

植物水分胁迫实时在线检测方法研究进展

赵燕东^{1,2} 高超^{1,2} 张新^{1,2} 蔡祥³

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083;

2. 北京林业大学城乡生态环境北京实验室, 北京 100083;

3. 北京林业大学信息学院, 北京 100083)

摘要: 植物水分胁迫程度不仅是表征植物健康状况的一个重要生命指标,而且是植物精准抚育的一个可靠依据,研究植物水分胁迫实时在线检测方法具有重大理论意义和实际应用价值。本文从植物生理特性指标(植物茎流、水势、蒸腾速率、茎体水分)和形态(植物2D图像、3D图像、茎干直径、光谱特征)两方面着重论述植物水分胁迫检测方法的研究进展,讨论各种方法的检测原理,从实际应用角度分析各种方法优缺点,并给出了得到广大学者普遍认可的产品,指出基于植物生理特性指标的水分胁迫检测方法具有较高的检测精度,但操作较复杂,并且对植物具有不同程度的损伤;基于植物形态特性的水分胁迫检测方法具有无损、快捷、操作简单等优点,但存在检测误差相对较大的缺点。针对各种检测方法的优缺点对未来的研究方向提出了展望。

关键词: 植物水分胁迫; 检测方法; 生理指标; 形态

中图分类号: Q945.78; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)07-0290-11

Review of Real-time Detecting Methods of Water Stress for Plants

Zhao Yandong^{1,2} Gao Chao^{1,2} Zhang Xin^{1,2} Cai Xiang³

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment,

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3. School of Information Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: The degree of water stress is an important life index for characterizing plant health. In addition, water stress is a reliable foundation of plant precise tending technology system. Therefore, to study the real-time detecting method of water stress for plants has important theoretical significance and practical application value. The research progress of detecting methods of water stress was discussed from two aspects of physiological indexes(stem flow, water potential, transpiration rate, stem water content) and morphology(2D image, 3D image, stem diameter, spectral feature). The detecting theory of each method was also expounded. Compared with each other, advantages and disadvantages of each method were analyzed from the point of practical application. Detecting methods based on physiological indexes had higher measuring precision. But it had complex operation progress and varying degree of destruction to plants. Detecting methods based on morphology had advantages of nondestructive, quick and simple operation. But it had relatively larger measuring error. Some international production organizations and its relative products which had been widely recognized for detecting water stress were also recommended to researchers. Eventually, two research focuses were proposed based on each method's advantages and disadvantages.

Key words: plant water stress; detecting method; physiological index; morphology

引言

植物水分的吸取与散失是植物、土壤和大气环境三者共同作用、相互影响的复杂过程,其中涉及到大量的物理、生物、环境等多学科知识的交叉综合。国内外对植物水分胁迫的实时在线检测方法进行了大量研究,这些方法从研究手段上可划分为针对土壤参数(包括土壤含水量、土壤水势)的实时在线检测,针对环境参数的实时在线检测和针对植物参数(包括生理参数和形态参数)的实时在线检测。其中,以植物自身生理特性为研究对象的检测方法是最直接和准确的,得到国内外众多学者的认可^[1-2]。这类方法主要从两方面展开,分别是基于植物生理指标的实时在线检测方法,包括植物茎流、水势、蒸腾速率、茎体水分等的检测^[3-6];以及基于植物形态的检测方法,分为传统的 2D 图像处理方法、新兴起的 3D 图像处理方法、植物茎干直径测量法、光谱法等^[7-8]。

本文将从植物生理指标检测和形态检测两方面着重阐述植物水分胁迫检测方法的研究进展,介绍各种方法的检测原理,并从实际应用角度分析各种方法的优缺点。

1 基于植物生理指标的水胁迫实时在线检测方法

植物体内水分状况与植物生理指标密切相关,主要包括茎流、水势、蒸腾速率及茎体水分,因此检测这些生理指标可以达到检测植物体内水分状况的目的,下面分别概述这些生理指标检测技术的原理、发展现状、优缺点以及应用领域和趋势。

1.1 茎流实时在线检测方法

近年来,利用茎流计检测植物蒸腾量的方法越来越广泛,运用茎流计实时监测植物液流速度,求得植物蒸腾耗水量,不仅为植物水分供求关系提供必要的水分生理依据,而且对地区水资源管理等具有重要的理论指导意义。不同类型茎流计测定液流速率的方法主要有热脉冲速率法(HPVM)、热平衡法(HBM)、热扩散法(TDM)和激光热脉冲法(LHPG)。

1.1.1 热脉冲速率法

热脉冲法的测量原理是在树木茎干的茎向同一直线上,先将热源探针插入,然后分别在其上、下部位 1.0 cm 和 0.5 cm 处插入两温度传感器探针,打开热源发出小段热脉冲,记录茎干内探针的升温曲线,利用补偿原理和脉冲滞后效应,测定树干中液流运动产生的热传导现象,并结合一定热扩散模

型,推导出液流速率及液流量。

以 HUBER^[9] 的热脉冲补偿系统、MARSHALL^[10] 的流速流量转换分析和 SWANSON 等^[11] 的损伤分析为基础,由 EDWARDS 总结成系统的理论技术,形成了第一代完备的树木边材液流检测系统——热脉冲液流检测仪。该系统考虑到边材液流传输的径向差异和液流探针对边材损伤所产生的误差,构建了适宜的模型,提高了测量精度。运用热脉冲方法估测树液流量的准确性和适用性在国内外大量科学研究中得到证实。众多针对树干热脉冲速率的时间和空间变异的研究工作表明,热脉冲速率和实际蒸腾速率显著相关^[12],利用热脉冲法测得的液流量与实际蒸腾量具有很高的关联度^[13-14]。GREEN 等^[15]应用热脉冲法测定了苹果树中的树液流速,并与断茎离体吸水试验的结果相比较,发现两者之间非常一致。刘奉觉等^[16]在国内首次采用热脉冲法对树木蒸腾耗水进行研究,发现该技术测定值与快速称重法接近。

由于检测原理的限制,热脉冲法的探针不能够连续放热,因此不能实现连续或任意时间间隔液流速率的测定,并且探针需要插入茎干中,因而会损伤植物茎干且干扰液流,导致测量精度下降。

1.1.2 热平衡法

热平衡法的测量原理是向电加热元件通以稳定持久的电流,依据热量平衡原理求出被液流带走的热量(或为维持热平衡而补充的加热功率)来计算茎干内液体流量。热平衡法具体可分为茎干热平衡法(SHB)和树干热平衡法(THB),两者的区别在于测量直径不同。

自 20 世纪 80 年代热平衡技术在国外被应用到植物的液流测定中后,此项技术得到了长足的发展,应用广泛。STEINBERG 等^[17]对盆栽榕树(茎干直径 45.2 mm)的液流速率测定,测得结果与水量平衡法求得的蒸腾速率相比较,误差在 4% 以内。GROOT 等^[18]应用茎干热平衡法对液流速率较低的针叶林进行研究,建立了一个衡量茎流计准确度的三维数字模型。然而热传导量和两个温度监测点的差值都很小,茎流计在液流速率较低时精确度不高。当热传导量小于热源的 5% 或者温度差小于 2.5℃,茎流计不再适用。TAKAGI 等^[19]应用热平衡茎流计以荷花为例研究了水生植物的蒸腾,结果与称重法比较相差不大,效果很好。

茎干热平衡法的测量探头设计成包裹式,通常用于测定直径较小的植物或器官,如小枝、苗木和作物等,安装时要保证探测器与茎表面接触良好。与热脉冲法相比,茎干热平衡法两个最大的优点是

需标定,也无需将温度探头插入茎干中,可以直接得到测定结果,但长时间使用容易对被测植物产生热灼伤。树干热平衡法是利用插入树干的探针进行测定,用已经建立的完善的描述热流动的物理关系式来计算树液流量,因此也不需要标定方程,进一步提高了测量精度,主要优点是适用于大树干,可用于测定直径大于120 mm树干液流。美国Dynamax公司基于热平衡法研发的Flow 32系列茎流计已得到广泛使用。

1.1.3 热扩散法

热扩散法的测量原理是将一对内置有热电偶的探针(上面的探针内置有线形加热器和热电偶,下面的探针作为参考,仅内置热电偶)插入具有水分传输功能的树干边材中,上面的探针加热后,与下面感测周围温度的探针作对比,通过检测热电偶之间的温差,计算液流热耗散(液流携带的热量),建立温差与液流速率的关系,进而确定液流速率的大小^[20]。

自GRANIER等^[21]提出用热扩散式茎流测量树木液流速率以来,该技术日趋成熟,得到广泛应用。GRANIER以杨树为研究对象,在晴天条件下,测得受抑制的、中等的和优势杨树的总蒸腾量分别为1.6、8.0、22.0 L/d,这与水量平衡法测得结果很相近。GRANIER发现当土壤含水量小于田间持水量的30%时,杨树的实际蒸腾量开始小于潜在蒸腾量。SELLAMI等^[22]对突尼斯南部一个庄园的杏树和李树蒸腾量进行了研究,结果表明杏树和李树日均蒸腾量分别为1.91 mm和1.20 mm,并建立了蒸腾量与太阳辐射之间的相关关系,这对制定庄园灌溉计划具有重要的参考价值。同时指出该方法存在的问题,探针的位置或对研究树木的选择不同都会造成误差。张友焱等^[23]利用热扩散茎流计连续测定了位于内蒙古乌审旗沙地樟子松的树干液流,探讨了环境因子对树干茎流的影响,了解了樟子松需水规律,测定了其耗水量,并为沙区植被建设提供了依据。

目前热扩散式茎流计主要应用在测定高大树木液流速率和单株耗水量等方面,以揭示树木蒸腾耗水特征及水分供求关系。利用热扩散法测量树液流量可以实现连续或任意时间间隔液流速率的自动化测定,是目前研究树木生理、生态环境、森林水文及测定整树水分利用较为理想的技术之一。德国Ecomatik公司基于热扩散法研发的SF系列茎流计已得到广泛使用。

1.1.4 激光热脉冲法

激光热脉冲法的测量原理是采用一个二极管激

光器瞬时放出空间离散且数量一致的能量束,同时用红外温度计实现无插入式监测温度变化,在不刺穿植被茎干的情况下即可进行实时测量,从而避免了连续加热对植物茎干所造成的伤害。经BAUERLE等^[24]验证可定期用于1年生草本植物的液流测量,在调查研究植物对环境压力和气候变化的反应方面非常有用。由于此方法用于大型树木液流的测量尚处于研究测试阶段,加之该系统造价高昂,目前应用并不广泛。但鉴于该系统的特殊优越性,估计未来会有较好的应用前景。

1.2 水势实时在线检测方法

植物水势以能量的观点表征植物组织中水分自由移动的能力,它决定了植物体内水的运移方向和限度。叶片是反映植物生理变化最敏感的部位,叶水势则是反映植物体内水分状况最直接和灵敏的指标,也被认为是衡量植物抗旱性的重要依据和合理灌溉的生理指标^[25]。目前国内外在教学科研中对植物水势的测定主要采用小液流法、压力室法和热电偶法。

1.2.1 小液流法

小液流法的测量原理是把植物组织放在已知浓度的外界溶液中,植物组织与环境溶液之间水分移动方向由水势差决定,通过外界溶液的浓度变化情况来确定植物组织的水势。小液流法原理清晰、不需复杂的仪器设备、简便易行,至今国内大专院校植物生理学实验教学中仍普遍采用,科研工作中也在使用^[26-28]。但小液流法测水势由于被测量植物组织切口处受伤细胞内的可溶性内含物进入外界溶液,改变了样品测量管中溶液的浓度,影响测量的准确性^[29],同时小液流法测水势的效率较低,限制了它在科学研究中的实际应用价值。

1.2.2 压力室法

压力室法的测量原理是通过测定木质部导管中的负压来测定水势的,将叶子或带叶小枝切口朝外密封于压力室中,用高压气体给室内叶片逐渐加压,当导管中的液体刚好回到原切口位置时,所施加压力的负值就等于枝叶的水势^[30]。压力室测水势的方法具有操作方便、测定快速等优点,而且还可测出植物材料的压力容积曲线,并根据曲线的性质推出植物水分状况的多种参数及细胞壁的弹性特点等,目前在国际上被广泛运用^[31-34]。但压力室法对测量对象的外形、硬度有一定的要求,对根或幼嫩枝条叶片等软组织难以测量,同时测量过程中水分散失过多,测定结果也会因观察者的不同而有差异,测量误差相对较大,并且无法实现实时在线测量^[35]。美国PMS Instrument公司研发的一系列便携式植物水

势压力室已得到学者的广泛使用。

1.2.3 热电偶法

热电偶法的测量原理是利用热电偶精确测定样品室内水汽露点温度来测定组织水势的。将叶片密闭在样品室内,叶片的水分蒸发到样品室内,当达到水平衡时,样品室中的露点温度与叶水势线性相关,通过准确测出露点温度,即可求出叶水势^[36]。热电偶法具体可分为离体叶圆片法和活体原位测定法,两者的区别在于离体叶圆片法通过打孔器打取叶圆片放入样品室内进行测定,活体原位测定法则是将样品室固定在与植物体相连的叶片上进行测定。

有研究者用叶圆片法测定得到的植物组织低于 -16 MPa ^[37] 甚至 -50 MPa ^[38] 的超低水势值,与植物的实际水势值严重不符。也有不少研究者通过延长平衡时间来提高叶圆片法的测量可靠性^[39-40],但是在数小时的平衡时间内,叶圆片被密封在样品室内,由于组织代谢和缺氧等引起的变化必然会影响测定结果的准确性^[41],同时数小时的平衡时间也大大降低了测定效率。MILLAR 等^[42] 研究了洋葱叶片切除测量和原位测量的差异,试验结果表明两者之间相差 $0.5\sim1.0\text{ MPa}$ 。

离体叶圆片法因受损细胞浆、角质、蜡质等的影响,平衡时间较短的测定结果与实际值相差很大,而平衡时间较长时又会由于组织代谢的变化而影响测定结果的准确性,因此叶圆片法不能准确测定植物的实际水势值。而活体原位测定法由于不用打叶圆片且测定时叶片处于正常状态,因此具有测定结果准确可靠、对植物没有损伤、可进行同一植物同一位点的连续测定等优点,其不足之处是对测定技术要求相对较高。美国 Wescor 公司基于热电偶法研发的 Psypro 露点水势仪已得到广泛使用。

1.3 蒸腾速率实时在线检测方法

蒸腾速率又称蒸腾强度,是植物在单位时间内单位叶面积上通过蒸腾作用散失的水量,它反映植物的耗水能力,是植物内部水分状况和土壤供水强度的综合反映。由于植物叶片蒸腾失去的水分与土壤蒸发散失的水分难以区分开,因此在农田环境下难以对蒸腾速率进行直接测量。常用的蒸腾速率测定方法有覆膜称重法、气量计测定法、热技术茎流法和 Penman - Monteith 法。

1.3.1 称重法

称重法分为植物离体部分快速称重法和蒸渗仪法。离体部分快速称重法具有操作简单,无需昂贵仪器的优点。但该方法属于破坏性测量,对植物生理活动影响很大,且测量结果准确性得不到保证。

蒸渗仪法具有很多优点,首先该方法不破坏植物周围环境,在植物自由生长的情况下实现测量;其次蒸渗仪具有性能很好的称重系统、自动化控制系统以及很高的称重分辨率和精度,并且可以自动记录数据,大大节省人工劳力。但是蒸渗仪存在设计成本高,安装困难,且需要定期维护等不足。德国 UMS 公司研发的 LY - UMS 型高精度蒸渗仪已得到广泛使用。

1.3.2 气量计测定法

气量计测定法的测量原理是利用灵敏的湿度敏感元件测定蒸腾室内空气相对湿度的短期变化来计算蒸腾速率。该方法适合田间测定瞬时蒸腾速率,其缺点在于蒸腾室改变了植物或叶片的生长环境,促使其改变蒸腾速率或者其他生理变化来适应环境变化,因此测量的蒸腾值不能反映真实值。美国 Decagon 公司基于气量计测定法研发的 SC - 1 稳态气孔计已得到广泛使用。

1.3.3 热技术茎流法

热技术茎流法的测量原理是首先根据温度在茎干内的传播速度推算出茎流速度,然后通过茎流与蒸腾速率的相关关系得出蒸腾速率。

DECKER 等^[43] 针对不同大小的白松和圆柏,通过同步测量不同时期的茎流和蒸腾速率,发现它们之间存在很好的相关性;KÖSTNER 等^[44] 将茎流在时间段上的积分用来表示蒸腾量,与真实蒸腾量相比准确性高达 95% 以上;ALARCÓN 等^[45] 发现当土壤水分充足时,杏树茎流的日变化与称重法测量的蒸腾速率极其相似,干旱胁迫时,通过茎流计算出的蒸腾速率比实际测量值稍低。因此,不少文献将茎流等同蒸腾速率来使用,但是 KÖSTNER 等却认为由于茎干及相关组织的储水效应以及水分从茎干流到叶片存在时间差,当前时刻茎干中的水分流量并不能代表当时所蒸腾的水分,而是代表某个时间之后的蒸腾水分,因此茎流与蒸腾速率之间存在时间差,蒸腾速率的动态变化稍稍滞后于茎流。

热技术茎流法对使用环境要求较低,可长期连续监测,适合野外测量。但是该方法的测量精度取决于茎流与蒸腾速率标定关系式的精度。

1.3.4 Penman - Monteith 法

Penman - Monteith 公式是联合国粮农组织 (FAO) 推荐使用计算蒸腾量的经验公式,该公式以能量平衡和水汽扩散理论为基础,充分考虑了各种环境气象因子,具有很好的准确性和适用价值,因此在国内外被广泛用于作物水分亏缺量计算和灌溉决策控制^[46-47]。

1.4 茎体水分实时在线检测方法

国外对植物体含水率的检测提出了很多方法,采用了诸多技术手段,如烘干法、 γ 射线法^[48]、核磁共振法^[49]、计算机层析成像技术^[50]、电阻法和介电常数法。在以上诸多方法中, γ 射线法存在潜在的安全隐患,核磁共振法和计算机层析成像技术成本高,且使用不方便,不能实现野外的定点长期监测。因此,实际使用较多的是烘干法、电阻法和介电常数法。

1.4.1 烘干法

烘干法的优点是数值准确,一般作为相关仪器的标定,不直接用于测量植物体含水率。因为取样对植物的生理活动有较大伤害,在关键部位取样(如树干)造成的伤害更大,因此取样部位受到限制。取样时在切口处会有水分流出,尤其在含水量很高的树干上取样,水分损耗会更多。植物不同部位贮存水分量的差异很大,因此采用烘干法估算植物的水分分布和平衡有很大局限性,并且烘干法无法实现在线测量,周期长。

1.4.2 电阻法

电阻法的测量原理是植物组织的电阻与其含水率存在着一定的关系,通过测量植物组织的电阻就可以判断其含水率。NAMKEN等^[51]将木材工业中测量木材含水率的电阻法做了改进,用以测量植物体含水率。但是MEDERSKI研究发现,电阻法灵敏度欠佳,并且植物组织的相对含水率与电阻值的联系并不紧密^[52]。宋蜚存等^[53]研究表明,活乔木组织的绝对含水率与电阻值之间不是单值函数,因此电阻法测量植物体含水率存在局限性。

1.4.3 介电常数法

介电常数法的测量原理是根据植物的介电特性间接测量植物体含水率。介电常数法具体可分为时域反射法(TDR)和驻波比法(SWR)。TDR法的测量原理是基于电磁波的传播速度与传播媒体的介电常数密切相关,茎干中水的比例不同时其介电常数有明显的变化,由电磁波的传播速度便可判断其含水率。SWR法的测量原理是基于传输线的输出电压与探头阻抗密切相关,茎干中水的比例不同时其介电常数有明显的变化,同时也会影响探头阻抗,由传输线的输出电压便可判断其含水率。

CONSTANTZ等^[54]以松树为研究样本,采用平行波导式探针结构的TDR法检测松树茎体体积含水率。WULLSCHLEGER等^[55]进一步采用双针平行不锈钢探头TDR法,监测了红花槭、黑橡胶、白栎和裂斗锥栗4种落叶阔叶树种含水率的季节性变化情况,并对这4个树种做了标定试验,归纳总结得出

了适合乔木类茎体体积含水率与有效介电常数之间的标定公式。该式估算的树干体积含水率与称量法所得结果有良好的一致性。近年来,赵燕东等^[56]提出了基于SWR法的植物茎体水分无损实时在线检测方法,进行了环状探头的优化设计,并成功研制出相关的植物茎体水分传感器。在随后的试验中,赵燕东等分别以树段和活立木为试验对象,验证了该传感器的检测性能,与此同时,与径流计的测量结果相比,得出植物茎体含水率与茎流负显著相关的结论。

TDR法的检测效果受限于探头长度,使用较短波导探头可以减小对植物的损伤,并且减小水分分布差异引入的误差,但是系统分辨率会降低,波导太长则信号的衰减会很大。同时TDR技术的实现要求比较高,生产成本比较高,目前仅应用于科学研究。与TDR法相比,SWR法可以实现无损测量,并且使用成本低,具有更广阔的应用空间。北京林业大学基于SWR法研发的BD-IV型植物茎体水分传感器在科学研究中也得到了一定应用。

2 基于植物形态的水胁迫实时在线检测方法

植物的形态变化是植物体细胞充水膨胀或失水收缩的结果,尤其是叶片的形态变化和茎干的直径变化与植物体内的水分状况有着密切的联系^[57],因此及时测量叶片形态信息和茎干直径变化也能够有效判定出植物体内的水分状况。

2.1 2D图像处理方法

2D图像处理方法的测量原理是当植物受到亏水胁迫时,植物的叶片颜色和形状轮廓等特征都会发生相应的变化,通过定义相关评价指标并借助2D图像处理方法可以定量衡量植物这些特征的变化量,从而达到判定植物亏水胁迫程度的目的。

作为早期探索,REVOLLON等^[58]在借助2D图像处理方法辨识连翘亏水胁迫承受能力的试验研究中,仅直观地计算和比较绿色面积的变化。OIDE等^[59]对大豆叶片受亏水胁迫的体态反应所获取的2D图像矩阵结合神经网络建模进行了初步研究,提取的信息能粗略表达植物亏水萎蔫变化。此后,FOUCHER等^[60]同样对连翘进行了2D图像识别,具体做法是在实验室环境下对多个盆栽样本进行水分控制,获取一系列2D图像并提出基于植物形态第一不变矩、分形维数和骨架长度作为判断水分状态的识别方法,并通过试验方法证实3种形态参数都能够较为准确地给出水分亏缺的阈值。FONT等^[61]通过计算叶片和茎干的夹角来判断植物的水分胁迫状况,指出按照这种方法计算的倾斜角可以

用于指导灌溉还可用于帮助优化温室环境参数。MIZUNO 等^[62]研究了繁叶植物和叶片稀少植物的萎蔫形式,以繁星花作为繁叶植物的代表定义了基于叶区域顶角、叶面积和叶区域外切矩形的萎蔫指数;以山茶树作为叶片稀少植物的代表定义了基于叶片倾斜角度的萎蔫指数。KACIRA 等^[63]提出以垂直投影面积作为水分亏缺指数的相关方法,随后 YANG 等^[64]对该方法的准确性进行了验证。TAKAYAMA 等^[65]也提出将投影面积作为监控西红柿水分胁迫的手段,并测试投影角度($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$)和预测准确性之间的关系,得出 90° 为最佳投影角度的结论。

基于 2D 图像处理判定植物亏水胁迫的方法具有图像获取简单、所需费用低廉、数字图像处理方法成熟等优点,但是这种方法也存在一些问题。首先,图像处理算法的准确性受环境因子影响很大,光照强弱、拍照背景的复杂程度都决定了图像处理的难易程度,从根本上决定了亏水判断的准确性。其次,对于植物水分亏缺的观测,叶片颜色的改变表明植物生理上已经受到了一定程度的危害且亏水胁迫程度较高,因此该方法不能用于植物亏水胁迫的早期判别。

2.2 3D 图像处理方法

3D 图像处理方法的测量原理是当植物受到亏水胁迫时,植物的叶片形态等特征都会发生相应的变化,通过定义相关评价指标并借助 3D 图像处理方法可以定量衡量植物这些特征的变化量,从而达到判定植物亏水胁迫程度的目的。

GODIN 等^[66]指出植物科学界正在开启一项全新科研项目,旨在建立植物结构功能和生长的计算模型,帮助理解植物形态结构与生理活动的复杂相互关系。ROSELL 等^[67]在研究中指出 3D 技术测量树木作物的几何形态对于农药喷洒、水分灌溉等方面均具有重要意义。OMASA 等^[68]利用激光扫描技术测量植物生长信息,获取叶片和茎干的生长变化,同时还指出 3D 处理技术比 2D 更适合用来监测植物亏水胁迫后的体态反应。由于缺乏有效的量化手段,ENGELBRECHT 等^[69]将植物萎蔫体态从不萎蔫到亏水死亡时的萎蔫仅粗略地划分为 6 个等级,这对于精细农业研究显然不够。应用 3D 技术进行亏水萎蔫体态辨识,不仅要测量出形态数据,还希望找到有效的数据处理方法定量判定植物亏水萎蔫程度^[70]。叶片对水分变化极为敏感,相比于植物整体形态的千变万化,叶片形态在水分充足和水分缺失情况下的变化都比较统一,因此基于叶片形态的萎蔫辨识比基于整株植物形态的辨识在实际应用中更

加方便可靠。赵燕东等^[71-75]利用激光扫描和 TOF 相机获取了西葫芦叶片的 3D 图像,提出了一种基于分形维数的萎蔫指数来定量描述植物亏水萎蔫程度,并在温室中结合环境参数获取萎蔫的动态变化过程。蔡祥等^[76-77]基于获取的 3D 点云数据,运用微分几何算法、二维傅里叶谱分析法、垂直投影面积法以及标准差等数学方法定义了多种萎蔫指数来定量刻画植物亏水萎蔫状态,并结合环境因子分析所定义指数刻画亏水萎蔫程度的有效性,结果表明萎蔫指数变化与环境参数具有较好的相关性。

基于 3D 图像处理判定植物亏水胁迫的方法能够实现植物亏水萎蔫信息的早期识别,对于植物需水信息的诊断与精准抚育均有重要价值,但是对 3D 图像的获取与处理比 2D 图像更加复杂困难。德国 PMD 公司基于飞行时间法 (TOF) 研发的 CamCube 系列 3D 相机已得到广泛使用。

2.3 茎干直径测量法

茎干直径测量法的原理是当蒸腾失水速率大于根系吸水速率时,植物体内水分减少,茎干作为贮藏水分的器官也会损失水分,导致直径收缩,当蒸腾失水速率与根系吸水速率达到平衡(或吸水速率大于失水速率)时,植物细胞失去的水分得到补充,细胞恢复膨胀,使茎干直径恢复到正常值,植物茎干的膨胀收缩对水分亏缺十分敏感,因此可以利用茎干直径微变化检测植物水分状况。

有研究认为茎干直径变化是比茎流、水势、蒸腾速率等更为敏感有效的植物亏水胁迫指标。余克顺等^[78]研究发现不同种类果树的茎干直径微变化对水分胁迫的反应有两种方式:桃、李、樱桃、柑桔、山楂和枣树等植物随水分胁迫程度加强,茎干的日最大收缩量增加,而苹果和葡萄树则减小。INTRIGLIOLO 等^[79]研究发现葡萄树茎干直径变换与水分状况的相关性很大程度依赖于生育期的变化。

测量植物茎干直径变化一般有两种方法:基于线性位移传感器的检测方法 (LVDT) 和基于激光测距的检测方法。基于线性位移传感器的检测方法具有测量电路简单、价格便宜、测量精确、可靠性好等优点,并且该方法对植株没有破坏性,将传感器固定在茎干测量部位,和数据采集器连接后,便可长期用于田间自动连续测量。基于激光测距的检测方法具有 LVDT 法的大部分优点,且不接触植物测量,不影响植物的生理活动及生长,但是激光传感器价格昂贵,对工作环境有一定要求。德国 Ecomatik 公司基于 LVDT 法研发的 DD 系列直径生长变化记录仪和瑞典 Haglof 公司基于激光测距法研发的 Mantax

Digitech 测径仪已得到广泛使用。

2.4 光谱法

光谱法的测量原理是植物反射光谱特征的差异与植物叶片的含水率密切相关,利用植物反射光谱特征可以诊断植物水分亏缺的程度。基于水分对红外波段的吸收特性,遥感上多采用红外通道进行植物水分状况监测。

早在 1971 年,THOMAS 等^[80]就用水分完全饱和的叶片在室温下逐渐干燥的方法对叶片含水率与光谱反射率之间的关系作了初步探讨,结果表明红外光谱反射率随叶片含水量的下降而增加,并指出 1 450 nm 和 1 930 nm 波段的反射率与叶片的相对含水率呈显著相关性。CARTER^[81]研究发现在近红外波段 950 ~ 970 nm 范围内对应一个弱的水吸收峰可以用来监测植物水分含量。DOBROWSKI 等^[82]研究发现 690 nm 和 740 nm 处的冠层光谱能够反映植物的水分胁迫状态。王纪华等^[83-84]应用地物光谱反射特征吸收峰的归一化定量描述技术对小麦进行了研究,发现小麦叶片相对水分含量与光谱反射率在 1 450 nm 附近水的特征吸收峰深度和面积呈现良好的线性正相关关系,并建立吸收深度、吸收面积与小麦叶片含水量之间的线性回归模型,通过光谱反射率诊断小麦水分亏缺程度;毛罕平等^[85-86]采用主成分回归法建立了基于光谱反射特征的葡萄叶片含水率模型,发现 703 nm 的导数光谱及 460、720、1 450、1 650、1 920 nm 波段的光谱反射率与葡萄叶片干基含水率呈极显著相关。

光谱法具有分析速度快、精度高、结果稳定和易于实现在线分析等优点。但是不同植被指数有各自特点及适用范围,因而利用高光谱数据信息丰富的特点,如何选择敏感、适用和多类别特征光谱方面需做大量研究,并且测量精度与敏感波段、模型的选择密切相关。美国 Spectral Evolution 公司研发的 PSR

系列地物波谱仪已得到广泛使用。

3 结论与展望

基于植物生理指标的水分胁迫诊断方法由于检测对象是与植物体含水量密切相关的生理参数,因此这类方法能够较准确判断出植物需水信息,但这类方法大多存在扰动植物生长环境,甚至属破坏性检测,并且有些生理指标测量过程耗时费力以及难以实现自动化连续实时监测。基于图像处理的植物水分胁迫诊断方法具有不接触植物、测量过程简单迅速等优点。在外界生长环境(如光照,温度,土壤水分等)的交叉影响下,如果能够通过检测技术实时获取亏水情况下植物外在的体态变化信息,应用数学模型建立起体态信息与植物水分胁迫之间的对应关系,定量表达出植物的水分胁迫程度,并且充分证实图像处理方法判断植物水分胁迫的准确性,将有利于植物健康状况评估及精准抚育的应用实施。基于以上分析,为了使植物水分胁迫检测技术能够为现实农林业生产提供决策支持,植物水分胁迫实时在线检测方法的未来研究可从以下方面考虑。

(1)在确保高精度植物水分胁迫实时在线检测的基础上,进一步探索基于植物生理指标的水分胁迫实时在线检测新方法,完善植物茎体水分实时在线检测技术,论证植物茎体水分对植物亏水胁迫的表征性,促使其成为植物生理研究、生产实践过程中一个有力工具。

(2)图像处理方法的准确性有待进一步证实。生理检测法比图像处理法的优势在于测量结果相对准确,且受到农业和生物学者的广泛认可。下一步的研究可以结合两种检测方法,将生理检测和图像处理方法同时进行,比较论证图像处理方法判断植物水分胁迫的准确性。

参 考 文 献

- 1 CHAERLE L, VAN DER STRAETEN D. Imaging techniques and the early detection of plant stress[J]. Trends in Plant Science, 2000, 5(11): 495 - 501.
- 2 胡笑涛. 温室番茄局部控制灌溉节水调控机制与水分亏缺诊断[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2012.
HU Xiaotao. Mechanism of water-saving of local controlled irrigation for tomato in greenhouse and its water deficiency diagnosis [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2012. (in Chinese)
- 3 ESCALONA J, FLEXAS J, MEDRANO H. Drought effects on water flow, photosynthesis and growth of potted grapevines[J]. VITIS-Journal of Grapevine Research, 2015, 41(2): 57 - 62.
- 4 杨鑫光, 傅华, 张洪荣, 等. 水分胁迫对霸王苗期叶水势和生物量的影响[J]. 草业学报, 2006, 15(2): 37 - 41.
YANG Xinguang, FU Hua, ZHANG Hongrong, et al. Effect of soil water stress on leaf water potential and biomass of *zygophyllum xanthoxylum* during seedling stage[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2006, 15(2): 37 - 41. (in Chinese)
- 5 MÖLLER M, ALCHANATIS V, COHEN Y, et al. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 827 - 838.
- 6 FERNÁNDEZ J E, CUEVAS M V. Irrigation scheduling from stem diameter variations: a review[J]. Agricultural and Forest

- Meteorology, 2010, 150(2): 135 – 151.
- 7 EHLERT D, HORN H J, ADAMEK R. Measuring crop biomass density by laser triangulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 61(2): 117 – 125.
- 8 SEIDEL D, FLECK S, LEUSCHNER C. Analyzing forest canopies with ground-based laser scanning: a comparison with hemispherical photography[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2012, 154 – 155: 1 – 8.
- 9 HUBER B. Observation and measurement of sap flow in plants[R]. Berichte der Deutscher Botanischen Gesellschaft, 1932: 89 – 109.
- 10 MARSHALL D C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport[J]. Plant Physiology, 1958, 33(6): 385 – 386.
- 11 SWANSON R H, WHITFIELD D W A. A numerical analysis of heat pulse velocity theory and practice [J]. Journal of Experimental Botany, 1981, 32(1): 221 – 239.
- 12 LASSOIE J P, SCOTT D R M, FRITSCHEN L J. Transpiration studies in Douglas-fir using the heat pulse technique[J]. Forest Science, 1977, 23(3): 377 – 390.
- 13 YUNUSA I A M, WALKER R R, LOVEYS B R, et al. Determination of transpiration in irrigated grapevines: comparison of the heat-pulse technique with gravimetric and micrometeorological methods[J]. Irrigation Science, 2000, 20(1): 1 – 8.
- 14 谢华, 沈荣开. 用茎流计研究冬小麦茎蒸腾规律[J]. 灌溉排水学报, 2001, 20(1): 5 – 9.
XIE Hua, SHEN Rongkai. Experimental research on transpiration of winter wheat with stem flow gauge [J]. Irrigation and Drainage, 2001, 20(1): 5 – 9. (in Chinese)
- 15 GREEN S R, CLOTHIER B E. Water use of kiwifruit vines and apple trees by heat pulse technique[J]. Journal of Experimental Botany, 1988, 39(1): 115 – 123.
- 16 刘奉觉, 郑世锴, 巨关升. 树木蒸腾耗水测算技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2): 117 – 126.
LIU Fengjue, ZHENG Shikai, JU Guansheng. A study on comparison of measuring water- consumption for transpiration in poplar [J]. Scientia Silvae Sinicae, 1997, 33(2): 117 – 126. (in Chinese)
- 17 STEINBERG S, VAN BAVEL C H M, MCFARLAND M J. A gauge to measure mass flow rate of sap in stems and trunks of woody plants[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1989, 114(3): 466 – 472.
- 18 GROOT A, KING K M. Measurement of sap flow by the heat balance method: numerical analysis and application to coniferous seedlings[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1992, 59(3): 289 – 308.
- 19 TAKAGI K, HARAZONO Y, NOGUCHI S, et al. Evaluation of the transpiration rate of lotus using the stem heat-balance method [J]. Aquatic Botany, 2006, 85(2): 129 – 136.
- 20 GRANIER A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, 3(4): 309 – 320.
- 21 GRANIER A, HUC R, BARIGAH S T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climatic factors [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1996, 78(1): 19 – 29.
- 22 SELLAMI M H, SIFAOU M S. Estimating transpiration in an intercropping system: measuring sap flow inside the oasis [J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(3): 191 – 204.
- 23 张友焱, 刘致远, 周泽福, 等. 环境因子对毛乌素沙地紫穗槐光合、蒸腾速率的影响 [J]. 林业科学研究, 2006, 19(4): 463 – 466.
ZHANG Youyan, LIU Zhiyuan, ZHOU Zefu, et al. The influence of environment factors on photosynthetic and transpiration rate of *Amorpha fruticosa* in Maowusu Sandland [J]. Forest Research, 2006, 19(4): 463 – 466. (in Chinese)
- 24 BAUERLE W L, WHITLOW T H, POLLOCK C R, et al. A laser-diode-based system for measuring sap flow by the heat-pulse method[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 110(4): 275 – 284.
- 25 李德全, 邹琦, 程炳篱. 测定植物组织水势的压力室法 [J]. 山东农业科学, 1990(3): 46 – 48.
- 26 关宏斌, 王晓兰. 吉兰泰与乌梁素海两地盐土植物水势的测定及探讨 [J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学版, 2000, 29(1): 55 – 58.
GUAN Hongbin, WANG Xiaolan. The test and study of the water potential of halophytes in Jilantai and Wuliangsu hai [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 2000, 29(1): 55 – 58. (in Chinese)
- 27 王春虎, 赵新亮, 王勇军, 等. 农大 108 等玉米品种幼苗阶段根水势的测定及抗旱性研究 [J]. 种子, 2006, 25(1): 34 – 36.
WANG Chunhu, ZHAO Xinliang, WANG Yongjun, et al. Study on drought resistance and measure of root's water potential in seedling stage of Nongda108 etc corn varieties [J]. Seed, 2006, 25(1): 34 – 36. (in Chinese)
- 28 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 651 – 657.
FAN Sulu, YUAN Zhaohe, FENG Lijuan, et al. Effects of drought stress on physiological and biochemical parameters of *Dahlia pinnata* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 651 – 657. (in Chinese)
- 29 王军, 孟祥增. 热电偶水势测定仪 [J]. 传感器技术, 1997, 16(5): 41 – 45.
WANG Jun, MENG Xiangzeng. Thermocouple type water potential meter [J]. Journal of Transducer Technology, 1997, 16(5): 41 – 45. (in Chinese)
- 30 王万里. 压力室在植物水分状况研究中的应用 [J]. 植物生理学通讯, 1984(3): 52 – 57.
- 31 MENGEL K, ARNEKE W W. Effect of potassium on the water potential, the pressure potential, the osmotic potential and cell

- elongation in leaves of *Phaseolus vulgaris*[J]. *Physiologia Plantarum*, 1982,54(4): 402 – 408.
- 32 NAVARRO A, BAÑON S, OLMOS E, et al. Effects of sodium chloride on water potential components, hydraulic conductivity, gas exchange and leaf ultrastructure of *Arbutus unedo* plants[J]. *Plant Science*, 2007, 172(3): 473 – 480.
- 33 PARENT B, SUARD B, SERRAJ R, et al. Rice leaf growth and water potential are resilient to evaporative demand and soil water deficit once the effects of root system are neutralized[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2010,33(8): 1256 – 1267.
- 34 JOHNSON D M, MCCULLOH K A, MEINZER F C, et al. Hydraulic patterns and safety margins, from stem to stomata, in three eastern US tree species[J]. *Tree Physiology*, 2011,31(6): 659 – 668.
- 35 BAHADUR R, TRIPATHI R P. Sampling procedure for measurement of xylem-water potential by pressure-chamber technique [J]. *The Indian Journal of Agricultural Sciences*,1995,65(11): 803 – 831.
- 36 龚明, 丁念诚, 刘友良. 用露点法和湿度法测定叶片水势及其组分[J]. *植物学通报*, 1989,6(3): 182 – 187.
GONG Ming, DING Niancheng, LIU Youliang. Measurement of water potential and its component in leaves with dew point and psychrometric methods[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1989,6(3): 182 – 187. (in Chinese)
- 37 杨丽娟, 王海洋, 严涛, 等. 10 种重庆乡土植物幼苗耐旱性研究[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2009,34(5): 121 – 128.
YANG Lijuan, WANG Haiyang, YAN Tao, et al. Study on drought resistance of the seedlings of ten native plants in Chongqing [J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2009,34(5): 121 – 128. (in Chinese)
- 38 庄丽, 陈亚宁, 李卫红, 等. 渗透胁迫条件下植物茎叶水势的变化——以塔里木河下游胡杨为例[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(6): 1002 – 1008.
ZHUANG Li, CHEN Yaning, LI Weihong, et al. Response of leaf and stem water potential of *Populus euphratica* to osmotic stress in lower reaches of Tarim river[J]. *Journal of Desert Research*, 2006,26(6): 1002 – 1008. (in Chinese)
- 39 HIRASAWA T, NAKAHARA M, IZUMI T, et al. Effects of pre-flowering soil moisture deficits on dry matter production and ecophysiological characteristics in soybean plants under well irrigated conditions during grain filling[J]. *Plant Production Science*, 1998, 1(1): 8 – 17.
- 40 付爱红, 陈亚宁, 李卫红. 温带荒漠区不同灌溉条件下的胡杨-俄罗斯杨水势变化分析[J]. *科学通报*, 2010,55(6): 504 – 511.
FU Aihong, CHEN Yaning, LI Weihong. Analysis on the change of water potential of *Populus euphratica* Oliv. and *P. Russkii* Jabl under different irrigation volumes in temperate desert zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(6): 504 – 511. (in Chinese)
- 41 MARTINEZ E M, CANCELA J J, CUESTA T S, et al. Use of psychrometers in field measurements of plant material: accuracy and handling difficulties[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*,2011, 9(1): 313 – 328.
- 42 MILLAR A A, LANG A R G, GARDNER W R. Four-terminal Peltier type thermocouple psychrometer for measuring water potential in nonisothermal systems. [J]. *Agronomy Journal*, 1970, 62(6):705 – 708.
- 43 DECKER J P, SKAU C M. Simultaneous studies of transpiration rate and sap velocity in trees[J]. *Plant Physiology*, 1964, 39(2): 213 – 215.
- 44 KÖSTNER B, GRANIER A, CERMÁK J. Sapflow measurements in forest stands: methods and uncertainties[J]. *Annales Des Sciences Forestières*, 1998, 55(1 – 2):13 – 27.
- 45 ALARCÓN J J, DOMINGO R, GREEN S R, et al. Sap flow as an indicator of transpiration and the water status of young apricot trees[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1): 77 – 85.
- 46 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 基于 Penman 修正式和 Penman – Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. *农业工程学报*, 2013,29(19):88 – 97.
SONG Ni, SUN Jingsheng, WANG Jinglei, et al. Analysis of difference in crop coefficients based on modified Penman and Penman – Monteith equations[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(19): 88 – 97. (in Chinese)
- 47 TRAJKOVIC S. Hargreaves versus Penman – Monteith under humid conditions [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(1): 38 – 42.
- 48 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 & Environment*, 1983, 6(3): 255 – 260.
- 49 BYRNE G F, FENN M D, BURGAR M I. Nuclear magnetic resonance studies of water in tree sections[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1986, 38(4): 307 – 317.
- 50 RASCHI A, TOGNETTI R, RIDDER H W, et al. Water in the stems of sessile oak (*Quercus petraea*) assessed by computer tomography with concurrent measurements of sap velocity and ultrasound emission[J]. *Plant, Cell & Environment*, 1995, 18(5): 545 – 554.
- 51 NAMKEN L N, LEMON E R. Field studies of internal moisture relations of the corn plant[J]. *Agronomy Journal*, 1960, 52(11): 643 – 646.
- 52 MEDERSKI H J. Determination of internal water status of plants by beta gauging[J]. *Soil Science*,1961,92(2):143 – 146.
- 53 宋蜚存, 林迎忠, 顾广滨. 活性对电导法测量木材含水率的影响[J]. *东北林业大学学报*,1994,22(1):113 – 116.
SONG Zhecun, LIN Yingzhong, GU Guangbin. The influence of wood cell activity on moisture content measurement by electric resistance[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 1994,22(1):113 – 116. (in Chinese)
- 54 CONSTANTZ J, MURPHY F. Monitoring moisture storage in trees using time domain reflectometry[J]. *Journal of Hydrology*,

- 1990, 119(1): 31–42.
- 55 WULLSCHLEGER S D, HANSON P J, TODD D E. Measuring stem water content in four deciduous hardwoods with a time-domain reflectometer[J]. *Tree Physiology*, 1996, 16(10): 809–815.
- 56 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]. *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]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(1): 310–316. (in Chinese)
- 57 BERG V S, HEUCHELIN S. Leaf orientation of soybean seedlings. I. Effect of water potential and photosynthetic photon flux density on paraheliotropism[J]. *Crop Science*, 1990, 30(3): 631–638.
- 58 REVOLLON P, CHASSERIAUX G, RIVIERE L M, et al. The use of image processing for tracking the morphological modification of forsythia following an interruption of watering [C] // *Proceedings of International Conference on Agricultural Engineering, AgEng OSLO98*, 1998: 24–27.
- 59 OIDE M, NINOMIYA S. Discrimination of soybean leaflet shape by neural networks with image input[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, 29(1): 59–72.
- 60 FOUCHER P, REVOLLON P, VIGOUROUX B, et al. Morphological image analysis for the detection of water stress in potted forsythia[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 89(2): 131–138.
- 61 FONT L, KOROSI F, FARKAS I. Leaf inclination based on destructive water stress indication for vegetables[J]. *Acta Horticulturae*, 2005, 691: 99–106.
- 62 MIZUNO S, NODA K, EZAKI N, et al. Detection of wilt by analyzing color and stereo vision data of plant[M] // *Computer Vision/Computer Graphics Collaboration Techniques*. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 400–411.
- 63 KACIRA M, LING P P, SHORT T H. Machine vision extracted plant movement for early detection of plant water stress[J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(4): 1147–1153.
- 64 YANG Y, LING P, FLEISHER D H, et al. Non-contacting techniques for plant drought stress detection[J]. *Transactions of the ASABE*, 2008, 51(4): 1483–1492.
- 65 TAKAYAMA K, NISHINA H. Early detection of water stress in tomato plants based on projected plant area[J]. *Environment Control in Biology*, 2007, 45(4): 241–249.
- 66 GODIN C, SINOQUET H. Functional-structural plant modelling[J]. *New Phytologist*, 2005, 166(3): 705–708.
- 67 ROSELL J R, SANZ R. A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 81: 124–141.
- 68 OMASA K, HOSOI F, KONISHI A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(4): 881–898.
- 69 ENGELBRECHT B M J, TYREE M T, KURSAR T A. Visual assessment of wilting as a measure of leaf water potential and seedling drought survival[J]. *Journal of Tropical Ecology*, 2007, 23(4): 497–500.
- 70 苗腾, 郭新宇, 陆声链, 等. 植物叶片萎蔫过程的物理表示方法[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 253–258. MIAO Teng, GUO Xinyu, LU Shenglian, et al. Physical description of plant leaf wilting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 253–258. (in Chinese)
- 71 ZHAO Y, SUN Y, CAI X, et al. Identify plant drought stress by 3D-based image[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(7): 1207–1211.
- 72 张新, 赵燕东, 郑力嘉, 等. 基于三维机器视觉的植物叶片萎蔫预测模型[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 260–267. ZHANG Xin, ZHAO Yandong, ZHENG Lijia, et al. Prediction model of plant leaf wilting using 3-D machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 260–267. (in Chinese)
- 73 张新, 高超, 赵燕东, 等. 基于 TOF 摄像机的植物叶态萎蔫辨识研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 1–7. ZHANG Xin, GAO Chao, ZHAO Yandong, et al. Research on identification of plant leaf wilting using TOF camera[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 1–7. (in Chinese)
- 74 赵燕东, 荣斐, 刘圣波, 等. 基于 2DFT 的植物叶片萎蔫程度与微环境因素相关性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(1): 253–258, 245. ZHAO Yandong, RONG Fei, LIU Shengbo, et al. Correlation between wilting index of plant morphology defined by 2DFT spectrum and micro-environmental factors[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(1): 253–258, 245. (in Chinese)
- 75 张慧娟, 赵燕东, 孙宇瑞, 等. 基于 3-D 图像的植物亏水胁迫萎蔫体态辨识方法[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(1): 154–158. ZHANG Huijuan, ZHAO Yandong, SUN Yurui, et al. Identification of plant morphology wilt-induced by water stress with 3-D based image[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(1): 154–158. (in Chinese)
- 76 CAI X, SUN Y, ZHAO Y, et al. Smart detection of leaf wilting by 3D image processing and 2D Fourier transform[J]. *Computers & Electronics in Agriculture*, 2013, 90(1): 68–75.
- 77 蔡祥, 孙宇瑞, 赵燕东, 等. 基于 3-D 数据的叶片萎蔫形态辨识方法[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(5): 286–292. CAI Xiang, SUN Yurui, ZHAO Yandong, et al. Identification methods for plant wilting at leaf-scale based on 3-D imaging[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(5): 286–292. (in Chinese)

78 余克顺, 李绍华, 孟昭清, 等. 水分胁迫条件下几种果树茎干直径微变化规律的研究[J]. 果树学报, 1999, 16(2): 86 – 91.
YU Keshun, LI Shaohua, MENG Zhaoqing, et al. Stem diameter microvariations of four different fruits trees under water stress [J]. Journal of Fruit Science, 1999, 16(2): 86 – 91. (in Chinese)

79 INTRIGLIOLO D S, CASTEL J R. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations[J]. Irrigation Science, 2007, 26(1): 49 – 59.

80 THOMAS J R, NAMKEN L N, OERTHER G F, et al. Estimating leaf water content by reflectance measurement[J]. Agronomy Journal, 1971, 63(6): 845 – 847.

81 CARTER G A. Primary and secondary effects of water content of the spectral reflectance of leaves[J]. American Journal of Botany, 1991, 78(7): 916 – 924.

82 DOBROWSKI S Z, PUSHNIK J C, ZARCO-TEJADA P J, et al. Simple reflectance indices track heat and water stress-induced changes in steady-state chlorophyll fluorescence at the canopy scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(3): 403 – 414.

83 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究[J]. 中国农业科学, 2001, 34(1): 104 – 107.
WANG Jihua, ZHAO Chunjiang, GUO Xiaowei, et al. Study on the water status of the wheat leaves diagnosed by the spectral reflectance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2001, 34(1): 104 – 107. (in Chinese)

84 王纪华, 赵春江, 郭晓维, 等. 利用遥感方法诊断小麦叶片含水量的研究[J]. 华北农学报, 2001, 15(4): 68 – 72.
WANG Jihua, ZHAO Chunjiang, GUO Xiaowei, et al. Study on the water content of wheat leaves by the remote sensing[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2001, 15(4): 68 – 72. (in Chinese)

85 毛罕平, 张晓东, 李雪, 等. 基于光谱反射特征葡萄叶片含水率模型的建立[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(5): 369 – 372.
MAO Hanping, ZHANG Xiaodong, LI Xue, et al. Model establishment for grape leaves dry-basis moisture content based on spectral signature[J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29(5): 369 – 372. (in Chinese)

86 毛罕平, 高洪燕, 张晓东. 生菜叶片含水率光谱特征模型研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 166 – 170.
MAO Hanping, GAO Hongyan, ZHANG Xiaodong. Spectral characteristics model of lettuce leaves' water content [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42 (5): 166 – 170. (in Chinese)