统种间水分利用研究[J]. 生态学报, 2012,32(7):2047–2055.
- HE Chunxia, MENG Ping, ZHANG Jinsong, et al. Water use of walnut-wheat intercropping system based on stable carbon isotope technique in the low hilly area of North China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7):2047–2055. (in Chinese)
- 17 梁文清. 冬小麦、夏玉米蒸发蒸腾及作物系数的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2012.
- LIANG Wenqing. Study on measuring crop evapotranspiration and crop coefficients changes for winter wheat and maize[D]. Yangling:Northwest A&F University,2012. (in Chinese)
- 18 SMITH D M, ALLEN S J. Measurement of sap flow in plant stems[J]. Journal of Experimental Botany,1996,47(12):1833–1844.
- 19 KÖSTNER B, GRANIER A, CERMÁK J. Sap flow measurements in forest stands: methods and uncertainties[J]. Annual Forest Science,1998,55(1–2): 13–27.
- 20 WULLSCHLEGER S D, MEINZER F C, VERTESSY R A, et al. A review of whole-plant water use studies in trees[J]. Tree Physiology,1998,18(8–9):499–512.
- 21 LU P, URBAN L, ZHAO P. Granier's thermal dissipation probe(TDP) method for measuring sap flow in trees: theory and practice[J]. Acta Botanica Sinica, 2004,46(6):631–646.
- 22 FARQUHAR G D, RICHARDS R A. Isotopic composition of plant carbon correlates with water-use efficiency of wheat genotypes [J]. Australian Journal of Plant Physiology,1984,11(6):539–552.
- 23 于婵,朝伦巴根,高瑞忠,等. 作物需水量模拟计算结果有效性检验[J]. 农业工程学报,2009,25(12):13–21.
- YU Chan, Chaolunbagen, GAO Ruizhong, et al. Validity examination of simulated results of crop water requirements[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(12):13–21. (in Chinese)