

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. 应用气象学报, 2015, 26(6): 695-704.

doi:10.11898/1001-7313.20150606

基于涡度相关的春玉米逐日作物系数及蒸散模拟

张淑杰¹⁾ 周广胜^{2)*} 李荣平¹⁾

¹⁾(中国气象局沈阳大气环境研究所,沈阳 110166) ²⁾(中国气象科学研究院,北京 100081)

摘 要

作物系数是计算作物蒸散量的关键参数。利用 2006—2008 年和 2011 年辽宁锦州玉米农田生态系统的涡度相关、气象、作物发育期及叶面积指数观测数据,分析不受水分胁迫条件下玉米逐日作物系数特征及其与叶面积指数的关系。研究表明:作物系数与玉米农田实际蒸散均呈单峰型变化,约在 7 月末至 8 月初达到最大值(玉米开花吐丝期)。在此基础上,建立了不受水分胁迫条件下玉米逐日作物系数与叶面积指数关系(达到 0.01 显著性水平),同时,采用积温表示的标准化生育期方法模拟相对叶面积指数,并建立了逐日作物系数与相对叶面积指数关系(达到 0.01 显著性水平),解决了无叶面积观测地区玉米逐日实际蒸散量的计算。研究结果可为玉米农田用水管理以及灌溉措施的制定提供参考。

关键词: 春玉米; 逐日作物系数; 涡度相关法

引 言

玉米是东北地区的主栽作物之一,种植面积较大,约占粮食作物面积的 1/3。近年来,由于作物种植结构调整,玉米播种面积和产量均呈逐年增加趋势,播种面积基本维持在 $500 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 以上,玉米总产量占粮食总产量的 50% 以上^[1]。受气候变化的影响,东北地区气候暖干化趋势显著^[2-4],干旱灾害频繁发生,特别是 2014 年干旱席卷东北大部分地区,且发生在玉米产量形成关键期,给玉米生产造成了严重影响。

农田实际蒸散量是水分平衡的重要组成部分,占农业用水的 90% 以上^[5-6],是确定农业用水管理和灌溉制度的基础^[7-9]。如何准确模拟实际生产所需的蒸散量是目前的研究热点^[10-14]。作物实际蒸散量模拟需要了解作物的生长发育特征和生育阶段,所处的大气环境条件及管理措施。目前,作物实际蒸散量能够通过直接和间接方法求取,直接方法指通过蒸渗仪或涡度相关方法测量得到作物实际蒸散

量的方法,该方法价格昂贵,不便于普及应用;间接方法指通过参考作物蒸散量和作物系数模拟得到作物实际蒸散量^[15-16],该方法便于实际操作。

作物系数指实际蒸散量与参考蒸散量的比值,是联合国粮农组织(FAO)^[17]推荐的标准化计算方法,反映作物本身的生物学特性、产量水平、土壤水肥状况以及管理水平等的影响。确定作物系数的方法包括单作物系数方法和双作物系数方法。单作物系数方法综合考虑了作物蒸腾和土壤蒸发的影响,双作物系数方法是将作物蒸腾和土壤蒸发分开考虑。作物系数随着作物生育进程、覆盖度、高度和叶面积指数的变化而变化,FAO 将作物生育进程分为 4 个阶段:初始生长期、快速生长期、生育中期和生育后期^[17]。在作物生长早期,作物系数随着作物冠层覆盖的增加而增加;当冠层覆盖达到最大时,作物系数也达到最大值,然后下降^[18]。到目前为止,已建立多种作物的作物系数^[19-20]。在这些研究中,普遍采用 FAO 提出的方法分段模拟作物系数,且均通过田间试验方法确定,耗费了大量的人力物力,很难在实际生产中应用。目前,单作物系数方法被广

2015-03-05 收到, 2015-06-26 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(41330531), 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(20151AE-CMA05)

* 通信作者, email: gszhou@cams.cma.gov.cn

泛用于作物需水量模拟^[21]。Shahrokhnia 等^[22]认为,单作物系数方法能更好地模拟逐日作物系数的变化。现有研究大多是按玉米4个生育阶段进行作物蒸散模拟,实际上作物系数处于动态变化中,有必要建立日尺度的作物系数动态模拟模型,以准确模拟作物的实际蒸散动态。

本研究拟利用辽宁锦州玉米农田生态系统2006—2008年和2011年的生长季涡度相关观测数据、大田作物发育期、叶面积观测数据,确定没有水分限制条件下的玉米逐日作物系数,实现玉米逐日实际蒸散的动态模拟。

1 观测及方法

1.1 观测

观测点位于中国气象局沈阳大气环境研究所锦州农田生态系统野外观测站(41°8′53″N,121°12′6″E,海拔为23 m)。该地区属温带季风性气候,年平均气温为9℃,最冷月1月平均气温为-8℃,最暖月7月平均气温为24.4℃。年平均降水量为690 mm,70%发生在夏季(6—8月)。表层土壤为棕壤,pH值为6.3,土壤有机质含量为0.6~0.9%^[23]。种植作物为玉米,生长季为每年的5月初至9月末,不进行灌溉,播种前实行条翻,每年施氮肥300 kg/hm²,播种前一次性施到农田中。站内建有3.5 m高的涡度相关观测系统和5 m高的气象梯度观测系统,前者配有三维超声风速仪(CSAT3, Campbell Scientific Ltd, USA)和快速响应红外CO₂/H₂O分析仪(Li-7500, Li Cor Inc, USA);后者可观测2.5 m和4 m高处的气温、湿度和风速,4 m高处的光合有效辐射(Li190SB, LI-COR, Inc.),3.5 m高处的净辐射,5,10,15,20,40 cm和80 cm深处的土壤温度(Model HFT01SC, Campbell Scientific Inc.)以及8 cm深处的地表热通量^[23-24]。

2006,2007,2008年和2011年玉米5个生育期(三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期),在锦州农田生态系统野外观测站玉米样地随机选取3个取样点,每个取样点选取3个1 m×1 m样方测定玉米密度,同时选取1~2株玉米标准株,利用直尺量取每一株标准株玉米全部叶片的长和宽,利用式(1)计算玉米叶面积指数(I_{LA})^[25]:

$$I_{LA} = 0.75\rho \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n L_{i,j} W_{i,j}}{m}. \quad (1)$$

式(1)中,0.75为玉米叶面积的校正系数, ρ 为植株密度, m 为测量株数, n 为第*i*株的叶片数, $L_{i,j}$ 和 $W_{i,j}$ 分别为第*i*株玉米、第*j*片叶片的长度和最大宽度。

2006,2007,2008年和2011年4—10月每旬逢8日用土钻法观测土壤湿度,观测深度为1 m,观测间隔为10 cm。其中,2006,2007,2008年数据用于建模,2011年数据用于验证所建模型。

1.2 涡相关数据处理

本研究主要利用4个生长季(分别为2006,2007,2008年和2011年玉米出苗到成熟)的逐日数据。使用EdiRe软件(<http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>)对玉米农田生态系统潜热(L_E)的10 Hz原始数据进行坐标旋转、WPL校正和异常值剔除,具体剔除标准:①剔除同期有降水数据,②设置通量的阈值为[-3, 3]mg CO₂ m⁻²·s⁻¹,剔除明显的异常数据,③剔除低于临界摩擦风速(0.15 m·s⁻¹)时的夜间潜热通量数据^[26]。由于传感器损坏、电力不足、雨天、仪器维护标定等原因,4个生长季缺失数据分别为14.2%,0.5%,1.6%和13.6%,对于缺失的数据不进行插补。基于涡度相关观测的春玉米农田生态系统潜热通量与玉米农田生态系统的实际蒸散关系如下:

$$L_E = \lambda E_T. \quad (2)$$

式(2)中, L_E 为潜热通量(单位:W·m⁻²), E_T 为实际蒸散量(单位:mm), λ 为蒸发潜热(单位:kg·m⁻²·s⁻¹)。

1.3 作物系数计算

本研究采用单作物系数方法模拟日作物实际蒸散量的变化。春玉米逐日作物系数(K_c)可表示如下:

$$K_c = E_T/E_{T_0}. \quad (3)$$

式(3)中, E_T 为日作物实际蒸散量, E_{T_0} 为日参考蒸散量, E_{T_0} 采用Penman-Monteith方法计算。

$$E_{T_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + r(1 + 0.34 U_2)}, \quad (4)$$

式(4)中, R_n 为冠层表面获取的太阳净辐射(单位: MJ·m⁻²·d⁻¹), G 为土壤热通量(单位: MJ·m⁻²·

d^{-1}), e_a 为饱和水汽压(单位: kPa), e_d 为实际水汽压(单位: kPa), Δ 为饱和水汽压-温度曲线斜率(单位: $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), γ 为干湿球常数(单位: $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$), U_2 为 2 m 高处的风速(单位: $m \cdot s^{-1}$), T 为平均气温(单位: $^\circ C$)。

1.4 相对叶面积指数动态模拟

作物系数受土壤、气候、作物生长状况和管理方式等诸多因素影响,与作物叶面积指数关系密切。随着叶面积指数的增加而增加,当叶面积指数达到最大以后,保持一段相对稳定的时间,其后随着植株蒸腾力减小,作物系数也随之下降。为模拟叶面积指数的变化规律,消除玉米品种、播种期和耕作措施对叶面积指数的影响,采用相对叶面积指数描述叶面积指数动态:

$$I_{RLAi} = I_{LAi} / I_{LAmax} \quad (5)$$

式(5)中, I_{RLAi} 为出苗后第 i 日的相对叶面积指数, I_{LAi} 为出苗后第 i 日的叶面积指数, I_{LAmax} 为玉米吐丝时叶面积指数。

春玉米相对叶面积指数动态可采用修正 Logistic 方程模拟^[25]:

$$I_{RLAi} = a / (1 + \exp(b + c \times t_i + d \times t_i^2)) \quad (6)$$

式(6)中, I_{RLAi} 为相对叶面积指数, t_i 为出苗后各阶段内大于等于 $10^\circ C$ 的有效积温标准化生育期, a, b, c 和 d 均为参数。

以叶面积指数达到最大为转折点将春玉米出苗至成熟的整个生育期划分为两个阶段,设叶面积指数最大(吐丝)时为 1,成熟时为 2,分别将各阶段内大于等于 $10^\circ C$ 的有效积温进行归一化处理,得到标准化的生育期:

$$t_i = \begin{cases} \frac{\sum_{j=1}^i \Delta t_j}{\sum_{j=1}^{i_{max}} \Delta t_j}, & i \leq i_{max}; \\ 1 + \frac{\sum_{j=i_{max}}^i \Delta t_j}{\sum_{j=i_{max}}^{i_{end}} \Delta t_j}, & i > i_{max}. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, t_i 为出苗后第 i 日的标准化生育期,第 1 阶段 t_i 范围为 $[0, 1)$,第 2 阶段的 t_i 范围为 $[1, 2)$; i_{max} 为叶面积指数达到最大时的日数, i_{end} 为成熟期日数, Δt_j 为大于等于 $10^\circ C$ 有效温度。计算公式如

下:

$$\Delta t_j = \begin{cases} T_j - 10, & T_j \geq 10; \\ 0, & T_j < 10. \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中, T_j 为日平均气温。由于锦州日平均气温极少出现 $30^\circ C$ 以上高温,因此,未进行无效高温订正。

1.5 蒸散模拟精度验证

在评价模型拟合效果时,除决定系数 (R^2) 外,还参考均方根误差和一致性指数 d ,

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_{Ti} - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_{Ti} - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)} \quad (9)$$

式(9)中, n 为观测样本量, E_{Ti} 和 O_i 分别为 E_T 的模拟值和观测值, \bar{O} 为观测值的平均值。 R^2 越高,均方根误差越低(接近 0), d 越接近 1, E_{Ti} 和 O_i 过原点的直线回归斜率越接近 1,模型的模拟结果越优。

2 结果分析

2.1 玉米农田生态系统蒸散的动态特征

图 1 给出了锦州玉米农田生态系统实际蒸散量 (E_T) 和参考蒸散量 (E_{T0}) 之间的比较。 E_T 是通过涡度相关系统观测获得, E_{T0} 利用气象观测数据基于式(4)计算得到。由 2007 年和 2008 年测得的玉米农田生态系统实际蒸散量看,农田实际蒸散量呈单峰型变化,在 7 月末至 8 月初达到最大值。参考蒸散量呈波动性变化。对 4—9 月而言,实际蒸散量占参考蒸散量的 47% 左右。

2.2 玉米农田生态系统作物系数的变化

利用式(2)~式(4)可计算得到玉米农田生态系统的逐日作物系数。图 2 给出了 2007 年锦州春玉米农田生态系统逐日作物系统 K_c 的变化。 K_c 呈单峰型变化,日间变化较大。 K_c 从出苗后开始增加,在玉米抽雄前达到 1,当玉米生长达到群体叶面积最大时,大约在 7 月末至 8 月初达到最大值,随后开始减小。2007 年锦州玉米农田生态系统逐日作物系统 K_c 在 0.12(出苗,5 月)到 1.8(开花后,8 月初)之间波动。其中, K_c 在 7 月至 8 月上旬波动较大,主要是由于降水的出现所致,说明降水后作物及土壤表面较湿,蒸发量较大。

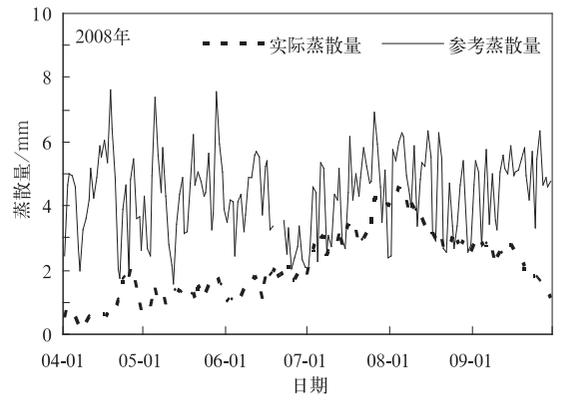
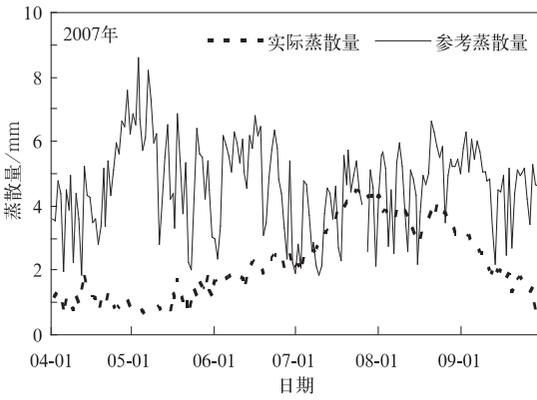


图1 4—9月玉米农田生态系统实际蒸散量(E_T)和参考蒸散量(E_{T0})的比较

Fig. 1 Comparison between maize actual evapotranspiration(E_T) and reference evapotranspiration(E_{T0}) from Apr to Sep in Jinzhou maize agricultural ecosystem

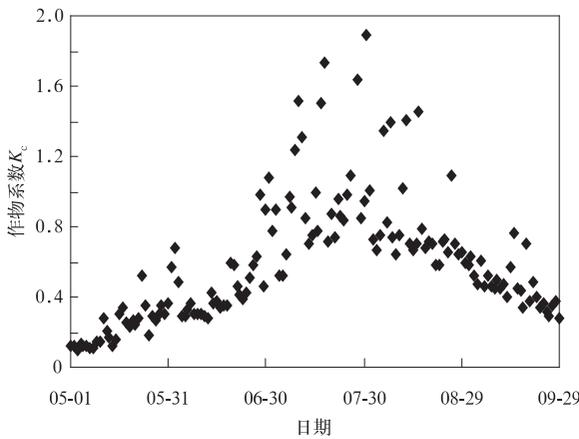


图2 2007年锦州玉米农田生态系统作物系数
Fig. 2 Daily crop coefficient of Jinzhou maize agricultural ecosystem in 2007

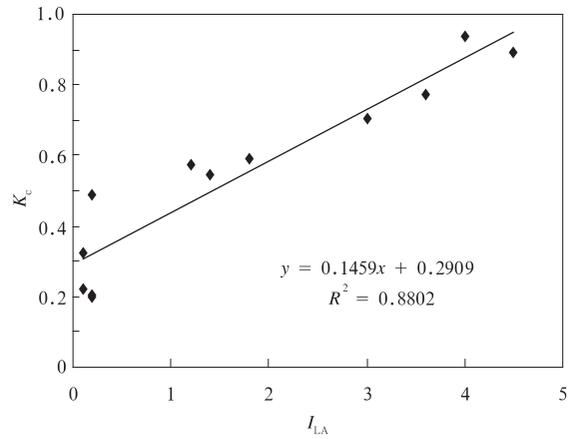


图3 叶面积指数(I_{LA})与作物系数(K_c)的关系
Fig. 3 Relationship between crop coefficient (K_c) and leaf area index(I_{LA})

2.3 玉米农田生态系统作物系数模拟与验证

东北地区春玉米一般在5月上旬出苗,此后蒸散才真正受到玉米影响。因此,本研究只考虑玉米出苗到成熟期间的作物系数。作物系数为作物正常生长时的实际蒸散量与参考蒸散量的比值,指农田水分能够充分满足作物生育的需求,因此,选取土壤水分供应充足的样本进行分析和建模(即土壤水分大于75%的土壤持水量)。

图3给出了作物系数 K_c 与叶面积指数 I_{LA} 的关系。作物系数与叶面积指数呈线性关系,复相关系数为0.88(达到0.01显著性水平)。针对没有叶面积观测地区的作物系数计算,分析相对叶面积指数与 K_c 的关系,以消除品种、气象条件、土壤和管理水平等的影响。本研究相对叶面积指数模型的建立与麻雪艳等^[25]的研究方法及资料相同,因此,直

接引用所建立的相对叶面积指数模型式(6),其中, $a=0.999, b=5.216, c=-13.831, d=5.528$ 。

图4给出了作物系数 K_c 与相对叶面积指数的关系。作物系数与相对叶面积指数呈三次曲线关系,复相关系数为0.933(达到0.01显著性水平),

$K_c = e + f \times I_{RLA} + g \times I_{RLA}^2 + h \times I_{RLA}^3$ 。(10)
式(10)中, e, f, g 和 h 为拟合参数,分别为0.219, 1.36, -4.119, 3.907。将式(10)和式(3)联合即可计算玉米农田生态系统的日实际蒸散量:

$$E_T = E_{T0} \times (e + f \times I_{RLA} + g \times I_{RLA}^2 + h \times I_{RLA}^3) \quad (11)$$

I_{RLA} 可通过式(6)计算得到。这样即使没有叶面积观测资料,也可通过出苗后的逐日温度资料计算得到玉米田的实际蒸散量。

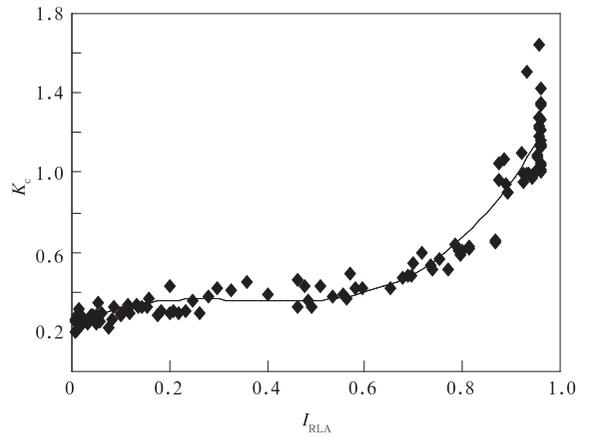
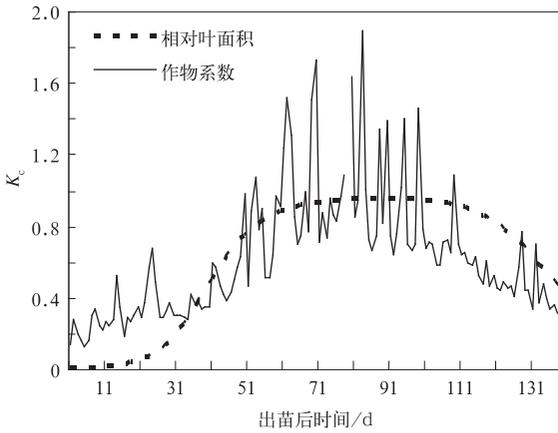


图 4 作物系数(K_c)与相对叶面积指数(I_{RLA})的关系

Fig. 4 Relationship between crop coefficient(K_c) and relative leaf area index(I_{RLA})

利用 2006—2008 年土壤水分供应充足(即土壤水分大于 75% 的土壤持水量)的相关数据对锦州玉米农田的作物系数及蒸散数据进行拟合验证。结果表明,式(10)和式(11)能够很好地模拟锦州玉米农田生态系统作物系数及蒸散的季节动态(图 5, 图

6), 模拟值与观测值之间的相关性决定系数分别为 0.934 和 0.883, 二者过原点线性回归斜率分别为 0.934 和 1.043, 均方根误差分别为 $0.09 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.37 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 一致性指数 d 分别为 0.99 和 0.95。

由目前关于玉米作物系数(表1)结果可知,即

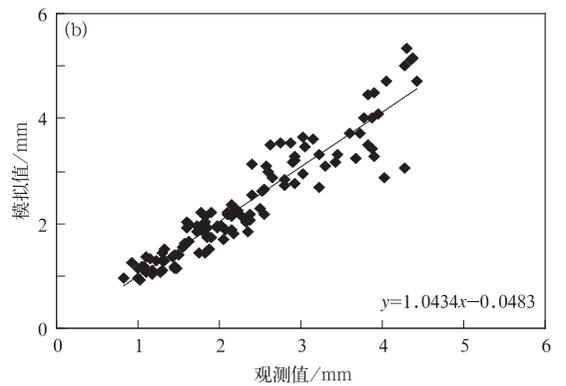
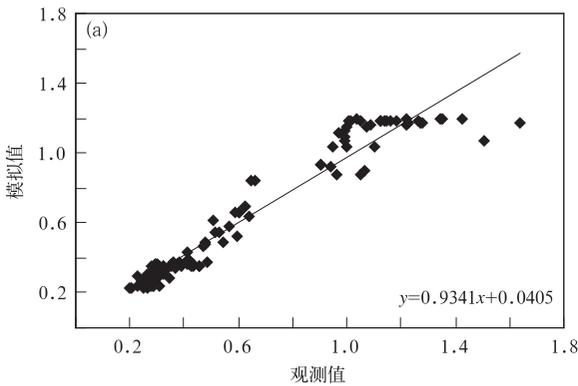


图 5 模型模拟值与观测值的比较 (a)作物系数,(b)实际蒸散量

Fig. 5 Comparison between simulated and observed values (a)crop coefficient,(b)actual evapotranspiration

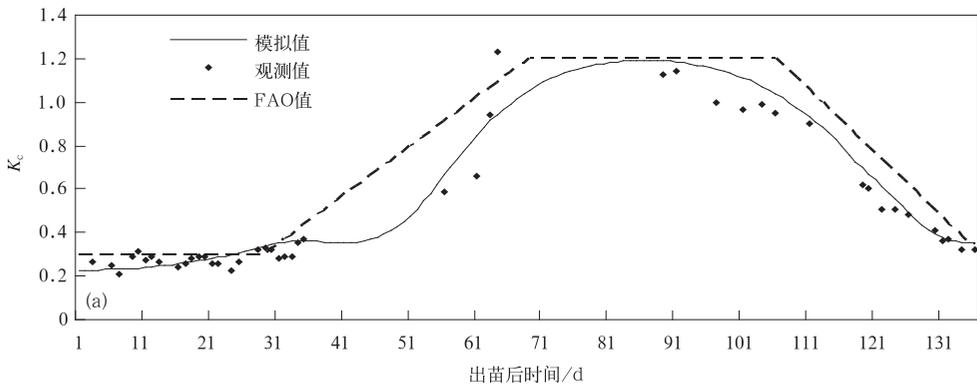
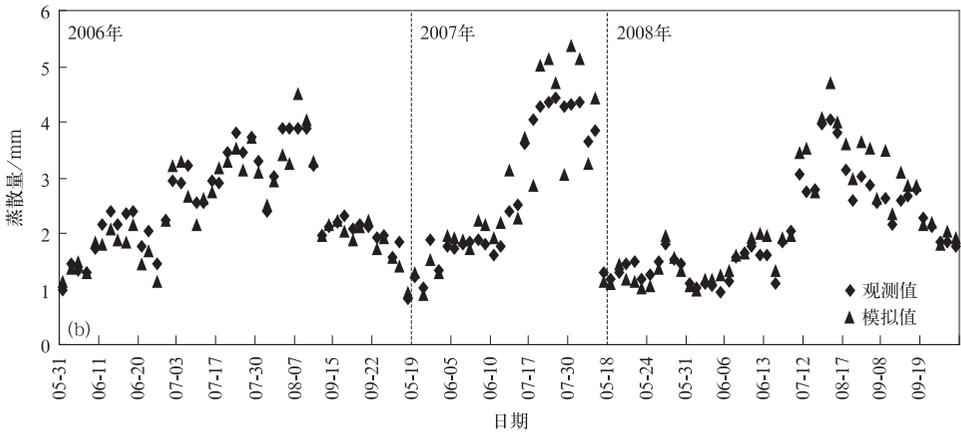


图 6 模型模拟值与观测值逐日变化 (a)2008 年作物系数,(b)实际蒸散量

Fig. 6 Daily changes of simulated and observed values (a)crop coefficient in 2008,(b)actual evapotranspiration



续图 6

使是同一地区,由于研究方法不同得到的作物系数不同,不同地区采取同样的方法得到的结论也不相同。因此,为提高作物实际蒸散量模拟精度,不同地区需要针对当地实际情况对作物系数进行修订。本研究中,玉米生长初期、发展期、中期和后期作物系数分别为 0.26,0.55,1.14 和 0.63,与 FAO 的推荐

值和陈凤等^[27]的研究结论基本一致。

利用 2011 年土壤水分供应充足(即土壤水分大于 75% 的土壤持水量)的相关数据对锦州玉米农田的作物系数及蒸散数据进行拟合验证。结果表明:该模型能够很好地模拟 2011 年锦州玉米农田生态系统作物系数及蒸散的季节动态(图7,图8),模拟

表 1 模拟作物系数 K_c 与 FAO 推荐值及目前研究成果比较

Table 1 Comparison of calculated K_c in present study with those values from FAO and other researches

出处	玉米生育阶段				地区	E_T 和 E_{T0} 观测及计算方法(E_T/E_{T0})
	初期	发展期	中期	后期		
本文	0.26	0.55	1.14	0.63	中国东北	EC/PM
文献[28]	0.05	0.51	1.13	0.64	意大利波河河谷	EC/PM
文献[29]	0.59	1.24	1.38	1.17	中国北部	Lys/Lys
文献[30]	0.90	0.95	1.25	1.00	中国华北	Lys/Lys
文献[31]	0.45	1.04	1.43	0.45	中国西北	Lys/PM
文献[32]	0.42		1.45	1.3	中国华北	Lys/PM
文献[27]	0.25		1.25	0.65	中国西北	Lys/PM
文献[33]	0.61	0.85~1.00	1.02	1.07	中国西北	Lys/PM
文献[34]	0.37	0.79	1.10	0.90	美国德克萨斯州	Lys/Lys
文献[17]	0.30		1.20	0.35~0.60		

注:EC为涡度相关法,Lys为蒸渗仪法,PM为FAO Penman-Monteith法。

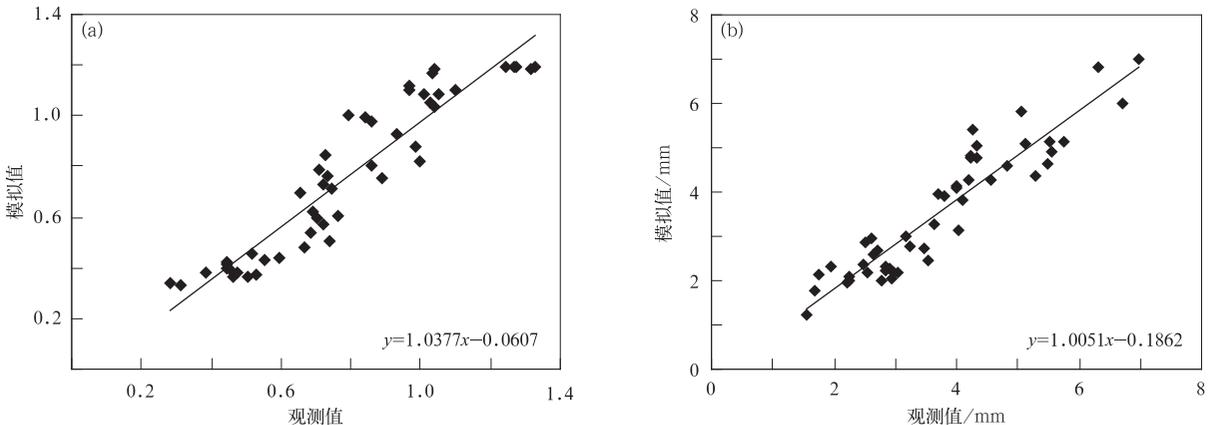


图 7 2011 年模型模拟值与观测值比较 (a)作物系数,(b)实际蒸散量

Fig. 7 Comparison between simulated and observed values in 2011 (a)crop coefficient,(b)actual evapotranspiration

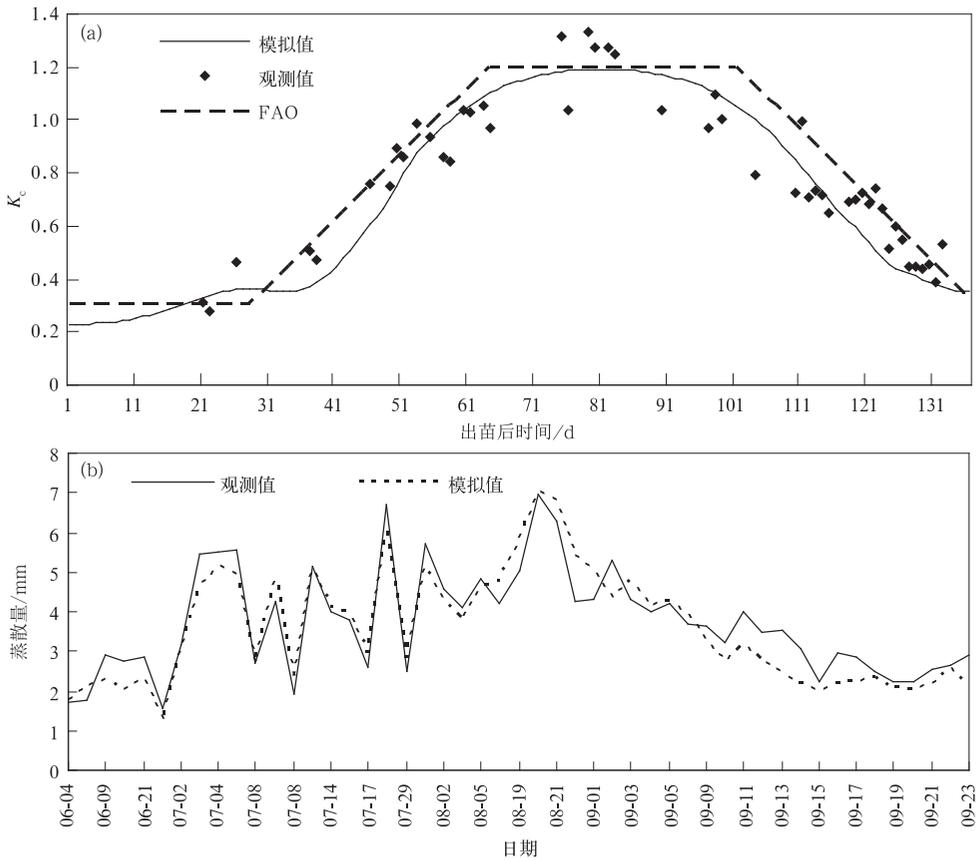


图 8 2011 年模拟值与观测值逐日变化 (a)作物系数,(b)实际蒸散量

Fig. 8 Daily changes of simulated and observed values in 2011 (a)crop coefficient,(b)actual evapotranspiration

值与观测值之间的决定系数分别为 0.876 和 0.869,二者过原点线性回归斜率分别为 1.037 和 1.005,均方根误差分别为 0.11 和 0.54 $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$,一致性指数 d 分别为 0.98 和 0.88。

3 结论和讨论

本研究利用 2006—2008 年和 2011 年锦州玉米农田生态系统的涡度相关、气象、作物发育期及叶面积指数观测数据,分析了不受水分胁迫条件下玉米逐日作物系数特征及其与叶面积指数的关系。主要结论如下:

1) 涡度相关观测数据显示,玉米农田实际蒸散量呈单峰型波动性变化,初期小于后期,于 7 月末至 8 月初达到最大值,4—9 月农田实际蒸散量占参考蒸散量的 47%。

2) 作物系数 K_c 值随时间变化规律与实际蒸散量相同。本研究利用连续 3 年的涡度相关数据及人工观测的玉米叶面积指数和土壤湿度数据,在土壤

水分供应充足(即土壤水分大于 75% 的土壤持水量)条件下修正了 FAO 提出的玉米作物系数,将分段模拟扩展到日尺度模拟。

3) 作物系数受土壤、气候、作物生长状况和管理方式等诸多因素影响,作物系数与叶面积指数的变化规律基本相同,复相关系数为 0.88(达到 0.01 显著性水平),且呈单峰型变化,即玉米出苗后随着玉米生长发育、植株高度和叶面积指数的增加,作物系数也随之增加,表明叶面积增加,蒸腾量加大,当叶面积指数于 7 月末至 8 月初达到最大值时,作物系数也达到最大值。

4) 本研究采用相对叶面积指数与作物系数的关系,消除了气候、土壤、作物品种及管理水平的等的影响,而相对叶面积指数可通过出苗后的逐日温度资料计算得到,因此,可适用于没有叶面积观测地区的玉米作物实际蒸散量计算。

本研究玉米生长初期、发展期、中期和后期作物系数分别为 0.26,0.55,1.14 和 0.63,结果与 FAO 推荐的作物系数基本一致,与陈凤等^[27]的研究结论

初期 0.25、中期 1.25 和后期 0.6 基本一致,较文献 [29-32] 的研究结果偏低,主要原因是测量蒸散量方法、研究区域及生育阶段划分不同。Alberto 等^[28] 和 Facchi 等^[21] 利用涡度相关观测数据在水分适宜情况下确定了玉米作物系数,前者试验地点在意大利湿润气候区,初期、发展期、中期和后期作物系数分别为 0.05, 0.51, 1.13 和 0.64,除玉米初期较本研究偏低外,其余 3 个发育阶段与本研究一致,作物系数的计算方法与本研究方法相同;后者试验地点在菲律宾地区,玉米初期、中期和后期作物系数为 0.30~0.40, 0.96~1.02 和 0.35~0.89,玉米初期与本研究结果一致,中期和后期比本研究偏低,确定作物系数方法与本研究不同。从目前研究结果看,基于涡度相关法确定的作物系数与 FAO 推荐的作物系数基本一致。

本研究建立的作物系数模型可以较好地模拟逐日玉米农田实际蒸散量动态,为农田用水管理以及灌溉措施的制定提供依据。研究结果是在玉米不受水分胁迫条件下得到的,当水分条件受限制时,要进行水分影响的修正。

参 考 文 献

- [1] 张淑杰,张玉书,纪瑞鹏,等. 东北地区玉米干旱时空特征分析. 干旱地区农业研究,2011,29(1):231-236.
- [2] 孙力,沈柏竹,安刚. 中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析. 应用气象学报,2003,14(5):542-552.
- [3] 魏凤英,张婷. 东北地区干旱强度频率分布特征及其环流背景. 自然灾害学报,2009,18(3):1-7.
- [4] 张淑杰,张玉书,陈鹏狮,等. 东北地区湿润指数及其干湿界线的变化特征. 干旱地区农业研究,2011,29(3):226-232.
- [5] Rana G, Katerji N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review. *European Journal of Agronomy*, 2000, 13(2): 125-153.
- [6] Ding R, Kang S, Li F, et al. Evapotranspiration measurement and estimation using modified Priestley-Taylor model in an irrigated maize field with mulching. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 168: 140-148.
- [7] Kjaersgaard J H, Plauborg F, Mollerup M, et al. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. *Agric Water Manag*, 2008, 95(8): 918-924.
- [8] 王石立, 娄秀荣, 沙奕卓. 华北地区小麦水分亏缺状况初探. 应用气象学报, 1995, 6(增刊 I): 42-48.
- [9] 吕厚荃, 钱拴, 杨霏云. 华北地区玉米田实际蒸散量的计算. 应用气象学报, 2003, 14(6): 722-728.
- [10] 毛飞, 张光智, 徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较. 应用气象学报, 2000, 11(增刊 I): 128-136.
- [11] He B, Oue H, Wang Y, et al. Measurement and modeling of evapotranspiration from an irrigated wheat field in the Hetao Irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 2007, 20(1): 8-16.
- [12] Kang S Z, Su X L, Tong L, et al. A warning from an ancient oasis: Intensive human activities are leading to potential ecological and social catastrophe. *The International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, 2008, 15(5): 440-447.
- [13] Yan H F, Oue H. Application of the two-layer model for predicting transpiration from the rice canopy and water surface evaporation beneath the canopy. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2011, 67(3): 89-97.
- [14] Yan H F, Zhang C, Oue H, et al. Comparison of different methods for estimating soil surface evaporation in a bare field. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2012, 118(3): 143-149.
- [15] 冯建设, 王建源, 王新堂, 等. 相对湿度指数在农业干旱监测业务中的应用. 应用气象学报, 2011, 22(6): 766-772.
- [16] 马晓群, 吴文玉, 张辉. 农业旱涝指标及在江淮地区监测预警中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(2): 186-194.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration—guidelines for Computing Crop Water Requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 56, Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, 1998.
- [18] Gao Y, Duan A, Sun J S, et al. Crop coefficient and water-use efficiency of winter wheat/spring maize strip intercropping. *Field Crops Research*, 2009, 111(1-2): 65-73.
- [19] Shrestha N K, Shukla S. Basal crop coefficients for vine and erect crops with plastic mulch in a sub-tropical region. *Agric Water Manag*, 2014, 143: 29-37.
- [20] Zhang C, Yan H F, Shi H B. Study of crop coefficient and the ratio of soil evaporation to evapotranspiration in an irrigated maize field in an arid area of Yellow River Basin in China. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 121(3-4): 207-214.
- [21] Facchi A, Gharsallah O, Corbari C, et al. Determination of maize crop coefficients in humid climate regime using the eddy covariance technique. *Agric Water Manag*, 2013, 130: 131-141.
- [22] Shahrokhnia M H, Sepaskhah A R. Single and dual crop coefficients and crop evapotranspiration for wheat and maize in a semi-arid region. *Theor Appl Climatol*, 2013, 114(3-4): 495-510.
- [23] 李荣平, 周广胜, 王宇. 中国东北玉米农田生态系统非生长季土壤呼吸作用及其对环境因子的响应. 科学通报, 2010, 55(13): 1247-1254.
- [24] 蔡福, 明惠青, 李荣平, 等. 动态空气动力学参数对玉米田陆气通量模拟的影响——以 BATSle 模型为例. 应用生态学报, 2013, 24(8): 2265-2273.
- [25] 麻雪艳, 周广胜. 春玉米最大叶面积指数的确定方法及其应用. 生态学报, 2013, 3(8): 2596-2603.

- [26] 王宇,周广胜. 雨养玉米农田生态系统的蒸散特征及其作物系数. *应用生态学报*,2010,21(3):647-653.
- [27] 陈凤,蔡焕杰,王健,等. 杨凌地区冬小麦和夏玉米蒸发蒸腾和作物系数的确定. *农业工程学报*,2006,22(5):291-293.
- [28] Alberto M C R, Quilty J R, Buresh R J, et al. Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agric Water Manag*,2014,136:1-12.
- [29] Liu C,Zhang X,Zhang Y. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat and maize by large-scale weighing lysimeter and micro-lysimeter. *Agricultural and Forest Meteorology*,2002,111(2):109-120.
- [30] Liu Y J,Luo Y. A consolidated evaluation of the FAO-56 dual crop coefficient approach using the lysimeter data in the North China Plain. *Agric Water Manag*,2010,97(1):31-40.
- [31] Kang S Z,Gu B J,Du T S,et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. *Agric Water Manag*,2003,59(3):239-254.
- [32] 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. *农业工程学报*,2005,21(8):25-29.
- [33] 梁文清,蔡焕杰,王健. 陕西关中地区夏玉米作物系数试验研究. *节水灌溉*,2011(12):1-4.
- [34] Piccini G,Ko J,Marek T,et al. Determination of growth-stage-specific crop coefficient (K_c) of maize and sorghum. *Agric Water Manag*,2009,96(12):1698-1704.

Daily Crop Coefficient of Spring Maize Using Eddy Covariance Observation and Its Actual Evapotranspiration Simulation

Zhang Shujie¹⁾ Zhou Guangsheng²⁾ Li Rongping¹⁾

¹⁾ (*Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166*)

²⁾ (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Spring maize is one of the most important crops in Northeast China and accounts for about 1/3 of grain crop area. Due to climate change in Northeast China during recent years, climate warming and drying trend is very significant. As a result, drought disasters of spring maize occur frequently, moreover, it often occurs in the critical period of the formation of maize production, resulting in a serious impact on maize yield. How to scientifically irrigate maize farmland and ensure maize yield stable and high is a serious challenge. In order to accurately calculate the actual evapotranspiration of maize, dynamic daily crop coefficient of spring maize and its relationship with leaf area index are studied, using the latent heat flux data from eddy covariance (EC), and corresponding data including meteorological data, phenological data and leaf area data during 2006–2008 and 2011 at Jinzhou Agricultural Ecosystem Research Station. Results indicate that both daily crop coefficient and actual evapotranspiration of spring maize farmland ecosystem show a unimodal curve change, and they reach the maximum from late July to early August (maize flowering and silk stages). A new dynamic crop coefficient model under conditions of enough water supply is developed for spring maize, and it indicates the close linear relationship between crop coefficient and leaf area index ($R^2=0.88$, $F=73.5$, $P<0.01$). Furthermore, the relative leaf area index is simulated using the standardization of growth period based on cumulative temperature. The relationship between daily crop coefficient of spring maize and relative leaf area index are also developed ($R^2=0.93$, $F=527$, $P<0.01$), which solves the calculation of daily actual evapotranspiration over spring maize farmland ecosystems without the leaf area observation. This new model improves the crop coefficient suggested by FAO, and extends the calculation from phenological stages to daily scale.

At present, crop coefficients come from different evapotranspiration observation methods, including lysimeter and eddy covariance, and different methods lead to significantly different results. The comparison shows that crop coefficients of maize at four phenological stages based on the evapotranspiration observations from eddy covariance towers are the closest to values suggested by FAO. The newly developed crop coefficient model is able to simulate daily actual evapotranspiration of spring maize farmland ecosystem with a good accuracy. It could provide theoretical basis for the management of agricultural water resources and irrigation.

Key words: spring maize; daily crop coefficient; eddy covariance method