

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.036

基于海棠茎干含水率的智能灌溉控制策略研究

赵燕东^{1,2} 郑焱¹ 周海洋^{1,3} 林剑辉^{1,3} 张鑫⁴ 于福满⁴

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;
3. 林业装备与自动化国家林业局重点实验室, 北京 100083; 4. 天津创世生态景观建设股份有限公司, 天津 300110)

摘要: 茎干含水率的动态变化是研究植物体水分和生长状况的重要指标, 准确判断活立木水分亏缺是人工林抚育和城市园林绿化中灌溉策略制定的重要科学依据。以海棠树为研究对象, 以茎干含水率为研究参数, 通过干旱胁迫试验探究茎干含水率变化与海棠树生理需水的关系。提出以海棠茎干含水率43%和茎干含水率下降值不超过12%为下限指标、土壤含水率33%为上限指标的灌溉控制策略, 依据此策略设计了一套智能灌溉控制系统, 并通过该系统验证了所提出灌溉策略的有效性与可行性。

关键词: 海棠; 茎干含水率; 灌溉指标; 灌溉控制策略

中图分类号: S274.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0323-09 OSID: 

Research of Intelligent Irrigation Control Strategy Based on Stem Water Content of Crabapple

ZHAO Yandong^{1,2} ZHENG Yan¹ ZHOU Haiyang^{1,3} LIN Jianhui^{1,3} ZHANG Xin⁴ YU Fuman⁴

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China
2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China
3. Key Laboratory of State Forestry Administration for Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China
4. Tianjin Chuangshi Ecology and Landscape Construction Co., Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: The dynamic change of stem water content is an important index to study the water content and growth condition of plants, which provides scientific basis for accurately judging the water deficit of active wood, plantation cultivation and irrigation of urban landscaping. Taking the potted crabapple as research object, and the relationship between the change law of stem water content and physiological water requirement of trees was explored through drought stress experiment. Drought stress was divided into two phases, the first phase lasted five days and the second phase lasted ten days. The decrease in stem water content in the second stage was larger than that in the first stage. And the number of leaves withered in the second stage was more than in the first stage. Comprehensively considered the ornamental nature of crabapple, the research took the first stage of drought stress experiment as research node. It was obtained that the stem water and soil water of crabapple showed a one-degree cubic polynomial relationship under natural drought conditions. An irrigation control strategy with stem water content (43%) and stem water content reduction range (12%) as the lower limit index and soil water content (33%) as the upper limit index was proposed. According to the strategy, an intelligent irrigation control system was designed, and the effectiveness and feasibility of the proposed irrigation strategy were verified by the system.

Key words: crabapple; stem water content; irrigation index; irrigation control strategies

0 引言

近年来,灌溉控制策略研究逐渐从依据土壤水

分、土壤水势等间接的工程指标转移到植物本身的生理指标(如茎流、茎干直径、茎干水分等)上。植物生理参数是评价植物生理需水最直接、最准确的

收稿日期: 2019-10-10 修回日期: 2019-12-04
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0600901)、天津市科委互联网跨界融合重大专项(16ZXHLNC00060)、内蒙古自治区科技计划项目(201802085)和北京市共建项目专项
作者简介: 赵燕东(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事生态信息智能检测与控制研究,E-mail: yandongzh@bjfu.edu.cn

指标,这一观点得到国内外众多学者的认可^[1-3]。其中,利用茎流计测量茎流具有较高的准确性,被广泛用于估算植物蒸腾耗水,对指导灌溉具有重要意义^[4-5]。NICOLAS 等^[6]利用茎流计测定杏树的液流速率,以此来估测杏树蒸腾量,证实该方法与 Penman - Monteith 公式之间具有密切的相关性,可以用来制定杏园的灌溉策略。张亚雄等^[7]利用茎流计测定了不同灌水处理下苹果树的茎流速率,并得出灌水上下限分别为田间持水量的 90% 和 60% 是适宜苹果树的灌水方案。但由于茎流计价格昂贵,难以推广普及。茎干直径的周期性变化与植物茎干内部含水率密切相关,一些学者用日最大收缩量(MDS)、日生长量(DI)和当日复原所需时间(RT)等参数诊断植物含水率的变化,为研究灌溉策略提供了新思路^[8-9]。GOLDHAMER 等^[10]利用最大收缩量指导杏树灌溉,取得了良好的节水效果。张寄阳等^[11]在不同程度的水分胁迫下分析得出,茎干直径的当日复原所需时间是适宜棉花灌溉的指标,并认为 MDS 和 DI 受多种因素影响,不适于单独作为灌溉指标。由于茎干直径变化幅度在微米之间,不仅对传感器的精确性有很高的要求,还容易受到环境因素的干扰,使其难以具有普适性。因此,寻找一种既能表征植物生理信息又易于工程实现的灌溉指标对发展节水灌溉尤为重要。

植物茎干水分是衡量植物木质部导管与韧皮细胞组织间水分交换的重要参数^[12-16]。研究茎干水分变化与植物生理需水的关系对智能灌溉的发展具有重要意义,但有关茎干水分在灌溉领域应用的研究还不够深入。近年来,随着茎干含水率监测技术的不断进步,赵燕东等^[17]基于驻波率原理研发出 BD-IV 型植物茎体水分传感器,当植物茎体直径在 5.0 ~ 10.5 cm 之间时,可准确检测出植物的茎干含水率。该传感器能够实现对植物茎干水分的实时、连续、无损测量,并且安装简易、适用范围广。

本文以海棠树为研究对象,以茎干含水率为研究参数,基于 BD-IV 型植物茎体水分传感器探究干旱胁迫下海棠树茎干含水率与土壤含水率之间的关系,确定能够表征活立木健康生长的指标阈值和适宜的灌溉指标,制定具有普适性的灌溉策略,并通过灌溉试验验证灌溉策略的有效性和可行性。

1 灌溉控制策略及系统设计

1.1 灌溉控制策略

植物遭受水分胁迫时,茎干含水率随土壤含水率的降低而降低。茎干含水率过低或下降范围过大都会影响植物的生理健康。因此,制定灌溉策略首

先需设置茎干含水率下限,保证植物在经过灌溉后能够恢复到健康范围;还需考虑植株间的差异性,对于某些含水率较高的个体,需设置茎干含水率最大下降范围,避免出现下降范围过大而导致植物不能恢复到健康状态的情况。可将这两个指标作为开始灌溉的阈值。

此外,SHAHZAD 等^[18]指出适宜的亏缺灌溉能够提高作物的产量和水分利用效率;过高的土壤含水率会造成水资源浪费和植物根系腐烂。而植物根系缓慢吸水的生理特性决定了茎干含水率对灌溉补水的响应滞后于土壤含水率,若选择茎干含水率作为停止灌溉的指标,则会出现过量灌溉的情况。所以,应该选择适宜植物生长的土壤含水率作为停止灌溉的指标,避免过量灌溉引起水资源的浪费。

本次灌溉控制策略的制定主要遵循 3 个原则:①设定茎干含水率下限阈值。②设定茎干含水率最大下降范围。③设定土壤含水率上限阈值。如图 1 所示,灌溉控制策略具体为:当灌溉监测控制器检测到茎干含水率低于所设定的下限值或者下降范围超过所设定的最大下降范围时,控制器给相应的阀门发出启动信号进行灌溉;当检测到土壤含水率高于所设定的上限阈值时,停止灌溉。

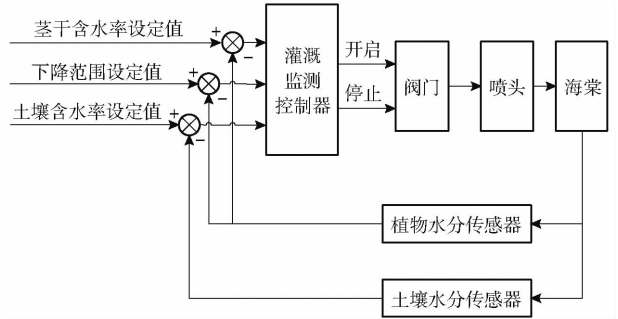


图 1 灌溉控制策略框图

Fig. 1 Schematic of irrigation control strategy

1.2 控制系统设计

1.2.1 系统结构

智能灌溉控制系统由现场控制器、通信中转模块、上位机 3 部分组成。如图 2 所示,控制器将采集的数据打包并通过 NetPort 模块将 RS232 协议转换为 TCP/IP 协议,通过路由器将转换的数据包发送到上位机;上位机在解析完数据后进行判断,当达到灌溉设定阈值时向现场控制器发送启动命令,通过路由器、NetPort 中转后,现场控制器接收到命令后开启相应的电磁阀进行灌溉,当检测到土壤含水率高于所设定的上限阈值时,停止灌溉。

1.2.2 现场控制器设计

现场控制器主要由以下硬件子模块组成:中央

处理器、电源模块、数据存储模块、NetPort 通信模块、时钟模块、AD 采集模块和继电器驱动模块, 结构图如图 3 所示。

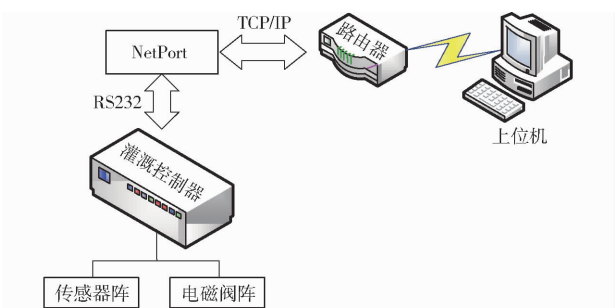


图 2 智能灌溉控制系统结构图

Fig. 2 Intelligent irrigation control system structure diagram

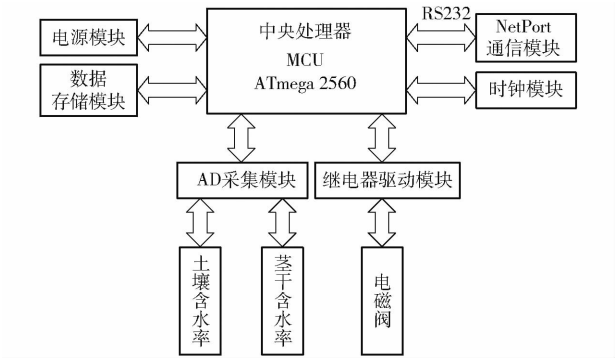


图 3 现场控制器框图

Fig. 3 Field controller block diagram

该控制器以 ATmega 2560 为核心;电源模块给控制器和传感器提供电能;控制器具备 SD 卡数据存储模块,能够实现数据的本地存储;通过 NetPort 模块实现 232 协议与 TCP/IP 协议的转换,再将路由器与上位机设置成相同的网段便能够实现控制器与上位机之间的通信;时钟模块采用 RX8025 芯片,通过 I²C 与单片机进行连接,保证时钟的精确性;通过 AD 采集模块实时获取土壤含水率和茎干含水率,

为灌溉策略提供数据支撑;继电器部分与电磁阀门相连接,通过驱动继电器控制阀门开关。

2 试验设计与方法

2.1 试验地概况

试验地位于北京市海淀区八家三顷园,地处东经 116°20',北纬 40°0',海拔约为 50 m,占地面积约为 30 000 m²。园内土壤质地为粘壤土,土壤容重约为 1.3 g/cm³,pH 值在 7~8 之间。平均气温约为 12.8℃,年日照时数约为 2 560 h,年均降水量 590 mm(主要集中在夏季,约占全年的 70%)。

2.2 试验设计

园内种植树龄 5 a 的西府海棠,茎干挺直,平均直径约为 46.9 mm,主分叉距地面平均高度约为 1.2 m,平均树高约 2.4 m,长势良好。2019 年 4 月初选择 5 棵生长状况较好的西府海棠,移栽于直径 70 cm、高 60 cm 的花盆中,并对花盆进行覆膜处理,目的是让水分散失只通过植物蒸腾作用消耗,同时减少降雨对试验结果的影响。

设置 4 个处理组和 1 个对照组,对照组试验期间每天灌溉,处理组设置不同梯度的土壤含水率并进行干旱胁迫试验,只在规定时间内进行灌溉(表 1)。试验分为 2 个阶段:第 1 阶段为 6 月 11—15 日;第 2 阶段为 6 月 16—25 日。

处理情况如表 1 所示,处理 1 起始土壤含水率为 20%,灌溉补水时间为第 5 天和第 15 天;处理 2 起始土壤含水率为 25%,灌溉补水时间为第 5 天和第 15 天;处理 3 起始土壤含水率为 30%,灌溉补水时间为第 5 天和第 15 天;处理 4 起始土壤含水率为 35%,试验期间不灌溉。对照组起始土壤含水率为 35%,试验期间每天灌溉。

表 1 试验分组处理情况
Tab. 1 Group treatment of test

处理情况	处理 1	处理 2	处理 3	处理 4	对照组
起始土壤含水率/%	20	25	30	35	35
第 1 阶段灌溉日期	6 月 15 日	6 月 15 日	6 月 15 日	不灌溉	每天灌溉
第 2 阶段灌溉日期	6 月 25 日	6 月 25 日	6 月 25 日		

2.3 传感器安装与数据获取

分别于主枝杈下 10 cm 处安装 BD-IV 型植物水分传感器(0~2 500 mV,±2%),用于监测植物茎干含水率;HYSWR-ARC 型土壤水分传感器(0~2 500 mV,±2%)探针向下垂直安装于土层下 10 cm 处,探针有效测量深度为土表下 20~40 cm,用于监测花盆内土壤含水率,安装示意图如图 4 所示。此外,距离海棠种植园北 5 m 处,使用 1.2 节所设计的

现场控制器(试验期间灌溉控制功能不运作),采集土壤含水率和茎干含水率。采集间隔 10 min,数据通过 NetPort 传至上位机,同时通过存储模块存于本地 SD 卡中,实现数据存储双保险。为方便数据处理,后期在进行数据分析时对采集的参数采用 3 点均值滤波的方式简化数据样本。

2.4 茎干含水率标定

BD-IV 型植物水分传感器输出模拟电压信号,

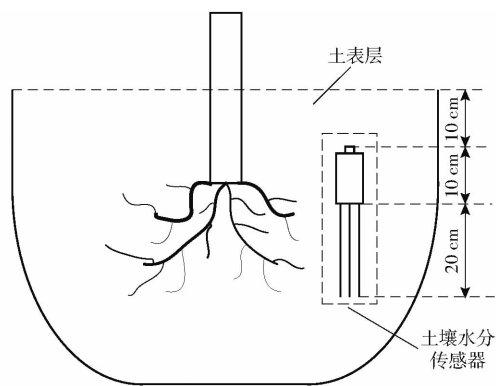


图4 土壤水分传感器安装示意图

Fig.4 Schematic of soil moisture sensor installation

转换成体积含水率的形式需要进行标定试验。本文参照文献[17]对松树树段进行标定的方法,从试验地截取一段直径约为5 cm的海棠树主干,长度约为10 cm;将木段完全浸入水中24 h以增加树干含水率;测得鲜木段体积*V*和质量*M*;之后将装好传感器的木段放置于恒温箱中(温度为25℃),每隔12 h记录一次木段质量与传感器输出电压,直至总质量与电压趋于稳定后,将木段放置于干燥箱中干燥(温度为60℃)至恒质量,再记录质量与电压,标定试验进行14 d,茎干体积含水率计算公式为

$$\theta = \frac{M_A - M_B}{\rho V} \times 100\% \tag{1}$$

式中 M_A ——含水木段质量,g
 M_B ——干木段质量,g
 ρ ——水的密度,g/cm³
 V ——木段体积,cm³

将含水率与电压进行线性拟合,结果如图5所示。由标定试验得到的海棠茎干含水率与电压的关系式为

$$S_{tWC} = 0.0636U - 0.6543 \quad (R^2 = 0.9653) \tag{2}$$

式中 S_{tWC} ——茎干含水率,%
 U ——传感器输出电压,mV

$R^2 = 0.9653$,说明标定曲线的线性度较好。

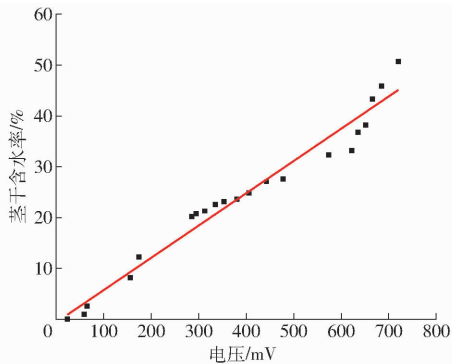


图5 茎干含水率与电压的关系曲线

Fig.5 Curve of relationship between stem moisture content and voltage value

为验证式(2)的可靠性,重新截取直径约为5 cm、长约10 cm的鲜木段,按照干燥标定流程将木段干燥至恒质量。记录传感器的电压和木段质量、体积。利用式(2)将电压转换为茎干含水率,并与干燥法测得的结果进行对比,如图6所示。从图6可以看出,对于所选取的木段,BD-IV型植物水分传感器利用式(2)转换后能够准确地量化木段茎干含水率。

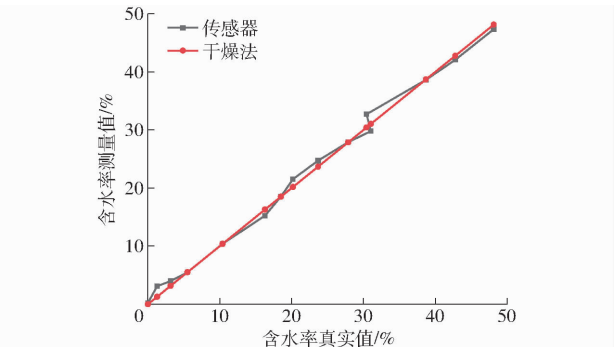


图6 传感器与干燥法的测量结果

Fig.6 Measurement results of sensor and drying method

3 结果与分析

3.1 灌溉阈值分析

3.1.1 干旱胁迫下茎干含水率与土壤含水率的变化情况

如图7所示,5组样本的茎干含水率日变化曲线与EDWARDS等^[19]借助于伽马射线得到的结果非常相似,符合植物水生理日变化规律。当清晨太阳辐射(SAR)与饱和水汽压差(VPD)迅速增加时,叶片蒸腾失水速率大于根系吸水速率,导致茎干含水率开始下降,在下午达到一天中的最小值;反之,当下午SAR和VPD开始下降时,叶片蒸腾失水速率小于根系吸水速率,导致茎干含水率开始回升,在次日清晨达到一天内的最大值^[20]。从曲线变化特征来看,茎干含水率的日变化曲线呈现出单波峰波谷的特点。从曲线走势分析,在整个干旱胁迫过程中,4个处理组的茎干含水率随着土壤含水率的降低均呈现出明显的下降趋势;对照组由于没有进行亏水处理,始终保持充分灌溉,茎干含水率始终保持稳定。

从图7可知,在第1阶段(6月11—15日),处理组1、2、3的茎干含水率最低下降到43%左右,在6月15日灌溉补水后,茎干含水率迅速升高,并且日变化曲线始终保持单波峰波谷的特点。

第2阶段(6月16—25日),由于干旱持续周期变长,茎干含水率下降趋势更为显著。在6月20日以后,下降趋势变缓,这可能是由于植物体内水分已

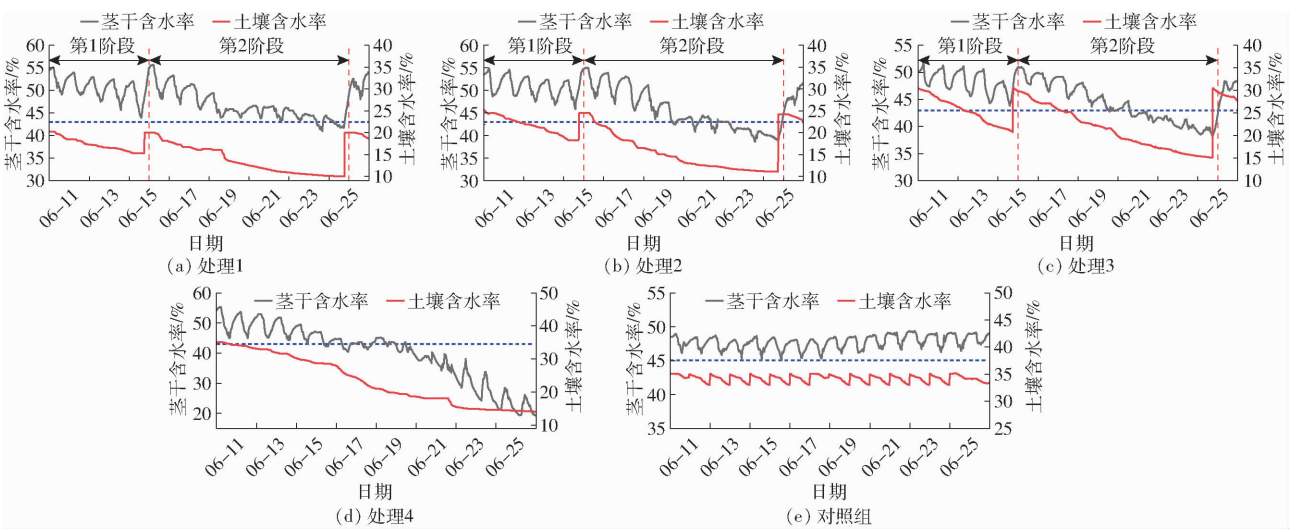


图7 茎干含水率与土壤含水率关系曲线

Fig. 7 Diagrams of relationship between stem moisture content and soil moisture content

经下降到较低水平,植物自身开启了自我保护机制,通过关闭部分叶片气孔和木质部导管降低蒸腾作用来减少水分的散失,从一部分叶片、树枝枯萎也可以看出;此外,处理3的日变化曲线从单波峰波谷变成了双波峰形式,说明缺水已经打破了植物的生理平衡,健康已经受到了威胁。在6月25日灌溉后,各样本对灌溉补水的响应程度发生了明显的变化:处理1和处理3的起始茎干含水率分别为55%和50%,在补水后茎干含水率分别迅速恢复到51.9%和48.4%;而处理2的起始茎干含水率为53%,在补水后仅恢复到48.4%,于补水后的第2天(6月26日)夜晚才恢复到起始水平,所需时间比处理1和处理3更长。可见,植株间具有明显的差异性。

处理4在整个试验期间没有灌溉,可以明显看出处理4的茎干含水率不断下降,最低下降到20%;且日变化曲线从单波峰波谷变为双波峰,最后变化为单波峰。树的所有枝干与叶子均萎蔫枯干,说明处理4的海棠树样本已经濒临死亡。

在试验期间,茎干含水率的日极差发生明显变化(图8)。从图8a~8c可以看出,试验第2阶段(6月16—25日)干旱胁迫共持续10d,处理1、处理2和处理3的茎干含水率日极差总体呈现变小的趋势,再次证明植物在缺水状态下,通过关闭部分木质部导管束来降低蒸腾作用,以此减少水分散失的自我保护机制;处理4试验期间不灌溉,图8d为处理4在整个试验期间(6月11—25日)茎干含水率日极差的变化情况,从图8d可以看出,干旱胁迫持续到第10天(6月20日)前的变化规律与处理1、处理2和处理3相同,但从第10天起(6月20—25日),茎干含水率日极差呈现增大的趋势,说明处理4的海棠样本由于干旱胁迫程

度的加深,自我保护机能减弱,已经逐渐丧失了对体内水分的调控功能。

3.1.2 茎干含水率阈值确定

试验中观察到的海棠树外表变化见图9。图9a为试验第1阶段末、处理2的样本外观图,由于第1阶段干旱胁迫周期为5d,海棠树遭受的干旱胁迫程度较低,截止到6月15日灌溉补水时仅有少部分枝叶出现萎蔫现象。图9b为处理2在试验第2阶段末的外观图,可以看出由于第2阶段遭受干旱胁迫的时间长达10d,在6月25日灌溉补水时,有较多的枝叶出现萎蔫。从保障植物观赏性的角度来选择,以第1阶段作为灌溉阈值的节点更具合理性。

根据试验结果、结合图9和图7,将干旱胁迫第1阶段作为研究的节点,茎干含水率如表2所示,5个样本的茎干含水率最小值约为43%;下降值在12%以内;并且第1阶段海棠树仅有极少部分的枝叶出现萎蔫情况。满足一般灌溉策略制定的要求。因此,选取茎干含水率下限值43%和最大下降值12%作为开始灌溉的阈值。

3.1.3 土壤含水率阈值确定

土壤含水率对于灌溉补水的响应速度快于植物茎干含水率,茎干含水率通常会在灌溉后的次日凌晨达到峰值,若以茎干含水率作为停止灌溉的指标,则会出现过量灌溉的情况,因此可以设置适宜海棠树生长的土壤含水率作为停止灌溉的指标,以达到节水灌溉的目的。

处理4没有进行灌溉处理,模拟盆栽海棠树从正常生长到干旱死亡的生理过程,随着土壤含水率的减少,干旱胁迫程度逐渐加重,茎干含水率逐渐降低。为了探究适宜海棠树生长的土壤含水率范围,统计该样本的茎干含水率与土壤含水率,样本数量

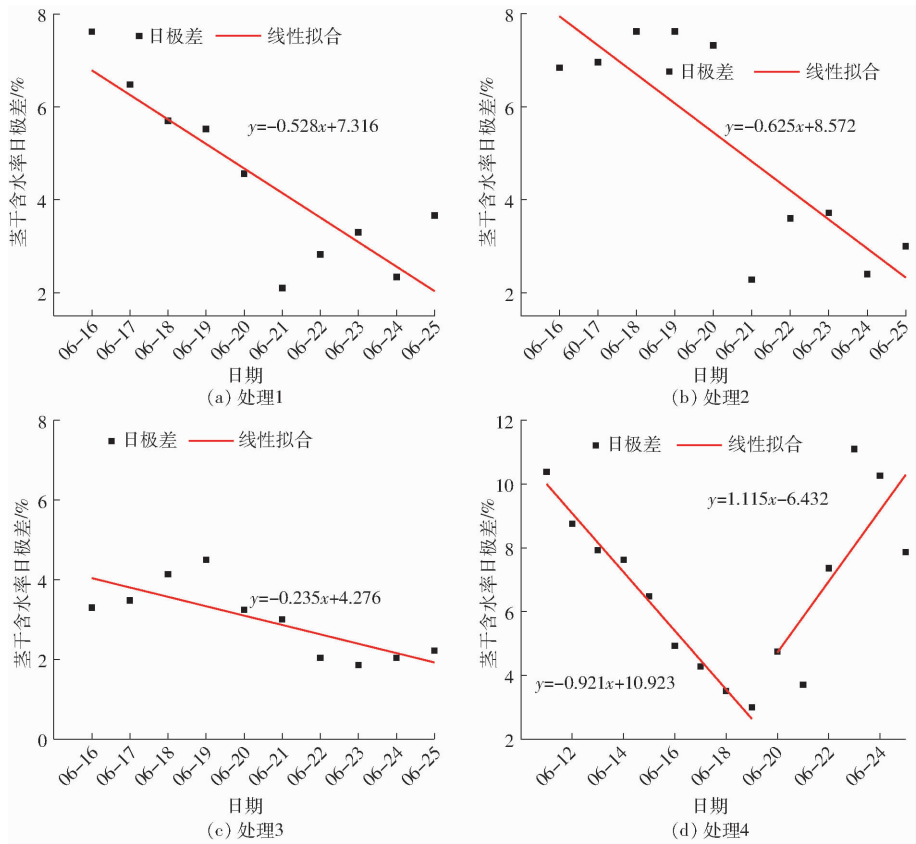


图8 干旱胁迫下茎干含水率日极差变化曲线

Fig.8 Diurnal variations of stem moisture content under drought stress



图9 树枝树叶萎蔫情况

Fig.9 Withering of branches and leaves

表2 干旱胁迫第1阶段茎干含水率

Tab.2 Changes of stem moisture content in early stage of drought stress %

样本	茎干含水率		
	最大值	最小值	下降值
处理1	55.15	43.93	11.22
处理2	54.87	45.85	9.02
处理3	51.68	43.83	7.85
处理4	55.05	43.05	12.00
对照组	48.97	45.13	3.84

为768。并对土壤含水率与茎干含水率进行相关性分析,如图10所示,得到茎干含水率与土壤含水率的关系式为

$$S_{tWC} = 0.0114S_{WC}^3 - 0.9005S_{WC}^2 + 23.799S_{WC} - 165.06 \quad (R^2 = 0.9183) \quad (3)$$

式中 S_{WC} ——土壤含水率,%
 $R^2 = 0.9183$,说明拟合度较好。

开启阀门灌溉的下限阈值是茎干含水率低于43%,处理4样本在干旱胁迫试验前的日平均茎干含水率约为50%,根据式(3),结合灌溉的下限阈值,当茎干含水率在43%~50%时,土壤含水率在21%~33%。所以,对于盆栽海棠样本,需保证茎干含水率在50%以上,土壤含水率需达到33%以上。

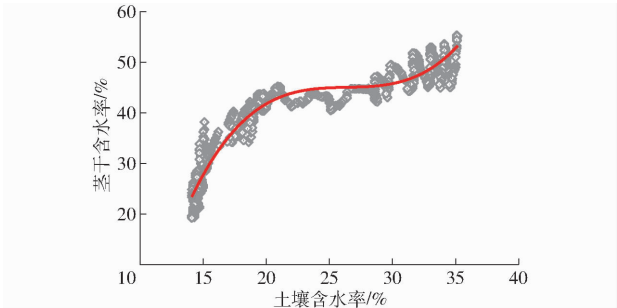


图10 适宜海棠生长土壤水分阈值

Fig.10 Soil moisture threshold suitable for growth of crabapple

3.2 验证实例

从7月11日开始,根据茎干含水率下限值43%和最大下降值12%两种指标分别选取样本树

进行实验验证。海棠树 1 是依照茎干含水率下限值进行灌溉,海棠树 2 按照茎干含水率下降范围进行灌溉。

图 11 为海棠树 1 茎干含水率与土壤含水率的变化曲线。从图 11 可以看出,茎干含水率最大值在 52% 左右,于 7 月 16 日 15 时到达最小值 42.91%, 低于设定阈值 43%, 控制器驱动电磁阀进行灌溉, 土壤含水率从 15.95% 上升到 33.80%。茎干含水率在次日凌晨达到峰值点,说明植物恢复到健康水平。该试验过程通过从树外表观察:仅有极少部分树叶有萎焉现象,个别细小树枝有缺水现象,树的整体长势良好,有许多新生嫩叶长出。证明按茎干含水率 43% 作为灌溉下限、土壤含水率 33% 作为灌溉上限的灌溉策略具有可行性。

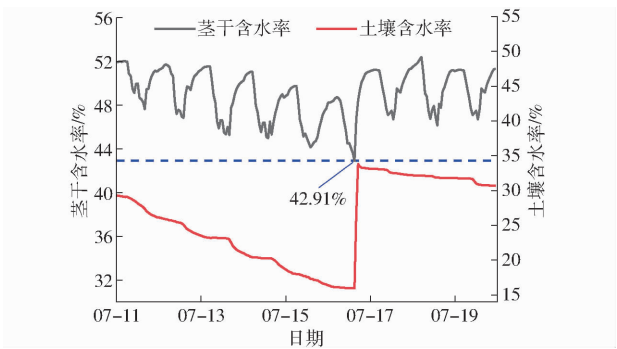


图 11 按茎干含水率最小值灌溉相关参数变化曲线
Fig. 11 Changing curves of relevant parameters of irrigation according to minimum stem moisture content

图 12 为海棠树 2 的茎干含水率和土壤含水率的变化曲线,树 2 的茎干含水率最大值为 56.94%。由图可知,在 7 月 16 日 15 时茎干含水率达到最小值 44.52%,下降值达到 12.42%,超过设定值 12%, 控制器驱动阀门进行灌溉,土壤含水率从 15.7% 升

至 33.6%。茎干含水率在 7 月 17 日凌晨达到峰值,整体呈上升趋势。外表与树 1 相同,长势良好,树枝、树叶萎焉状况占极少数。证明按茎干含水率下降值不超过 12% 作为灌溉下限、土壤含水率 33% 作为灌溉上限的灌溉策略同样有效可行。

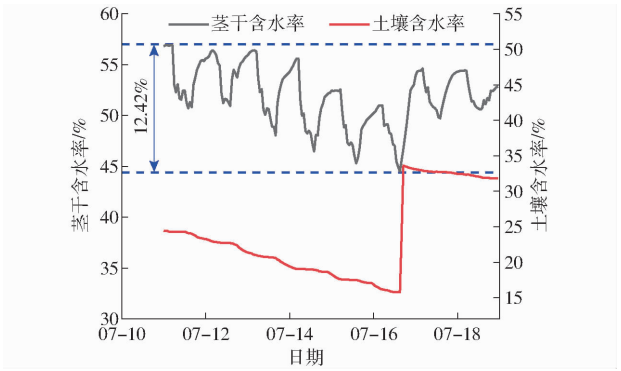


图 12 按茎干含水率下降范围灌溉相关参数变化曲线
Fig. 12 Changing curves of irrigation related parameters according to reduction range of stem moisture content

在实际制定灌溉策略时,将两种指标相结合可以保证灌溉策略的普适性,对于耐干旱树种,可以选择茎干含水率下限值作为灌溉指标;对于树干直径较大、茎干含水率较高的树种,优先选择茎干含水率下降范围作为灌溉指标。

4 结束语

基于 BD-IV 型植物水分传感器分析了干旱胁迫下海棠树的茎干含水率变化规律,提出了以茎干含水率 43% 和茎干含水率最大下降值 12% 为下限阈值、土壤含水率 33% 为上限阈值的灌溉策略,并利用所设计的灌溉控制系统验证了该灌溉策略的有效性,结果表明,该灌溉控制策略能够满足海棠树的生命需水,可为有关活立木灌溉控制研究提供新思路。

参 考 文 献

[1] GOODWIN I, BOLAND A M. Scheduling deficit irrigation of fruit trees for optimizing water use efficiency [R]. Australia: Department of Natural Resources and Environment, Institute if Sustainable Irrigated Agriculture, 2002.

[2] 赵燕东,高超,张新,等. 植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(7):290-300. ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Review of real-time detecting methods of water stress for plants[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(7):290-300. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160740&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.040. (in Chinese)

[3] 李秧秧,王全九. 几种基于植物生理活动的节水灌溉指标研究进展[J]. 节水灌溉, 2009(2):32-35. LI Yangyang, WANG Quanjiu. Advances in several water-saving irrigation indexes based on plant physiological activities[J]. Water Saving Irrigation, 2009(2):32-35. (in Chinese)

[4] JUHASZ A, SEPSI P, NAGY Z, et al. Water consumption of sweet cherry trees estimated by sap flow measurement[J]. Scientia Horticulturae, 2013,164:41-49.

[5] 张彦群,王建东,龚时宏,等. 基于液流计估测蒸腾分析覆膜滴灌玉米节水增产机理[J]. 农业工程学报, 2018,34(21):89-97. ZHANG Yanqun, WANG Jiandong, GONG Shihong, et al. Analysis of water saving and yield increasing mechanism in maize field with drip irrigation under film mulching based on transpiration estimation by sap flow meter[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(21):89-97. (in Chinese)

- [6] NICOLAS E, TORRECILLAS A, ORTUNO M, et al. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 72(2):131–145.
- [7] 张亚雄,孙西欢,马娟娟,等. 蓄水坑灌下苹果树茎流速率日变化及其影响因子的研究[J]. *节水灌溉*, 2017(5):11–15. ZHANG Yaxiong, SUN Xihuan, MA Juanjuan, et al. Daily variation of stem flow rate of apple tree and influence factors under water storage pit irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017(5):11–15. (in Chinese)
- [8] FERNANDEZ J E, CUEVAS M V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(2):135–151.
- [9] 员玉良,程强, LUTZ Dawerow, 等. 基于茎直径和茎流复合测量的植物根压无损观测方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(11):290–295. YUAN Yuliang, CHENG Qiang, LUTZ Damerow, et al. Non-destructive observation of plant root pressure based on combined measurement of stem diameter and sap flow[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(11):290–295. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151139&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.039. (in Chinese)
- [10] GOLDHAMER D A, FERERES E. Irrigation scheduling of almond trees with trunk diameter sensors[J]. *Irrigation Science*, 2004, 23:11–19.
- [11] 张寄阳,段爱旺,孟兆江,等. 基于茎直径微变化的棉花适宜灌溉指标初步研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(12):86–89. ZHANG Jiyang, DUAN Aiwang, MENG Zhaojiang, et al. Rational indicators for irrigation scheduling of cotton based on microchanges of stem diameter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(12):86–89. (in Chinese)
- [12] 张付杰. 植物蒸腾耗水量检测方法的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014. ZHANG Fujie. Study on measuring of plant transpiration amount[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [13] 高超,赵玥,赵燕东,等. 基于微环境参数集的茎干水分变化规律与估算模型研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(12):292–298. GAO Chao, ZHAO Yue, ZHAO Yandong, et al. Research on diurnal variation and estimation model of stem water content based on micro-environment parameter set[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(12):292–298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171235&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.035. (in Chinese)
- [14] ZHOU H, SUN Y, SHAN G, et al. In situ measurement of stem water content and diurnal storage of an apricot tree with a high frequency inner fringing dielectric sensor[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 250–251:35–46.
- [15] SUN Y, ZHOU H, SHAN G, et al. Diurnal and seasonal transitions of water and ice content in apple stems: field tracking the radial location of the freezing- and thawing-fronts using a noninvasive smart sensor[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 274:75–84.
- [16] 周海洋,孙宇瑞, SCHULZE LAMMERS P, 等. 基于内边缘场电容效应的树干/枝水分传感器研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):317–323. ZHOU Haiyang, SUN Yurui, SCHULZE LAMMERS P, et al. Inner fringing-field capacitance sensor for measurement of stem water content[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):317–323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160143&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.043. (in Chinese)
- [17] 赵燕东,高超,张新,等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(1):310–316. ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1):310–316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160142&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042. (in Chinese)
- [18] SHAHZAD A, YUEYUE X, IRSHAD A, et al. Tillage and deficit irrigation strategies to improve winter wheat production through regulating root development under simulated rainfall conditions[J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 209:44–54.
- [19] EDWARDS W R N, JARVIS P G. A method for measuring radial differences in water content of intact tree stems by attenuation of gamma radiation[J]. *Plant Cell and Environment*, 1983, 6(3):255–260.
- [20] GAO Chao, ZHAO Yue, ZHAO Yandong. A novel sensor for noninvasive detection of in situ stem water content based on standing wave ratio[J]. *Journal of Sensors*, 2019, 10:1–10.
- [21] 高超,赵玥,赵燕东. 基于茎干含水率的紫薇病虫害等级早期诊断方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(11):189–194. GAO Chao, ZHAO Yue, ZHAO Yandong. Early diagnosis method of disease and pest level on *Lagerstroemia indica* based on stem water content[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(11):189–194. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181122&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.022. (in Chinese)
- [22] 陈昌雄,余坤勇,曹祖宁,等. 小叶青冈天然林树干含水率的研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(12):39–41.

- CHEN Changxiong, YU Kunyong, CAO Zuning, et al. Moisture content of tree stem of *Cyclobalanopsis myrsinaefolia* (Bl.) oerst in natural forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2010, 30 (12): 39 – 41. (in Chinese)
- [23] 张伶俐, 王润涛, 张长利, 等. 基于调亏理论和模糊控制的寒地水稻智能灌溉策略[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 52 – 58.
- ZHANG Lingyi, WANG Runtao, ZHANG Changli, et al. Intelligent irrigation strategy based on regulated deficit theory and fuzzy control for rice in cold region[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13): 52 – 58. (in Chinese)
- [24] WANG X, MENG Z, CHANG X, et al. Determination of a suitable indicator of tomato water content based on stem diameter variation[J]. Scientia Horticulturae, 2017, 215: 142 – 148.
- [25] LI Xianyu, SHI Haibin, SIMUNEK J, et al. Modeling soil water dynamics in a drip-irrigated intercropping field under plastic mulch[J]. Irrigation Science, 2015, 33(4): 289 – 302.
- [26] 赵燕东, 马扬飞, 王勇志. 绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 46 – 50.
- ZHAO Yandong, MA Yangfei, WANG Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation amount[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 46 – 50. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120309&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.009. (in Chinese)
- [27] 蔡甲冰, 许迪, 司南, 等. 基于冠层温度和土壤墒情的实时监测与灌溉决策系统[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 133 – 139.
- CAI Jiabing, XU Di, SI Nan, et al. Real-time monitoring system of crop canopy temperature and soil moisture for irrigation decision-making[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(12): 133 – 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151219&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.019. (in Chinese)
- [28] CONCEICAO N, TEZZA L, HAUSLER M, et al. Three years of monitoring evapotranspiration components and crop and stress coefficients in a deficit irrigated intensive olive orchard[J]. Agricultural Water Management, 2017, 191: 138 – 152.
- [29] PALTINEANU C, SEPTAR L, MOALE C. Crop water stress in peach orchards and relationships with soil moisture content in a chernozem of dobrogea[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2013, 139(1): 20 – 25.
- [30] YOUNG B C, JONG H S. Analysis of the changes in medium moisture content according to a crop irrigation strategy and the medium properties for precise moisture content control in rock wool[J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2019, 60(3): 337 – 343.
- [31] ABRAHA M G, SAVAGE M J. Comparison of estimates of daily solar radiation from air temperature range for application in crop simulations[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(3): 401 – 416.