

科尔沁沙地玉米茎流变化规律研究

唐霞^{1,2}, 崔建垣¹, 岳祥飞^{1,2}, 王少昆^{1,2}, 岳广阳¹

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 以 Dynamax 包裹式茎流测量系统对科尔沁沙地玉米的液流变化进行了连续监测, 结合实验区自动气象站同步测定的光合有效辐射、气温、相对湿度和风速等气象因子以及人工记录的天气状况, 分析了 4 种典型天气条件下玉米的茎流变化、蒸腾耗水规律及其与气象因子的关系。结果表明, 不同天气条件下, 玉米液流日变化波动曲线不同, 影响液流量的主要气象因子也不同, 光合有效辐射始终是液流变化的主导因子。晴天, 玉米液流速率的日进程为“几”字型峰或单峰曲线; 阴天, 玉米的液流曲线通常呈多峰状态; 风天和雨天是单峰曲线, 或是呈不规则的多峰曲线。玉米茎秆液流通量密度的变化是各种气象因子综合作用的结果。单株日耗水量的总体变化趋势是从晴天、风天、阴天到雨天依次减少, 其平均值分别为 588, 401, 399 和 305 g/h。

关键词: 热平衡技术; 茎流; 气象因子; 科尔沁地区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2011)02-0031-05

中图分类号: S274.1

Characteristics of Maize Sap Flow in Horqin Sandy Land

TANG Xia^{1,2}, CUI Jian-Yuan¹, YUE Xiang-Fei^{1,2}, WANG Shao-Kun^{1,2}, YUE Guang-Yang^{1,2}

(1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 730000, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A Dynamax sap flow measuring system consisted of heat balance sensors was used to continuously monitor sap flows of corn (*Zea mays*) on Horqin sandy land, Northeastern China. The photosynthetic active radiation, air temperature, relative humidity and wind velocity were recorded synchronously by an automatic weather recording system. Based on the manual records of weather conditions, four most representative weather conditions were gathered up to analyze the relationship between sap flow, water consumption and meteorological factors. The results showed that the diurnal variations and affecting factors of sap flows differed with weather conditions. However, the photosynthetically active radiation was always the dominant factor affecting the sap flow. The diurnal sap flow changes of corn showed board peaks or single-peaked curves in sunny days, multiple-peaked curves in cloudy days, and single-peaked or irregular multiple-peaked curves in windy day and rainy day. The diurnal variations of sap flows resulted from comprehensive effects of multiple meteorological factors. The water consumption for an individual corn plant was the highest in sunny days, followed by windy days, cloudy days, and rainy days, with means of 588, 401, 399, and 305 g/h, respectively.

Keywords: heat balance method; sap flow; meteorological factors; Horqin sandy land.

玉米 (*Zea mays*) 是科尔沁沙地的主要粮食作物, 其播种面积占当地总播种面积的 70% 以上^[1]。属高秆作物, 耗水量大, 水分对其产量的构成影响很大^[2]。科尔沁沙地位于内蒙古东部, 是我国北方农牧交错带沙漠化最严重的地区之一^[3-5]。该区生态环境脆弱, 经常出现连续的高温、强辐射和风沙等恶劣天气, 且降雨量极不稳定, 地表河流、湖泊逐渐干枯, 使当地农作物的生长主要依靠对地下水资源的严重开

采来维持, 导致地下水位不断下降。许多学者采用不同方法研究了科尔沁沙地玉米的耗水规律, 测定和估算了农田玉米的蒸散量^[6-7]。而对科尔沁沙地玉米的茎流变化特征报道不多。为此, 研究该区玉米茎秆液流变化规律及耗水量, 将有助于深入了解玉米蒸腾耗水特性, 从而指导区域的合理灌溉。

利用热技术法测算树木茎干液流是目前该领域最先进、应用最广泛的技术方法。该方法根据其设计

原理可分为热脉冲法、热平衡法、热扩散法和激光热脉冲法,其适用性各异^[8]。国内运用此技术进行的液流研究大多集中在树冠蒸腾耗水上^[9-11,17],用于作物蒸腾方面的研究报道相对较少。以热平衡为原理的包裹式茎流探头在研究直径较小的植物茎秆液流时具有明显优越性,谢华等^[12]研究了冬小麦蒸腾规律;高阳等^[13]测定了玉米/大豆间作群体内作物的蒸腾量;刘德林^[14]和赵永玲^[15]分别对夏玉米的茎流与蒸腾规律进行了研究,取得了满意的结果。本研究以科尔沁沙地玉米为研究对象,采用 Dynamax 茎流测量系统直接测定玉米植株的茎秆液流变化速率,并同步获取气象数据,分析不同天气条件下玉米的茎流和单株耗水量的变化,及其对气象因子的响应,旨在阐明玉米在特殊天气下的蒸腾耗水规律,分析不同气象因子对茎流速率的影响,为提高农业用水效率以及该区制定农田灌溉制度提供理论依据。

1 试验区概况

试验在位于科尔沁沙地中南部的中国科学院生态系统研究网络奈曼沙漠化研究站进行,地理位置 120°41'E,42°54'N。该地区属半干旱气候,年平均降水量 366 mm,主要集中在 6—8 月,年蒸发量 1 935 mm,干燥系数在 1.4~1.8 之间。地下水位 4~15 m,年均气温 6.5℃,1 月份平均气温 -12.7℃,7 月份平均气温 23.7℃,≥10℃积温 3 000℃以上,无霜期 150 d。年太阳辐射总量 5 200~5 400 MJ/m²,年均风速 3.5~4.5 m/s,其中 4—5 月平均风速可达 5.0~6.0 m/s。

2 材料与方法

2.1 供试材料

供试玉米品种为郑单 958,播种期为 2010 年 5 月初,收获期为 9 月 25 日。试验作物严格按照当地农业措施管理,灌溉采用漫灌方式(8 月 12 日灌水 20 mm),使玉米生育期均处于适宜的土壤水分条件下。试验区土壤为沙壤土,0—50 cm 土层平均容重为 1.51 g/cm³,0—20 cm 土层有机质含量为 0.67%,全氮 0.038%,全磷 0.071%(P₂O₅),全钾 2.75%(K₂O)。

2.2 测定方法

用 Dynamax 公司开发的包裹式茎流计,选择 2 株生长良好,立地条件基本一致的玉米,将茎流传感器包裹在第 2 茎节。安装前去掉叶鞘,擦干水分,均匀地涂抹一层硅胶,然后将探头固定在植株上,最后用铝箔包裹住探头(铝箔用来防雨和阻隔阳光的照射)。在 2010 年作物生长旺盛的 7—9 月对玉米的液

流速率进行连续监测,数据采集时间间隔设为 1 h。利用距离农田约 20 m 的自动气象站对实验区光合有效辐射、温度、相对湿度和风速等气象因子每隔 1 h 进行自动记录,气象记录与茎流记录同步。同时结合人工观测情况,在阴、晴、风、雨天气条件下各选出 5 个最典型的实验日进行数据分析。天气条件的划分以当地气象情况为依据,云量超过 4/5 且太阳不可见为阴天;无云且有持续的高温和强辐射为晴天;日间平均风速 >5 m/s 为风天;有持续或短暂降雨发生为雨天。

2.3 数据处理

茎流数据均由 SGB16 探头采集所得,利用 Origin 8.0 和 SPSS 13.0 软件对所有实验数据进行分析处理。玉米单株日耗量由实验日内 24 h 整点测得的液流量密度值累加求得。

3 结果与分析

3.1 不同天气条件下玉米的液流变化特征与峰值

由图 1 可以看出,典型晴天条件下玉米的茎秆液流量密度日变化趋势呈“几”字型峰或单峰曲线,大约从夜间 19:00 到次日凌晨 6:00 有较为稳定而微小的茎流。液流启动时间在凌晨 6:00 左右,随太阳辐射的增强和气温的升高,植株的茎流速率迅速增大,一般在 9:00—12:00 达到一天中的峰值,随后略有下降,峰值在 64.7~82.4 g/h 之间。通常,液流速率在 18:00 左右开始急剧下降,21:00 之后基本降至零值。

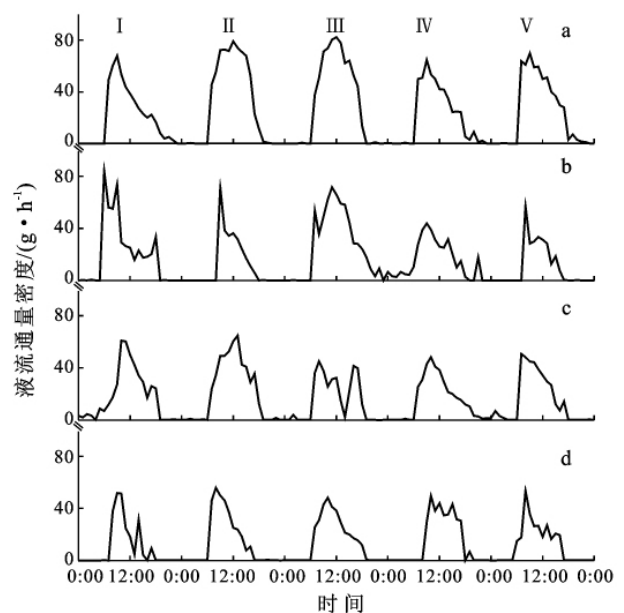


图 1 不同天气条件下玉米茎秆液流量密度日变化

注:图 a 为晴天: I 0811, II 0812, III 0813, IV 0820, V 0824; 图 b 为阴天: I 0807, II 0822, III 0825, IV 0828, V 0829; 图 c 为风天: I 0803, II 0808, III 0809, IV 0814, V 0831; 图 d 为雨天: I 0804, II 0817, III 0818, IV 0819, V 0821。下同。

阴天条件下,玉米的液流变化通常为多峰曲线。液流的启动时间在 5:00—7:00 之间,液流通量密度值的上升过程很不稳定。进入液流活跃阶段后,明显的液流高峰状态界限多出现于上午 9:00 左右(71.3~73.9 g/h),但是液流波动较大,出现多个峰值。阴天液流下降得非常迅速,在 19:00 时已达最低值。8 月 28 日和 8 月 29 日与前述不同,液流日变化进程始终保持在较低的状态,峰值仅为 43.8~57.1 g/h,低于晴天时的水平。

大风天气下,玉米的液流日变化进程基本呈现为单峰曲线,或呈不规则的多峰曲线。除 8 月 3 日液流启动时间为凌晨 5:00 外,其它大风天气中液流的启动时间均为 7:00。在 8 月 9 日的大风天气条件下,液流曲线变化幅度很大,出现多个峰值,液流最大值分别为 45.1,32.4 和 41.4 g/h。其它 4 d 中液流的上升幅度比晴天时小,高峰状态持续时间较短,其间有明显的波动变化,液流最大值分别为 60.9,64.9,48.3 和 48.2 g/h。

在雨天,玉米的液流通量密度日进程曲线呈多峰或单峰变化。8 月 4 日、8 月 19 日和 8 月 21 日为多峰状态,日间液流通量密度值有不同幅度的起落,峰值分别为 51.3~31.3,49.3~43.3 和 53.4~27.1 g/h;8 月 17—18 日则是连续的降雨天气,液流活动日变化表现为单峰曲线,最大值两者很接近,分别为 48.3 和 49.5 g/h。

3.2 气象因子变化对玉米液流的影响

由图 2 可以看出,晴天条件下 5 个实验日内的光合有效辐射变化一致,均为单峰曲线,峰值位于 12:00 左右。而与之相对应的液流变化曲线则呈现为“几”字型峰或单峰曲线,液流在高峰状态时表观波形或单峰变化趋势与光合有效辐射存在显著差异。具体表现为,液流启动后随太阳辐射强度的变化,上升至一定值后便基本保持稳定,进入液流活动的高峰状态。随着光合有效辐射虽继续增强,液流通量密度值却始终在一个较小的范围内波动,液流变化趋于平稳(图 1a: II, III)。这主要是由于在晴天条件下,午间的太阳辐射过于强烈,气温在 32℃ 以上,空气相对湿度均为 37%(图 2),太阳辐射影响叶片气孔开度、空气温度及水汽压差。此时若植株的蒸腾耗水不断增强,则会造成植物体内水分供需平衡失调,使正常的生理机能受损^[8]。当光照强度超过某一值时,茎流量不再增大,开始波动;一段时间以后,光照强度减小,蒸腾随之减小,茎流也减小。另外 3 个单峰曲线随着光照强度的增加,叶面温度开始升高,叶面气孔开度增大,叶面蒸腾作用加强,造成茎流的增大。但是茎流峰值与光照强度不同

步,与前 2 个实验日相比午间辐射强度更大,并且空气湿度也仅有 19%~30%。原因一方面可能是随着作物蒸腾的进行,土壤含水量下降,当其根系吸水无法持续满足蒸腾失水时,叶片部分气孔便自动关闭或减小开合程度,叶片蒸腾速率随之变化,将茎秆的液流通量密度值及相应的单株耗水量稳定地调节在足以维系正常生命活动的水平上,避免过度失水;另一方面可能是由于空气干燥,叶面温度过高,呼吸作用加强,光合受抑制使细胞间 CO₂ 浓度升高导致气孔开度减小^[15]。这种蒸腾特征是玉米的一种自我保护机制,作为 C₄ 作物使其在高温和强辐射环境中更容易生长。典型晴天条件下玉米单株日耗水量平均为 588 g/d,其中 8 月 12—13 日日耗水量为 706 和 714 g/d,其它 3 个实验日的耗水在 471~566 g/d 之间(图 3)。

由图 2 可以看出,在阴天,由于云层的遮挡,太阳辐射强度较低,其波动变化呈多峰曲线。由于太阳辐射的不稳定,使茎流的变化也极其不稳定。总体来看日间最高气温 26.6~29.4℃,最低湿度 35%~54%,难以直观地分辨出其中的响应关系。但从液流与光合有效辐射曲线的来看,它们所产生的影响效应可能不如光合有效辐射。阴天的单株日耗水量差异很大,在 250~628 g/d 之间,平均耗水量 399 g/d,低于晴天时的水平(图 3)。

由图 1 可以看出,在大风天气,5 个实验日内的液流变化曲线存在差别。8 月 9 日的日间平均风速为 5.23 m/s,1 h 极大风速达 12.9 m/s。实验日内出现了 2 个较强的太阳辐射和较高的液流波峰,并且彼此相吻合的程度较好。从液流与太阳辐射曲线波动的程度来看,日间的大风条件对液流的变化产生了一定的影响,最终效应明显。玉米单株日耗水量分别为 346 g/d,与阴天的水平相当。其它 4 d 的日间平均风速分别为 6.24,5.80,6.04 和 5.08 m/s,1 h 极大风速高达 13.4 m/s。4 个实验日内的液流日变化趋势均呈单峰曲线,这与太阳辐射变化基本相符,但是液流峰值出现时间各不相同,说明持续的大风成为影响液流变化的关键因子。强风可能引起叶片气孔的大量关闭,导致叶片蒸腾速率变缓,液流通量密度始终保持在一个较低的水平,平均单株日耗水量只有 401 g/d。

雨天时太阳辐射强度小,空气温度低,空气相对湿度大,液流波形变化幅度和峰值也低。其中 5 d 的降雨量分别为 2.5,10.4,5.2,4.2 和 8.1 mm。尤其在 8 月 17—18 日,由于持续的阴雨,平均气温为 23.8℃,空气相对湿度则在 74% 以上,但是受太阳辐射强度影响出现了液流日变化曲线的单峰状态,可能是茎流的主要影响因素(图 2)。另外 3 个实验日为多云阵雨

天气,液流保持较低的多峰值,日间最低气温 18.6 °C,平均气温 22.3 °C,空气相对湿度在 83% 以上,液

流量与太阳辐射强度相似波动较大。雨天玉米单株日耗水量最低只有 235 g/d,平均为 305 g/d。

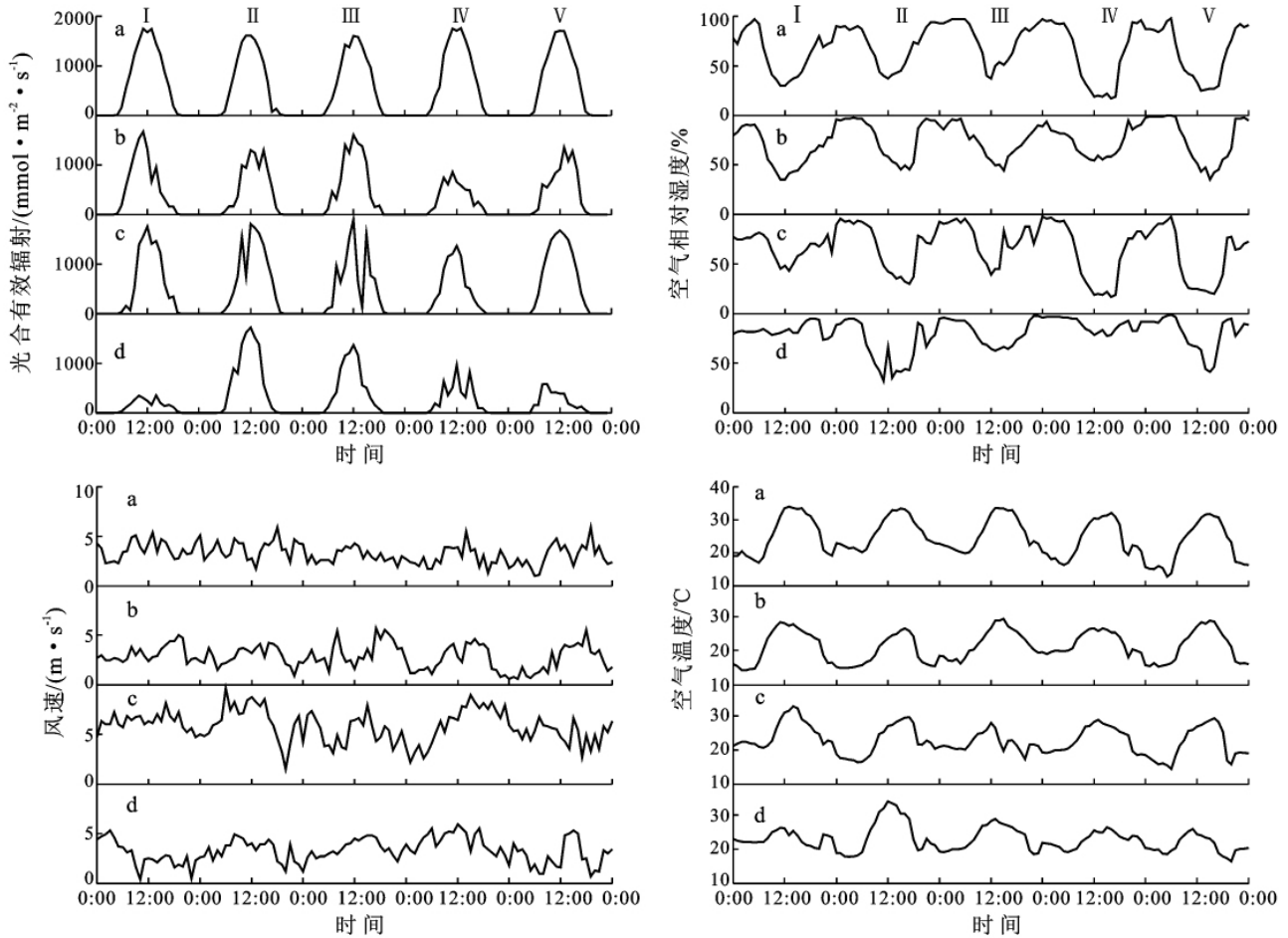


图 2 不同天气条件下光合有效辐射、风速、空气相对湿度和温度的多日变化

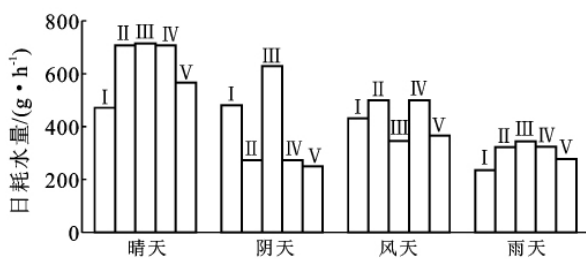


图 3 不同天气条件下玉米的单株日蒸腾耗水量

3.3 液流速率与气象因子的关系

分别对不同天气条件下玉米的液流通量密度值与 4 个环境因子监测值进行偏相关分析,在求液流通量密度与其中 1 个环境因子的相关系数时,对其它 3 个因素的影响进行变量控制,结果见表 1。

在以上偏相关分析的基础上,选择光合有效辐射、风速、空气相对湿度和空气温度作为自变量,以玉米液流速率为因变量,以 0.05 和 0.01 可靠性作为变量入选和剔除临界值,经过逐步回归,建立不同天气条件下液流速率与环境因子的多元线性模型(表 2)。

由表 1—2 可以看出,不同天气条件下液流速率的主要影响因子有所差异。晴天、阴天和雨天均为光合有效辐射和空气相对湿度,风天为光合有效辐射和风速。它们之间均达到了显著相关。经过回归系数和相关系数检验,回归方程都达到了极显著水平。

表 1 不同天气条件下玉米液流速率与各环境因子相关分析的偏相关系数

天气	系数	光合有效辐射	风速	相对湿度	温度
晴天	R^2	0.704**	-0.018	0.183*	0.036
阴天	R^2	0.578**	0.141	0.242**	0.181
风天	R^2	0.725**	0.199**	0.053	0.019
雨天	R^2	0.536**	0.071	0.316**	0.038

注: **表示在 $p < 0.01$ 水平极显著, *表示在 $p < 0.05$ 水平显著。下同。

4 结论

晴天往往伴随着高温和强辐射,这是科尔沁地区最为典型的天气特征,对于农作物自身的水分调节能

力是一个严峻的考验。玉米在午间强辐射阶段已经启动自我保护机制,通过调节气孔的开闭对叶片蒸腾强度进行控制,避免了过度失水,液流曲线因此呈现为单峰。表明在连续的高温、强辐射和干旱少雨的恶劣环境之下,当一些作物开始表现出失水萎蔫时,玉米依然可以保持较好的生长状态。同时在土壤水分条件较好时,玉米的茎流速率加快,在午间出现峰值并保持一段时间,呈“几”字型。这说明除了气象因子,土壤水分也是玉米液流的关键影响因素。

表 2 不同天气条件下液流通量密度
与环境因子的多元回归模型

天气	回归方程	R^2
晴天	$SF_1 = -14.583 + 0.044PAR + 22.590 RH$	0.734**
阴天	$SF_2 = 5.473 + 0.030PAR + 2.451 RH$	0.485**
风天	$SF_3 = -2.756 + 0.026PAR + 1.324 0S_w$	0.710**
雨天	$SF_4 = 4.780 + 0.031PAR + 0.002 7RH$	0.521**

注:SF 液流速率(g/h); PAR 光合有效辐射[$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]; S_w 风速(m/s); RH 空气相对湿度(%)。

阴天和雨天太阳辐射强度低,空气温度、湿度和风速等对液流的影响效应相对明显。由于温度下降和空气相对湿度的增高,雨天往往出现液流活动的较低状态。大风可能会成为限制液流活动水平的主导因子,对该天气条件下液流的 2 种波动特征比较发现,光合有效辐射的波动引起液流曲线呈现不同的峰值。

不同天气条件下玉米的日变化及其主导因子各不相同。晴天,玉米液流速率的日进程为“几”字型峰或单峰曲线,其主要影响因子为光合有效辐射和空气相对湿度,与刘德林等^[14]的研究结果相类似;阴天,玉米的液流曲线通常呈多峰状态,主要影响因子是光合有效辐射和空气相对湿度;大风天气条件下,其液流日变化表现为单峰曲线,或是呈不规则的多峰曲线,光合有效辐射和风速是其主要影响因子;而雨天的液流日变化曲线则是多峰或单峰状态,主要影响因子为光合有效辐射和空气相对湿度。空气温度与茎秆液流相关关系不明显,可能是由于叶片温度或者土壤温度影响液流活动^[16],还需全面考虑叶温与土温,以及不同时期玉米自身的生理学活性。

尽管不同天气条件下液流速率的主要影响因子存在差异,但光合有效辐射始终是玉米液流变化的最主要影响因子,这与高阳等^[13]的研究结果一致。它与液流曲线变化趋势以及表现特征波动规律的吻合程度也最高。从太阳辐射与液流变化波动曲线的偏移程度可以大体分辨出其它气象因子所产生的影响效应,玉米茎秆液流通量密度的变化最终是各种气象因子综合作用的结果。

玉米单株日耗水量在雨天时差别不大,而在其它各天气条件下,其日耗水量的差异则十分明显,可能与这些天气状况下气象因子的大幅波动有关。不同天气条件下玉米的单株日耗水量总的变化趋势是从晴天、风天、阴天到雨天依次减少。

[参 考 文 献]

- [1] 张铜会,赵哈林,赵学勇,等. 科尔沁地区玉米耗水规律初探[J]. 中国沙漠,1999,19(S):137-139.
- [2] 赵聚宝. 旱地农田水分状况与调控技术[M]. 北京:农业出版社,1992.
- [3] 常学礼,崔步礼,陈雅琳,等. 科尔沁沙地生态环境特征分析[J]. 干旱区地理,2005,28(3):336-341.
- [4] 张华,李锋瑞,李玉霖,等. 科尔沁沙地奈曼旗近 5 年来风况及合成输沙势[J]. 中国沙漠,2004,24(5):624-627.
- [5] 王涛,吴薇,赵哈林,等. 科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J]. 中国沙漠,2004,24(5):519-528.
- [6] 李玉霖,张铜会,崔建垣. 科尔沁沙地农田玉米耗水规律研究[J]. 中国沙漠,2002,22(4):354-358.
- [7] 李玉霖,崔建垣,张铜会. 参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J]. 中国沙漠,2002,22(4):373-376.
- [8] 岳广阳,赵哈林,张铜会,等. 不同天气下小叶锦鸡儿茎流与耗水特性[J]. 应用生态学报,2007,18(10):2173-2178.
- [9] 杨建伟,梁宗锁,韩蕊莲,等. 不同干旱土壤条件下杨树的耗水规律及水分利用效率研究[J]. 植物生态学报,2004,28(5):630-636.
- [10] Tomo'omi K, Hisami N, Tetsuya M, et al. Sources of error in estimation stand transpiration using allometric relationships between stem diameter and sapwood area for *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtuse* [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 206: 191-195.
- [11] 孙鹏森,马履一,王小平,等. 油松树干液流的时空变异性研究[J]. 北京林业大学学报,2000,22(5):1-6.
- [12] 谢华,沈荣开. 用茎流计研究冬小麦蒸腾规律[J]. 灌溉排水,2003,20(1):5-9.
- [13] 高阳,段爱旺,邱新强. 应用热平衡法测定玉米/大豆间作群体内作物的蒸腾量[J]. 应用生态学报,2010,21(5):1283-1288.
- [14] 刘德林,刘贤赵. GREENSPAN 茎流法对玉米蒸腾规律的研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4):134-137.
- [15] 赵永林,刘钰,蔡甲冰. 夏玉米茎流和茎直径变化规律及其关系分析[J]. 灌溉排水学报,2010,29(3):24-28.
- [16] Gavloski J E, Whitefield G H, Ellis C R. Effect of restricted watering on sap flow and growth in corn (*Zea mays*) [J]. Canada Journal Plant Society, 1992,172:361-368.
- [17] 岳广阳,赵哈林,张铜会,等. 科尔沁沙地杨树苗木生长过程中蒸腾耗水规律研究[J]. 中国沙漠,2009,29(4):674-679.