

▪ 作物水肥高效利用 ▪

文章编号: 1672-3317(2022)07-0008-08

乳熟期倒伏对夏玉米农田蒸散量的影响

彭记永^{1,2}, 韩耀杰^{1,2}, 李树岩^{1,2*}, 方文松^{1,2}

(1.中国气象局·河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003;

2.河南省气象科学研究所, 郑州 450003)

摘 要:【目的】确定夏玉米倒伏后农田蒸散量变化特征。【方法】郑州农业气象试验站 2016 年 8 月 25 日出现夏玉米大风倒伏现象, 利用正常年(2017 年)气象数据、作物观测数据和涡度观测数据, 通过 Penman-Monteith 模型(P-M 模型)模拟并检验夏玉米正常生长年型蒸散量变化特征, 优化参数模型, 计算 P-M 模型模拟值与实测值的最优拟合度。然后根据率定参数的 P-M 蒸散模型, 利用田间调查数据, 以未倒伏的植株参数为假定夏玉米没有发生倒伏, 进行农田蒸散量模拟, 模拟结果作为蒸散量对照值(P-M_N); 以实际倒伏后的植株参数, 进行农田蒸散量模拟, 模拟结果为实际倒伏蒸散量(P-M_L)。【结果】正常年型蒸散量模拟值与实测值具有较好的一致性, 模拟绝对误差为 0.005, 相对误差为 10.7%, 均方根误差和一致性指数分别为 0.019、0.980, 说明模型具有较好的预测性。在倒伏年, 倒伏后蒸散量模拟值与实测值的绝对误差和相对误差分别为 0.002 mm/30 min、2.9%, 均方根误差为 0.001, 一致性指数为 0.98。【结论】乳熟期夏玉米倒伏后农田蒸散量显著降低, 根据 P-M 模型计算结果, 夏玉米倒伏后农田蒸散量降低 0.019 mm/30 min, 日平均降低 0.68 mm/d, 降低 18.3%。并且倒伏前期日平均降低 0.99 mm/d, 降低 20.6%; 倒伏后期日平均降低 0.42 mm/d, 降低 14.8%。

关键词: 夏玉米; 倒伏; Penman-Monteith 模型; 涡度相关; 模拟; 蒸散量

中图分类号: S513

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022075

OSID:



彭记永, 韩耀杰, 李树岩, 等. 乳熟期倒伏对夏玉米农田蒸散量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(7): 8-15.

PENG Jiyong, HAN Yaojie, LI Shuyan, et al. Effect of Lodging on Evapotranspiration of Summer Maize at Milk Ripening Stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(7): 8-15.

0 引言

【研究意义】准确计算农田蒸散量不仅有助于指导农田灌溉和提高水分利用效率, 而且在研究作物与大气的相互作用中扮演着重要角色^[1-2]。理清倒伏后农田生态系统蒸散量变化特征, 对指导农业生产、保障粮食安全以及制定倒伏后农田管理措施有重要意义。【研究进展】在计算农田蒸散量的模型方面, Monteith 在 Penman 潜在蒸散模型的基础上, 把作物冠层看成一片大叶整体, 建立了基于阻力模型的 Penman-Monteith 模型, 具有较高的计算精度, 在国内外农田蒸散量估算研究中得到了验证和广泛应用^[3-4]。王娟等^[5]基于 P-M 模型模拟夏玉米农田蒸散量, 对模型中的关键阻力参数进行校正, 模型计算效

果有很大提高, 模拟结果更接近于测量值。郭映等^[6]研究了西北黄土高原区覆膜情况下玉米的蒸散量变化特征, P-M 模型日蒸散量可满足可靠性判断标准。贾红等^[7]利用波文比系统对比分析了夏玉米生长季 Shuttleworth-Wallace 模型和 P-M 模型对蒸散量估计的差异, 在冠层郁闭时, 二模拟值与实测值均有良好表现, 与实测值较为接近。前人对农田蒸散量的模拟研究多集中在作物正常生长情况下模型的参数优化、准确性及敏感性分析等方面^[8], 而利用蒸散模型针对农田灾害尤其是夏玉米倒伏后农田蒸散量进行的研究还不多见。

夏玉米是黄淮地区最主要的粮食作物, 常年播种面积及产量占全国玉米的 20%以上^[9]。在夏玉米生长季, 强对流天气多发, 倒伏是影响玉米产量的重要气象灾害, 研究表明每年因倒伏造成的玉米减产达 5%~25%^[10-11]。而且乳熟—成熟期倒伏发生概率达到 28.7%, 明显高于其他生育阶段^[12]。倒伏改变玉米群体结构及叶片空间分布, 导致植株、叶片相互遮蔽; 并破坏茎秆的疏导组织, 阻碍根系向叶片输送水分, 影响农田生态系统蒸腾速率^[13-14]。而蒸散速率的大小

收稿日期: 2022-02-15

基金项目: 中国气象局 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室开放基金项目 (AMF202106); 中国气象局 河南省农业气象保障与应用技术重点实验室应用基金项目 (KM202216); 中国气象局创新发展专项项目 (CXFZ2021Z094)

作者简介: 彭记永 (1981-), 男, 高级工程师, 主要从事农业气象学研究。
E-mail: ppeng345@163.com

通信作者: 李树岩 (1979-), 女, 正研级高级工程师, 主要从事农业气象灾害及作物模型应用研究。E-mail: lsy_126com@126.com

影响着作物的光合作用强度和光合产物的累积，并最终影响产量的形成^[15]。前人在倒伏对夏玉米干物质累积、产量、品质的影响，以及倒伏成因、补救措施及品种抗倒伏能力评价等方面做了较为深入的研究^[16-17]，但玉米倒伏后群体蒸散量变化特征的对比分析研究成果较少，其中观测手段是制约该领域研究的主要原因之一。玉米属于高秆作物，人工控制试验难以反映灾害的真实性，倒伏后农田生态系统蒸散量的对比观测是难点。

【切入点】本研究针对郑州农业气象试验站 2016 年 8 月 25 日发生的夏玉米倒伏灾害，根据正常年（2017 年）的气象资料、作物观测资料和涡度系统观测资料，利用 P-M 方程模拟夏玉米正常生长状况下农田蒸散，率定模型参数，并检验模型准确性。根据率定参数的 P-M 蒸散模型，利用田间调查数据，以未倒伏的植株参数为假定夏玉米没有发生倒伏，进

行农田蒸散量模拟，模拟结果作为蒸散量对照值；以实际倒伏后的植株参数，进行农田蒸散量模拟，模拟结果为实际倒伏蒸散量。【拟解决的关键问题】对比分析倒伏后农田蒸散量的变化特征，确定夏玉米乳熟期大风倒伏对农田蒸散量的影响。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验地点位于河南省郑州农业气象试验站（34°43'N，113°39'E，海拔 110.4 m），地势平坦，该试验站年平均气温 14.9℃，多年平均降水量 670 mm 左右。土壤类型为沙壤土，微碱性，地下水位深度大于 2 m。农业生产以冬小麦和夏玉米轮作为主，种植结构单一，试验地块管理措施与当地大田一致。主要作物种植以及土壤参数见表 1。

表 1 2016 年、2017 年夏玉米种植模式和土壤参数

Table 1 Planting mode and soil parameters of summer maize in 2016 and 2017

年份	种植密度/(株 m ⁻²)	行间距/m	株间距/m	土壤类型	10 cm 土壤 体积质量/(g cm ⁻³)	10 cm 土壤 田间持水率/%	10 cm 土壤 凋萎湿度/%
2016	6.16	0.60	0.27	沙壤土	1.3	22.8	4.1
2017	5.54	0.58	0.31				

2016 年、2017 年夏玉米主要生育期状况及气象条件如表 2 所示。2016 年、2017 年夏玉米试验季播种品种为杂交中熟品种“浚单 20”。2017 年夏玉米生长季，无气象灾害发生。2016 年夏玉米生长季，除 2016 年 8 月 25 日的大风倒伏外，无其他气象灾害发生。该试验

站于 2016 年 8 月 25 日（乳熟后第 3 日）12:20 出现 8 级大风，极大风速 18.1 m/s，小时平均风速 3.8 m/s，并伴随降水，日降水量 23.8 mm。整个田块倒伏近 1/2，以茎秆折断为主，主要发生在第三节和第四节节间，折断部位距离地面约 20~30 cm。

表 2 2016 年、2017 年夏玉米主要生育期状况及气象条件

Table 2 Growth and meteorological conditions of summer maize in 2016 and 2017

年份	播种日期	乳熟日期	成熟日期	日照时间/h	>0℃ 累积积温/(℃ d ⁻¹)	降水量/mm
2016	0602	0822	0912	650.2	2 839.0	467.6
2017	0604	0828	0922	699.7	3 017.4	361.0

1.2 通量数据观测及数据质量控制

通量观测系统采用美国 Campbell Scientific 公司的涡动协方差系统，包括 1 套梯度观测系统和 1 套涡度观测系统。梯度观测系统由 1 套 PAR LITE 光合有效辐射传感器、5 层空气温湿度传感器、4 层风向风速仪组成。涡度相关系统由 LI-7500 CO₂/H₂O 分析仪（架设高度为 3.0 m）、CSAT3 三维超声风速仪、CNR2 净辐射传感器（架设高度为 3.0 m）、HFP01 土壤热通量板（埋深 0.05 m）组成。按照中国气象局下发的《近地层通量观测数据格式》和《近地层通量观测业务规范（试行）》进行仪器日常维护和通量数据下载。参照一般通量数据处理方法^[18-20]，对 30 min 通量数据进行野点剔除、坐标轴旋转和 WPL 变换处理。对由于降水、断电等因素造成的数据缺失以及剔除异常数

据之后的数据序列，采用平均昼夜法和非线性回归法等插补^[21-22]，形成完整的数据序列。

2016 年为倒伏年型，选择倒伏前后（8 月 22 日—9 月 12 日）21 d 的数据进行分析，剔除倒伏日（8 月 25 日）由降水引起的异常数据。2017 年为正常年型，选取相对应的乳熟期—成熟期（8 月 28 日—9 月 22 日）连续 25 d 数据进行分析。2016 年倒伏前后能量闭合率分别为 0.80、0.82；2017 年乳熟期能量闭合率为 0.89。经分析，数据能量平衡闭合率以及数据质量等级标准满足通量数据质量要求。

1.3 夏玉米倒伏灾害调查

在夏玉米倒伏后第 2 天（2016 年 8 月 26 日）进行倒伏类型和倒伏率的调查。此次倒伏基本为茎折，连续调查 100 株记录倒伏株数，倒伏株数除以调查总株数

即为相应的倒伏率,并结合图像识别^[23],综合分析倒伏率为46.0%。在成熟期根据倒伏比例,分别进行作物参数测定。

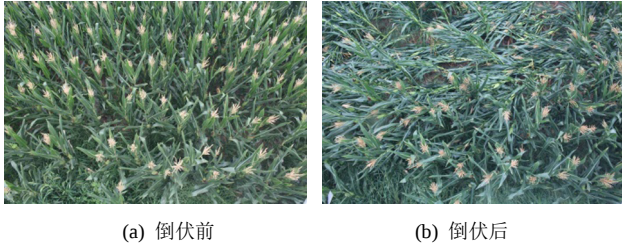


图1 夏玉米倒伏前后对比

Fig.1 Comparison of summer maize before and after lodging

1.4 作物观测

1.4.1 发育期观测

按照《中国气象局农业气象观测规范(上卷)》^[24]进行夏玉米生长发育观测。主要包括三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期。

1.4.2 作物参数测定

在三叶期、七叶期、拔节期、抽雄期、乳熟期和成熟期进行了叶长、叶宽、株高测定。取样方法,在田间固定4个测点,每测点连续选取10株,4个测点共40株量取高度,按株高数据的离散程度分成数据范围相等的5组,再按照每组的平均株高为参考高度取样,每个参考高度取1株,共取5株,齐地面剪下,带回室内,将叶、茎鞘、穗等器官分离,量取并记录每片叶长、叶宽值。叶面积测量方法采用长宽系数法进行:

$$LS_i = \sum_{i=1}^n L_i \times D_i \times k, \quad (1)$$

式中: LS_i 为单株叶面积 (cm^2); L_i 为叶长 (cm); D_i 为叶宽 (cm); k 为叶面积校正系数,取 0.70。单株叶面积乘以每平方米株数即为叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 2016 年、2017 年夏玉米叶面积指数如表 3 所示。

表3 2016年、2017年夏玉米叶面积指数

年份	最大叶面积指数	成熟期叶面积指数
2016	4.8	2.9 (未倒伏)
		1.6 (倒伏和未倒伏)
2017	4.0	2.9

1.5 夏玉米农田蒸散量模型

Penman-Monteith 模型用于实际蒸散量的计算^[25], 公式如下:

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p(e_s - e_a)/r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c)/r_a}, \quad (2)$$

式中: Δ 为饱和水汽压—温度曲线斜率 (kPa/K); R_n 为冠层表面净辐射 (W/m^2); G 为土壤热通量 (W/m^2); ρ 为空气密度 (kg/m^3); C_p 为空气比热 (1.012 J/(kg K)); e_s 为参考高度的饱和水汽压 (hPa); e_a 为蒸发表面的实际水汽压 (kPa); γ 为干湿表常数 (0.067

kPa/K); r_c 为冠层阻力 (s/m); r_a 为作物冠层高度与参考高度间空气动力学阻力 (s/m)。

净辐射 R_n 由 CNR2 净辐射传感器观测得到。土壤热通量 G 通过积分法^[26]计算得到, G_z 为 0.05 m 土壤热通量板测量结果, G_s 为土壤热存储项:

$$G = G_z + G_s. \quad (3)$$

对冠层阻力参数 r_c , 采用 Jarvis^[27]和 Noilhan 等^[28]提出的参数化模型, 使用有效叶面积指数 (LAI_e) 对 r_c 进行优化^[29]:

$$r_c = \frac{1}{LAI_e} \times \frac{r_{\min}}{F_1 \times F_2 \times F_3 \times F_4}, \quad (4)$$

式中: LAI_e 为冠层有效叶面积指数, F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 分别为净辐射 R_n (W/m^2); 饱和水汽压差 VPD (hPa); 气温 T ($^{\circ}\text{C}$) 和土壤容积含水率 θ (cm^3/cm^3) 的响应函数。

有效叶面积指数 LAI_e 由下式计算:

$$LAI_e = \begin{cases} LAI, & LAI \leq 2 \\ 2 + \frac{LAI-2}{3}, & LAI > 2 \end{cases} \quad (5)$$

r_a 采用 Shuttleworth 等^[30]推算公式计算得到:

$$r_a = \frac{1}{\kappa u_*} \left[\ln \frac{Z-d}{h-d} + \frac{h}{n(h-d)} \left\{ \exp \left[n \left(1 - \frac{d+Z_0}{h} \right) \right] - 1 \right\} \right], \quad (6)$$

式中: κ 为 Karman 常数 ($\kappa=0.41$); u_* 为摩擦风速 (m/s); Z 为参考高度 (m); d 为地面修正项 (m); h 为株高 (m); n 为冠层内湍流扩散衰减常数, 取值为 2.5; Z_0 为粗糙度 (m)。

1.6 误差分析方法和模型精度验证

通过相关系数 (Correlation coefficient, r)、斜率 (Slope) 评价模拟值与实测值之间的相关性及变化趋势的一致性。利用平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE) 和平均相对误差 (Mean Relative Error, MRE) 对模型精度进行评价, 误差越小, 表明模拟精度越高。同时引入均方根误差 (Root Mean Squared Error, $RMSE$) 和一致性指数 (Index of Agreement, IA), 分别用来评价误差值的离散程度, 以及模拟值与实测值之间的偏差, 评价模型模拟的效果。误差 $RMSE$ 越小, 一致性指标越接近于 1, 则模拟效果越好。

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - O_i}{n}, \quad (7)$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{S_i - O_i}{O_i} \times 100\%}{n}, \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}, \quad (9)$$

$$IA = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}, \quad (10)$$

式中: $\bar{O}$ 为观测值的平均值; S_i 为第 i 个模拟值; O_i 为第 i 个观测值。

1.7 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据处理和制图,采用 SPSS19.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 夏玉米叶面积指数模拟

根据实测叶面积指数,利用修正的 Logistics 模型进行夏玉米逐日叶面积指数模拟^[31]。并由倒伏率和成熟期倒伏后叶面积指数模拟计算 2016 年倒伏后一成熟期叶面积指数。由图 2 可知,模拟值与实测值较为一致。

2.2 正常年份夏玉米农田蒸散量模拟

利用正常生长年型(2017年)夏玉米乳熟期一成熟期观测数据,进行夏玉米正常生长状况下农田蒸散

量的模拟,采用有效叶面积指数,率定蒸散模型冠层阻力参数 r_c ,正常年型夏玉米农田蒸散量模拟值与实测值具有较好的一致性,P-M模型模拟值与实测值变化趋势较为一致(图3)。

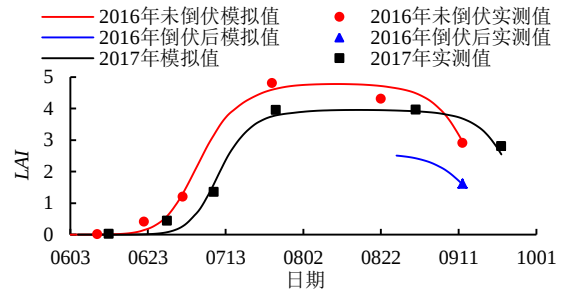


图 2 叶面积指数模拟

Fig.2 Leaf area index simulation

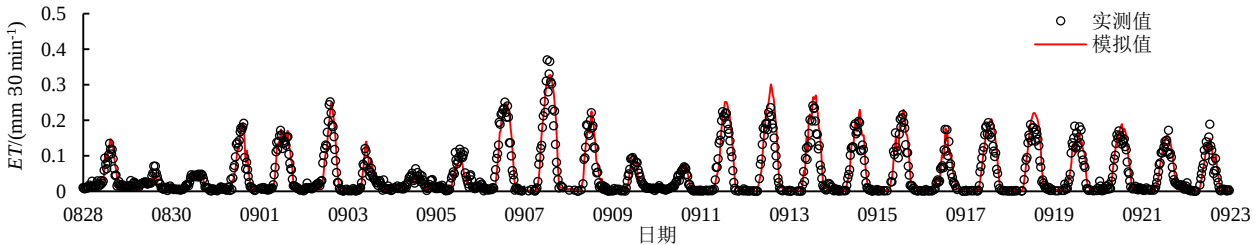


图3 正常年型夏玉米蒸散量实测值与模拟值对比

Fig.3 Comparison between observed and simulated evapotranspiration of summer maize in normal year

由表4可知,P-M模型模拟值与实测值相关系数 r 分别为0.97(在0.01水平上显著),呈极显著正相关,拟合直线的斜率为1.08。平均绝对误差为0.005 mm/30 min,平均相对误差为10.5%。RMSE为0.019 mm/30

min,IA为0.98,说明模型具有较好的预测精度,P-M模型可以较准确的模拟夏玉米正常生长状况下的农田蒸散量。

表4 正常年型P-M模型模拟夏玉米农田蒸散量统计结果

Table 4 Statistical results of evapotranspiration simulated by P-M model in normal year

模型	r	Slope	MAE/(mm 30 min ⁻¹)	MRE/%	RMSE/(mm 30 min ⁻¹)	IA
P-M	0.97**	1.08	0.005	10.5	0.019	0.98

注 ** $P < 0.01$ 。

通过对30 min(08:00—18:00)蒸散量求和得到夏玉米农田日蒸散量,对比分析夏玉米农田蒸散量日(8月28日—9月22日)变化特征发现(图4),正常年

型(2017年),日P-M模型模拟值与实测具有较好的一致性,但模拟值较实测值大,日平均绝对误差为0.22 mm/d,相对误差为10.6%。

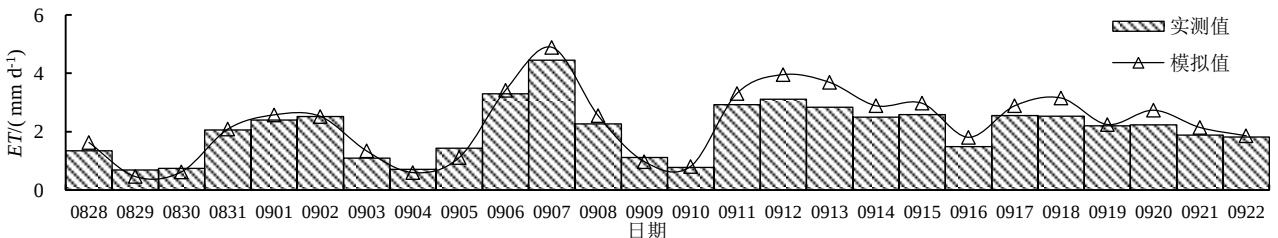


图 4 正常年型蒸散量日模拟值与实测值

Fig.4 Daily simulated and observed value of normal annual evapotranspiration

2.3 倒伏年夏玉米农田蒸散量模拟

根据率定参数的蒸散模型,利用田间调查数据,以未倒伏的植株参数为假定夏玉米没有发生倒伏,进行农田蒸散量模拟,模拟结果作为蒸散量对照值

(P-M_N);以实际倒伏后的植株参数,进行农田蒸散量模拟,模拟结果为实际倒伏蒸散量(P-M_L)。对比倒伏发生后(2016年8月26日—9月12日)蒸散量变化特征,农田蒸散量逐渐降低,实测值与倒伏后模

拟值 ($P-M_L$) 变化趋势具有较好的一致性, $P-M_N$ 较 $P-M_L$ 大 (图 5), 说明倒伏后农田蒸散量降低。

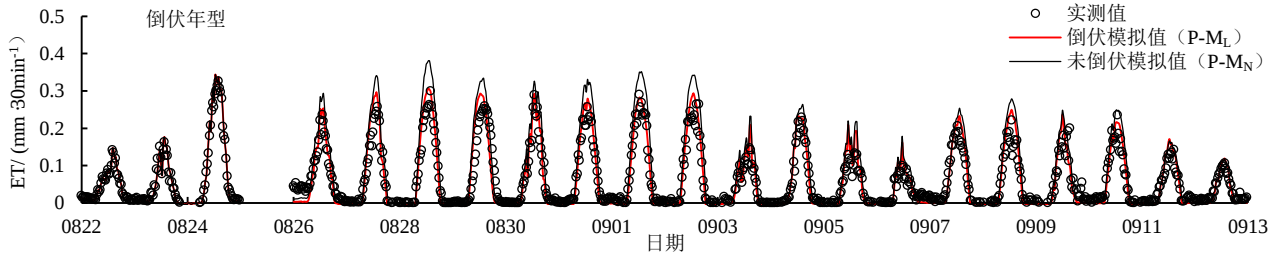


图5 倒伏年型夏玉米蒸散量实测值与模拟值

Fig.5 Observed and simulated value of summer maize evapotranspiration in lodging years

由表5可知, 倒伏后, $P-M_L$ 模型模拟值与实测值相关系数 r 为 0.97 (在 0.01 水平上显著), 呈极显著正相关, 拟合直线斜率为 1.16。 $P-M_L$ 模型模拟值与实测值的平均绝对误差为 0.002 mm/30 min, 平均相对误差

分别为 2.9%。 $RMSE$ 为 0.001 mm/30 min, IA 为 0.98, 说明模型能够预测倒伏后蒸散量的变化趋势。根据 $P-M_N$ 和 $P-M_L$ 模型的模拟结果, 计算倒伏后夏玉米农田平均蒸散量降低了 0.019 mm/30 min。

表5 倒伏后 $P-M$ 模型模拟夏玉米农田蒸散量统计分析

Table 5 Statistical results of evapotranspiration simulated by $P-M$ model in lodging year

模型	r	Slope	MAE/ (mm 30 min ⁻¹)	MRE/%	RMSE/ (mm 30min ⁻¹)	IA
$P-M_L$	0.97**	1.16	0.002	2.9	0.001	0.98

注 ** $P < 0.01$ 。

夏玉米倒伏年型 (2016年8月26日—9月12日) $P-M_L$ 模型和 $P-M_N$ 模型日蒸散量变化趋势与实测值较为一致, 但 $P-M_N$ 模型模拟值较 $P-M_L$ 模型模拟值大, 说明倒伏后农田蒸散量较未倒伏降低, 模拟值与实测值之差分别为 0.35、1.03 mm/d。根据模型模拟结果, 并考虑模型模拟误差, 计算得到倒伏后夏玉米农田蒸散量降低了 0.68 mm/d, 平均降低了 18.3% (图6)。

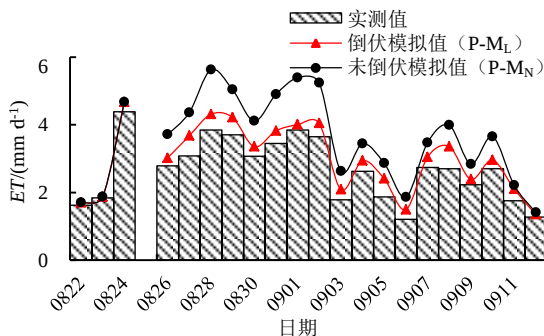


图6 倒伏年型日蒸散量模拟值与实测值

Fig.6 Daily simulated and observed evapotranspiration value in lodging years

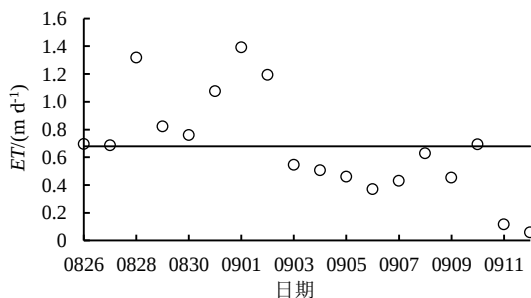


图7 夏玉米倒伏后日蒸散量减少值

Fig.7 Daily evapotranspiration reduction after summer maize Lodging

从夏玉米倒伏后日蒸散量减少值可以看出 (图 7), 倒伏前期 (8月26日—9月2日) 夏玉米农田蒸散量降低较多, 日平均降低 0.99 mm/d, 平均降低 20.6%; 倒伏后期 (9月3—12日) 夏玉米逐渐成熟, 植株枯萎, 作物蒸腾降低, 农田蒸散量逐渐减小, 日平均蒸散量降低 0.42 mm/d, 平均降低 14.8%。

3 讨论

1) $P-M$ 模型能够模拟植株正常生长的农田蒸散量, 具有较高的准确性^[32-33]。吕厚荃等^[34]利用修正阻力参数的 $P-M$ 模型, 进行夏玉米实际蒸散量的模拟, 相对误差为 10%~15%左右。Gardiol 等^[35]研究发现, $P-M$ 模型相比其他模型, 模拟夏玉米农田蒸散量偏低, 但较涡度相关法实测值偏高。涡度相关数据由于能量闭合和空间代表性等问题, 与蒸渗仪法以及 $P-M$ 模型模拟法相比可能会低估生态系统的蒸散量^[36-37]。与本文研究结果一致, 夏玉米正常生长年型 $P-M$ 模型模拟值较通量观测值大, 与观测值相比平均相对误差为 10.7%。研究表明 r_c 是影响农田蒸散最敏感的阻力参数^[38], 并且 LAI 是影响 r_c 的最主要的生物因素^[39]。因此, 本研究主要考虑利用有效叶面积指数, 提高冠层阻力模拟精度, 进行农田蒸散量模拟。此外, 夏玉米倒伏后, 不仅叶面积指数降低, 而且冠层高度也因之降低, 本研究忽略了平均冠层高度降低对 r_a 造成的影响^[40], 是模型误差产生的原因之一。

2) 在夏玉米乳熟—成熟期, 随着植株叶片变黄, 叶面蒸腾逐渐降低, 棵间蒸发逐渐占比增大, 逐步回升到 20%~40%左右^[41]。而夏玉米倒伏后, 倒伏植株

覆盖地面, 不仅使作物蒸腾降低, 而且造成棵间蒸发减少。本研究发现夏玉米农田蒸散量降低值倒伏前期明显大于倒伏后期, 可能由于倒伏后至成熟期一直无有效降水, 表层土壤含水率逐渐降低, 从而造成棵间蒸发减小有关。由于大风倒伏灾害的突发性、偶发性, 目前还缺乏有效的观测手段开展大面积夏玉米倒伏蒸散量的量化研究, 而人工控制试验难以还原灾害的真实性。本研究仅利用 1 a 的倒伏数据进行夏玉米农田蒸散量的模拟, 并且无区分作物蒸腾和土壤蒸发, 有待于利用更多观测数据和方法^[42-43], 把作物蒸腾和土壤蒸发区分开, 进行全面深入的研究。

3) 乳熟期是夏玉米产量形成的关键时期, 夏玉米倒伏后, 不但造成农田蒸散量降低; 而且倒伏后茎秆折断, 破坏茎秆输导系统, 既影响根系向叶片运输水分和养料, 也影响叶片向果穗输送光合产物, 最终造成减产。本研究没有考虑倒伏后农田蒸散量对产量的影响, 以及倒伏后农田蒸散量、群体光合作用和农田水分利用效率之间的关系, 有待于进一步研究。同时, 乳熟期一成熟期也是夏玉米叶片逐渐衰老、生理功能进入全面衰退的时期。研究表明在夏玉米生育后期, 保持较高的叶面积指数和一定的土壤含水率, 能够提高农田耗水量和叶片抗衰老能力, 有利于增加夏玉米产量^[44-45]。虽然乳熟期灌溉会降低农田水分利用率, 但能够增加营养器官同化物向籽粒的转化效率, 从而提高籽粒产量^[46]。因此, 在夏玉米生育后期发生倒伏后, 为了尽可能减少产量的损失, 在土壤含水率较小时, 适当进行灌溉是需要关注的重点。

4 结 论

乳熟期夏玉米倒伏后农田蒸散量显著降低, 并且倒伏前期较倒伏后期降低更多。根据P-M模型计算结果, 夏玉米倒伏后农田蒸散量降低0.019 mm/30 min, 日平均降低0.68 mm/d, 降低18.3%。并且倒伏前期日平均降低0.99 mm/d, 降低20.6%; 倒伏后期日平均降低0.42 mm/d, 降低14.8%。因此, 在夏玉米乳熟期, 对于发生茎折的倒伏玉米, 可提早收割, 避免产量损失; 对于根倒、茎倒以及正常生长的植株, 需加强水肥管理。

参考文献:

- [1] 吴友杰, 杜太生. 基于氧同位素的玉米农田蒸散发估算和区分[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 127-134.
WU Youjie, DU Taisheng. Estimating and partitioning evapotranspiration of maize farmland based on stable oxygen isotope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 127-134.
- [2] 汪秀敏. 农田蒸散量测定与计算方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012: 12-14.
- [3] WANG Xiumin. Study on the field evapotranspiration measurement and calculation[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2012: 12-14.
- [4] LECINA S, MARTINEZ-COB A, PEREZ P J. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions[J]. Agricultural Water Management, 2003, 60(3): 181-198.
- [5] 有德宝, 王建林, 吕明强, 等. 基于 Penman-Monteith 法的黑河流域玉米农田蒸散特征研究[J]. 华北农学报, 2015, 30(S1): 139-145.
YOU Debao, WANG Jianlin, LYU Mingqiang et al. Evapotranspiration of maize field in irrigation area in Heihe middle reaches using the penman-monteith method[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2015, 30(S1): 139-145.
- [6] 王娟, 王建林, 刘家斌, 等. 基于 Penman-Monteith 模型的两个蒸散模型在夏玉米农田的参数修正及性能评价[J]. 应用生态学报, 2017, 28(6): 1 917-1 924.
WANG Juan, WANG Jianlin, LIU Jiabin, et al. Parameters modification and evaluation of two evapotranspiration models based on Penman-Monteith model for summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(6): 1 917-1 924.
- [7] 郭映. 应用 Shuttleworth-Wallace 双源模型对玉米蒸散的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015: 40-42.
GUO Ying. Estimation of actual evapotranspiration of maize field using Shuttleworth-Wallace model[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015: 40-42.
- [8] 贾红, 胡继超, 张佳宝, 等. 应用 Shuttleworth-Wallace 模型对夏玉米农田蒸散的估计[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 77-80.
JIA Hong, HU Jichao, ZHANG Jiabao, et al. Estimation of evapotranspiration during the maize growing season using the Shuttleworth-Wallace model[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 77-80.
- [9] 刘斌, 胡继超, 赵秀兰, 等. 应用 Penman-Monteith 模型估算稻田蒸散的误差分析[J]. 中国农业气象, 2015, 36(1): 24-32.
LIU Bin, HU Jichao, ZHAO Xiulan, et al. Error analysis on evapotranspiration estimation of paddy rice field by Penman-Monteith model[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(1): 24-32.
- [10] 国家统计局. 2018 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018: 401-405.
National Bureau of Statistics of China. 2018 China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018: 401-405.
- [11] KANG M S, DIN A K, ZHANG Y D, et al. Combining ability for rind puncture resistance in maize[J]. Crop Science, 1999, 39(2): 368-371.
- [12] ELMORE R W, FERGUSON R B. Mid-season stalk breakage in corn: hybrid and environmental factors[J]. Journal of Production Agriculture, 1999, 12(2): 293-299.
- [13] 李树岩, 马玮, 彭记永, 等. 大喇叭口及灌浆期倒伏对夏玉米产量损失的研究[J]. 中国农业科学, 2015, 48(19): 3 952-3 964.
LI Shuyan, MA Wei, PENG Jiyong, et al. Study on yield loss of summer maize due to lodging at the big flare stage and grain filling stage[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(19): 3 952-3 964.
- [14] 刘佳丽. 玉米抗茎倒的力学与解剖学特征及栽培措施影响的研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012: 1-6.
LIU Jiali. Study on mechanical and anatomical characteristics of stem lodging resistance and effect of cultivation practices in summer maize [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2012: 1-6.
- [15] 王永学. 玉米抗倒伏有关性状遗传的初步研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2011: 1-17.
- [16] WANG Yongxue. Preliminary study of inheritance on lodging resistance traits in maize[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2011: 1-17.

- [15] 申双和, 景元书. 农业气象学原理[M]. 北京: 气象出版社, 2017: 174-181.
SHEN Shuanghe, JING Yuanshu. Principles of agrometeorology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2017: 174-181.
- [16] 曹庆军. 春玉米抗茎倒能力评价及其化学调控技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2016: 23-29.
CAO Qingjun. Evaluation of stalk lodging resistance of different spring maize genotypes and mechanism of its improvement by plant growth regulators(PGRs)[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2016: 23-29.
- [17] 陈尚洪, 陈红琳, 沈学善, 等. 密度和施氮量对丘陵区机播夏玉米产量及倒伏影响研究[J]. 西南农业学报, 2012, 25(3): 805-808.
CHEN Shanghong, CHEN Honglin, SHEN Xueshan, et al. Effects of planting density and nitrogen application on yield and lodging of mechanized sowing summer maize[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2012, 25(3): 805-808.
- [18] 李春, 何洪林, 刘敏, 等. ChinaFLUX CO₂ 通量数据处理系统与应用[J]. 地球信息科学, 2008, 10(5): 557-565.
LI Chun, HE Honglin, LIU Min, et al. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX[J]. Geo-Information Science, 2008, 10(5): 557-565.
- [19] 徐自为, 刘绍民, 宫丽娟, 等. 涡动相关仪观测数据的处理与质量评价研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(4): 357-370.
XU Ziwei, LIU Shaomin, GONG Lijuan, et al. A study on the data processing and quality assessment of the eddy covariance system[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(4): 357-370.
- [20] VICKERS D, MAHRT L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1997, 14(3): 512-526.
- [21] 郭建侠, 卞林根, 戴永久. 在华北玉米生育期观测的 16m 高度 CO₂ 浓度及通量特征[J]. 大气科学, 2007, 31(4): 695-707.
GUO Jianxia, BIAN Linggen, DAI Yongjiu. Measured CO₂ concentration and flux at 16 m height during corn growing period on the North China plain[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(4): 695-707.
- [22] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R, et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(1): 43-69.
- [23] 贾洪雷, 王刚, 郭明卓, 等. 基于机器视觉的玉米植株数量获取方法与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 215-220.
JIA Honglei, WANG Gang, GUO Mingzhuo, et al. Methods and experiments of obtaining corn population based on machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(3): 215-220.
- [24] 国家气象局编定. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 7-30.
National Meteorological Administration. Agricultural meteorological observation specifications (Volume I)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 7-30.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome: FAO Irrigation and Drainage Paper56, 1998: 15-27.
- [26] LIEBETHAL C, HUWE B, FOKEN T. Sensitivity analysis for two ground heat flux calculation approaches[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 132(3/4): 253-262.
- [27] JARVIS P G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B, Biological Sciences, 1976, 273(927): 593-610.
- [28] NOILHAN J, PLANTON S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. Monthly Weather Review, 1989, 117(3): 536-549.
- [29] 彭记永, 杨光仙. 夏玉米蒸散优化参数模型及参数敏感性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 55-62.
PENG Jiyong, YANG Guangxian. Improvement of evapotranspiration models in summer maize field and its sensitivities analysis to the resistance parameters[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 55-62.
- [30] HUTTLEWORTH W J, WALLACE J S. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1985, 111(469): 839-855.
- [31] 彭记永, 李军玲, 张志红. 夏玉米叶面积指数模型适用性及误差分析[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(5): 70-76, 91.
PENG Jiyong, LI Junling, ZHANG Zhihong. Applicability and error analysis of leaf area index model of summer maize[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(5): 70-76, 91.
- [32] KATO T, KIMURA R, KAMICHIKA M. Estimation of evapotranspiration, transpiration ratio and water-use efficiency from a sparse canopy using a compartment model[J]. Agricultural Water Management, 2004, 65(3): 173-191.
- [33] 米娜, 陈鹏狮, 张玉书, 等. 几种蒸散模型在玉米农田蒸散量计算中的应用比较[J]. 资源科学, 2009, 31(9): 1 599-1 606.
MI Na, CHEN Pengshi, ZHANG Yushu, et al. A comparative study on estimation models for field evapotranspiration[J]. Resources Science, 2009, 31(9): 1 599-1 606.
- [34] 吕厚荃, 钱控, 杨霏云, 等. 华北地区玉米田实际蒸散量的计算[J]. 应用气象学报, 2003, 14(6): 722-728.
LYU Houquan, QIAN Shuan, YANG Feiyun, et al. Estimation of actual evapotranspiration for maize field in North China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2003, 14(6): 722-728.
- [35] GARDIOL J M, SERIO L A, DELLA MAGGIORA A I. Modelling evapotranspiration of corn (Zea mays) under different plant densities[J]. Journal of Hydrology, 2003, 271(1-4): 188-196.
- [36] 刘笑吟, 高明逸, 周心怡, 等. 蒸发比法能量强制闭合及其对稻田蒸散量估算精度的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 121-130.
LIU Xiaoyin, GAO Mingyi, ZHOU Xinyi, et al. Enforcing energy balance closure by evaporation ratio method and its effect on evapotranspiration estimation of paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(11): 121-130.
- [37] 王伟娜, 张翔, 张立锋, 等. 蒸渗仪法和涡度相关法测定蒸散的比较[J]. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3 551-3 559.
WANG Weina, ZHANG Xiang, ZHANG Lifeng, et al. A comparison study of the evapotranspiration measured by lysimeter and eddy covariance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, 38(11): 3 551-3 559.
- [38] 李璐, 李俊, 同小娟, 等. 不同冠层阻力公式在玉米田蒸散模拟中的应用[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1 026-1 034.
LI Lu, LI Jun, TONG Xiaojuan, et al. Application of different canopy resistance models in summer maize evapotranspiration simulation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(8): 1 026-1 034.
- [39] 林馨贝, 周岗, 郑泽涛, 等. 不同冠层阻力模型在夏玉米蒸散发计算中的优化应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 28-35.
LIN Xinbei, ZHOU Gang, ZHENG Zetao, et al. Optimizing the canopy resistance models to calculate evapotranspiration from summer maize fields[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(6): 28-35.
- [40] HILLEL D. Encyclopedia of soils in the environment[M]. Salt Lake City, USA: Academic Press, 2004: 322-338.
- [41] 王健, 蔡焕杰, 康燕霞, 等. 夏玉米棵间土面蒸发与蒸发蒸腾比例研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 17-22.
WANG Jian, CAI Huanjie, KANG Yanxia, et al. Ratio of soil evaporation to the evapotranspiration for summer maize field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 17-22.

- [42] 石俊杰, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 稳定同位素法和涡度-微型蒸渗仪区分玉米田蒸散组分的比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 114-120.
SHI Junjie, GONG Daozhi, MEI Xurong, et al. Comparison of partitioning evapotranspiration composition in maize field using stable isotope and eddy covariance-microlysimeter methods[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(20): 114-120.
- [43] GAO X, GU F X, GONG D Z, et al. Comparison of three evapotranspiration models in a rain-fed spring maize field in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Agricultural Meteorology, 2020, 76(4): 155-163.
- [44] 黄超, 刘战东, 赵彝, 等. 不同产量水平下夏玉米光合及耗水特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(12): 19-28.
HUANG Chao, LIU Zhandong, ZHAO Ben, et al. Study on photosynthesis and water consumption characteristics of summer maize under different yield levels[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(12): 19-28.
- [45] 李霞, 张吉旺, 任佰朝, 等. 冬小麦-夏玉米播前耕作对夏玉米叶片衰老特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1397-1403.
LI Xia, ZHANG Jiawang, REN Baizhao, et al. Effects of tillage at pre-planting of winter wheat and summer maize on leaf senescence of summer maize[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1397-1403.
- [46] 党红凯, 李伟, 曹彩云, 等. 乳熟后灌溉对夏玉米水分利用效率及干物质转运的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 131-138.
DANG Hongkai, LI Wei, CAO Caiyun, et al. Effects of late milk irrigation on water use efficiency and dry matter distribution of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 131-138.

Effect of Lodging on Evapotranspiration of Summer Maize at Milk Ripening Stage

PENG Jiyong^{1,2}, HAN Yaojie^{1,2}, LI Shuyan^{1,2*}, FANG Wensong^{1,2}

(1. CMA Henan Agrometeorological Support and Applied Technique Key Laboratory, Zhengzhou 450003, China;

2. Henan Institute of Meteorological Science, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: 【Objective】 Strong winds in summer often result in lodging stress to summer maize in central China. The purpose of this paper is to evaluate experimentally how the lodging affects evapotranspiration from a maize field.

【Method】 The analysis was based on a dataset collected on 25 August 2016 after a strong wind hit Zhengzhou agrometeorological station. Using the Penman-Monteith (P-M) model, meteorological and crop data, as well as vorticity measured in 2017 (a normal year), we calculated the evapotranspiration and optimized the model parameters to fit the P-M model to the measured data in 2017. Using the P-M model and the calibrated parameters and field-survey data, we estimated evapotranspiration from the summer maize field without any lodging as the control (P-M_N). The reduced evapotranspiration (P-M_L) due to the lodging in 2016 was estimated using field survey-plant data. **【Result】** The evapotranspiration calculated without lodging agreed well with the measured data, with an absolute error of 0.005 mm/30 min, a relative error of 10.7%, and root mean square error and consistency index being 0.019 and 0.98 respectively. For the lodged maize field, the absolute and relative errors between the calculated and measured evapotranspiration were 0.002 mm/30 min and 2.9%, respectively, and the root mean square error and the consistency index were 0.001 and 0.98 respectively.

【Conclusion】 Maize lodging at milk stage due to strong winds significantly reduced its evapotranspiration. Results calculated using the P-M model showed that the lodging reduced daily evapotranspiration by 0.68 mm, a 18.3% reduction compared to the control. The reduced daily average evapotranspiration in the early stage of the lodging was 20.6% (0.99 mm), while in the later stage it decreased to 0.42 mm, 14.8% down compared to the control.

Key words: summer maize; lodging; Penman-Monteith model; eddy covariance; simulation; evapotranspiration

责任编辑：赵宇龙