

夏玉米茎流速率变化规律及其影响因子研究

冯东雪, 刘海军, 高壮壮, 唐晓培

(北京师范大学水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:采用 FLOW32-1K 包裹式茎流计测量茎流速率, 分析 2018 年夏玉米(郑单 958)蒸腾量(本研究采用茎流)与气象因子, 包括净辐射、温度、饱和水汽压差(VPD)、风速的相关性, 并以 Pearson 相关性系数进行评价。结果显示: 试验期间土壤含水率保持在田间持水率的 70%~80%, 得出在玉米不受水分胁迫条件下, 茎流速率与净辐射、温度、VPD、风速均呈线性相关, 相关系数分别为 0.754、0.622、0.674、0.443, 表明太阳辐射与茎流速率关系最密切, 与风速关系最小。在夏玉米生长吐丝期、灌浆期和成熟期, 晴天时茎流速率日变化为单峰曲线, 早上 5:00 茎流开始启动, 随后茎流速率逐渐上升, 在 11:00 茎流速率达到峰值 $74.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$, 随后又降低, 一般在 21:00 降低为 0.0。雨天时由于大气辐射不稳定, 表现为多峰曲线, 且茎流速率波动较大 ($0 \sim 37.7 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$)。经计算夏玉米在灌浆生长期叶面积指数稳定在 4.4, 这时基础作物系数 K_{cb} 为 1.0, 9 月 10 日后显著下降, 至收获时(10 月 1 日)降低至 0.55。

关键词: 夏玉米; 茎流速率; 气象因子; 作物系数

中图分类号: S513; Q945.18 **文献标志码:** A

Study on the variation of sap flow rate and its influencing factors in summer maize growth season

FENG Dongxue, LIU Haijun, GAO Zhuangzhuang, TANG Xiaopei

(Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: FLOW32-1K wrapped sap-flowmeter was used to measure sap-flow rate, and the correlation between transpiration of 2018 summer maize (Zhengdan958) (sap-flow was used in this study) and meteorological factors, including net radiation, temperature, saturation water pressure difference (VPD), and wind speed, were analyzed and evaluated with Pearson correlation coefficient. The results showed that the soil moisture content was maintained at 70%~80% of the field water retention rate during the experiment, and it was concluded that under the condition that maize was not subjected to water stress, the sap flow rate was linearly correlated with the net radiation, temperature, VPD and wind speed, and the correlation coefficients were 0.754, 0.622, 0.674 and 0.443, respectively, indicating that solar radiation had the closest relationship with the sap flow rate and the smallest relationship with wind speed. In the growth period from flowering to maturing stages, the daily sap flow curve on sunny days showed a single peak. It started at 5:00 AM, then increased and reached the peak value of $74.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ at 11:00 AM, after that decreased and lastly dropped to 0.0 at 21:00. In rainy days, the curve had multiple peaks, and the sap flow rate fluctuated greatly ($0 \sim 37.7 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$), mainly due to the instability of climate condition. During the grain-filling stage, the leaf area index was approximate 4.4, and the basic crop coefficient K_{cb} , the ratio of transpiration to reference evapotranspiration was 1.0, then gradually decreased to 0.55 at harvest.

Keywords: summer maize; sap flow rate; meteorological factor; crop coefficient

水是植物体的有机组成部分,植物从土壤中吸收 99% 以上的水分,通过蒸腾作用进入到大气中,只有 1% 贮存在植物体内,为植物生长和生理活动提供需求^[1]。植物蒸腾作用是土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 水分迁移的主要组成部分,直接影响植物生理生态过程^[2]。植物叶片在蒸腾作用下消耗水分,促使植物根系从土壤中吸收水分,由于植物根系和茎之间存在水势差,水分由水势高的根系运移到水势低的茎秆,由茎传递给叶片,叶片与大气之间存在气压差,水最终由叶片通过蒸腾作用释放到大气中。在不考虑植株体内水分变化情况下,茎流速率即为蒸腾速率,因此茎流速率可以用来表征植物体内水分生理情况^[3-4]。

植株茎流测量方法主要有热脉冲方法、热平衡方法及热扩散方法等^[5]。其中热平衡法具有不损伤作物、可长期定点稳定测量茎流等优点,得到了广泛应用。孙宏勇等^[6]在河北省栾城实验站通过大型蒸渗仪和 Micro-Lysimeter 测定夏玉米作物蒸腾和棵间蒸发,发现在夏玉米整个生育时期,作物蒸腾占总耗水量的 63.99%。于文颖等^[7]对不同干旱胁迫下的春玉米进行观测,发现干旱胁迫会导致玉米茎流速率下降。杜斌等^[8]研究不同含水层对茎流速率的影响并基于人工神经网络和主成分回归建立茎流估算模型,发现人工神经网络模型对玉米茎流速率模拟精度较高,10~20 cm 与 20~30 cm 土壤含水层与茎流速率关系显著。研究发现复杂的环境会导致茎流变化,影响因素包括温度、相对湿度、饱和水汽压、大气辐射、降雨等^[9]。王力等^[10]分别从小时尺度、日尺度、月尺度对茎流速率与气象因子关系进行显著性分析,小时尺度上水汽压差与茎流速率关系最显著,日尺度上水汽压差和温度与茎流速率关系显著,月尺度上苹果树茎流速率 8 月>7 月>6 月>9 月>5 月,仅地表温度与茎流速率关系显著。可以看出在不同作物、不同环境和不同

尺度条件下,茎流速率与气象条件的关系不完全相同。

夏玉米是华北地区的主要作物,其蒸散量一般在 300~400 mm^[11]。夏玉米对水分比较敏感,水分亏缺会显著影响其产量,准确估算玉米蒸散量,制定合理灌溉制度,是保证高产稳产的关键。本文以夏玉米为研究对象,利用包裹式茎流计对玉米茎流进行连续观测,分析茎流速率和气象因子的关系,计算基础作物系数 (K_{cb})。研究结果为准确测算作物蒸腾量、制定灌溉计划等提供方法和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于河北省邢台市宁晋县大曹庄国家级种子试验站 (114°55'40.59"E, 37°29'49.25"N), 试验区地势平坦, 土质肥沃, 地力较匀, 平均海拔 26 m, 属暖温带亚湿润季风气候。年均温度在 12~14℃。多年平均降雨量 465.2 mm, 2018 年降雨量为 559.9 mm, 大于多年平均降雨量。全年约 70% 的降雨分布于夏季, 无霜期约 200 d。试验区土壤为粉壤土, 其机械组成部分为粘粒 13%、粉粒 59%、砂粒 27%。试验田 0~20 cm 土壤田间持水量为 36.0 cm³·cm⁻³, 容重 1.5 g·cm⁻³; 20~60 cm 土壤田间持水量为 37.0 cm³·cm⁻³, 容重 1.4 g·cm⁻³。

1.2 试验设计

试验研究对象为夏玉米, 品种为郑单 958, 播种面积 200 m×60 m, 行距 0.6 m。2018 年 6 月 10 日进行播种, 10 月 3 日收获。施加复合肥奥林丹 600 kg·hm⁻² (N:P₂O₅:K₂O 为 18:22:5), 整个生育期共降雨 420 mm。玉米生长初期降雨量较少 (64.8 mm), 为了补充土壤水分保证玉米正常生长, 根据当地灌溉经验, 于 6 月 20 日、7 月 6 日、7 月 24 日采用喷灌进行灌溉, 灌溉量分别为 90、45、90 mm (图 1)。夏玉米生长早期茎秆比较脆弱, 因此从 2018 年

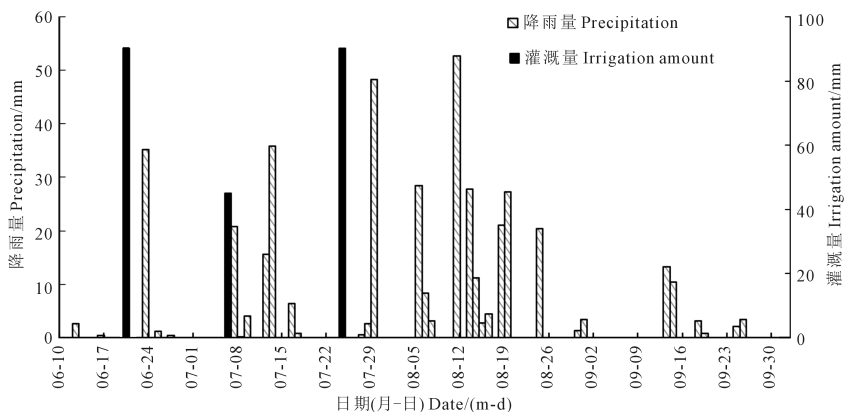


图 1 玉米全生育期降雨量与灌溉量

Fig.1 Rainfall and irrigation amount during the whole growth period of maize

8月10日—10月1日进行茎流观测,期间降雨205.2 mm。

1.3 研究方法

试验所用仪器为美国 Dynamax 公司 FLOW32-1K 包裹式茎流计,选取 8 株长势均匀、无病虫害的玉米,保证距离地面第 2 节至第 3 节玉米茎秆裸露在外面,将茎流计探头放在裸露的茎秆上,用数据采集器 CR1000 每 10 s 进行茎流数据采集,取茎流平均数据进行茎流日变化、不同天气茎流变化、茎流与气象因子关系的分析。叶面积数据由人工测量,取叶子最长和最宽值,通过长与宽乘积获得叶面积,每周采集 1 次,并计算叶面积指数(LAI)。单株叶面积(m^2) = 长(m) × 宽(m) × 系数(系数为 0.75),叶面积指数(LAI) = 单株叶面积(m^2) × 单位土地面积上的株数/单位土地面积(m^2)。利用 Trime 系统对 0~180 cm 的土壤进行土壤含水率测量,每 20 cm 为 1 层,每 7 d 测量 1 次。

气象数据采集源自试验站设立的小型气象站,测量指标包括净辐射、空气温度、相对湿度、降雨量、风速。参考作物蒸散发 ET_0 根据 FAO 56 的 Penman-Monteith 公式计算,其公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_{hr} + 273} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中, ET_0 为参考作物蒸散发($mm \cdot h^{-1}$); R_n 为作物表面净辐射($MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); G 为土壤热通量($MJ \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$); T_{hr} 为小时平均气温($^{\circ}C$); Δ 为小时平均气温下的饱和水汽压曲线斜率($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$); γ 为湿

度计常数($kPa \cdot ^{\circ}C^{-1}$); u_2 为小时平均风速($m \cdot s^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa), e_a 为实际水汽压(kPa)。

1.4 数据处理

利用 EXCEL 和 SPSS 18.0 进行数据整理和分析。

2 结果与分析

2.1 玉米叶面积指数与土壤含水率变化过程

通过对夏玉米叶面积指数进行观测,发现在 8 月 13 日—9 月 10 日期间,作物叶面积指数趋于稳定,仅存在小幅波动,波动范围为 ± 0.2 ,因叶面积为人工测量,存在一定误差,波动可以忽略不计(图 2)。试验期间 0~60 cm 土层土壤含水率变化规律大体一致,土壤含水率变化较慢,且相对变化程度较小。0~20 cm 土壤含水率在 $0.25 \sim 0.30 cm^3 \cdot cm^{-3}$ 范围内动态变化。20~60 cm 土壤含水率在 $0.26 \sim 0.33 cm^3 \cdot cm^{-3}$ 范围内动态变化。试验期间土壤含水率一直保持在田间持水量的 70%~80%,可以看出土壤水分充足,夏玉米生长和蒸腾没有受到土壤水分胁迫(表 1)。

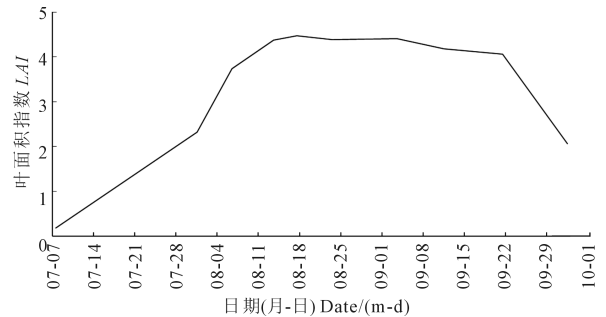


图 2 玉米生育期叶面积指数变化

Fig.2 Changes of leaf area index in maize growth period

表 1 不同土层土壤体积含水率变化

Table 1 Changes of volumetric soil moisture contents in different soil layers

日期 (月-日) Date (m-d)	0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm	
	土壤体积含水率 Volume moisture content/%	占田间持水量 的百分比 A percentage of field moisture capacity/%	土壤体积含水率 Volume moisture content/%	占田间持水量 的百分比 A percentage of field moisture capacity/%	土壤体积含水率 Volume moisture content/%	占田间持水量 的百分比 A percentage of field moisture capacity/%
07-21	26.8	74.5	27.8	74.8	31.2	84.6
07-25	29.6	82.3	28.0	75.6	31.4	85.2
08-07	27.3	75.8	27.7	74.6	31.0	83.9
08-13	29.6	82.2	29.6	79.7	32.7	88.6
08-23	29.6	82.3	29.3	79.1	32.5	87.9
09-04	26.7	74.1	27.9	75.3	29.8	80.9
09-11	25.1	70.0	25.9	70.1	27.2	73.8
09-21	25.2	70.1	26.2	70.7	27.3	74.0

2.2 玉米茎流日累积量变化过程

对茎流速率日变化进行分析,其中茎流数据为每 0.5 h 采集 1 次,日数据将每日共计 48 个数据累计求和,获得日茎流速率。研究区 8—9 月是夏玉米抽雄和灌浆期,这时玉米叶面积指数达到最大(4.47),气象蒸发力也较大,是玉米需水高峰期。因此本研究对玉米吐丝、灌浆、成熟生育期的日茎流进行观测,采用 8 月 11—13 日、17 日、20 日—21 日、8 月 24—29 日、9 月 2 日—9 月 11 日、9 月 15 日—9 月 21 日、9 月 24 日—10 月 1 日共 36 d 数据进行绘图(图 3)。试验期间测量得到单株日茎流量均值为 $502 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,最大单株茎流量为 $810 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。本试验中 8 月 15 日—9 月 8 日(吐丝期、灌浆期)茎流速率较大,到了 9 月 10 日之后(成熟期)茎流速率下降,主要是玉米在抽雄期和灌浆期叶面积指数较大(约 4.06~4.47),蒸腾蒸散量大。随着玉米成熟,叶子营养物质向籽粒转移、叶片活性降低、蒸腾功能减弱,且叶片出现枯萎、脱落的情况,造成叶面积指数降低,到 10 月 2 日收获前达到 2.06,使得蒸腾速率减小,茎流速率降低。

2.3 不同天气下玉米茎流速率日变化

基于实测茎流数据,本试验分别选取了典型天

气(晴天、雨天和多云)条件下茎流速率日变化过程(图 4)。可以看出晴天时茎流速率一般表现为单峰曲线,呈现先增大后减小的趋势,最大单株茎流速率为 $74.5 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从早上 5:00 点开始茎流速率逐渐增加,到 11:00 达到峰值,随后变化较小,15:00 以后显著下降。多云天气时茎流速率出现多个峰值,最大单株茎流速率为 $39.9 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$,15:00 后茎流速率开始下降,19:00 时茎流速率降低为 0。雨天受风速和辐射等多因素影响,茎流速率呈现不规则变化曲线,茎流启动时间延后,从早上 7:00 茎流速率开始缓慢增加,期间出现多次骤升骤降,最终降为 0。雨天茎流速率与晴天相比波动较大,没有特定规律。

2.4 玉米茎流速率与气象因子的关系

在土壤水分供给充足条件下,植物蒸腾主要受到气象因素影响。图 5 显示了玉米吐丝期、灌浆期、成熟期 5 个典型晴天(8 月 12 日、8 月 17 日、9 月 12 日、9 月 23 日、10 月 1 日)时,茎流速率、净辐射、饱和水汽压差(VPD)、温度、风速的日变化过程比较。可以看出茎流速率与 4 种气象因子呈正相关,变化趋势基本一致。从图 5a 看出茎流速率在每天 11:00~14:00 期间达到峰值,随着净辐射增强,茎流

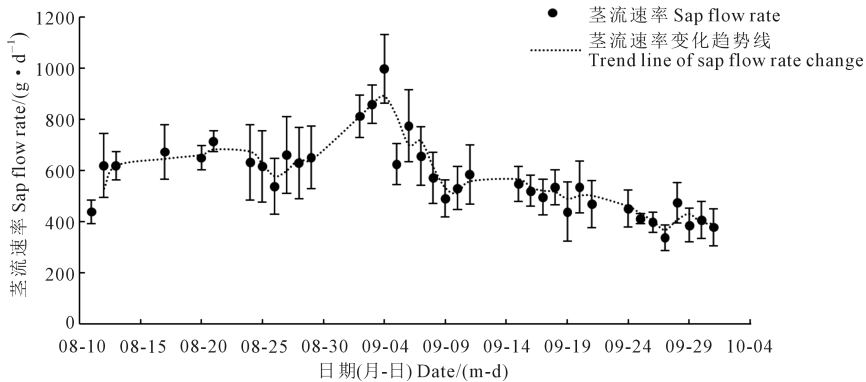


图 3 玉米茎流速率逐日变化

Fig.3 Day-by-day variation of maize sap flow rate

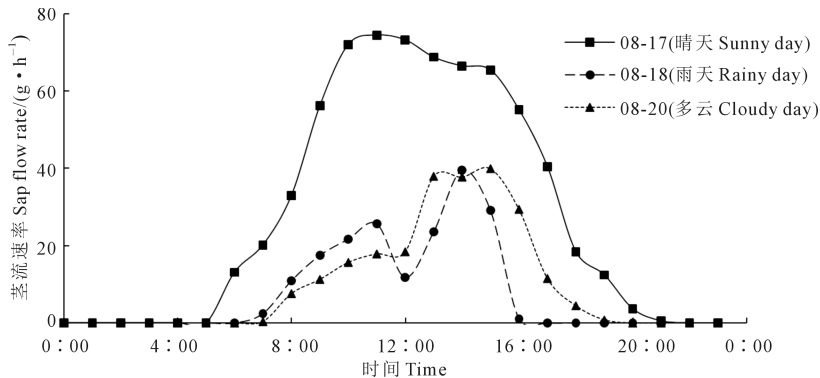


图 4 玉米在晴天、雨天、多云下的茎流速率日变化

Fig.4 The diurnal variation of stem flow rate in corn under sunny, rainy and cloudy day

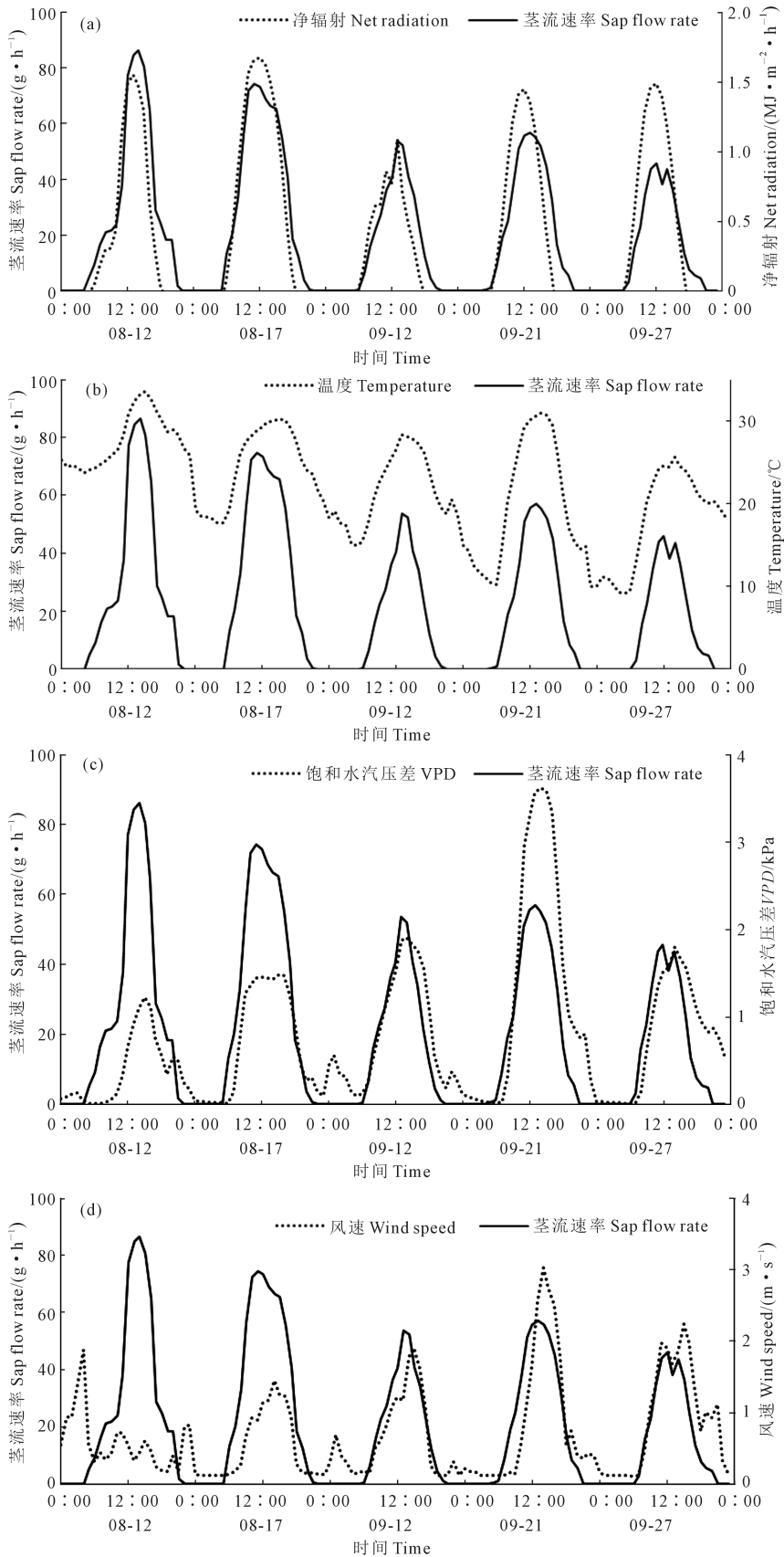


图 5 玉米生育期 5 个典型晴天的茎流速率与气象因子变化情况

Fig.5 The changes of sap flow rate and meteorological factors in five typical sunny days of maize growth period

速率增加,当净辐射减弱时,茎流速率减小。茎流速率滞后净辐射 1 h 出现,这是由于随着净辐射增强,作物需要一定时间调节自身系统,适应净辐射变化。如图 5b 茎流速率与温度不同步,茎流速率早于温度 1 h 左右出现,但变化趋势一样,随着温度升高而升高。饱和水汽压差 (VPD) 与茎流速率也存在不同步现象(图 5c),较茎流速率滞后 1 h,但二者变化趋势相同。风速对茎流速率呈现出正相关变化趋势(图 5d),茎流速率随着风速增加而增加。但在强风天气下,会导致叶片气孔开放程度降低,降低茎流速率。在玉米生育期后期,作物各器官均已完善,此时可利用观测的茎流速率作为作物蒸腾的参考依据。

利用 SPSS 对茎流数据进行相关性及回归性分析,应用了 30 d 的数据(每个变量为 720 个数据,5 个变量共 3600 个数据)进行分析。进一步分析各气象因子与茎流速率的相关性,结果列于表 2。净辐射、温度、VPD、风速的 Pearson 相关性分别为 0.754、0.622、0.674、0.443,因此太阳辐射对茎流速率影响最为显著,VPD 次之,风速与茎流速率相关性最小。基于小时数据,建立了茎流速率与气象要素的关系(表 3),可以看出净辐射、温度、VPD、风速与茎流速率数据拟合较好, F 检验达到显著性水平, $F>3.84$ 回归方程有效(F 值为回归均方和/残差均方和),相关系数为 0.842,均达到极显著水平,因此

净辐射、温度、VPD、风速均为影响茎流速率的主要影响因子。

2.5 茎流速率与 ET_0 的关系

根据 FAO 56 的 Penman-Monteith 公式计算参考作物蒸散发 ET_0 [12],并与茎流速率日变化过程比对(图 6)。 ET_0 与茎流速率日变化趋势相同,白天 ET_0 增长快速,茎流速率也随之增加。到了夜晚夏玉米蒸散发减弱、茎流速率变慢。茎流速率一般滞后蒸腾速率 1h,主要是当蒸腾发生时作物需要一定时间将信号从叶片传递给根部,在根系-叶片水势差的驱动下,根部吸水并将水由茎传递到叶片形成茎流,故存在一定时间差。茎流速率滞后于蒸腾速率的现象已经在苹果树、枣树 [13-14] 等作物上被发现。

作物蒸腾量(Tr)可通过公式 $Tr = K_{cb} \times ET_0$ 计算得出,其中 K_{cb} 为基础作物系数,反映了作物本身的耗水能量。本研究计算了茎流速率与参考作物蒸散发 ET_0 的比值,得到了基础作物系数 K_{cb} (图 7)。当叶面积指数在 4.38~4.47 时, K_{cb} 平均值在 1.0 左右。9 月 21 日以后,随着叶片脱落、萎蔫,叶面积指数显著下降,这时蒸腾迅速减弱,基础作物系数 K_{cb} 也从 0.85 降低到 0.55。FAO 56 中给出玉米 K_{cb} 推荐值生长初期为 0.15,生长中期为 1.15,生长后期为 0.50。可以看出,在生长中期本研究得到的 K_{cb} 要小于 FAO 56 推荐值。由于 FAO 56 推荐值是考虑了

表 2 茎流速率与气象因子相关性

Table 2 Correlation between sap flow rate and meteorological factors

气象因子 Meteorological factor	显著性 Significance	Pearson 相关性 Pearson correlation	样本数 Sample size
净辐射 Net radiance	0.000	0.754 **	720
温度 Temperature	0.000	0.622 **	720
饱和水汽压差 VPD	0.000	0.674 **	720
风速 Wind speed	0.000	0.443 **	720

注: ** 为在 $P<0.01$ 水平上显著相关。

Note: ** means significantly correlated at the level of $P<0.01$.

表 3 茎流速率与气象因子回归性

Table 3 Regression of sap flow rate and meteorological factors

气象因子 Meteorological factor	相关系数 Correlation coefficient	F	显著性 Significance
净辐射 Net radiance	0.754	945	0.000
净辐射、饱和水汽压差 Net radiation, VPD	0.832	805	0.000
净辐射、饱和水汽压差、温度 Net radiation, VPD, temperature	0.838	561	0.000
净辐射、饱和水汽压差、温度、风速 Net radiation, VPD, temperature, wind speed	0.842	434	0.000

注: $F>3.84$ 回归方程有效,否则方程为不良方程。

Note: $F>3.84$ means that regression equation is valid, otherwise, the equation is not correlated.

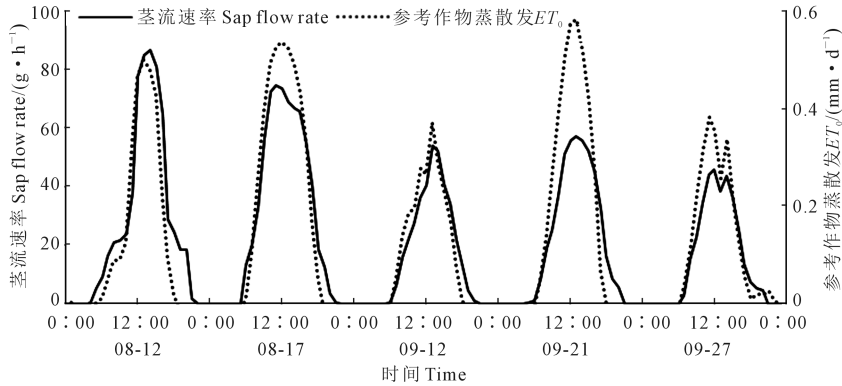


图 6 玉米生育期 5 个典型晴天的茎流速率与 ET_0 变化情况

Fig.6 The changes of sap flow rate and ET_0 in 5 typical sunny days during maize growth period

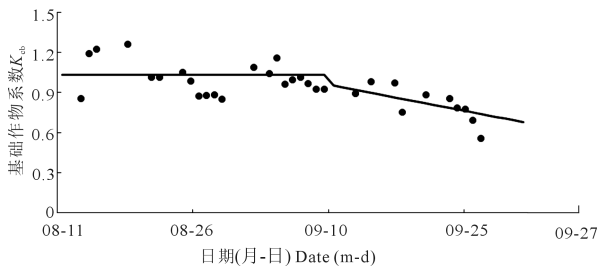


图 7 茎流观测期间基础作物系数 K_{cb} 变化过程

Fig.7 Variation process of basic crop coefficient K_{cb} during sap flow observation

全球的研究结果,是一个能够代表全球玉米生长特性的值,而对于不同种植区域,则要根据实际气候特点和种植特征进行调整。

3 讨论

作物蒸腾量大小不仅由自身生理特性所决定,如叶面积指数、气孔导度、作物品种等,还与周围气象因子、土壤水分息息相关。本研究是在水分充足情况下进行,故土壤水分不会对茎流速率产生影响。Adiku 等^[15]发现当土壤水分受到限制时,植物继续吸水能力将取决于其固有特性,如耐旱性、气孔开放程度。作物茎流速率也将受到抑制,同时叶面积指数越高的玉米对水分需求越高,这点与本研究得到的结果一致,夏玉米进入生长中期叶面积指数逐渐升高,茎流速率加快,作物需水量快速增加,是作物需水高峰期。随着作物进入成熟期,叶子开始发黄、脱落,叶面积指数下降,茎流速率也逐渐降低。大量研究发现树木茎流速率呈现昼高夜低的规律,到了夜晚大气辐射减弱,温度降低,树干茎流速率减小,夜晚仍保持着微弱的茎流变化^[16-18]。夏玉米也有相似的变化规律,早上 5:00~7:00 茎流速率开始启动,13:00~15:00 茎流速

率达到峰值,但在夜晚茎流速率逐渐降低,直至为 0。不同天气下,茎流速率表现也不同,晴天时茎流速率较为规律,表现为昼高夜低。但在雨天和多云情况下,由于净辐射不稳定,茎流速率波动较大,没有固定规律,这与其他学者的研究结果一致^[19-21]。净辐射、温度、VPD、风速都是影响夏玉米茎流速率的主要因子^[16, 22-23],其中净辐射与茎流速率相关性最强,茎流速率相较于净辐射延后 1 h 达到峰值,是因为当外界净辐射发生变化时,作物内部需要一定时间调节来适应这种变化,故二者出现了时间差^[24]。气象因子不是单一影响茎流速率,而是各个因子相互作用共同影响着茎流速率。随着净辐射增强,温度逐渐增加,VPD 也随之变大,造成茎流速率变大。本研究同时计算了参考作物蒸散发 ET_0 ,将其与夏玉米茎流速率做对比,发现茎流速率与参考作物蒸散发 ET_0 变化趋势一致,但出现了茎流滞后现象,约滞后 1 h。基础作物系数 K_{cb} 在夏玉米生长中期达到最大值,随后稳定在 1.00 左右,在生长后期开始下降^[25]。

茎流速率是反映作物体内水分状况的重要生理指标,通过对夏玉米茎流速率的观测可以较好地预测作物水分需求,监测作物水分状况,为今后田间管理、灌水制度提供指导。本研究分析了夏玉米生长中、后期茎流速率与气象因子的变化规律以及茎流速率与参考作物蒸散发 ET_0 的关系,并确定了基础作物系数 K_{cb} ,在今后研究中应对夏玉米生长初期进一步进行观测和深入研究。

4 结论

1) 夏玉米灌浆期茎流量较大,最大单株茎流量为 $810 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$,到了成熟期茎流速率下降。收获前(10月2日)单株茎流量为 $379.75 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

(下转第 198 页)