文章编号:1000-7601(2018)02-0063-08

科尔沁沙地青贮玉米蒸散量的估算与分析

马鹏飞,刘廷玺,段利民,王 丹,祁秀娇

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:为准确估算科尔沁沙地青贮玉米实际蒸散量的变化规律,选用 ASCE Penman – Monteith(ASCE – PM)模型计算参考作物蒸散发(ET₀);利用双作物系数模型模拟土壤含水率与对应实测值进行统计分析,根据均方根误差、一致性指数、平均绝对误差和 Nash – Sutcliffe 效率指数 4 个指标以及回归系数和决定性系数对双作物系数模型进行率定和验证,然后模拟青贮玉米的作物系数,与 ASCE – PM 模型结合后模拟青贮玉米的蒸散发、棵间土壤蒸发和作物蒸腾规律,并分析其影响因素。结果表明:双作物系数模型准确地模拟土壤含水率和棵间土壤蒸发的变化过程,率定各阶段基础作物系数为 0.25、0.9 和 0.5。棵间土壤蒸发先由播种时峰值下降到较低水平,于收割前有所回升;蒸腾速率除刚出苗和收割前呈单峰变化外大部分时段呈双峰变化,日内变化规律大体为中午高,早晚低,自出苗之日起生长中期后半段处于较高水平,之后逐渐减弱。青贮玉米蒸散量与太阳辐射线性关系最为显著(R = 0.643),与气温、空气湿度和风速的相关性依次次之。ASCE – PM 模型空气动力项 5 d 尺度贡献率为 27.94% ~ 77.66%,且随风速同增减。综上所述,ASCE – PM 模型结合双作物系数可较好估算科尔沁沙地青贮玉米的实际蒸散量,以及棵间土壤蒸发和作物蒸腾量。

关键词: *ET*₀ 计算模型; 双作物系数模型; 作物系数; 棵间土壤蒸发; 作物蒸腾; 空气动力项 中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A

Estimate and analysis of silage maize evapotranspiration in Horqin Sandy Land

MA Peng-fei, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, WANG Dan, QI Xiu-jiao

(Inner Mongolia Agricultural University Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Water Resource Protection and Utilization Key Laboratory, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: This study aimed to accurately estimate the evapotranspiration of silage maize in Horqin sandy land. In this paper, ASCE Penman – Monteith (ASCE – PM) models was used to estimate the reference evapotranspiration (ET_0) , and we compared the simulated soil moisture content by SIMdual _ K_e model and the corresponding measured values. The root-mean-square-error (*RMSE*), consistency index (*d*), average absolute error (*AAE*), Nash-Sutcliffe efficiency index(*E*) were chosen as three evaluation indicators combining the regression coefficient (*b*) and the decisive coefficient (*R*²) to rate and verify SIMdual _ K_e model, and then simulated silage maize crop factor crop, simulating e-vapotranspiration figure maize, soil evaporation and crop transpiration combined with ASCE – PM model and analyzed their influencing factors. The results illustrated that SIMdual _ K_e model accurately simulated the soil water content and the soil evaporation change, and the basic crop coefficients were 0.25, 0.9 and 0.5 respectively at each stage. During the growing season, the soil evaporation decreased from the peak value to the lower level before sowing, and recovered before harvest; the transpiration rate was bimodal at most of the time except for emergence and harvest, and the law of daily variation was generally high and low at noon. Transpiration rate from the date of emergence to the second half of the growing medium term was in a high level, then gradually weakened. The linear relationship between the actual evapotranspiration of silage maize and the solar radiation was significant (*R* = 0.643), the correlation with the actual evapotranspiration.

基金项目:国家自然科学基金重点国际(地区)合作研究、重点与面上项目(51620105003,51139002,51479086,51369016);内蒙古水利科 技项目;教育部创新团队发展计划(IRT13069);科技部重点领域创新团队(2005RA4013);内蒙古自治区草原英才产业创新创 业人才团队、内蒙古农业大学寒旱区水资源利用创新团队(NDTD2010-6)

作者简介:马鹏飞(1990一),男,河北秦皇岛人,硕士研究生,主要进行干旱区蒸散发研究。E-mail:739057003@qq.com。

通信作者:刘廷玺(1966—),男,内蒙古赤峰人,教授,博士,研究方向为干旱区生态水文。E-mail: txliu1966@163.com。

收稿日期:2016-11-18 修回日期:2017-03-26

ration of silage maize was from high to low, followed by temperature, air humidity and wind speed. The contribution rate of aerodynamics 5 d scale of ASCE – PM model was 27.94% ~ 77.66%, and the contribution rate of model aerodynamic items increased and decreased with wind speed. In conclusion, the ASCE – PM model combined with the double-crop coefficient could estimate the actual evapotranspiration of silage maize and the soil evaporation and silage maize transpiration in Horqin sandy.

Keywords: ET_0 calculation model; SIMdual _ K_c model; crop coefficient; soil evaporation; crop transpiration; aerodynamic term

蒸散发量(简称蒸散量)为植物蒸腾量和土壤蒸 发量之和^[1],是水文循环的重要组成部分^[2],也是制 定农业灌溉制度和研究水文过程的重要依据,准确 地估算蒸散量对于区域水资源管理和农业水资源高 效利用具有重大意义[3]。估算蒸散量的方法有很 $\mathscr{S}^{[4-7]}$,关键在于参考作物蒸散量(*ET*₀)的计算。 由于蒸散量是经由土壤一植物一大气连续体(SPAC 系统)的动态水分传输过程,导致蒸散量是水文循环 中最难估算的。1979年联合国粮农组织(FAO)提出 了修正 Penman 公式^[8],在国内得到广泛的应用。 1998年,FAO明确了"参考作物蒸散发(ET₀)"的概 念,即"高 0.12 m、综合表面阻力为 70 s·m⁻¹、反射 率为0.23的一种假想参考作物的蒸散速率,可以近 似代表高度一致、生长良好、水分充足、完全覆盖地 面的大面积绿草的蒸散量"^[9],且在56号文件给出 了具体的 FAO - 56 Penman - Monteith 计算公式,且 得到广泛的应用。2005年美国工程协会在FAO-56 Penman – Monteith 公式的基础上,综合考虑作物高度 变化的影响,提出 ASCE Penman - Monteith 公式,且 在陕西关中地区^[10]和黑河流域中游取得很好的效 果[11]。

针对玉米实际蒸散量估算,很多学者通过遥感 反演的方法,分析大田玉米的蒸散发规律,如王敏政 等[12]在河北省保定进行了相关研究;也有很多学者 利用大型蒸渗仪来直接测量,经修正后可得玉米实 际蒸散量,如杨光超等^[13]在河北省怀来县进行了相 关研究:一些学者通过涡度相关系统,分析了田间尺 度玉米蒸散量的变化规律,如张淑杰等[14]在辽宁锦 州地区开展了相关研究:少数学者借助大孔径闪烁 仪,并结合涡度相关系统分析了暖温带半湿润季风 气候区夏玉米蒸散量的变化特征,如杨凡等^[15]在河 北省栾城进行了相关研究。近些年来出现了很多利 用模型来模拟作物蒸散规律的研究,如赵丽雯等^[16] 通过 Shuttleworth - Wallace 模型估算了绿洲农田玉 米生长季的实际蒸散量;赵娜娜^[17]等率定了双作物 系数模型,并分析了夏玉米棵间土壤蒸发和作物蒸 腾规律;蔡锡镇等^[18]通过 SWAT 模型与遥感相结合

的方法模拟了水文流域的蒸散发量,并取得了良好的效果;在与本文相似的浑善达克沙地,刘艳伟等^[19]通过双作物系数模型和 SWAT 模型共同模拟 天然植被的蒸散发量,均取得了良好的模拟效果。

本文以科尔沁沙地青贮玉米为研究对象,采用 ASCE Penman – Monteith 模型计算 *ET*₀,然后通过土 壤含水率模拟值与实测值对比率定了双作物系数模 型,从而得出土壤蒸发系数和作物蒸散系数,与 *ET*₀ 结合后可实现棵间土壤蒸发和青贮玉米蒸腾的模 拟,重点分析棵间土壤蒸发和青贮玉米蒸腾的变化 规律及其影响因素,对荒漠化日趋严重的科尔沁沙 地青贮玉米蒸散量的计算和生态保护政策的制定具 有重大意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与试验设计

本文选择位于科尔沁沙地东南缘的阿古拉生态 水文试验区域为研究区,行政区隶属内蒙古通辽市 科尔沁左翼后旗阿古拉镇,地理坐标为122°33′00″~ 122°41′00″E,43°18′48″~43°21′24″N,面积55 km²。研 究区为典型的半干旱荒漠化地区,流动、固定沙丘和 草甸、农田与小型湖泡相间分布。区内南北沙丘主 要有小叶锦鸡儿等灌木沙生植被,差巴嘎蒿等半灌 木沙生植被,中间毗邻湖泡的低缓草甸地上分布着 一年或多年生牧草,二者之间的过渡带分布着玉米、 青贮玉米等农作物。研究区属典型的温带大陆性季 风气候,雨热同期,常年多风干燥,多年平均降水量 389 mm, 且主要集中在 6-9 月, 占年降水量的 69.3%;Φ20 cm 蒸发皿多年平均蒸发量 1 412 mm, 目主要集中在 5—9 月,占年蒸发量的 79.0%;平均 相对湿度介于40%~90%之间,多年平均日照时数 2 931.5 h_o

为开展区域内青贮玉米蒸散量的专项研究,在 研究区装有一套气象站(Campbell),可获得2.0 m与 3.5 m处风速、2 m处空气温湿度、太阳净辐射和降 雨量的测量数据;地下埋有CS655 土壤探头,可实现 土壤水分、电导率与温度的观测,埋设梯度为10

表 1 ASCE – PM 模型中 C_n 和 C_d 取值

量筒。气象站各探头和雨量筒将数据的采集间隔设 置为 10 min, 30 min 和 daily。试验点种植青贮玉米, 于 2015 年 5 月 23 日播种、8 月 30 日收割。7 月 27 日雨后进行施肥(尿素),生长期内无明显虫害,且无 灌溉。采集土样进行颗分试验,确定其土质为沙壤 土。自6月3日开始,选取长势具有代表性的10m ×10m样方,在样方选取具有代表性的两株青贮玉 米,利用 Li-6400 光合作用仪对选定的两株青贮玉 米上、中、下三个部位的叶片进行测试(前期矮小时 只测上下两个部位),每个叶片测量3次,可获得叶 片尺度的净光合速率、蒸腾速率、胞间 CO2 浓度等生 理指标,测试的时间间隔为12d,测试时段为4:30-17:30,每个小时测量一次;同时测量选定测试株的 叶片个数及其面积;并在样方内再选定5棵代表样 株,测定玉米的高度、叶面积等生态指标。在生长期 内利用直径 10 cm、高 20 cm 的两组小型蒸发器对土 壤蒸发进行观测,每组由纱布封底和塑料布封底的 小型蒸发器各一个,大雨后更换新土实施新一轮观 测,雨后1d、2d、3d直至下次降雨的早晚进行连续 观测,选用0.01g精度的天平对土样进行称重。

cm、20 cm、40 cm 和 80 cm; 2.5 m 架设一个自记式雨

1.2 ASCE Penman – Monteith(ASCE – PM)模型

美国工程师协会成立了参考作物蒸发蒸腾量标 准委员会,该委员会对目前应用比较广泛的 Penman (1948)、Modified – Penman、Penman – Monteith、FAO – 56 Penman – Monteith 等模型进行了全面系统研究, 广泛的比较了这些参考作物蒸散发模型的性能,包 括选择标准的公式参照了 Allen 等人研究结 果^[10,20]。经过了大量反复实验,结果表明:标准 AS-CE – PM 模型误差最小^[21]。2005 年美国工程师协 会将 ASCE – PM 模型作为美国最新研究计算 *ET*₀ 的标准公式,其优点为将作物分为高草(大于 0.5 m)和矮草(小于 0.5 m)以及白天和黑夜分开来计 算。针对青贮玉米作物高度变化剧烈特点,本文选 用 ASCE – PM 模型计算 *ET*₀,其计算公式为:

$$ET_{0} = \frac{0.408\Delta(R_{n} - G) + \gamma \frac{C_{n}}{T + 273}U_{2}(e_{s} - e_{a})}{\Delta + \gamma(1 + C_{d}U_{2})}$$
(1)

式中: ET_0 为参考作物蒸散量, mm · d⁻¹; R_n 为净辐射, MJ · m⁻² · d⁻¹; G 为土壤热通量, MJ · m⁻² · d⁻¹; T 为空气温度, \mathbb{C} ; u_2 为高度 2 m 处风速, m · s⁻¹; Δ 为 蒸汽压曲线斜率, kPa · \mathbb{C}^{-1} ; γ 为湿度常数, kPa · \mathbb{C}^{-1} , C_n 和 C_d 为计算系数, 其值与作物冠层类型、计 算步长和计算时段有关, 见表 1。

Table 1	C. and	C_{\perp} values	in the	ASCE -	PM model

项目 Project		<0.5 m 植被 Vegetation		>0.5 m植被 Vegetation		
		C_n	C_d	C_n	C_d	
计算步长 Calculate the step size	月或日 Month or day	900	0.34	1600	0.38	
	小时(白天) Hour(daytime)	37	0.24	66	0.25	
	小时(夜晚) Hour(night)	37	0.96	66	1.70	

1.3 双作物系数模型

双作物系数模型(SIMdual _ K_e)是依据 FAO – 56 双作物系数法^[9]来模拟作物水分运移规律的模型。双作物系数法中的作物系数是实际蒸散量和参考蒸散量的比值,它综合反映了各种环境因素和作物对蒸散量的影响,包括空气动力学阻力、表面阻力、作物品种、作物长势、栽培技术等。双作物系数法将作物系数分离为作物蒸腾系数和土壤蒸发系数两个部分,用以表征农田棵间土壤蒸发量和作物蒸腾量占农田实际蒸散量的比例。本文采用 FAO – 56 双作物系数法进行计算,数学表达式为:

$$ET_c = K_c ET_0 \tag{2}$$

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \tag{3}$$

式中, *ET*_e 为农田实际蒸散量; *ET*₀ 为参考作物蒸散 量, 通过 ASCE – PM 模型来估算; *K*_{eb} 为基础作物系 数, 表征作物蒸腾的影响程度; *K*_e 为土壤蒸发系数, 表征土壤蒸发的影响程度; *K*_s 为水分胁迫系数, 反 映根区土壤含水率不足时对作物蒸腾的影响。

基础作物系数 K_{cb}分为生长初期、生长中期和 生长末期三个生长阶段,分别记为 K_{cbini}、K_{cb midi}和 K_{cb end},可根据 FAO – 56^[9]、赵丽雯等^[11]给定的计算 方法并结合前人相近试验成果确定初始值,最终应 由双作物系数模型模拟的土壤含水量、土壤蒸发率 与相应实测值达最优拟合加以率定。

1.4 统计参数

本文利用 ASCE - PM 模型计算科尔沁沙地的 ET₀,然后利用双作物系数模型模拟出土壤含水率 与实测值进行统计分析,采用相对均方差(RMSE)、 一致性指数(d)、平均绝对误差(AAE)和 Nash - Sutcliffe 效率指数(E)4个统计量(见下面公式)以及回 归分析中回归系数(b)和决定性系数(R²)率定双作 物系数模型。

$$RMSE = \left(\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} (P_i - Q_i)^2\right)^{\frac{1}{2}}$$
(4)

$$d = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} [|P_i - Q_{ave}| + |Q_i - Q_{ave}|]^2}\right) (5)$$

$$AAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |P_i - Q_i|$$
 (6)

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (O_i - O_{ave})^2}$$
(7)

式中,N为观测次数; Q_i 为第i个实测值; P_i 为第i个 模拟值; Q_{aue} 为 Q_i 平均实测值($i = 1,2,3,\dots,N$); P_{aue} 为 P_i 平均模拟值($i = 1,2,3,\dots,N$)。

2 结果与分析

2.1 双作物系数模型率定

双作物系数法模型为概念性参数,具有一定的物理 基础。可通过土壤数据、气象数据、作物数据和降雨 灌溉数据对农田作物进行耗水量的模拟,并且实现 了颗间土壤蒸发量和作物蒸腾量的剥离。试验样地 青贮玉米种植间距为 40 cm × 30 cm, 且整个生长期 内无灌溉。根据作物生长过程中地面覆盖程度和叶 面积指数的变化情况,将其生长期分为生长初期(5 月23日-6月11日)、快速生长期(6月12日-7月 21日)、生长中期(7月22日-8月20日)和生长末 期(8月21日—8月30日)四个生长阶段[9]。根据 试验样地青贮玉米生长初期、生长中期和生长末期 的生理生态指标,并参照赵娜娜等^[17,22]对北京大兴 区夏玉米、吴尧等^[23]对本研究区玉米农田的作物系 数研究,确定 K_{cbini} 、 K_{cbini} 和 K_{cbend} 的初始值分别为 0.3、1.15和0.6,利用 SIMdualKc 模型^[17,22-23],反复 调整各生长阶段的作物系数和其它参数,使模型模 拟的土壤含水率与实测值达到最优拟合,见图 1。 经参数率定后基础作物系数以及模拟土壤含水率和 实测值之间的统计参数见表 2。



图 1 土壤含水率模拟与实测之间对比

Fig.1 Comparison between simulated and observed soil water content

表 2 经率定的基础作物系数以及土壤含水率模拟值和实测值之间的统计量

```
Table 2 Determined K_{cb} and the statistical parameters between simulated \theta_v and measured \theta_v
```

作物生长阶段 Crop growth stage			_		统计参数	Statistics para	meters	
初期 K _{cbini} Early growth	中期 K _{cbmid} Medium-term growth	末期 K _{cbend} The end of growth	b	R^2	RMSE	d	E	AAE
0.25	0.9	0.5	1.020	0.915	0.020	0.975	0.891	0.015

由图 1 及表 2 可以看出,双作物系数模型模拟 的土壤含水率与实测值之间拟合度较高,回归系数 达 1.02,决定系数为 0.87,可知模型模拟值与实测 值线性关系极为显著。就误差而言,均方根误差仅 为 0.02,平均绝对误差 AAE 仅为 0.15,误差很小,均 在合理范围内;模型的一致性和有效性分别为0.975 和 0.891,均接近于 1,说明双作物系数模型准确地 预测了土壤含水率,同时也说明了模型在该地区可 取得较好的模拟效果,因此模型模拟出的实际作物 蒸散量、棵间土壤蒸发量和作物蒸腾量以及各种作物 系数是可信的。模型模拟的作物系数如图2所示。

2.2 蒸散发量的估算与分析

应用双作物系数模型可以较好地模拟土壤含水量的变化规律,同时也有效的将蒸散发量(*ET_c*)剥离为棵间土壤蒸发量和作物蒸腾量两个部分,本文就两部分分别进行分析。

2.2.1 棵间土壤蒸发对模型的验证效果 根据参数统计结果(表3),就相关性而言,青贮玉米棵间土 壤蒸发的实测值和模拟值之间的回归系数 b 为 1.009,决定系数 R²为0.925,二者相关性显著;就准

67

确性而言,均方根误差 RMSE 为 0.213,平均绝对误 差为 0.173,模型的模拟误差在可接受的范围之内; 就一致性和有效性而言,其值分别为 0.987 和 0.929,基本接近于 1,说明给模型比较准确地预测 了棵间土壤蒸发。通过验证表明双作物系数模型在 本试验区具有一定的适用性。



图 2 模型生长期内作物系数

Fig.2 Crop coefficients of four models during growth period

2.2.2 棵间土壤蒸发量的对比与分析 ASCE – PM 模型经双作物系数模型模拟的土壤蒸发系数 K_e 折 算后反映棵间土壤蒸发量的变化规律如图 3 所示。

由图3可看出,棵间土壤蒸发变化总体上为:播种前 后,棵间土壤蒸发处于生长季的最高水平,随着作物 的生长波动降低至较低水平,收割前几天有所升高。 青贮玉米生长初期,棵间土壤蒸发量较大,是因为播 种前进行了翻地和除草,试验样地无植被覆盖,表层 土壤松散而孔隙率较高,加之播种前10天内共降雨 73.6 mm,致使土壤含水率持续较高水平,因此棵间 土壤蒸发量均处于较高水平。进入快速生长期,棵 间土壤蒸发量波动减小,造成这种现象的原因可能 是前期盖度小,随青贮玉米增高、盖度增大而棵间土 壤蒸发量减小。青贮玉米进入生长中期后,盖度逐 渐达到最大,蒸散量以作物蒸腾量为主,棵间土壤蒸 发量持续处于较低水平。青贮玉米的生长末期开始 后,棵间土壤蒸发量开始增加,这是由于8月14日 至8月22日期间有8天均发生降雨,总降雨量达 49.3 mm, 土壤含水量处在田间持水率水平附近, 导 致降雨过后连续4天棵间土壤蒸发持续增大;8月 26日-29日之间降雨 16.8 mm,使土壤含水率持续 处于较高水平,因此棵间土壤蒸发量持续增加。



Table 3 The statistical parameters between simulated and observed soil evaporation







2.2.3 作物蒸腾量的对比与分析 基于科尔沁沙 地青贮玉米生长期短的特点,2015年青贮玉米出苗 后利用 Li-6400光合作用仪进行了 8 次蒸腾作用 的测试,其中6月份3次(6月3日、6月17日和6月 30日)、7月份2次(7月8日和7月19日)和8月份 3次(8月1日、8月13日和8月25日),其变化情况 见图4。叶片蒸腾速率整体上随着气温和太阳辐射 增强而增大,且于 10:00—14:00达到一天中的峰 值,14:00后随着光热强度的下降而减小。

各测试日由于田间气象和土壤水分的不同而具 有不同的变化规律。6月3日是个典型的晴天,蒸 腾速率大且峰值较高,呈单峰变化。6月17日、6月 30日、7月8日、7月19日、8月1日和8月13日的 蒸腾速率均呈双峰变化,除8月1日和8月13日外 其它测试日第二峰值高于第一峰值,出现明显的"午 休现象",其原因是青贮玉米为了防止高温致使水分 过度流失,叶片的气孔的闭合度较高。8月1日蒸腾速率的第二峰值远小于第一峰值,是因为13:20—15:10出现较厚云层的遮挡,短波辐射由47.13 MJ·m⁻²·d⁻¹下降到11.28 MJ·m⁻²·d⁻¹,且温度下降,15:10以后云层消失而短波辐射增大至26.07 MJ·m⁻²·d⁻¹;8月13日的第二峰值于第一峰值相当,可能因为测试时刻选取不恰当,并且14:30 左右出现薄云。8月25日出现为典型晴天,蒸腾速率呈光滑单峰变化,由于光热条件下降,整体的蒸腾速率小于其他测试日。就青贮玉米叶片平均蒸腾速率而言(见表4),除7月19日和8月1日因天气因素影响

外,自出苗之日起直至生长中期结束均处于较高水 平,于生长中期后半段到最大值,之后逐渐减弱。

鉴于青贮玉米叶片实测蒸腾速率与模拟田间整体蒸腾速率之间尺度因素和单位因素,仅对二者进行了相关性分析,决定系数 R² 见表 4。可以看出 8 个试验日决定性系数均在 0.5 以上,线性关系显著, 其中 8 月 1 日由于天气原因相关性最低,8 月 25 日 由于连续的降雨,造成了青贮玉米环境因子发生较 大的变化,因而相关性较低;6 月 30 日上午晴朗多 云是造成相关性降低的主要原因。





Fig.4 Diurnal variation of transpiration rate in silage maize growing season

表 4 测试日叶片平均蒸腾速率以及作物蒸腾模拟值与实测值的对比

Table 4 The average transpiration rate of leaves on the test day and comparison of measured and simulated values of crop transpiration

叶片蒸腾速率/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹) Leaf transpiration rate	06 - 03	06 - 17	06 - 30	07 – 08	07 – 19	08 – 01	08 – 13	08 – 25
	3.11	2.97	3.09	3.52	2.10	1.73	4.40	1.55
决定系数 R ² Coefficient of determination	0.609	0.948	0.569	0.795	0.883	0.523	0.737	0.595

2.3 青贮玉米蒸散量与气象条件

太阳净辐射、日平均气温、空气湿度和风速是影 响青贮玉米蒸散量的主要因素,而降雨通过影响这 4个因素间接地影响青贮玉米蒸散量。为了分析各 气象因子对青贮玉米蒸散量的影响程度,利用双作 物系数模型模拟的青贮玉米蒸散量与主要气象因子 进行线性拟合,太阳净辐射、日平均气温、空气湿度 和风速与模拟蒸散量值的相关系数分别为 0.604、 0.572、0.501和0.235。由此可见,生长季内太阳净 辐射与青贮玉米蒸散量相关性最为显著,因此,太阳 净辐射是影响青贮玉米蒸散量的主要因素,同时也 说明了太阳辐射能量是驱动 SPAC 系统中植物水分 向大气运动的主要驱动力。气温与太阳辐射有密切 的联系,同一天内气温和太阳辐射大体上变化趋势 相同,但存在一定滞后性,太阳辐射最强的时段气温 逐渐升高,而夜晚在没有太阳辐射的条件下气温也 逐渐降低到一天中的最低值,因此蒸散量与气温的

相关性仅次于太阳辐射,其值为 0.572。由 ASCE – PM 模型结构可知,空气湿度对蒸散发有抑制作用, 空气湿度增高造成水汽压差减小,而水汽压差是决 定水分气化难易程度重要因素之一,炎热干旱地区 的蒸散量远远大于潮湿高温地区就是这个原因,因 此空气湿度与青贮玉米蒸散量的相关系数值为 0.501。风速决定着汽化后的水蒸汽能否快速远离 其汽化界面,从而降低土壤表面或叶面处的空气湿 度,本文风速与蒸散量的相关性相对较低。

本文采用的 ASCE - PM 模型属于综合法,模型 全面的考虑了空气动力项和辐射项的贡献,由于青 贮玉米的生长期仅为 100 d,采用月或旬尺度规律不 明显,故本文采用 5 d 尺度的平均值进行分析研究。 模型空气动力学项所占青贮玉米蒸散量的贡献率如 图 5 所示。我们可根据空气动力项的贡献率的变化 情况,也可得到辐射项的贡献率的变化情况。结果 显示 ASCE - PM 模型空气动力项贡献率为 27.94% ~77.66%。同时在风速较大的前 10 d,各模型空气 动力项的贡献率为生长期内最大,在青贮玉米收割 前的 5~10 d,ASCE - PM 模型的贡献率为整个生育 期内的最小值,此时辐射项贡献率达最大值。空气 动力项贡献率随风速同增同减。从总体上看生长季 的前半段空气动力项的贡献率较高,随着作物生长 辐射项逐渐成为蒸散量的主要贡献项。



图 5 生长季内空气动力学项贡献率



3 讨 论

国内已有很多利用双作物系数模型模拟蒸散量 的研究,如赵娜娜等^[24]对北京大兴区冬小麦进行了 研究,指出模拟土壤含水率与实测值非常接近,这与 本文土壤含水率模拟效果好有一定的相似之处;而 在西北干旱区黑河流域中游农田玉米蒸散发研究 中,赵丽雯等发现 P – M 和 ASCE – PM 模型与双作 物模型结合后较好的估算了玉米日蒸散发量^[11];王 子申等^[25]通过双作物系数模型研究了西北干旱区 小麦蒸散发及棵间土壤蒸发规律,取得了很好的效 果,以上都印证了模型的适用性和估算方法的可行 性。

针对小型蒸发器测定土壤蒸发数据校验模型的 研究屡见不鲜,阳勇等^[26]利用小型蒸发器评价了 P -M、Priestley - Taylor 和 Hargreaves - Samani 模型在 草地的适用性,取得了较好的效果;赵娜娜等^[17]利 用小型蒸发器与双作物系数模型相结合的方法,校 验了双作物系数模型,并取得较好的效果,与本研究 相似;赵丽雯等^[16]利用小型蒸发器检验了蒸散发模 型,取得较好的效果。就作物蒸腾而言,赵风华 等^[27]在山东禹城平原区和夏桂敏等^[28]在辽宁平原 区都得出玉米蒸腾速率呈明显单峰变化的结论,而 王淑庆等^[29]在黄土高原中南部和郭映等^[30]在黄土 高原丘陵沟壑区的研究均发现玉米的蒸腾速率均呈 现双峰变化;这些与本文青贮玉米刚出苗和收割前 呈单峰变化而生长季的大部分时间呈双峰规律的结 果均有一些差别。并且很多学者确定的作物蒸腾测 试时段为8:00—18:00,而本文8:00之前日出后仪 器测试出作物蒸腾速率较大,可能是因为叶片上露 珠较多,叶片表面水分蒸发影响了测试结果,对此有 待进一步研究。

很多学者已对 SPAC 系统的驱动力进行了相关 的研究^[31],大多数学者都得出太阳辐射为主要驱动 力。孙菽芬^[32]在对 SPAC 综合系统的研究中发现, 水循环过程和能量平衡过程均起因于太阳辐射能 量,与本文结论相同。蒸散发是多种气象因子综合 作用的结果,不同时期的影响因子有所不同。唐霞 等^[33]针对科尔沁沙地玉米的研究表明,光合有效辐 射是玉米液流变化的最主要影响因子,与本文的研 究结果相近;刘昌明和张丹^[34]在分析了全国蒸散发 的影响因子,指出蒸散量受太阳辐射和最高温度影 响显著,与本文结论均有一致性。

4 结 论

本文以科尔沁沙地青贮玉米为研究对象,选用 ASCE – PM 模型计算 *ET*₀;利用双作物系数模型模 拟土壤含水率与对应实测值进行统计分析,根据统 计指标对模型进行率定和验证,然后模拟青贮玉米 的作物系数,与 ASCE – PM 模型结合后模拟青贮玉 米的蒸散发量、棵间土壤蒸发量和作物蒸腾量规律, 并分析其影响因素,得出以下几点结论:

1) 双作物系数模型可以较为准确地模拟科尔 沁沙地青贮玉米的土壤含水率和棵间土壤蒸发量的 变化过程,且率定出青贮玉米的 K_{cbini}、K_{cb midi}和 K_{cb end}值分别为 0.25、0.90 和 0.50。

2) 生长季内棵间土壤蒸发量由初期峰值下降 到较低水平并持续到生长末期,直到收割前5-10 天有所回升。青贮玉米蒸腾速率刚出苗和收割前呈 单峰变化而生长季的大部分时间呈双峰规律,第二 峰值高于第一峰值;日内蒸腾速率变化规律为整体 上随着气温和太阳辐射增强而增大,且于10:00—14 :00 达到一天中的峰值,14:00 后随着光热强度的下 降而减小。蒸腾速率自出苗之日起直至生长中期结 束均处于较高水平,于生长中期后半段到最大值,之 后逐渐减弱。

3) 青贮玉米实际蒸散量与太阳辐射线性关系 最为显著(*R*=0.643),说明太阳辐射是驱动 SPAC 系统的主要驱动力;与气温、空气湿度和风速的相关 性依次次之。ASCE – PM 模型空气动力项 5 d 尺度 贡献率为 27.94% ~ 77.66%,从总体上看生长季的 前半段空气动力项的贡献率较高,随着作物生长辐 射项逐渐成为主要的贡献项,并且随风速同增同减。 综上所述, ASCE - PM 模型结合双作物系数可 较好估算科尔沁沙地玉米的蒸散量, 以及棵间土壤 蒸发和玉米蒸腾量。

参考文献:

- [1] 魏光辉,杨鹏年.新疆焉耆盆地 ET₀ 计算方法的适用性评价
 [J].干旱地区农业研究,2015,(6):46-51.
- [2] 汤鹏程,何 蒙,苗 澍,等.不同 ET₀ 计算方法在内蒙古东部 地区适用性比较[J].干旱地区农业研究,2016,34(1):38-43.
- [3] 樊 军,邵明安,王全九.黄土区参考作物蒸散量多种计算方法的比较研究[J].农业工程学报,2008,24(3):98-102.
- [4] 张俊鹏,孙景生,刘祖贵,等.不同麦秸覆盖量对夏玉米田棵间
 土壤蒸发和地温的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):
 95-100.
- [5] 杜加强,熊珊珊,刘成程,等.黄河上游地区几种参考作物蒸散
 量计算方法的适用性比较[J].干旱区地理,2013,36(5):831-840.
- [6] 屈艳萍,康绍忠,王素芬,等.液流一株间微型蒸渗仪法测定新 疆杨蒸发蒸腾量适用性分析[J].干旱地区农业研究,2014,32 (3):88-94.
- [7] 贾 悦,崔宁博,魏新平,等.基于反距离权重法的长江流域参考作物蒸散量算法适用性评价[J].农业工程学报,2016,32
 (6):130-138.
- [8] Frere M, Popov G F. Agrometerological crop monitoring and forecasting. FAO Plant Production and Protection Paper 17[R]. Roma: Food and Agriculture Organization of United Nation (FAO), 1979.
- [9] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage paper 56[R]. Rome: Food and Agriculture Organization of United Nation (FAO), 1998.
- [10] Allen R G, WilliamO, Pruitt, et al. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETO by the FAO 56 Penman – Monteithmethod[J]. Agricultural Water Management, 2006,81(1):1-22.
- [11] 赵丽雯,吉喜斌.基于 FAO 56 双作物系数法估算农田作物 蒸腾和土壤蒸发研究——以西北干旱区黑河流域中游绿洲农 田为例[J].中国农业科学,2010,43(19):4016-4026.
- [12] 王敏政,周广胜.基于地面遥感信息与气温的夏玉米土壤水分 估算方法[J].应用生态学报,2016,27(6):1804-1810.
- [13] 杨光超,朱忠礼,谭 磊,等.怀来地区蒸渗仪测定玉米田蒸散 发分析[J].高原气象,2015,34(4):1095-1106.
- [14] 张淑杰,周广胜,李荣平.基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟[J].应用气象学报,2015,26(6):695-704.
- [15] 杨 凡,齐永青,张玉翠,等.大孔径闪烁仪与涡度相关系统对 灌溉农田蒸散量的对比观测[J].中国生态农业学报,2011,19 (5):1067-1071.
- [16] 赵丽雯,赵文智,吉喜斌.西北黑河中游荒漠绿洲农田作物蒸

腾与土壤蒸发区分及作物耗水规律[J].生态学报,2015,35 (4):1114-1123.

- [17] 赵娜娜,刘 钰,蔡甲冰,等.夏玉米棵间蒸发的田间试验与模 拟[J].农业工程学报,2012,28(21):66-73.
- [18] 蔡锡填,徐宗学,苏保林,等.区域蒸散发分布式模拟及其遥感 验证[J].农业工程学报,2009,25(10):154-160,365.
- [19] 刘艳伟,朱仲元,乌 云,等.浑善达克沙地天然植被蒸散量两种计算方法的比较[J].农业机械学报,2010,41(11):84-88.
- [20] Allen RG, Walter IA, Elliott R, et al. Requirements and challenges in selecting and specifying astandardized ET equation [C]//4th Decennial National Irrigation Symposium, American Society of Agricultural Engineers, 2000:201-208.
- [21] Walter I A, Allen R G, Elliott R, et al. ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation[R]. ASCE – EWRI Task Committee Report, 2005.
- [22] Nana Zhao, Yui Liu, Jiabing Cai, et al. Dual crop coefficient modelling applied to the winter wheatorprojectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapo soil evaporation component [J]. Agricultural Water Management, 2013, 117:93-105.
- [23] Yao Wu, Tingxi Liu, Paula P, et al. Water use by a groundwater dependent maize in a semi-arid region ofInner Mongolia: Evapotranspiration partitioning and capillary rise[J]. Agricultural Water Management, 2015, 152:222-232.
- [24] 赵娜娜,刘 钰,蔡甲冰,等.双作物系数模型 SIMDual_Kc 的 验证及应用[J].农业工程学报,2011,27(2):89-95.
- [25] 王子申,蔡焕杰,虞连玉,等.基于 SIMDualKc 模型估算西北旱 区冬小麦蒸散量及土壤蒸发量[J].农业工程学报,2016,32 (5):126-136.
- [26] 阳 勇,陈仁升,宋耀选,等.黑河上游山区草地蒸散发观测与 估算[J].应用生态学报,2013,24(4):1055-1062.
- [27] 赵风华,王秋凤,王建林,等.小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变 化耦合机理[J].生态学报,2011,31(24):7526-7532.
- [28] 夏桂敏,郑丽丽,孙仕军,等.免耕玉米环境因子对叶片光合-蒸腾日变化的影响研究[J].灌溉排水学报,2013,32(3):79-82.
- [29] 王淑庆,张岁岐,王小林.黄土塬区不同栽培模式下玉米蒸腾 耗水规律的研究[J].中国生态农业学报,2013,21(4):432-439.
- [30] 郭 映,董 阳,党慧慧,等.基于不同时间尺度玉米蒸散蒸腾 量及其影响因素[J].资源科学,2014,36(7):1501-1508.
- [31] 寿文凯,胡飞龙,阿拉木萨,等.基于 SPAC 系统干旱区水分循 环和水分来源研究方法综述[J].生态学杂志,2013,32(8): 2194-2202.
- [32] 孙菽芬.土壤 植被 大气统一体内水分循环和能量交换 ——SPAC 模型[J].力学进展,1984,14(1):1-10.
- [33] 唐 震,崔建垣,赵学勇,等.科尔沁沙地玉米叶面蒸腾与棵间 蒸发特性[J].草业科学,2011,28(5):788-792.
- [34]刘昌明,张 丹.中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分 析[J].地理学报,2011,66(5):579-588.