

东北春玉米单株茎流变化规律及其农田尺度提升方法

黄茜, 杨伟才, 毛晓敏^{*}

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 农业农村部作物高效用水武威科学观测实验站, 武威 733000)

摘要: 为揭示春玉米单株茎流速率规律, 明确单株茎流提升至群体蒸腾的尺度转换因子, 2017 和 2018 年连续在东北典型黑土区开展了春玉米田间试验, 对春玉米灌浆期内茎流速率、气象数据、棵间蒸发及土壤剖面含水率进行观测和分析。结果表明: 春玉米茎流速率有明显的昼夜变化规律, 降雨对玉米茎流有较强的抑制作用, 降雨后茎流速率明显升高; 在晴、阴、雨天气情况下玉米白天茎流差异较大, 且在阴雨天气情况下, 茎流曲线呈多峰曲线, 峰值较低。玉米茎流的变化是各种环境因素综合作用的结果, 其中茎流速率与空气温度、光合有效辐射、相对湿度间相关系数的绝对值皆在 0.8 以上, 表明他们是影响东北黑土区茎流速率的主要环境因素。以茎粗、茎干截面面积、叶面积为尺度转换因子将单株茎流尺度提升得到春玉米农田尺度群体蒸腾量, 将 2 a 灌浆期春玉米群体蒸腾量与棵间蒸发之和, 与水量平衡法计算得到的蒸发蒸腾量进行比较, 误差均在 20% 以内。3 种尺度提升方法和水量平衡法得到 2 a 春玉米灌浆期内日均蒸发蒸腾量分别在 4.22~4.78、3.91~4.56 mm/d 范围内。其中以叶面积为尺度转换因子计算的蒸发蒸腾量与水量平衡法的结果最为接近, 相对误差在 5% 左右, 表明东北高寒黑土区春玉米农田适合采用叶面积作为单株向农田尺度提升的转换因子。

关键词: 蒸发蒸腾量; 蒸腾; 蒸发; 春玉米; 茎流速率; 尺度提升; 支持向量机回归

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.012

中图分类号: P426.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0094-09

黄茜, 杨伟才, 毛晓敏. 东北春玉米单株茎流变化规律及其农田尺度提升方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(16): 94-102.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.012 <http://www.tcsae.org>

Huang Xi, Yang Weicai, Mao Xiaomin. Variations of sap flow rate and its farmland scale improving method for spring maize in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 94-102. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.012 <http://www.tcsae.org>

0 引言

黑龙江省作为玉米的主产区之一, 2018 年玉米种植面积 6.318×10^6 hm², 占全省粮食作物种植面积的 44.45%^[1]。水是影响玉米产量的主要因素, 而玉米耗水主要为蒸腾耗水, 为此研究玉米茎流变化规律, 明确单株茎流提升至群体蒸腾的尺度转换因子, 对于准确掌握春玉米蒸腾耗水规律, 科学指导灌溉, 实现玉米高产具有重要意义。

作物蒸发蒸腾量 (Evapotranspiration, ET) 包括作物蒸腾 (Transpiration, T) 和棵间蒸发 (Evaporation, E) 2 个部分。ET 常见的测定方法有蒸渗仪法^[2]、涡度相关法^[3-5]、波文比法^[6-7]、区域遥感法^[8-9]等, 但以上方法都不能直接将 T 、 E 分开, 不利于精准灌溉和提高作物水分利用效率。茎流计和微型蒸渗仪可直接分开测量计算 T 、 E , 大量研究结果表明基于热平衡原理的茎流计测量作物蒸腾是可行的, 且精度较高^[10-14]。Manderscheid 等^[15]探究了不同 CO₂ 浓度在不同供水条件下玉米茎流日

变化和季节性变化规律。冯东雪等^[16]探究了不同天气情况下夏玉米茎流速率的日变化规律。时荣超等^[17]分析了不同种植密度下玉米茎流的日变化。Jiang 等^[10]比较了制种玉米父本、母本茎流日变化的差异。Feng 等^[18]比较了覆膜与无覆膜处理之间玉米茎流的日变化和季节性变化。Ismanov 等^[19]探究了大豆茎流在不同生育期、不同土壤水分下的变化规律。在此基础上, 国内外学者们探究了植物茎流与环境等因素的相关性。Zhao 等^[20]分析了影响玉米茎流速率的主要气象因子为净辐射、气温、水汽压差 (Vapor Pressure Deficit, VPD)、风速, 并以净辐射和气温为因变量建立了玉米茎流的经验计算模型。张川等^[21]研究发现温室黄瓜茎流速率与空气温度、太阳辐射和净辐射呈极显著正相关, 与相对湿度呈极显著负相关, 表明空气温度、太阳辐射、净辐射和相对湿度是影响黄瓜茎流速率的主要因素。Deng 等^[22]对 4 种灌木的夜晚茎流速率进行观测, 结果表明降水后可促进灌木夜间的茎流速率, VPD、平均气温和风速与夜间茎流显著相关, 此外树干直径也会影响夜间茎流的大小。茎流计仅能获得单株茎流量, 为掌握农田群体作物的蒸腾耗水规律, 需要将单株茎流进行尺度提升。在这个由单株到群体的尺度提升过程中需确定尺度转换因子, 常见的尺度转换因子有叶面积、茎干截面面积、种植密度、茎粗等^[23-26]。

目前, 有关单株茎流到群体蒸腾尺度提升的研究对象大多为树木, 对东北地区单株玉米茎流的尺度提升的研究较少。为此, 本文通过采用 FLOW32-1K 包裹式茎流

收稿日期: 2020-04-05 修订日期: 2020-06-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YF040106-3); 国家自然科学基金基金项目 (51679234)

作者简介: 黄茜, 主要从事水文水资源方面的研究。

Email: 18227590596@163.com

^{*}通信作者: 毛晓敏, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源与农业水土工程研究。Email: maoxiaomin@cau.edu.cn

计和微型蒸渗桶测得连续 2 a 春玉米需水关键期的茎流数据和棵间蒸发值, 探究茎流速率在降雨前后、不同天气条件下的变化规律及差异, 并解析茎流速率与环境因素之间的相关关系及变化特征, 通过比较不同尺度转换因子计算农田尺度春玉米群体的蒸腾量, 确定适合典型东北高寒黑土区单株春玉米茎流的尺度转换因子, 进一步探究春玉米在灌浆期内 E 、 T 、 ET 的变化规律, 为该地区精准灌溉提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年和 2018 年的 5—10 月, 在黑龙江省齐齐哈尔市克山县北联镇沈阳空军后勤部农场 ($125^{\circ}36'E$, $48^{\circ}15'N$) 进行, 多年平均气温 $2.4^{\circ}C$, 多年降水量 500 mm, 多年平均风速 4 m/s。土壤质地为粉壤土, 1 m 土层平均田间持水量为 $0.41\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 饱和含水率为 $0.54\text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 干容重为 $1.23\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

1.2 试验设计

本试验玉米品种为瑞福尔 1 号, 种植模式为 1.1 m 大垄双行南北种植, 株距为 20 cm, 灌溉方式为滴灌, 滴灌方式为“一带双行”, 滴灌带毛管间距 110 cm, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 1.38 L/h。根据当地施肥方案一次性施足底肥, 不追肥, 由二铵、硫酸钾和尿素混合拌匀施入, 各复合肥施入质量比例为 5.5:14:5, 其中二铵含氮量 $\geq 18\%$, 含磷量 $\geq 46\%$; 硫酸钾含钾量 $\geq 41\%$; 尿素含氮量 $\geq 46.4\%$ 。经过计算施入纯氮量为 $200\text{ kg}/\text{hm}^2$, 纯磷量为 $60\text{ kg}/\text{hm}^2$, 纯钾量为 $49.5\text{ kg}/\text{hm}^2$ 。2017 年、2018 年试验为保证土壤水分保持在较高水平, 无水分胁迫产生, 设置灌溉下限为田间持水量 (Field Capacity, FC) 的 80%, 上限为 100%FC。2017 年、2018 年春玉米播种日期均为 5 月 3 日, 收获日期分别为 10 月 2 日、9 月 18 日, 2018 年因在玉米生育末期受霜冻天气的影响, 玉米提前收获。

试验采用水表作为量水标度, 每次灌水量根据灌水上下限、计划湿润层深度和小区灌溉面积计算, 单次灌水量^[27]依据以下公式计算:

$$Q = \frac{(\theta_1 - \theta_2)hS\alpha}{100} \quad (1)$$

式中 Q 为灌水量, m^3 ; θ_1 为灌水上限, cm^3/cm^3 ; θ_2 为灌水下限, cm^3/cm^3 ; h 为计划湿润层深度, cm ; α 为土壤湿润比; S 为试验小区面积, m^2 。取生育中期的 h 为 40 cm, 根据滴灌带滴头流速和流量取 α 为 0.6。

根据水表读数和式 (1) 计算实际灌水量, 2017 年 7 月 20 日、7 月 22 日、7 月 25 日分别灌水 16.00、16.50、18.37 mm。由于 2018 年在玉米整个生育期内降雨量丰富, 土壤含水率保持在较高水平, 所以未灌水。

1.3 试验监测指标与方法

1.3.1 气象数据

在试验田附近安装气象站实时监测, 气象站是由锦州阳光气象科技有限公司生产的 PC-4 型自动气象站, 仪器安装高度为 2 m, 每 15 min 记录 1 次, 记录玉米整个

生育期内的太阳辐射、大气温度、大气湿度、降雨等气象参数值。

有效降雨量采用经验公式计算^[28]

$$P_e = \begin{cases} P_r, & P_r < 50 \\ 0.75P_r, & P_r \geq 50 \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_e 为有效降雨量, mm; P_r 为降雨量, mm。

1.3.2 土壤水分

采用 EM50 (北京力高泰科技有限公司, 精度为 0.1%) 测定土壤剖面的水分, 测定的深度为 1 m, 每 20 cm 土层安装 1 个传感器, 取其平均值作为该小区的土壤含水率。采用土钻取土烘干法结合土壤容重对 EM50 采集的数据进行校正。

1.3.3 作物生长指标

从苗期开始, 每隔 10 d 在试验小区随机选取具有代表性的 6 株玉米, 带回室内测量作物生长指标, 包括茎粗和叶面积指数 (Leaf Area Index, LAI), 所有完全展开叶的长和宽, 用叶片的实际面积乘以修正系数 0.75 计算 LAI。

1.3.4 作物耗水量

作物耗水量的计算方法较多。为更可靠的进行作物耗水量的计算, 本文采用了以下 2 种方法。

1) 水量平衡法

根据农田水量平衡^[28]

$$ET = P_e + I + B - D - \Delta W - R \quad (3)$$

式中 P_e 为有效降雨量, mm; I 为灌水量, mm; B 为地下水补给量, mm; D 为深层渗漏量, mm; ΔW 为田间始末状态的土壤贮水量变化, mm; R 为地表径流, mm。因为试验田地势平坦, 2 a 作物生育期内未出现暴雨, 未观测到地表径流; 另外在试验田土壤质地随土层加深粉粒含量增高, 相当于在土壤深层形成一道隔水层, 深层渗漏可忽略不计, 又因为试验区地下水埋深较深, 因此未考虑地下水向作物根区的补给。

2) 微型蒸渗桶和茎流计实测法

本研究采用微型蒸渗桶 (微型蒸渗桶的外筒直径为 11 cm, 内筒直径为 10 cm, 高为 20 cm, 底部用塑料薄膜封住) 测定棵间蒸发, 微型蒸渗桶的材质为 PVC 管。采用基于热平衡原理的 FLOW32-1K 包裹式茎流计^[3,10,29] (北京力高泰科技有限公司, 精度为 1%) 测得蒸腾, 二者之和得到作物实际的蒸发蒸腾量。

每天晚上 07:00, 用精度为 0.01 g 的电子秤称质量, 记录数据, 每隔 7 d 微型蒸渗桶里面的原状土更换 1 次, 棵间蒸发^[30]由下式计算:

$$E = f \frac{10}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta M_i}{A\rho} \quad (4)$$

式中 E 为土壤棵间蒸发, mm/d; A 为微型蒸渗桶的横截面积, cm^2 , 本文横截面积为 78.5 cm^2 ; ΔM_i 为第 i 日和 $i-1$ 日的微型蒸渗桶质量差值, g; f 为裸土所占比例; N 为微型蒸渗桶重复数; ρ 为水的密度, g/cm^3 。

由于 2 a 春玉米灌浆期内降雨频率高, 微型蒸渗桶测得的棵间蒸发数据缺失较多, 本文利用支持向量机回归

算法 (Support Vector Regression, SVR), 建立了东北黑土区春玉米棵间蒸发预测模型, 对缺失的棵间蒸发值进行补充。SVR 应用于回归分析时, 其原理是找到一个最佳分类表面使所有训练样本与该分类面间的误差最小。SVR 是用代表性实例的子集 (即支持向量机) 而不是全部输入数据来构建预测模型, 从而避免了过拟合问题, 降低了对数据规模和数据分布的要求^[31]。

棵间蒸发需要的第 1 个条件是能量的供给, 主要为太阳辐射、气温, 第 2 个条件是水汽的输送, 主要取决于与水汽传输阻力相关的环境条件, 如风速、水汽压、气温、叶面积、土壤表面的湿润程度等^[32]。因此以 LAI、风速、1 m 土层平均土壤含水率、净辐射为输入变量, 微型蒸渗桶实测的蒸发值为输出变量构建 SVR 棵间蒸发的预测模型。以 2017 年的数据训练模型, 以 2018 年的数据验证模型。

玉米生长中期阶段 (2017 年 8 月 3 日—9 月 7 日, 2018 年 8 月 6 日—9 月 7 日) 测定春玉米的茎流速率。茎流计安装方法: 1) 选取具有代表性相隔一定距离的玉米植株, 测量其叶面积, 将传感器随机包裹在春玉米第 3 节茎秆位置上, 包裹时需要除去茎秆处的叶鞘, 用游标卡尺测量包裹植株的茎直径; 2) 为了防止包裹处植株伤口增生, 涂抹植物油, 并在传感器外面包裹 2~3 层泡沫锡箔; 3) 用保鲜膜胶带封口, 防止雨水进入传感器, 每 15 min 记录 1 次数据。选定包裹传感器的植株每 10 d 左右换 1 次, 同时为防止降雨对仪器造成损害与干扰, 在降雨后对茎流计传感器进行重新安装。

茎流计测得的茎流为单株的蒸腾量, 为了得到玉米群体的蒸腾量需要通过尺度转换因子对单株茎流进行尺度提升。本文选择的尺度转换因子包括茎干截面面积、叶面积和茎粗, 具体转换公式参照姜雪莲在文中的描述^[33]。

① 茎干截面面积为尺度转换因子进行尺度提升

$$T_{\text{截面面积}} = 10 \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{A_m \rho} A_k \quad (5)$$

式中 $T_{\text{截面面积}}$ 为采用茎干截面面积为尺度转换因子得到的玉米群体蒸腾量, mm/d; Q_m 为第 m 个样本植株的茎流, g/d; A_m 为第 m 个样本植株的茎干截面面积, cm^2 ; A_k 为单位占地面积的平均茎干截面面积, cm^2/cm^2 ; n 为样本数。

② 叶面积为尺度转换因子进行尺度提升

$$T_{\text{叶面积}} = 10 \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{LA_m \rho} LAI \quad (6)$$

式中 $T_{\text{叶面积}}$ 为采用叶面积为尺度转换因子得到的玉米群体蒸腾量, mm/d; LA_m 为第 m 个样本植株的叶面积, cm^2 ; LAI 为平均叶面积指数, m^2/m^2 。

③ 茎粗为尺度转换因子进行尺度提升

$$T_{\text{茎粗}} = 10 \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \frac{Q_m}{D_m \rho} D' \quad (7)$$

式中 $T_{\text{茎粗}}$ 为采用茎粗为尺度转换因子得到的玉米群体蒸腾量, mm/d; D_m 为第 m 个样本植株的茎粗, cm;

D' 为单位占地面积的平均茎粗, cm/cm^2 。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Office Excel 2010 处理数据, 制作图表, 用 MATLAB 自带的支持向量机工具箱进行棵间蒸发值的模拟, 利用 SPSS 软件进行相关性分析。采用实测值和模拟值之间的决定系数 (R^2) 表示实测值与模拟值之间的符合程度, R^2 值越大表示二者之间的吻合程度越高。选用均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 表示模型模拟的精度, RMSE 越小表示模拟的精度越高, 计算公式如下:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{j} \sum_{i=0}^j (h_i - y_i)^2} \quad (8)$$

式中 h_i 为第 i 个实测值; y_i 为第 i 个模拟值; j 为棵间蒸发实测值的个数。

2 结果与分析

2.1 茎流速率变化规律

2.1.1 玉米茎流速率的日变化特征

2017 年、2018 年玉米灌浆期玉米茎流速率和有效降雨的日变化如图 1 所示。2017 年茎流速率峰值最高与最低分别出现在 8 月 13 日 (91.03 g/h) 和 8 月 30 日 (19.80 g/h)。2018 年茎流速率峰值最高与最低值出现在 8 月 6 日和 9 月 2 日, 分别为 82.169、8.56 g/h, 且茎流速率大致随日期推进呈下降趋势。在 2017 年在 8 月 16 日—23 日与 2018 年 8 月 6 日—16 日玉米茎流速率呈现较高水平, 原因是这几日降雨少, 光合有效辐射、气温都比灌浆期其他时间大。

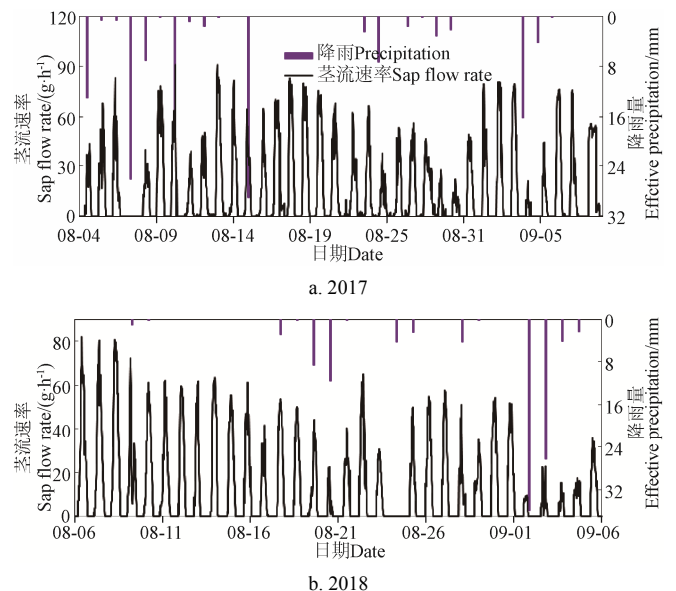


图 1 2017 年和 2018 年降雨和茎流速率日变化

Fig.1 Diurnal variations of effective precipitation and sap flow rate in 2017 and 2018

玉米茎流速率呈现出明显的昼夜变化规律, 变化趋势大约呈“几字形”, 隔天会出现 1 次茎流骤降然后又上升的情况, 这是因为植物通过蒸腾作用水分以气体形式散发到大气中, 中午温度过高植物需要通过减小气孔

开度从而降低蒸腾作用来减少水分的流失，更好地维持生理上的稳态，因而出现“午休现象”^[34]。2017 年、2018 年灌浆期内茎流速率峰值的平均值分别为 58.72、48.26 g/h。2017 年观测期内（8 月 4 日—9 月 8 日）有效降雨量为 134.64 mm，2018 年在观测日期内（8 月 6 日—9 月 6 日）有效降雨量为 104.6 mm。2 a 在茎流计观测时间段内均未灌水，玉米耗水主要来自降雨，且在灌浆期内玉米叶面积较大，绝大部分耗水用于蒸腾作用，因此 2017 年比 2018 年茎流速率平均峰值大。

2.1.2 降雨后的玉米茎流日变化

选取 2017 年、2018 年降雨前、降雨和降雨后的茎流数据进行分析，如图 2 所示。可以看出降雨对玉米茎流有较强的抑制作用，在降雨后，土壤含水率增加，并且随着太阳辐射升高、气温回升等气因素的影响，蒸腾速率明显提高，Zhang 等^[35]研究结果也表示土壤含水率增加，加上气象因素的综合影响，玉米茎流会增加。此外，降雨后的茎流明显大于降雨天茎流，达到甚至超过了降雨前的茎流。经计算，2017 和 2018 年降雨后日茎流速率峰值分别比降雨天增加 24.67%和 187.39%。

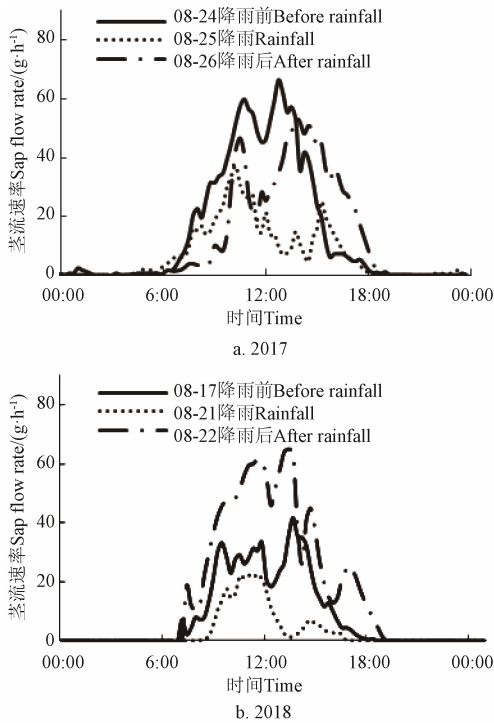


图 2 2017 年、2018 年降雨前后玉米茎流日变化
Fig.2 Diurnal variation of maize sap flow rate before and after rainfall in 2017 and 2018

2.1.3 不同天气条件下玉米茎流的日变化

选取 2018 年典型的雨天、晴天和阴天进行对比分析。图 3 为 2018 年晴天（8 月 15 日）、阴天（8 月 17 日）、雨天（8 月 21 日）的玉米茎流速率日变化过程。晴天，玉米茎流速率在 06:00 左右开始增加，到 12:30 左右达到最大值，18:30 后茎流速率开始逐渐减小到 0；阴天茎流数值波动较大，在 06:00 左右开始逐渐增加，在 17:30 左右逐渐减小到 0；雨天玉米茎流速率在 07:30 左右开始增加，达到峰值的时间最早为 10:30，持续时间最短，在 16:00

左右茎流速率减小至 0。晴天、阴天、雨天茎流速率平均值分别为 16.14、8.28 和 3.13 g/h，晴天最大，阴天次之，雨天最小。在阴雨天气，玉米茎流速率日变化呈多峰曲线，波动较大，这是因为在多云条件下由于云量的变化导致太阳辐射变化频繁，加上阴雨天气条件下各环境因子大幅度变化所致。其他研究也发现了相似不同天气情况下茎流的日变化规律^[16,36-37]。

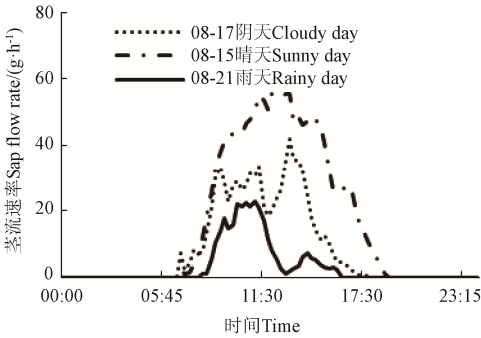


图 3 2018 年不同天气条件下玉米茎流日变化
Fig.3 Diurnal variation of maize sap flow rate under different weather conditions in 2018

2.1.4 环境因素对茎流速率的影响

茎流速率与各环境因子相关性分析结果见表 1，从表 1 中可以看出，茎流速率与空气温度、风速、水汽压、光合有效辐射呈显著正相关，与相对湿度、土壤温度呈显著负相关，其中茎流速率与空气温度、光合有效辐射、相对湿度间相关系数的绝对值皆在 0.8 以上，是影响东北黑土区茎流速率的主要环境因素。下面主要分析茎流速率与光合有效辐射、相对湿度、空气温度的日变化过程。

表 1 2017 和 2018 年玉米茎流速率与环境因子相关性分析
Table 1 Correlation analysis of maize sap flow rate and environmental factors in 2017 and 2018

指标 Indexes	2017	2018
风速 Wind speed	0.15*	0.39**
土壤温度 Soil temperature	-0.14*	-0.77**
土壤水分 Soil moisture	0.02	-0.37**
水汽压 Water vapor pressure	0.51**	0.37**
空气温度 Air temperature	0.81**	0.80**
相对湿度 Relative humidity	-0.88**	-0.87**
大气压 Atmospheric pressure	0.07	0.05
光合有效辐射 Photosynthetically active radiation	0.86**	0.96**

注：“**”表示在 0.01 水平上极显著相关，“*”表示在 0.05 水平上显著相关。
Note: “**” means extremely significant correlation at 0.01 level, “*” means significant correlation at 0.05 level.

图 4 所示分别为 2017 年 8 月 18 日—21 日，2018 年 8 月 11 日—13 日玉米茎流速率和空气温度、光合有效辐射、相对湿度的日变化。玉米茎流速率随气温变化而变化，但气温出现峰值的时间比茎流速率首个峰值出现的时间晚 1 h 左右，当气温达到最大值时，茎流速率会下降，一段时间后慢慢恢复到另 1 个峰值，主要原因为玉米在气温高时启动的自我保护机制，减小气孔的大小，避免过度失水。光合有效辐射开始增加时间早于茎流开始增加时间，之后光合有效辐射逐渐减小，茎流速率随之减小，两者间变化

的时间差可能是因为当外部环境变化的时候，玉米内部需要一定的时间来适应，Zhang^[38]等也发现了茎流启动时间比光合有效辐射滞后 1 h 左右。相对湿度与玉米茎流速率变化趋势相反，相对湿度出现波谷比茎流速率的高峰时间晚，减小至最小值的时间比茎流速率减小至 0 的时间晚，这与 Deng 等^[22,39]研究结果一致。

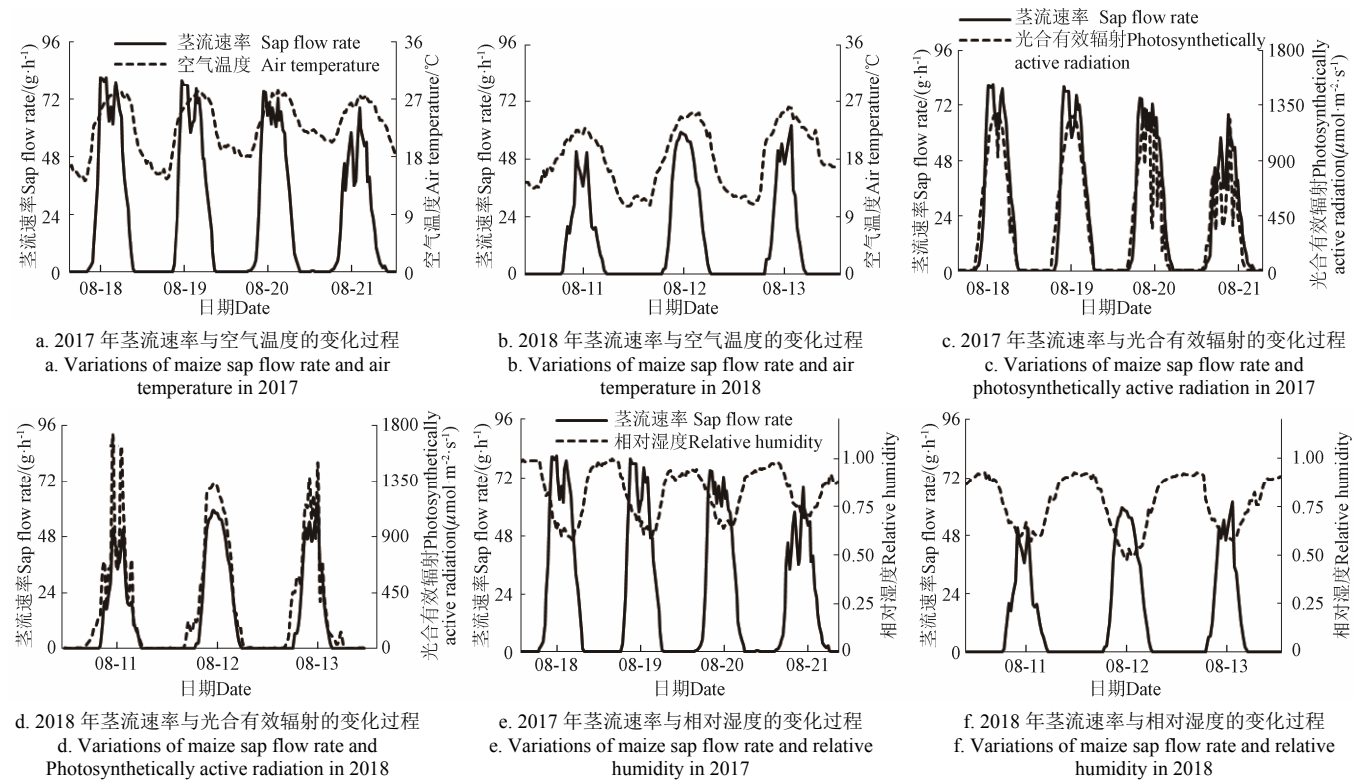


图 4 玉米茎流速率及其主要影响因素的变化过程

Fig.4 Variation of maize sap flow rate and its main influencing factors

2.2 春玉米蒸散发尺度提升及其耗水规律

2.2.1 单株玉米蒸腾尺度提升

根据式（5）～式（7）采用不同尺度转换因子的提升方法计算蒸腾量，结果如图 5 和表 2 所示。

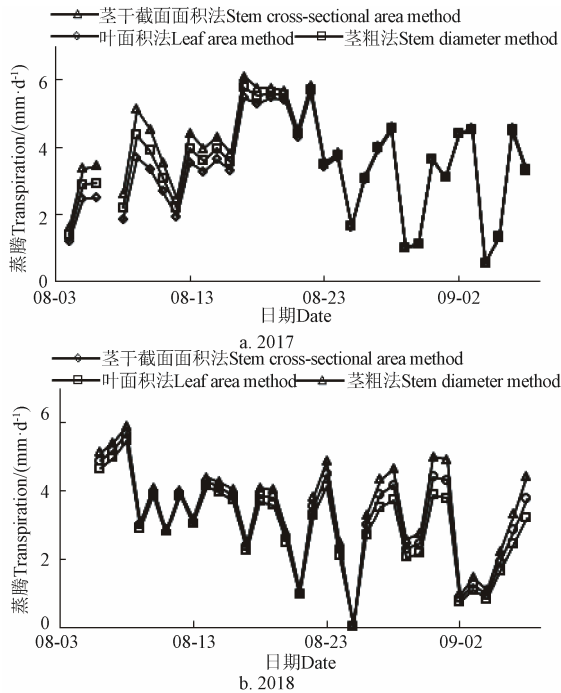


图 5 2017 年和 2018 年不同尺度转换因子计算蒸腾量变化
Fig.5 Variations of transpiration calculated by different scaling conversion factors methods in 2017 and 2018

表 2 不同尺度转换因子计算的春玉米群体蒸腾量

Table 2 Transpiration of spring maize population calculated by different scaling conversion factors (mm·d⁻¹)

年份 Year	阶段 Stage	蒸腾 Transpiration		
		茎干截面面积法 Stem cross-sectional area method	叶面积法 Leaf area method	茎粗法 Stem diameter method
2017	08-04—09-07	125.07	112.86	118.60
2018	08-06—09-07	112.96	97.68	104.91

从 2 a 的数据可看出，在灌浆期内，作物蒸腾量在不同尺度提升方法下变化趋势相同，在计算时间内以茎干截面面积换算的蒸腾量最大，茎粗值换算的蒸腾量次之，叶面积换算的蒸腾量最小。这与姜雪莲^[33]在西北甘肃地区研究结果相似，以茎粗为尺度转换因子得到的结果大于以叶面积为尺度转换因子得到的结果。

2.2.2 棵间蒸发量的计算

根据 2 a 数据建立 SVR 棵间蒸发预测模型训练和验证结果见图 6。如图可见 SVR 模型能较好地用于估算棵间蒸发值，训练和验证 R^2 均在 0.80 以上，RMSE 均小于 0.5 mm，模型较为稳定，且估算的精度较高。

根据建立的 SVR 模型对降雨天缺失的棵间蒸发值进行补充，图 7 为 2 a 灌浆期内棵间蒸发变化，2 a 灌浆期内最大棵间蒸发值分别为 3.59、3.31 mm/d，日均棵间蒸发值分别为 1.17、1.03 mm/d，2017 年灌浆期内棵间蒸发（42.32 mm）大于 2018 年（32.98 mm），这是因为 2017

年灌浆期内降雨量、1 m 土层平均含水率、平均风速、平均净辐射均高于 2018 年。2 a 灌浆期内的日均值蒸发值与刘洋^[40]在黑龙江省哈尔滨的研究结果接近（全生育期平均土壤蒸发量在 1.5 mm/d 左右）。

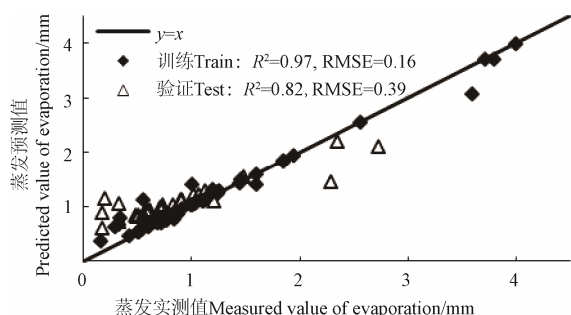


图 6 棵间蒸发值的 SVR 模型训练和验证结果

Fig.6 Training and testing results of evaporation based on SVR model

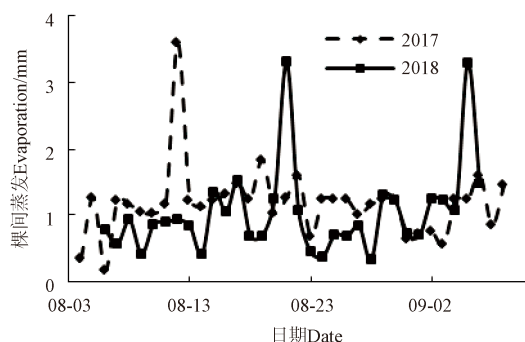


图 7 2017 年和 2018 年春玉米灌浆期棵间蒸发变化

Fig.7 Variations of evaporation during filling stage of spring maize in 2017 and 2018

2.2.3 不同尺度提升方法与水量平衡计算结果比较

根据以上 2 节得到的群体蒸腾量和棵间蒸发量，可得到基于 3 种不同尺度转换因子下的 2 a 春玉米灌浆期内的农田蒸发蒸腾量。

采用水量平衡法作为标准与 3 种尺度转换因子下的农田 ET 进行比较，结果见表 3。可以看得，所有方法得到的结果均显示 2017 年在灌浆期内的春玉米蒸发蒸腾量大于 2018 年，这是因为 2017 年灌浆期内降雨充沛，而降雨又作为玉米耗水的主要来源。2017 和 2018 年春玉米灌浆期日均蒸发蒸腾量分别为 4.22~4.78 和 3.91~4.56 mm/d，根据聂堂哲^[41]的研究，1959—2015 年黑龙江省玉米 8 月蒸发蒸腾量范围为 106~158 mm，即日均蒸发蒸腾量范围为 3.12~5.09 mm/d，2 a 的结果均在聂堂哲^[41]的结果范围内。

基于 3 种尺度转换因子尺度提升方法与水量平衡法的比较可以看出 2 a 与水量平衡法最接近的皆为以叶面积为转换因子计算的 ET，误差在 5% 左右，而基于其他 2 个尺度转换因子尺度提升得到的 ET 误差在 8%~17% 之间，说明选择叶面积为尺度转换因子效果理想，这与韩兆敏^[26]在内蒙古砧砂岩区对沙棘单株茎流扩展到林分群体耗水、姜雪莲^[33]在西北旱区对制种玉米单株茎流提升到农田蒸腾量的研究结果一致，认为叶面积作为尺度转

换因子与实测值最为接近。

表 3 灌浆期内春玉米蒸发蒸腾量不同计算方法的比较

Table 3 Comparisons of evapotranspiration (ET) during filling stage of spring maize by different calculation methods

年份 Year	水量平衡法 计算的 ET ET by water balance/mm	基于不同尺度提升方法的 ET ET by different upscaling methods					
		茎干截面面积 Stem cross- sectional area		叶面积 Leaf area		茎粗 Stem diameter	
		ET /mm	RE /%	ET /mm	RE /%	ET /mm	RE /%
2017	147.69	167.39	13.33	155.18	5.07	160.92	8.96
2018	125.41	145.94	16.37	130.66	4.18	137.89	9.94

3 结 论

通过 2017 年、2018 年在黑龙江省典型黑土区春玉米茎流、棵间蒸发、土壤含水率等的试验监测，研究了春玉米单株茎流速率的动态变化规律及其农田尺度提升方法，主要得到了以下结论：

1) 玉米茎流速率有明显的昼夜变化规律，变化趋势大约呈“几”字形，降雨对茎流速率有较强的抑制作用，春玉米茎流日变化在晴天、阴天、雨天总体趋势相同，但是在阴雨天气，玉米茎流速率日变化呈多峰曲线；玉米茎流的变化是各种气象因子综合作用的结果，茎流速率与空气温度、光合有效辐射、相对湿度密切相关。

2) 以茎粗、茎干截面面积、叶面积为尺度转换因子将单株茎流尺度扩展得到春玉米群体蒸腾量，加上棵间蒸发值，与水量平衡法计算蒸发蒸腾量比较，2 a 灌浆期误差均在 20% 以内，其中以叶面积为尺度转换因子计算的 ET 与水量平衡法最接近，2 a 灌浆期误差在 5% 左右，说明选择叶面积为尺度转换因子效果理想。

由于本研究只在春玉米灌浆期内进行了茎流速率的监测和单株茎流提升至群体蒸腾方法的研究，在其他生育期是否有同样的规律有待做进一步的研究。

[参 考 文 献]

- [1] 黑龙江统计局. 黑龙江统计年鉴(2019)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- [2] Doležal F, Hernandez-Gomis R, Matula S, et al. Actual evapotranspiration of unirrigated grass in a smart field lysimeter[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 1-13.
- [3] Qin Shujing, Li Sien, Kang Shaozhong, et al. Transpiration of female and male parents of seed maize in northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 397-409.
- [4] Li Shijie, Wang Guojie, Sun Shanlei, et al. Assessment of multi-source evapotranspiration products over China using eddy covariance observations[J]. Remote Sensing. 2018, 10(11): 1-28.
- [5] Gao Guanlong, Zhang Xiaoyou, Yu Tengfei, et al. Comparison of three evapotranspiration models with eddy covariance measurements for a Populus euphratica Oliv. forest in an arid region of northwestern China[J]. Journal of

- Arid Land, 2016, 8(1): 146-156.
- [6] Noman A B, Hu Yongguang, Abdul S, et al. Estimation of evapotranspiration using Bowen ratio method[J]. IFAC-Papers On Line, 2018, 51(17): 807-810.
- [7] Maruyama T, Ito K, Takimoto H. Abnormal data rejection range in the Bowen ratio and inverse analysis methods for estimating evapotranspiration[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2019, 269/270: 323-334.
- [8] Poon P K, Kinoshita A M. Estimating evapotranspiration in a post-fire environment using remote sensing and machine learning[J]. Remote Sensing, 2018, 10(11): 1728-1743.
- [9] 宋立生, 刘绍民, 徐同仁, 等. 土壤蒸发和植被蒸腾遥感估算与验证[J]. 遥感学报, 2017, 21(6): 966-981.
- Song Lisheng, Liu Shaomin, Xu Tongren, et al. Soil evaporation and vegetation transpiration: Remotely sensed estimation and validation[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(6): 966-981. (in Chinese with English abstract)
- [10] Jiang Xuelian, Kang Shaozhong, Li Fusheng, et al. Evapotranspiration partitioning and variation of sap flow in female and male parents of maize for hybrid seed production in arid region[J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 132-141.
- [11] Wang Xingwang, Guan Huade, Huo Zailin, et al. Maize transpiration and water productivity of two irrigated fields with varying groundwater depths in an arid area[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2020, 281: 1-14.
- [12] 李建明, 任瑞丹, 范兵华, 等. 灌溉量对温室全有机营养液栽培甜瓜根际环境和茎流的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 217-224.
- Li Jianming, Ren Ruidan, Fan Binghua, et al. Effects of irrigation amount on the rhizospheric environment and stem flow of melon cultivated with full organic nutrition in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 217-224. (in Chinese with English abstract)
- [13] 龚雪文, 刘浩, 孙景生, 等. 日光温室番茄不同空间尺度蒸散量变化及主控因子分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 166-175.
- Gong Xuewen, Liu Hao, Sun Jingsheng, et al. Variation of evapotranspiration in different spatial scales for solar greenhouse tomato and its controlling meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 166-175. (in Chinese with English abstract)
- [14] 冀健红, 刘新阳. 温室番茄植株蒸腾变化规律及主要影响因素研究[J]. 节水灌溉, 2020(8): 40-43, 49.
- Ji Jianhong, Liu Xinyang. A study on transpiration variation law and its main influencing factors of tomato grown in a solar greenhouse[J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 40-43, 49. (in Chinese with English abstract)
- [15] Manderscheid R, Erbs M, Burkart S, et al. Effects of free-air carbon dioxide enrichment on sap flow and canopy microclimate of maize grown under different water supply[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2016, 202(4): 255-268.
- [16] 冯东雪, 刘海军, 高壮壮, 等. 夏玉米茎流速率变化规律及其影响因子研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 185-191, 198.
- Feng Dongxue, Liu Haijun, Gao Zhuangzhuang, et al. Study on the variation of sap flow rate and its influencing factors in summer maize growth season[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 185-191, 198. (in Chinese with English abstract)
- [17] 时荣超, 佟玲. 不同种植密度下制种玉米液流变化及其影响因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(3): 1-8.
- Shi Rongchao, Tong Ling. Affecting factors and variation of sap flow of seed maize in different planting densities[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(3): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [18] Feng Yu, Hao Weiping, Gao Lili, et al. Comparison of maize water consumption at different scales between mulched and non-mulched croplands[J]. Agricultural Water Management, 2019, 216: 315-324.
- [19] Ismanov M, Francis P, Henry C, et al. Relations among sap flow, soil moisture, weather, and soybean plant parameters in high water demand and final growth stages[J]. Agricultural Sciences, 2019, 10: 371-385.
- [20] Zhao Liwen, He Zhibin, Zhao Wenzhi, et al. Extensive investigation of the sap flow of maize plants in an oasis farmland in the middle reach of the Heihe River, Northwest China[J]. Journal of Plant Research, 2016, 129(5): 841-851.
- [21] 张川, 张亨年, 闫浩芳, 等. 微喷灌结合滴灌对温室高温环境和作物生长生理特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 83-89.
- Zhang Chuan, Zhang Hengnian, Yan Haofang, et al. Effects of micro-sprinkler irrigation combined with drip irrigation on greenhouse high temperature environment and crop growth physiological characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(20): 83-89. (in Chinese with English abstract)
- [22] Deng Jifeng, Zhu Hangyong. Nocturnal sap flow of Hedysarum scoparium and its response to meteorological factors in semiarid Northwest China[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 186(6): 1-7.
- [23] Vertessy R A, Hatton T J, Reece P, et al. Estimating stand water use of large mountain ash trees and validation of the sap flow measurement technique[J]. Tree Physiology, 1997, 17(12): 747-756.
- [24] Hatton T J, Wu H I. Scaling theory to extrapolate individual tree water use to stand water use[J]. Hydrological Processes, 1995, 9(5/6): 527-540.
- [25] 段利民, 童新, 吕扬, 等. 固沙植被黄柳、小叶锦鸡儿蒸腾耗水尺度提升研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(1): 52-62.
- Duan Limin, Tong Xin, Lü Yang, et al. Upscaling of the

- transpiration and water consumption of Sand-fixing Vegetation *Salix gordejvii* and *Caragana microphylla*[J]. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(1): 52-62. (in Chinese with English abstract)
- [26] 韩兆敏. 内蒙古砒砂岩区油松和沙棘茎流耗水特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- Han Zhaomin. Study on Water Consumption Characteristics of *Pinus Tabulaeformis* and *Hippophae Rhamnides* in the Sandstone Area of Inner Mongolia[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [27] 何昕楠, 林祥, 谷淑波, 等. 微喷补灌对麦田土壤物理性状及冬小麦耗水和产量的影响[J]. *作物学报*, 2019, 45(6): 879-892.
- He Xinnan, Lin Xiang, Gu Shubo, et al. Effects of supplemental irrigation with micro-sprinkling hoses on soil physical properties, water consumption and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(6): 879-892. (in Chinese with English abstract)
- [28] 孟玉清, 李世月, 聂鑫鑫, 等. 灌溉用水有效利用系数对需水量的影响[J]. *河南水利与南水北调*, 2017(4): 18-20.
- [29] 王雪梦, 胡笑涛, 冉辉, 等. 不同施肥处理葡萄着色成熟期茎流规律及对气象因子的响应[J]. *中国农村水利水电*, 2020(6): 125-129.
- Wang Xuemeng, Hu Xiaotao, Ran Hui, et al. Stem flow regularity of grape coloring and its response to meteorological factors in different ferti[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(6): 125-129. (in Chinese with English abstract)
- [30] 刘春伟, 邱让建, 孙亚卿, 等. 不同材料和尺寸微型蒸渗仪测定土壤蒸发量[J]. *中国农村水利水电*, 2018(6): 1-5.
- Liu Chunwei, Qiu Rangjian, Sun Yaqing, et al. The evaluation of soil evaporation by the micro-lysimeter with different material and size in maize and winter wheat field[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2018(6): 1-5. (in Chinese with English abstract)
- [31] 解雪, 陈军锋, 郑秀清, 等. 基于主成分分析和粒子群算法优化支持向量机的冻融土壤蒸发预报模型[J]. *节水灌溉*, 2020(1): 61-65, 72.
- Xie Xue, Chen Junfeng, Zheng Xiuqing, et al. Freeze-thaw soil evaporation forecast model based on PCA-PSO-SVM[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(1): 61-65, 72. (in Chinese with English abstract)
- [32] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 267-282.
- [33] 姜雪连. 西北旱区制种玉米父本母本耗水特性及蒸发蒸腾量估算方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- Jiang Xuelian. Characteristics of Water Consumption of Female and Male Parents and Evapotranspiration Modeling of Maize for Seed Production in an Arid Region of Northwest China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [34] 朱秀群, 侯士田, 蓝美宁, 等. 土壤水分对玉米蒸腾特性的影响[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(9): 44-52.
- Zhu Xiuqun, Hou Shitian, Lan Funing, et al. Influence of soil moisture on corn's transpiration characteristics[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(9): 44-52. (in Chinese with English abstract)
- [35] Zhang Li, Yan Minfei, Li Hongbing, et al. Effects of zinc fertilizer on maize yield and water-use efficiency under different soil water conditions[J]. *Field Crops Research*, 2020: 248: 1-13.
- [36] 于文颖, 纪瑞鹏, 冯锐, 等. 不同程度干旱胁迫及复水对春玉米(丹玉 39)茎流动态的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(2): 163-170.
- Yu Wenying, Ji Ruipeng, Feng Rui, et al. Effects of different drought stresses and re-watering on sap flow dynamic of spring maize Danyu 39[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(2): 163-170. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杜斌, 胡笑涛, 王文娥, 等. 交替沟灌玉米灌浆期茎流影响因子敏感性分析与模型适用性研究[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(2): 233-245.
- Du Bin, Hu Xiaotao, Wang Wene, et al. Stem flow influencing factors sensitivity analysis and stem flow model applicability in filling stage of alternate furrow irrigated maize[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(2): 233-245. (in Chinese with English abstract)
- [38] Zhang Baozhong Xu Di, Liu Yu, et al. Multi-scale evapotranspiration of summer maize and the controlling meteorological factors in north China[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2016, 216: 1-12.
- [39] 王淑庆. 黄土塬区玉米茎流特征及其影响因子的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- Wang Shuqing. Research on the Stem Sap Flow Variations of Maize and Its Influencing Factors in Loess Tableland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [40] 刘洋, 栗岩峰, 李久生, 等. 东北半湿润区膜下滴灌对农田水热和玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(10): 93-104.
- Liu Yang, Li Yanfeng, Li Jiusheng, et al. Effect of mulched drip irrigation on water and heat conditions in field and maize yield in sub-humid region of northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(10): 93-104. (in Chinese with English abstract)
- [41] 聂堂哲, 张忠学, 林彦宇, 等. 1959—2015 年黑龙江省玉米需水量时空分布特征[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 217-227.
- Nie Tangzhe, Zhang Zhongxue, Lin Yanyu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of maize water requirement in Heilongjiang Province during 1959-2015[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 217-227. (in Chinese with English abstract)

Variations of sap flow rate and its farmland scale improving method for spring maize in northeast China

Huang Xi, Yang Weicai, Mao Xiaomin^{*}

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Wuwei Experimental Station for Efficient Water Use in Agriculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuwei 733000, China)

Abstract: Maize is one of the main food crop in the northeast China. It is of great significance to understand the sap flow rate variation and its environmental impact factors for optimizing the structure of maize production and achieving high water use efficiency in the northeast China. In order to reveal the daily variation of sap flow rate and its environmental impact factors, to clarify the scaling conversion factors for upscaling individual plant sap flow estimation to the farmland level, and to investigate the characteristics of evapotranspiration (ET) during the filling stage, field experiments were conducted in two consecutive years (2017 and 2018) in the northeast China. The sap flow rates, crop growth indices, meteorological data, soil evaporation and soil water content of the root zone in black soil were determined. The results showed that there was an obvious day-night fluctuation of spring maize sap flow rate, and the average peak values of sap flow rate in the two years were 58.72 and 48.26 g/h, respectively. Rainfall events had a strong inhibitory effect on the sap flow of spring maize, and the sap flow rate increased significantly after rainfall, even higher than that before rainfall. The sap flow rate was quite different among the sunny, cloudy and rainy days. The sap flow rate revealed a multi-peak curve in the cloudy and rainy days. The maize sap flow rate was the highest in the sunny day, followed by cloudy and rainy days, with the average values of 16.14, 8.28, 3.13 g/h respectively in 2018. The variation of sap flow rate could be regarded as the result induced by the comprehensive effects of various environmental factors. According to the correlation analysis, the sap flow rate had a significant positive correlation with air temperature, wind speed, water vapor pressure and photosynthetic active radiation, and a significant negative correlation with relative humidity and soil temperature. The absolute values of the correlation coefficients between the sap flow rate and air temperature, photosynthetic active radiation, and relative humidity were above 0.8, indicating that they were the main environmental factors affecting spring maize sap flow rate in the black soil region of northeast China. Using the stem diameter, stem cross-sectional area and leaf area as the scaling conversion factors, the individual plant sap flow rates were upscaled to the farmland level during the spring maize filling stage, which were 118.60, 125.07 and 112.86 mm in 2017, and 104.91, 112.96 and 97.68 mm in 2018, respectively. Leaf area index, wind speed, average soil moisture content at 1-m soil layer, and net radiation were selected to establish the soil evaporation forecast model based on the Support Vector Regression (SVR). Then the SVR model was used to estimate the evaporation values that were absent in micro-lysimeter monitoring mainly in rainfall days. The results showed that the Root Mean Squared Error (RMSE) and Coefficient of Determination (R^2) of the soil evaporation forecast model based on SVR were 0.39 mm and 0.82. Therefore, the SVR model was reliable to be used for the evaporation forecast. The evaporation values during the spring maize filling stages in the two years were 42.32 and 32.98 mm, respectively. The sum of transpiration (obtained by the three upscaling methods) and evaporation (obtained as mentioned above) in the two years were compared with the ET calculated by water balance method, and the relative errors were all within 20%. The average daily ET values were within the range of 4.22~4.78 and 3.91~4.56 mm/d, respectively during the spring maize filling stages of the two years. The ET calculated by using leaf area as the scaling conversion factor was the closest to the result of water balance method, with an relative error of about 5%. It demonstrated that the leaf area was suitable to be used as the converting factor for upscaling the single plant sap flow to farmland level of the maize field in black soil of northeast China.

Keywords: evapotranspiration; transpiration; evaporation; spring maize; sap flow rate; upscaling; support vector regression