

温室茄子不同生育期茎直径变化特征 及其与气象因子的关系

王晓森^{1,2}, 孟兆江^{1,2}, 段爱旺^{1,2}, 刘祖贵^{1,2}

(1. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453003; 2. 农业部作物需水与调控重点开放实验室, 河南 新乡 453003)

摘要: 为了寻找诊断温室作物水分状况的可靠的茎变化指标, 对春季温室条件下茄子不同生育期、不同土壤含水量茎变化关键指标进行了研究。结果表明, 各生育期低水分处理的茎直径(MDS)日最大收缩量基本上大于高水分处理的MDS, 但它们的变化趋势基本一致, 这种一致性是由气象因子所致; 苗期的日生长量(DI)从未出现过负值, 高水分处理的累积DI要大于低水分处理的累积DI, 且MDS和DI之间呈现出一定程度的负相关, 而其余时期的DI基本上在DI=0附近波动; 通过对MDS、DI和相关气象因子进行回归分析发现, MDS和气象因子有更好的相关性, 基本上各时期MDS和相对湿度呈负相关关系, 与温度、辐射、空气饱和差呈正相关关系; 且气象因子对低水分处理的茎变化影响大于对高水分处理茎变化影响, 由此提出建立合理土壤水分条件下的气象因子对MDS的预测模型作为诊断温室作物水分状况、实现自动灌溉的方法。

关键词: 茄子; 茎直径变化; 生育期; 气象因子; 土壤含水量

中图分类号: S162.4⁺1; S641.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2010)04-0106-06

目前国内诊断作物水分状况的方法大致分为两类, 一类主要是通过测定土壤水分的方法, 另一类则是通过测定作物生理指标的方法。测定土壤水分的方法虽然简单但无法取得来自作物本身的需水信息, 正如Kramer描述的那样, “诊断作物水分状况的可靠指标, 只能从作物本身的测定中得到”^[1]。但目前一些作物生理指标如叶水势、气孔导度、细胞液浓度、组织相对含水量等测定方法复杂或对作物本身具有破坏性无法实现迅速、及时的作物水分状况的预报^[2]。

而茎变差法则是利用植株白天蒸腾失水收缩、晚上吸水膨胀的茎直径变化特征来诊断作物体内水分状况, 与其它生理指标测定方法相比, 具有直接性、简便性、对植株不具有破坏性等优点, 并且还具有实现自动灌溉这一多目标用途的功能而受到国内外专家的重视, 成为近期的研究热点, 但是相关研究大多集中在果树上, 对温室作物不同生育期茎变化规律研究非常少。据文献资料表明, 目前国内外研究者把茎直径相对变化量(RV)、日最大收缩量(MDS)、日生长量(DI)等反映茎秆变化的指标与相关的影响因子结合起来探索作物在遭受水分胁迫时的茎直径变化机制, 寻找适合用于指导灌溉的技术指标, 多数研究者倾向于运用MDS作为关键技术指

标^[3-5]。本文主要是针对前人相关研究存在的问题, 就温室作物茄子不同生育期茎直径变化的关键指标及其相互关系以及气象因子、土壤含水量对它们的影响展开研究, 以期为基于茎直径变化诊断作物水分状况的灌溉自动控制系统提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设计

试验于2007年4~6月在中国农业科学院农田灌溉研究所日光温室中进行, 温室长40 m, 宽8.5 m, 种植区40 m×7 m(280 m²)。温室东西走向, 坐北朝南, 温室间隔15 m, 互不遮荫。覆盖聚乙烯薄膜, 外层覆盖复合保温被, 温室内设有补温装置。以茄子为试材, 试验以小区结合筒栽的方式进行, 温室试验土质为砂壤土, 耕层土壤容重1.38 g/cm³, 田间持水24%(占干土重)。每小区宽1 m, 双行种植, 各小区间留1 m间隔并以塑料布隔离, 以防土壤水分侧渗, 同时便于观测记载, 筒栽布置在温室的中部且埋入土中, 使其上沿与小区的地面齐平, 筒径30 cm, 每行作物铺设一条滴灌管, 滴头间距与株距相同。试验处理设计采用随机区组设计, 分为高水分下限(80% FWC, Field Water Capacity)和低水分下限(50%

收稿日期: 2009-08-26

基金项目: 国家“863”计划(2006AA100209-06); 河南商丘农田生态系统国家野外科学观测研究站观测研究及数据信息系统建设; 国家自然科学基金(50779071)

作者简介: 王晓森(1975—), 男, 河南濮阳人, 硕士, 助研, 从事于作物节水灌溉理论与高效用水技术。E-mail: ngswxas@126.com。

通讯作者: 孟兆江(1958—), 男, 河南桐柏人, 博士, 副研究员, 主要从事节水农业基础理论和技术研究。E-mail: zjmeng5@tom.com。

FWC) 两个处理,各重复 4 次。采用时域反射仪(TDR)监测和取土烘干法控水,低于土壤水分控制下限时灌水至田间持水量,供水方式为滴灌,水表计量。试验统计分析软件采用 SAS8.1 进行。

1.2 试验观测项目与方法

以德国产 DD 型茎直径变化传感器来连续监测茄子茎直径微变化,生育前期安装在距地面 5 ~ 10 cm 茎秆处,而在中、后期安装在 10 ~ 15 cm 处来连续监测茎直径变化,每个处理安装 4 个;数据自动采集器(DL2e Data Logger)与传感器相连,每 10 min 自动采集一次茎变化数值,每日或隔日用笔记本电脑下载一次数据。温室内气象因子如辐射、气温、空气相对湿度由 IR 型红外测试仪直接测定,以便了解气象因素对不同生育阶段、不同水分处理的茄子茎变化的影响。饱和水汽压差(VPD, kPa)采用以下公式计算,其中 e_a 为饱和水汽压(kPa)、 RH_{mean} 为空气平均相对湿度(%)、 T 为气温($^{\circ}C$)。

$$e_a = 0.6108 \exp[17.27 T / (T + 273.3)];$$

$$VPD = (1 - RH_{mean}/100) e_a$$

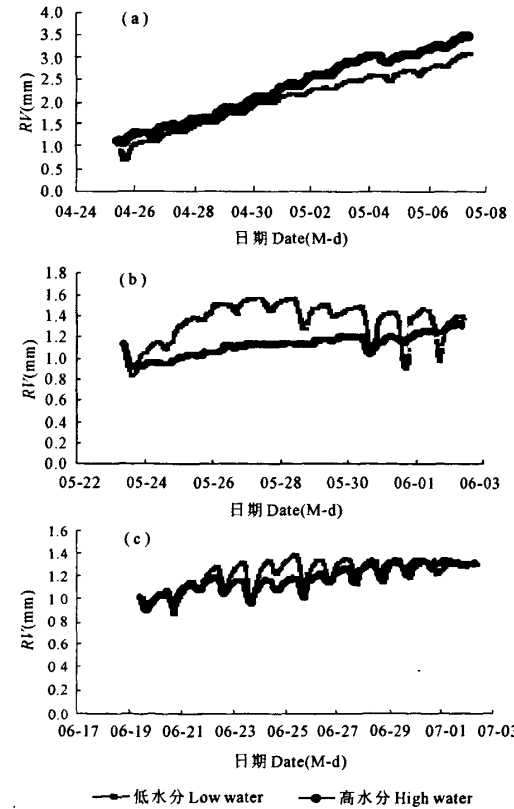
本文用于反映茎直径变化的指标主要有茎直径相对变化量(RV; relative variation)、日最大收缩量(MDS; maximum daily shrinkage)、日生长量(DI; daily increase)。

2 结果与分析

2.1 不同生育期茄子茎直径相对变化量分析

茎直径相对变化量(RV)是通过茎变化传感器和数据采集器直接测得的数据,一般设定一初始值,所测数据为茎直径相对于初始值的变化量,简称茎直径相对变化量,通过对温室茄子茎直径 RV 数据的处理,可以对其茎变化幅度作定性与定量的分析。如图 1 a、b、c 所示,茄子 3 个生育期茎直径 RV 曲线均呈“曲折”状,很好地显示了其茎直径白天失水收缩晚上吸水膨胀的循环变化状态,其中苗期 RV 的变化幅度最大,从 4 月 25 日到 5 月 6 日的 12 d 的时间内相对变化量约从 1.0 mm 到 3.2 mm,茎直径长幅达 2.2 mm;而花果期和盛果期基本相同,花果期从 5 月 23 日到 6 月 1 日的 10 d 时间里,盛果期从 6 月 19 日到 7 月 1 日的 13 d 时间里,相对变化量均约从 1.0 mm 到 1.3 mm,茎直径长幅仅为 0.3 mm。这主要是因为茄子苗期茎秆自然生长因素为主,这个时期的 RV 曲线(图 1 a)呈现明显的向上发展态势;而从花果期开始,茄子的营养体生长变慢,进入营养体与生殖器官并进生长阶段,茎粗自然生长逐渐减弱,所以才导致了后面两个生育期茎直径较小的长

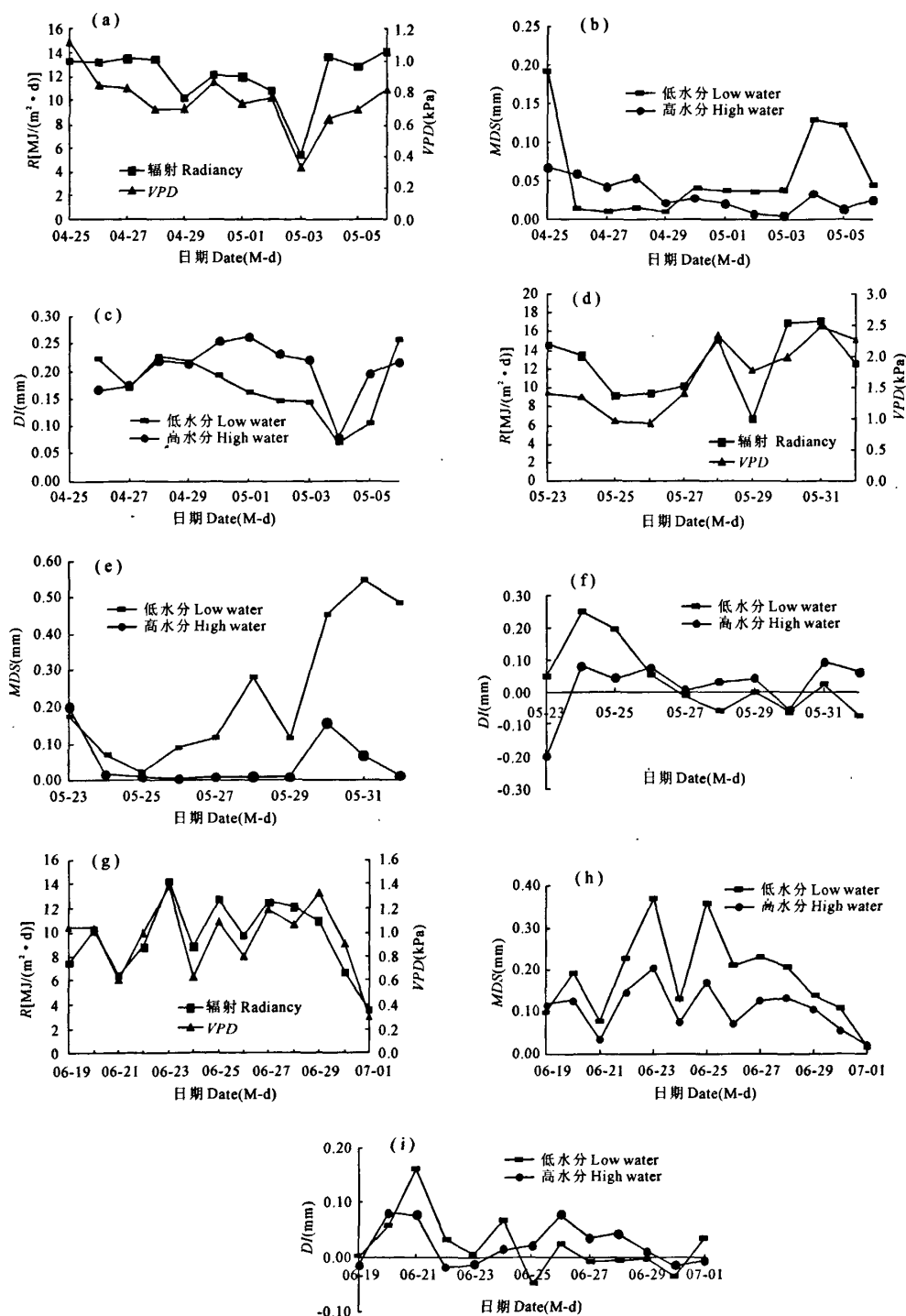
幅。土壤水分的不同对于茄子苗期茎秆的影响主要表现在长势上,高水分处理的茎秆长势要好于低水分处理的长势,其 RV 曲线的差异随着土壤水分差异的加大显现出来,而对于花果期、盛果期茄子茎变化的影响主要表现在收缩、膨胀的幅度上,低水分处理的 RV 的曲线波动幅度要大于高水分处理的波动幅度,这主要因为苗期茄子植株比较矮小,相对于中、后期植株来说满足其生长需要耗水也少,低土壤水分对其植株产生的胁迫主要表现在长势上;而花果期和盛果期的植株比较高,腾发耗水也大,低水分对植株茎秆的胁迫也大,使它不得不释放更多茎秆储水来满足蒸腾需要,具体表现为低水分比高水分大的收缩量,以及由此导致的较大的 RV 波动幅度。



a. 苗期; b. 花果期; c. 盛果期
a. Seedling stage; b. Flowering and fruit-bearing stage; c. Full fruit stage
图 1 不同土壤含水量下不同生育期茎直径相对变化量
Fig.1 RV of stem diameter under high and low soil water contents during different growth stages

2.2 茄子茎直径日最大收缩量和生长量分析

为了能够很清楚地了解气象因素对其 MDS 变化的影响特提供每个生育期的辐射、VPD 变化图(图 2 a、d、g),根据 Penman 蒸腾速率计算公式二者是导



a, b, c: 苗期; d, e, f: 花果期; g, h, i: 盛果期

a, b, c: Seedling stage; d, e, f: Flowering and fruit-bearing stage; g, h, i: Full fruit stage

图 2 不同生育期日平均辐射、VPD(a, d, g)、茎直径最大收缩量(b, e, h)、日生长量(c, f, i)

Fig.2 Daily average values of radiation and VPD(a, d, g), MDS (b, e, h) and DI (c, f, i) in different growth stages

致植株蒸腾作用的主因,其对茎直径变化的影响在很多国内外研究中已得到证实^[6-11]。茄子茎直径一般在早上 7:00 茎秆经过一夜的根系吸水补充达到一天中的最大值,然后由于辐射的增强,蒸腾的加剧,茎秆收缩直径开始减小,至下午 16:00 左右收缩到最小值,后又恢复,其 MDS 的计算方法为一天中最大的 RV 值减去最小的 RV 值。苗期 MDS(图 2 b)数值较小,而花果期、盛果期的数值较大(图 2 e,h),各生育期除苗期在 4 月 29 日土壤水分未拉开以前高水分处理的 MDS 大于低水分处理的 MDS 外,其余同一天低土壤水分处理的数值都要大于高土壤水分处理的数值,并且同一时期高低土壤水分处理的 MDS 变化的趋势基本是一致的,而这种一致的变化趋势与各生育期的辐射、VPD 变化曲线基本相同,显示出二气象因子对其变化影响的重要性,具体见图 2。

对于茎直径日生长量(DI)这个指标来讲,在茎秆生长期主要反映的是一天的生长量,而对于花果期和盛果期则主要反映的是茎秆的恢复力,因为这两个时期的茎秆生长基本已经结束,其茎变化主要围绕着白天蒸腾失水收缩,夜晚根系吸水膨胀进行的,其计算方法为第二天零点的 RV 值减去第一天零点的 RV 值。苗期 DI(图 2 c)从未出现过负值,而花果期和盛果期的 DI(图 2 f,i)则在 DI = 0 附近波动且呈现负增长,即经过一夜的恢复有可能不能复原,这主要是因为苗期茎直径以自然生长为主且植株矮小、蒸腾耗水少,而中后期植株大、蒸腾耗水强的原因。在苗期,高水分的 DI 于 4 月 29 日后显著大于低水分的 DI($P < 0.05$, ANOVA),之前二者长势基本相同,随后由于土壤含水量的降低,蒸腾作用对低水分处理茄子的胁迫加剧,使其不得不释放更多的自身储水来满足蒸腾的需要,其 MDS 值逐渐变大,超过了高水分处理的 MDS 值,并最终影响到了低水分处理茄子茎秆的 DI;另外 5 月 6 日对低水分处理一经充分供水,二者的 DI 不仅趋于一致,甚至低水的 DI 有大于高水分的 DI 趋势,表现出茎秆的生长补偿效应^[12]。苗期试验期间的累积生长量要远远大于其它时期,且高水分处理的累积生长量要大于低水分处理的累积生长量(表 1)。还很重要的一点是,MDS 和 DI 呈现出相反的变化趋势,几乎每一个较大 MDS 值都对应一个较小的 DI 值,对苗期低水分处理的 MDS 和 DI 作回归分析得出,二者基本上呈负相关关系(图 3),而高水分处理的 MDS 和 DI 的相关性却没有那么好,这表明土壤含水量越低,MDS 对 DI 的影响越大,这就要求如果苗期选择 MDS 作为灌溉指标且制定合理的灌溉值域范围时,

以不影响到茄子自然生长的点为宜。

表 1 试验时间内茎直径总生长量
Table 1 Gross daily increase of stem diameter during testing time

生育期 Growth stage	时间(d) Time	累积生长量(mm) Gross increase	
		高水分 High water	低水分 Low water
苗期 Seedling	11	2.23	1.92
花果期 Flowering and fruit-bearing	10	0.17	0.35
盛果期 Full fruit	13	0.29	0.29

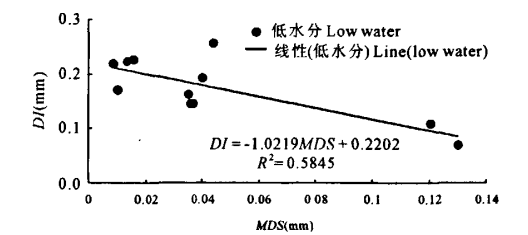


图 3 苗期每日生长量和最大收缩量的关系
Fig.3 Relationship between DI and MDS during seedling stage

2.3 茄子不同生育期茎变化和相关气象因子的关系

影响茄子茎直径变化的因素是多样的,除了植株自身外,还有土壤含水量、温室微气象因子等外部因素的作用,其中微气象因子主要有辐射、温度、湿度、空气饱和差(VPD)等几项,以下统计分析所用气象因子数据为一天的平均值。笔者以现有数据为基础,分别对诸气象因子与 MDS、DI 做回归分析,结果表明,MDS 与诸气象因子的相关性比 DI 要好,有很好的可预测性,且土壤水分越低这种相关程度越高,决定系数越大,不同时期的 MDS 和相对湿度呈负相关关系,与温度、辐射、空气饱和差呈正相关关系,其中与辐射相关性最好,其次是 VPD,具体见图 4。另外,在温室茄子 3 个生育期中盛果期的 MDS 与气象因子相关性最好,分析因为这 3 个时期的土壤含水量是以下限控制的,在土壤含水量下限相同时,盛果期的耗水量最大、水分亏缺效应也最明显,当水分亏缺效应明显时 MDS 最易受气象因素影响。

表 2 不同生育期的 MDS、辐射平均值
Table 2 Average values of MDS, radiation in different stages

项目 Items	生育期 Growth stage		
	苗期 Seedling	花果期 Flowering and fruit-bearing	盛果期 Full fruit
MDS 高水分 High water (mm)	0.03	0.05	0.11
低水分 Low water	0.06	0.23	0.18
辐射 Radiation[MJ/(m ² ·d)]	12.04	12.56	9.53

为了详细研究各生育期 MDS 与同时期辐射的关系列表 2, 从表 2 可以看出各生育期测试期间的气象因子是有差异的, 其中花果期的数值最大, 因此不能简单比较各时期 MDS 数值的大小, 如果对 3 个时期的低水 MDS 进行协方差分析(glm; Duncan, $\alpha = 0.05$), 把辐射定为协变量, 即假定各生育期辐射影响在同一水平线上, 则均值顺序就由最初的花果期、盛果期、苗期就变为盛果期、花果期、苗期, 但同样方法对高土壤水分的 MDS 顺序就没有任何影响, 均值顺序仍然是盛果期、花果期、苗期。这表明如果让导致茎变化最显著的气象因子辐射各生育阶段的影响在同一水平线上之后, 无论低水分还是高水分盛果

期 MDS 均值应该最大, 水分亏缺效应最明显, 而实际花果期低水 MDS 最大是由当时特殊的蒸腾条件所致, 花果期的 VPD 值为苗期的 2.25 倍, 为盛果期的 1.78 倍, 辐射值为苗期的 1.04 倍, 为盛果期的 1.32 倍。与初始排序相比, 辐射定为协变量对低水分均值的影响大于对高水分均值的影响, 这说明气象因子对低水分 MDS 的影响要大于对高水分 MDS 的影响。另外, 把辐射定为协变量后高低土壤水分处理 MDS 均值顺序的一致性表明, 对于土壤相对含水量在 50% FWC 以上, 气象因子对温室茄子茎变化的影响要大于土壤含水量对茎变化的影响。

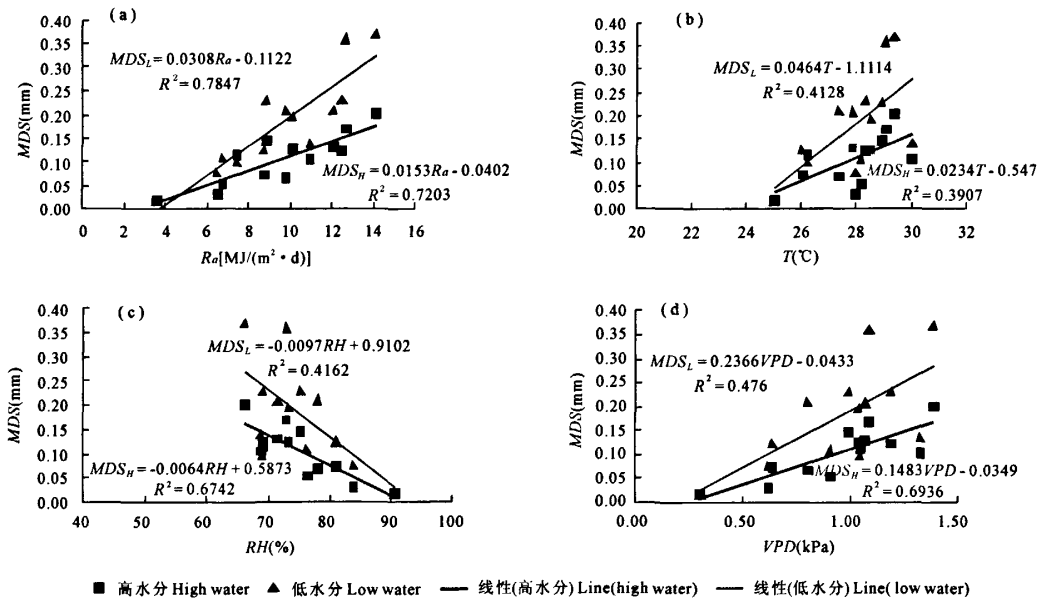


图 4 盛果期最大收缩量与气象因子的关系

Fig. 4 Relationships between MDS and meteorological factors such as radiation(a), temperature(b), relative humidity(c) and VPD(d) during full fruit stage

3 讨论

1) 基于茎直径变化的自动灌溉系统需要有可靠的定量指标来解决什么时间灌水、灌多少水的问题, 而 MDS 由于与气象因子有很好的相关性、预测性成为首选, 实际应用中可以首先作出一合理土壤水分条件下的诸气象因子回归模型来预测它, 然后用实测值与模型预测值比较的值域范围的不同来解决是否灌水、灌多少水的问题, 因为实测值会因土壤含水量的下降而变大, 这在本文的试验中已得到证实, 所以它们的比值范围应该有规律可循的。但应用该方法时要注意, 不同生育期的预测模型有可能

不同, 即预测模型要适时, 是合理土壤水分条件下的适时预测模型, 否则就会造成很大的偏差。

2) 在协方差分析中, 把辐射定为协变量后高、低土壤水分 MDS 均值顺序的一致性表明, 对于温室茄子在 50% FWC 以上的土壤相对含水量条件下, 气象因子对茎直径变化趋势上的影响比土壤含水量更大, 也就是说气象因子决定着 MDS 最基本的变化趋势, 而土壤含水量则会从程度上影响它。比如说盛果期高、低土壤水分的 MDS(图 2 h)均是 6 月 21 ~ 24 日先上升后下降, 这与当时的辐射的变化趋势一致, 但低土壤含水量的 MDS 要大于高土壤含水量的 MDS, 体现了程度的不同。

3) 本研究的重点仅在于反映茎直径变化的几个关键指标(RV、MDS和DI)的变化规律及其与气象因子的关系,在后续的工作中还要加上茎变化与作物生理指标,诸如光合速率、气孔导度、叶水势、叶片含水率、茎流量等相互关系的研究,以及由于水分胁迫导致的茎直径变化的内部机制研究,还要对各生育期合理土壤水分条件下的MDS预测模型进行统计分析、验证等工作,如果要真正实现基于茎变差确定作物灌水时间和灌水量,这些研究都是必需的。

参考文献:

- [1] Kramer P J. Water Relations of Plants[M]. New York: Academic Press, 1983:489.
- [2] 孟兆江,段爱旺,刘祖贵,等.根据植株茎直径变化诊断作物水分状况研究进展[J].农业工程学报,2005,21(2):30—33.
- [3] Marsal J, Gelly M, Mata M, et al. Phenology and drought affects the relationship trunk shrinkage and midday stem water potential of peach trees[J]. Hort Sci Biotech, 2002,77:411—417.
- [4] Fereres E, Goldhamer D A. Suitability of stem diameter variations and water potential as indicators for irrigation scheduling of almond trees[J]. Hort Sci Biotech, 2003,78:139—144.
- [5] Intrigliolo D S, Castel J R. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum[J]. Irrig Sci, 2004,23:93—102.
- [6] 雷水玲,孙忠富,雷廷武.温室室内作物茎秆直径变化对基质含水率的响应[J].农业工程学报,2005,21(7):116—119.
- [7] Betty K, Douglas V, Browning F. Stem diameter in relation to plant water status[J]. Plant Physiol, 1971,48:683—685.
- [8] Namken L N, Bartholic J F, Runkles J R. Monitoring cotton plant stem radius as an indication of water stress[J]. Agronomy Journal, 1969,61:891—893.
- [9] Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements[J]. Irrig Sci, 2001,20:115—125.
- [10] Moriana A, Fereres E. Plant indicators for scheduling irrigation of young olive trees[J]. Irrig Sci, 2002,21:83—90.
- [11] Gallardo M, Thompson R B, Valdez L C. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato[J]. Irrig Sci, 2006,24:241—255.
- [12] 孟兆江,刘安能,庞鸿宾,等.棉花调亏灌溉的生态生理效应[J].灌溉排水学报,2003,22(4):30—33.

Stem diameter variation characteristics during different growth stages of eggplant in greenhouse and its relation to meteorological factors

WANG Xiao-sen^{1,2}, MENG Zhao-jiang^{1,2}, DUAN Ai-wang^{1,2}, LIU Zu-gui^{1,2}

(1. Farmland Irrigation Research Institute, CAAS, Xinxiang, Henan 453003, China;

2. Key Lab for Crop Water Requirement and Regulation, Ministry of Agriculture, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: In order to find a reliable index of stem variation to diagnose water content of crops in greenhouse, an analysis was made of some key indexes of stem variation under high and low soil water content in greenhouse in spring. The result indicated that, the maximum daily shrinkage (MDS) of low soil water content was mostly bigger than that of high soil water content during three growth stages, but they both shared the same variation trend which was caused by meteorological factors. Furthermore, there was no negative daily increase (DI) in seedling stage opposite to fluctuation above or below DI = 0 during the other two growth stages. In addition, the gross DI of high soil water content was bigger than that of low soil water content during seedling stage, and the relationship between MDS and DI was negative correlation too. Through regression analysis between MDS, DI and relative meteorological factors respectively, we found that MDS had a better correlation with meteorological factors than DI, and there were positive correlations of MDS to radiation, temperature, VPD and negative correlation to relative humidity, which influenced the low soil water content's MDS more sharply than that of high soil water content. Because of the evidences above, we came up with the thought of establishing a model under seemly soil water content between MDS and meteorological factors as the key point of diagnosing water content inner crops of greenhouse and opening the automatic irrigation system.

Keywords: eggplant; variation of stem diameter; growth stage; meteorological factor; soil water content