

自动传感监测系统在经济林木水分管理上的应用

吴梅¹, 陈铭², 渠心静², 李俊² (1. 国家林业和草原局中南调查规划设计院, 湖南长沙 410014; 2. 中南林业科技大学经济林培育与保护省部共建教育部重点实验室, 经济林培育与利用湖南省高校“2011”协同创新中心, 湖南长沙 410004)

摘要 自动传感监测系统与常见的灌溉系统(喷灌系统、喷雾系统、地表滴灌系统及地下滴灌系统)结合不仅能节省能源和人力成本、节约水资源、控制非点源污染,而且具有精确控制浇灌、零渗漏、零污染等特点,广泛应用于经济林木水分的研究和应用中。概述了经济林木干旱研究现状及相关的抗旱品种筛选方法和干旱胁迫生理研究,并以 Em-5 型水分传感器和 Em-50/G 型数据采集器为例详细介绍了传感器的组成。在此基础上概述了自动传感监测系统在林木水分研究与管理中的应用,从合理灌溉、精准林业和智慧林业 3 个方面探讨了其经济林木应用中需注意的重点,并提出了其今后研究和应用的方向。

关键词 自动传感监测系统;林木;干旱;水分管理

中图分类号 TP 274 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)01-0102-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.01.026



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Application of Automatic Sensing System in Non-wood Forest's Water Management

WU Mei¹, CHEN Ming², QU Xin-jing² et al (1. Central South Inventory and Planning Institute of National Forestry and Grassland Administration, Changsha, Hunan 410014; 2. Key Laboratory of Non-wood Forest Cultivation and Protection of Ministry of Education, 2011 Cooperative Innovation Center of Cultivation and Utilization for Forest Trees of Hunan Province, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hunan 410004)

Abstract Automatically sensing monitoring system with common irrigation system (sprinkler systems, spray systems, surface drip irrigation and subsurface drip irrigation system) can not only save energy and labor costs, save water resources, control non-point source pollution, and it has accurate control to water, zero pollution, zero leakage etc, it has been widely used in the study of non-wood forest moisture. In this paper, the basic situation of non-wood forest drought research and related drought resistance screening and drought stress physiological research were summarized, and the composition of the sensor was described in detail with the Em-5 moisture sensor and Em-50/G data collector as examples. On this basis, the application of automatic sensing monitoring system in forest drought research was summarized, the key points of non-wood forest drought research were explored from three aspects of reasonable irrigation, precise forestry and intelligent forestry, the direction of future research and application was proposed.

Key words Automatic sensing system; Forest; Drought; Water management

水是植物赖以生存的物质基础,充足的水分供应是植物正常生长发育的基本条件。随着全球人口数量的增加和自然生态环境的日益恶化,全世界粮食产量的提高很大程度上受环境胁迫的限制,其中干旱是限制农业生产的主要环境因素之一^[1-2]。全世界由于水分亏缺导致的减产超过其他因素造成的减产总和。干旱严重影响着作物的生长发育、产量及品质,每年因干旱导致作物减产达 50% 以上。全球约 1/3 土地面积属于干旱或半干旱区域,而中国干旱、半干旱地区约占国土面积的 50%^[3]。干旱使土壤墒情极差,导致多数苗木脱水现象严重,影响种苗培育和林木生产。春季的持续干旱易造成幼苗的生理干旱,从而导致种苗成活率下降^[4]。经济林木的立地条件差,受干旱的影响程度较其他林分更大。干旱易造成结果期的经济林叶片枯萎脱落,新梢停止生长,果实大量脱落。调查发现,无灌溉条件下的经济林叶片由绿变黄,失去光合效能;外围新梢趋于停长,开始大量落果,未脱落的果实大多形成失水果,失去了商品价值。同时,受干旱胁迫的经济林果实易并发日灼病,果面组织呈腐烂或干枯状^[5]。

水资源的时空分布不均,城镇化进程、人口增长过快等原因导致区域性水资源短缺,加上灌溉所需劳力成本的增

长,促使园林、农业等领域在果树栽培、花卉种养、种苗培育等方面选择更有效的灌溉系统^[6]。自动无线传感器技术是一种新兴的用于实时监测土壤水分含量变化的现场测量技术手段,在大范围区域它具有高空间和时间分辨率^[7]。自动灌溉系统的优势主要体现在人力成本和水资源的节省,能有效控制非点源污染,减少根际病原微生物危害,提高苗木品质,被广泛应用于苗木生产中^[8]。在林木栽培和研究中,常采用自动传感监测系统与常见的喷灌系统、喷雾系统、滴灌系统相结合,软件系统与硬件系统相结合的方式,实现操作自动化。将传感器与自动浇灌系统相结合,通过实时监测土壤基质或植物的水分亏缺状况来进行灌溉,从而实现节水目的,近年来该项应用研究日益增多。有研究报道了一种基于基质水分含量的电容传感器自动浇灌系统,其特点是根据环境参数和植物体积的变化自动调节灌溉,能有效地将基质体积含水量稳定在一定的范围之内^[9]。该研究基于经济林木干旱研究现状,简要概述了自动传感监测系统的组成和优势,并提出了今后应用的方向和要点。

1 经济林木干旱研究现状

1.1 经济林木对干旱胁迫的生理响应 植物抗旱性是一个复杂性状,包括植物的形态解剖构造、水分生理形态特征及生理生化反应到组织细胞、光合器官及原生质结构特点的综合反应。植物生长过程对干旱最为敏感,轻微的干旱胁迫就能使生长缓慢或停止。干旱条件下,植物的茎生长会受到明

基金项目 湖南省林业科技创新专项(XLK201987)。

作者简介 吴梅(1982—),女,湖南衡阳人,工程师,从事林业资源调查设计及林业规划研究。

收稿日期 2020-05-24;修回日期 2020-06-16

显抑制,外形较正常植株明显矮小,根冠比增大^[10]。在生理生化上表现为气孔关闭,光合速率迅速下降,脯氨酸、可溶性糖等渗透调节物质积累等,使植物在干旱条件下重新建立体内代谢平衡,从而免受干旱所引起的损伤^[11]。对高经济价值的粮油作物如水稻、玉米、大小麦等干旱胁迫研究已经进入了分子和细胞水平^[12]。但是,对于大部分林木植物来说,抗旱机理研究在植物形态、生理生化机制方面居多^[13],对于有些树种如杨树、松树、杉树等也有做到分子和细胞水平的^[14]。

在干旱胁迫下,经济林木茎叶形态结构会发生改变。初期,植物会对干旱胁迫产生应激反应,表现为各种生理活动减缓或停止,随着干旱胁迫的加剧,叶片发生萎蔫,影响光合效能,抑制植物生长。对经济林木叶片的组织结构研究发现,叶片气孔密度、角质层和栅栏组织厚度与植株的抗旱性呈正相关^[15]。侧根对植物抗旱有重要作用^[16];干旱胁迫能降低次生根的发生数量,增加初生根上分枝根的形成;根系生物量呈下降趋势,根系活力强的林木抗旱性较强^[17]。

当植物受到干旱胁迫时,细胞壁和细胞质膜相接触可引起胞内游离钙离子浓度增加,也能造成植物活性氧迸发,导致胞内信号物质变化,诱导基因表达,干旱胁迫会使植物体内 DNA 发生损伤、断裂甚至基因突变,对植物造成严重的伤害^[18]。同样,干旱胁迫会引起植物细胞通透性发生变化,限制水分以及营养物质从胞内向外扩散,在一定程度上增加植物抗菌和应对干旱胁迫的能力。在植物对干旱应答通路研究中发现,S-腺苷蛋氨酸合成酶起到重要作用,S-腺苷蛋氨酸合成酶基因为木质素合成提供甲基供体,是细胞壁木质化过程中的关键基因。S-腺苷蛋氨酸的表达量会在水分胁迫下急剧增加,在持续干旱胁迫下植物细胞的伸长生长会停止,随后植物木质化程度加剧,减少水分和营养物质向外扩散以增强植物细胞的抗旱能力^[19]。

1.2 植物对干旱胁迫响应的快速筛选技术 植物抗旱性最终应该体现在产量指标或与产量相关的指标上,比如生长量或生物量(株高、径长、鲜重、干重、经济产量)。除了产量或生物量指标外,在干旱研究中常规的评价指标有形态指标(根系的长度与分布、根冠比、植株冠层结构特征等)、生理指标(水分生理、光合速率、气孔导度、蒸腾速率、叶片或冠层温度、细胞质膜透性等)、生化指标(渗透调节物质、脱落酸、酶活力等)。这些指标大多需要破坏性测量。

为了加速抗旱性筛选和遗传育种进程,国内外学者都在找寻简单、可靠、快捷的筛选方法和非破坏性测定指标。近年,随着仪器设备技术的发展,一些非破坏性测量仪器为研究者们提供了方便。由于各种原因,测量结果的可靠性并不乐观。Berger 等^[20]提出应用热红外图像技术(thermal infrared imaging technique 或者称 infrared thermography)对大田作物如小麦、大麦、玉米等品种的抗旱性进行高效筛选(high throughput screening)的可能性。这种技术的测定原理是基于叶片在干旱胁迫下气孔逐渐关闭,导致叶片温度升高,从而通过连续测量叶片或冠层的温度变化来判断各个品种的

耐旱性。也就是说,在相同干旱胁迫下,抗旱性高的品种有较低的叶片温度或冠层温度。但是,这种图像技术目前还没有得到应用,一方面是设备昂贵,另一方面这种测定技术容易受其他逆境和环境条件的影响,从而产生测定误差。有学者建议了相似的快速筛选法,利用便携式气孔导度计频繁地测定叶片的气孔导度,从而筛选出抗旱品种。同样,这种技术的先决条件是要在相同的干旱胁迫程度下进行,并且不受其他环境因子如高温等影响。也就是说,在测定气孔导度的同时,也要测定土壤含水量。在相对密闭的温室或人工气候室内使用时还要特别注意工作人员的呼吸导致二氧化碳浓度升高,从而导致气孔关闭,造成测定误差^[21]。

还有一种快捷、非破坏性的测定方法。只有在重度干旱胁迫下,叶绿素荧光的各个参数(初始荧光、最大荧光、PSII最大量子效率等)才会有变化^[22]。所以,叶绿素荧光作为干旱胁迫的筛选指标不够敏感,不能单独作为筛选指标,但可作参考。

基于气孔导度对其他环境因子的敏感性,单独使用这个指标不可靠,尤其是在田间情况下,要特别注意其他环境因子存在胁迫的可能性。另一种较为便捷的方法是测定叶片温度,最好是连续测定。不管用哪种方法,都必须在同步测定干旱胁迫程度的前提下进行,并明确植株不受其他环境因子的限制。

2 自动传感监测系统的组成

自动传感系统主要由无线传感器、数据采集器、电磁阀、终端控制装置等组成(图1)。干旱研究用的传感器有土壤水分传感器和环境因子的传感器,如温湿度、光量子或日射传感器。植物对干旱胁迫的响应与周围环境有直接关系,所以在监测水分含量的同时,也要同时监测并记录环境因子。时域反射法(TDR)是20世纪80年代发展起来的一种土壤水分测定方法,是一个类似于雷达的系统,按均匀时间间隔取样,通过脉冲从波段管的始端传到末端的时间差来识别土壤水分的表征,从而实现土壤水分变化情况监测^[23]。此方法有较强的独立性,其结果与土壤类型、密度、温度基本无关,测定精度比较高,但是TDR传感器及其配套设备比较昂贵。自80年代后期以来,许多公司如AquaSPYsentek、Delta-T、Decagon(现改名成METER)开始用比TDR更为简单的方法来测量土壤水分含量,数据采集也比较简单。

EC-5型是由EC-10和EC-20型水分传感器改进而来的新型传感器,通过发射频率为70 MHz的方波来测量探针周围土壤的介电常数,并通过数据采集器的计算程序将所测得的介电常数转换为土壤体积含水率。EC-5型传感器的优点是数据记录时间间隔最小可达1 s,能持续监测土壤水分变化,且能有效降低盐分、温度、电介质等因素的干扰,及时反映土壤水分状况。Em50/G是METER公司推出的5通道数据采集器(含干电池供电和太阳能板+充电电池供电2种类型),是ECH20土壤含水量监测系统的核心部件,可连接任意型号的ECH20系统传感器。Em50/G安装在用O型圈密封防雨的防护箱内,且电池型Em50的耗电量非常小,电

池可连续使用1年,能每分钟读取1个数据,满足野外长期监测的需要。利用ECH2O Utility软件可以设置日期、时间、测量间隔和数据收集等。

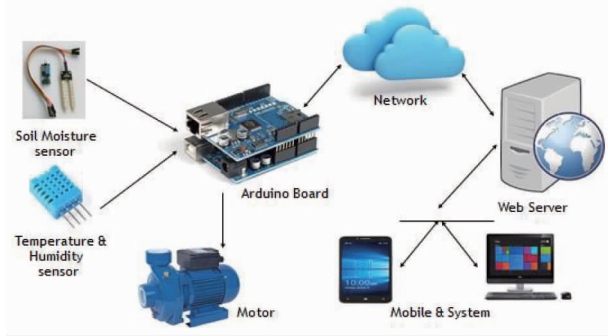


图1 自动传感监测系统的组成部分

Fig. 1 Components of the automatic sensing and monitoring system

3 自动传感监测系统在林木干旱研究中的应用

干旱是林木在生长过程中常遇到的逆境。干旱胁迫可导致苗高、地径生长量下降50%以上。为适应干旱,林木在逆境中表现出耐受性,在叶片形态及结构、内含物质、渗透调节及酶调节等方面会产生一系列生理变化,减轻甚至避免细胞受到伤害^[24]。研究表明,干旱胁迫会导致刺槐叶片水分状况趋于恶化,生长趋于衰弱,单株总叶面积下降,各器官干物质积累减少。山杏在干旱胁迫条件下表现出叶片保水力和细胞膜稳定性相对较弱、抗氧化酶活性和渗透调节能力相对较低的特点^[24]。干旱胁迫下,油松、侧柏及柠条苗木均可通过调节根系内可溶性蛋白质、可溶性糖、淀粉和游离氨基酸的含量以提高自身对干旱的抵抗力^[24]。林木对逆境的耐受性随着植株生长而变化,一般幼苗对逆境如干旱胁迫等最敏感^[25]。随着植株生长,抗旱性也逐渐提高。但是,同样的干旱胁迫程度在生殖生长期遭受时通常会导致更大的减产,譬如杏仁。在林木生长过程中利用自动传感监测系统对林木周围土壤含水量进行精确监控,有利于林木正常生长,不会使其受到干旱胁迫。Nemali等^[9]利用土壤(基质)水分传感器、数据采集器和继电器控制器有效地把基质体积含水量控制在设定的范围之内。国外学者利用传感器系统和自动浇灌控制系统研究了几种花卉植物和几个棉花品种的抗旱特性^[26]。至今已有很多学者采用这种自动灌溉控制系统,研究多种花卉植物如矮牵牛、美国矾根、长春花在形态发育、生理生化等方面的耐旱特性^[27],这种控制系统与实际情况不同之处在于植株生长在恒定的土壤水分含量下。

4 自动传感监测系统在经济林木水分研究和应用中的重点和方向

4.1 合理灌溉 水分是经济林正常生长的重要因素。根据经济林生长发育的需水要求和水肥条件,有必要及时进行合理的灌溉。采用土壤水分传感器和智能化灌溉系统相结合的方式,通过分析插入土壤中的水分传感器传输回的实时数据,结合果树不同生育期需水规律,精确计算出林木的水分胁迫指数,可用于指导灌溉,避免林木发生干旱胁迫或过度

灌溉。如果利用基于土壤水分含量的传感器控制灌溉系统来浇灌苗圃和温室中培育的植物,通过控制栽培基质的含水量,使植物生长在最适的水分条件下,将极大节省灌溉用水量,同时也能减少杀虫剂和肥水的渗漏^[28]。

4.2 精确林业 在传统的低效型、高能耗林业逐渐被高效、低能耗、集约、持续发展的现代林业生产方式所代替,以数据和知识高度密集为主要特征的精确林业中,自动传感监测系统在其中的应用非常广泛^[29]。Dooley等^[30]以精确林业为主旨进行定点作业决策,对不同传感技术采集的数据进行比较分析,分析了林业生产中相对湿度、温度、坡度和坡向、相对景观特征的位置、可视信息、声音、振动等实时数据采集的传感器,以期探索出最先进的传感器。近代植物水分生理研究也为精准灌溉系统提供了科学且准确的依据,即可以通过根、茎、叶等各个器官在体积上的微小变化反映出植物水分状态的变化,这种变化能通过微米量级测量显示出来,从而有助于实现真正意义上的智能节水灌溉。通过传感器技术和灌溉技术相结合的方法,更加直接、快速、精确地测出植株的需水情况,并进行及时浇灌,既解决了灌溉用水的不必要浪费问题,也解决了经济林木因缺水而受到干旱胁迫的问题。

4.3 智慧林业 在人工智能、移动互联网等新技术的推动下,我国林业发展已由传统林业向“智慧林业”迈进。国家林业和草原局在《中国智慧林业发展指导意见》中指出,林业中信息化的应用已经从零散的点的应用发展到融合的、全面的创新应用,随着现代信息技术的不断更新,将逐步实现和完善林业资源的实时、动态监测和管理。智慧林业的发展与传感器的广泛应用息息相关。首先,传感器等技术使智慧化林业系统实现林业信息资源的数字化;其次,通过传感设备和智能终端,实现林业信息传输的感知化,空中、地下、地上全覆盖,实现对森林、湿地、沙地、生物多样性的现状、动态变化进行有效监管。运用传感器技术,动态监测经济林地土壤水分含量、树体含水量和空气相对湿度等,结合智能化浇灌系统,对经济林进行合理灌溉和栽培,全面提升经济林果实产量和质量,推动经济林地可持续发展。

干旱将是一个长期存在的世界性难题。受水资源缺乏和水利设施不够完善的限制与影响,大部分位于丘陵和山地上的经济林灌溉问题得不到有效解决。在一些低山丘陵地区存在降水量小、水资源不足和经济林蓄水保墒能力差等问题,导致经济林果实产量低、品质差。因此,解决经济林水资源和合理灌溉的问题尤为重要。基于自动传感监测系统,结合灌溉系统,推进对经济林干旱机理研究的进程,合理、精确地控制并测定植株干旱胁迫的程度,以及植株对干旱胁迫响应的量化和评价具有重要的意义。自动传感监测系统在实际应用中还存在诸多问题,如传感探头易受到土壤盐分积累、温度等多种因素的干扰,测量响应速度慢和测量精度不够高^[31-32];监测终端与各土壤水分传感器之间全部用有线连接,必然在测量区域地下大量埋设传感器引线,易受耕作等人为破坏,修复维护困难等。随着自动传感监测系统的逐步

完善和发展,将进一步深入对经济林土壤含水量问题、精准灌溉问题和经济林水分的研究。

参考文献

- [1] 汤章城. 植物对水分胁迫的反应和适应性——I. 抗逆性的一般概念和植物的抗涝性[J]. 植物生理学通讯, 1983, 19(3): 24-29.
- [2] 降云峰, 赵晋锋, 马宏斌, 等. 作物干旱研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 1-5.
- [3] 何修道, 王立, 党宏忠, 等. ECH2O EC-5 水分传感器测定沙地土壤含水率的可靠性[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 68-71, 77.
- [4] 王云变, 刘洋, 王成虎, 等. 干旱对山西林业的影响及应对措施[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(1): 93-96.
- [5] BOGENA H R, HUISMAN J A, OBERDÖRSTER C, et al. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications[J]. Journal of hydrology, 2007, 344(1/2): 32-42.
- [6] 牛艳东, 龙维, 孙友平, 等. 传感器控制自动灌溉系统的研制及其在油茶苗木生产中的应用[J]. 湖南林业科技, 2018, 45(1): 6-11.
- [7] 闫文清, 任宝君, 马桂珍. 严重干旱对建平县果树生产的影响及应对策略[J]. 现代农业, 2009(12): 13-14.
- [8] 陈永忠, 肖志红, 彭邵锋, 等. 油茶果实生长特性和油脂含量变化的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(1): 9-14.
- [9] NEMALI K S, VAN IERSEL M W. An automated system for controlling drought stress and irrigation in potted plants[J]. Scientia horticulturae, 2006, 110(3): 292-297.
- [10] 杨鹏辉, 李贵全, 郭丽, 等. 干旱胁迫对不同抗旱大豆品种质膜透性的影响[J]. 山西农业科学, 2003, 31(3): 23-26.
- [11] HADIARTO T, TRAN L S P. Progress studies of drought-responsive genes in rice[J]. Plant cell reports, 2011, 30(3): 297-310.
- [12] ALBACETE A A, MARTÍNEZ-ANDÚJAR C, PÉREZ-ALFOCEA F. Hormonal and metabolic regulation of source-sink relations under salinity and drought: From plant survival to crop yield stability[J]. Biotechnology advances, 2014, 32(1): 12-30.
- [13] DACOSTA M, HUANG B R, RACHMILEVITCH S. Physiological and biochemical indicators for abiotic stress tolerance[M]//HUANG B R. Plant-environment interactions. New York: CRC Press, 2006: 321-356.
- [14] HARFOUCHE A, MEILAN R, ALTMAN A. Molecular and physiological responses to abiotic stress in forest trees and their relevance to tree improvement[J]. Tree physiology, 2014, 34(11): 1181-1198.
- [15] 李晓储, 黄利斌, 张永兵, 等. 四种含笑叶解剖性状与抗旱性的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(2): 177-181.
- [16] XIONG L M, WANG R G, MAO G H, et al. Identification of drought tolerance determinants by genetic analysis of root response to drought stress and abscisic acid[J]. Plant physiology, 2006, 142(3): 1065-1074.
- [17] 唐承财, 钟全林, 王健. 林木抗旱生理研究进展[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 20-26.
- [18] 张丽莉, 王庆祥, 石瑛, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶肉和茎部细胞超微结构的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2015, 46(1): 91-95.
- [19] YAMAGUCHI-SHINOZAKI K, SHINOZAKI K. A novel cis-acting element in an Arabidopsis gene is involved in responsiveness to drought, low-temperature, or high-salt stress[J]. The plant cell, 1994, 6: 251-264.
- [20] BERGER B, PARENT B, TESTER M. High-throughput shoot imaging to study drought responses[J]. Journal of experimental botany, 2010, 61(13): 3519-3528.
- [21] MUNNS R, JAMES R A, SIRLAULT X R R, et al. New phenotyping methods for screening wheat and barley for beneficial responses to water deficit[J]. Journal of experimental botany, 2010, 61(13): 3499-3507.
- [22] NIU G H, RODRIGUEZ D S, MACKAY W. Growth and physiological responses to drought stress in four oleander clones[J]. Journal of the American society for horticultural science, 2008, 133(2): 188-196.
- [23] 赵永明, 蔡永革, 吕新. 土壤水分实时监测的应用与现状[J]. 江西农业学报, 2007, 19(3): 31-33, 65.
- [24] 王姗姗. 干旱对北方林木的影响[J]. 防护林科技, 2017(21): 8-11, 14.
- [25] 吴芹, 张光灿, 裴斌, 等. 3个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J]. 生态学报, 2013, 33(12): 3648-3656.
- [26] HUANG B, JIANG Y. Physiological and biochemical responses of plants to drought and heat stress[M]//KANG M. Crop improvement in 21st century. New York: Harthrow Press, 2001: 287-300.
- [27] SUN Y P, NIU G H, ZHANG J F, et al. Growth responses of an interspecific cotton breeding line and its parents to controlled drought using an automated irrigation system[J]. Journal of cotton sciences, 2015, 19(2): 290-295.
- [28] BURNETT S E, VAN IERSEL M W. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* grown with capacitance sensor-controlled irrigation[J]. HortScience, 2008, 43(5): 1555-1560.
- [29] 王华田. 我国暖温带经济林水分管理的实现途径及措施[J]. 经济林研究, 2009, 27(2): 97-103.
- [30] DOOLEY J H, FRIDLEY J L. Near-surface sensing and mapping for site-specific operational decisions in precision forestry[C]//2001ASAE annual meeting. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998: 1.
- [31] 李东升, 张文卓, 陈为凤, 等. 植物叶片水分间接柔性测量传感器的研究[J]. 林业科学, 2004, 40(6): 130-133.
- [32] 刘慧婕. 科学、协调、可持续——新时代林业的发展之路[J]. 农家参谋, 2018(16): 81.
- [33] 龙滕周, 项东云, 孟永庆, 等. 桉树人工林栽培密度效应研究进展[J]. 广西林业科学, 2008, 37(2): 71-75.
- [34] 李昌荣, 项东云, 周国福, 等. 栽培密度与施肥对尾巨桉中大径材生长的影响[J]. 广西林业科学, 2007, 36(1): 31-35.
- [35] 李宝琦, 徐建民, 余勇, 等. 栽培密度与施肥对雷州半岛桉树大径材培育效果的中期研究[J]. 广东林业科技, 2009, 25(6): 14-21.
- [36] 林永胜. 柳窿桉丰产栽培关键技术研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- [37] 朱声管. 桉树丰产栽培配套技术研究: 以广西国有维都林场为例[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
- [38] 彭玉华. 柠檬桉叶材两用林的栽培技术[J]. 广西林业科学, 1996, 25(4): 227-228.
- [39] 赵连春, 赵成章, 陈静, 等. 秦王川湿地不同密度桉柳枝-叶性状及其光合特性[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1722-1730.
- [40] 骆丹, 王春胜, 曾杰. 西南桦幼林冠层光合特征及其对造林密度的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(4): 44-49, 139.
- [41] 李涛. 群体密度对高等植物光合功能的影响及调控机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.

(上接第 101 页)

耗碳水化合物较多。综合来说,在密度 D3 条件下,柠檬桉表现出了较强的光合能力,对柠檬桉的生长具有促进作用,增加柠檬桉各项生长指标的提升。

参考文献

- [1] 欧阳林男, 陈少雄, 张维耀, 等. 柠檬桉在中国的适生地理分布及其影响因素[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 361-367.
- [2] 刘思汝. 柠檬桉表型和 SSR 标记的遗传多样性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2016.
- [3] 谷瑶, 周丽珠, 李桂珍, 等. 组培柠檬桉叶绿素和挥发油研究[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(19): 120-122.
- [4] 谷瑶, 周丽珠, 陈健波, 等. 蒸馏时间对柠檬桉叶得油率及主成分的影响[J]. 广西林业科学, 2018, 47(1): 89-93.
- [5] 黄锡泽, 周国福, 李宏伟, 等. 尾巨桉人工林栽培密度研究[J]. 广西林业科学, 2005, 34(1): 5-7, 12.