

光谱分析技术在作物生长信息检测中的应用研究进展

蒋焕煜, 应义斌*, 谢丽娟

浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310029

摘 要 获取作物的相关生长信息可以预测作物的生长和健康状态, 是实现作物生产管理智能化的基础。植物的生长信息获取技术主要包括利用其电学特性、光学特性和机器视觉技术等, 随着光谱技术的发展, 近红外光谱技术、多光谱技术和高光谱技术在作物生长信息的获取应用上开始大量应用, 并显示了其分析速度快、效率高、成本低、无需制备样品等优点, 已成为一种快速、无损的现代分析技术。文章介绍了国内外运用光谱分析技术在作物生长信息获取上的研究情况, 并分析了该技术应用于作物生长信息获取时尚存在的问题和今后的研究方向, 提出了进行作物生长实时、智能化管理的必要性, 需要加快研制相关的光谱自动分析设备, 提高作物生长信息获取的速度, 最后指出了结合机器视觉技术、红外成像技术、光谱分析技术等多种技术进行作物生长多种信息获取是未来发展的趋势。

关键词 光谱分析技术; 作物; 生长信息; 应用

中图分类号: S123

文献标识码: A

文章编号: 1000-0593(2008)06-1300-05

引 言

精确农业是现有农业生产措施与电子信息高新技术的有机结合, 是一种根据农田小区环境的差异性, 定时、定位、定量地实施投入的农业生产管理技术, 以达到最少量的生产投入, 最大化的生产效益。精确农业是一种农业新模式, 是信息化时代农业智能化技术与自动控制技术相结合形成的一种先进农业生产体系, 其核心是针对作物群体差异精确投入, 在降低生产成本的同时充分利用资源, 实现农业可持续发展。作物生长信息的获取技术是精确农业的重要技术支撑之一, 作物信息以一个生长季节为周期, 每个生长季节又分为不同的生长阶段, 这些生长阶段有固定的时序特征, 因而作为精确农业, 适时地采集作物生长状态的信息至关重要^[1], 通过对作物相关生长信息的获取, 可以合理地控制作物生长的环境参数, 并且可以使肥、水、农药等得到精确的自动化管理。

随着当今世界农副产品数量和质量需求的日益提高, 我国农业发展已相应地进入了高产、优质、高效益的新阶段, 这使我们对农业生产管理的要求也越来越高, 现代农业生产迫切需要能准确、快速、方便、经济地获取作物相关生长信息的方法, 通过获取作物的外观生长信息和作物内部的生长

信息, 建立基于多信息融合的科学评价作物生长状况的数学模型, 实现对作物生长情况的实时或定时自动监测, 使作物生产采用计算机进行科学、智能化管理和决策成为可能。本文主要对光谱技术在作物生长信息获取上的应用研究和发展情况进行归纳总结。

1 国内外研究进展

目前国内外对作物生长信息的采集主要包括表现信息的获取(如作物生长发育状况等可视物理信息)和内在信息获取(如叶片及冠层温度、叶水势、叶绿素含量、养分状况等借助于外部手段获取的物理和化学的信息)。光谱技术是绿色分析技术, 具有分析速度快、效率高、成本低、重现性好, 测试方便等特点, 科学家们早就发现植物营养状况与光谱特性密切相关, 并从30多年前开始, 就针对大田作物进行了一系列的相关研究, 是探测和获取作物营养状态和长势信息的有效手段。目前, 在作物生长信息获取上的应用也越来越多, 主要采用近红外技术、多光谱技术、高光谱技术等, 为能对研究对象进行更好的分析处理, 光谱分析和图像分析技术结合的光谱成像技术也开始应用, 如多光谱成像技术和高光谱成像技术等。

1.1 国外研究状况

收稿日期: 2007-09-16, 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60771064, 60401002)资助

作者简介: 蒋焕煜, 1972年生, 浙江大学生物系统工程与食品科学学院副教授

e-mail: hyjiang@zju.edu.cn

*通讯联系人 e-mail: ybying@zju.edu.cn

Shibayama 等利用多元回归方法分析了水稻多时相的可见光、近红外和中红外光谱与叶面积指数、干生物量以及产量的关系^[2,3],还研究了水稻冠层的可见光、近红外和中红外反射光谱^[4],用于评价水稻的缺水情况,研究发现其一阶导数光谱在 960 nm 与水稻冠层水分指数有很高的相关性,可以用于指导灌溉作业。

“红边”是植被反射率曲线的最大斜率点,发生在 680 ~ 750 nm 波长范围内,这一范围内反射率从非常低的叶绿素红光吸收变化到非常高的近红外反射率,是描述植被色素状态和健康状况的重要指示波段,Pinar 比较了草丛群体光谱“红边”位置与叶片叶绿素浓度、叶绿素密度的关系,表明群体植被光谱“红边”位置能够更好地反映草丛的叶绿素密度信息^[5]。

Kim 等利用光谱传感器获得的多光谱图像进行分析,以评价作物的含氮量,从而获得作物的生长情况^[6],还研究了利用基于机器视觉的多光谱图像处理系统^[7],通过建立作物发射光谱和含氮量关系的数学模型,用于在线、实时获取玉米植株的氮含量信息,并根据作物不同需肥量进行精确施肥作业。

Tumbo 等指出玉米 V6 生长阶段的叶绿素水平是其氮含量的重要指示器^[8],并研究玉米在不同叶绿素水平下的高光谱特征,研究结果表明利用光谱反射建立的模型可稳健地预测玉米在 V6 生长阶段的叶绿素水平,叶绿素值和近红外/绿色的比值的相关系数达到 0.94,均方根误差为 1.44SPAD 值。

Huang^[9]等利用多光谱图像技术获取光谱信息,并在 555, 660, 680 和 780 nm 四个波段建立了预测水稻氮素含量的预测模型,模型的相关系数为 0.84,校正标准误差为 0.21,并且模型也可在其他不同种类的水稻品种进行预测,通过多光谱图像分析技术分析水稻田氮素的含量分布研究,用于在线的精确农业精确施肥作业。

Sui 等建立了一套包括作物健康传感器和数据采集及处理装置的系统^[10],用于检测棉花植株的含氮情况,传感器通过红、绿、蓝和近红外 4 个波段的光学滤镜实时测量了棉花叶面的光谱反射,结果显示红色和近红外波段的光谱信息和棉花叶面的氮素含量有显著的相关性,而蓝色、绿色波段和植株的高度通过神经网络训练,用于棉花植株含氮量预测,达到 91% 的预测精度,还在原系统的基础上,增加了一个用于测量植株高度的超声波传感器,利用光谱数据、植株高度和实际叶面的氮含量进行人工神经网络训练,在预测叶面氮缺乏和正常两种情况的精度达到 90%^[11]。

Noh 等利用多光谱图像技术获得大田玉米叶片三通道(绿、红、近红外)图像,利用光谱分析技术获得了玉米的含氮水平^[12-14],评价了玉米的缺氮情况,并用以实现大田玉米含氮水平的在线检测,后来利用一个多光谱 CCD 摄像头获取玉米冠层的红、绿、近红外 3 个通道的反射光谱,采用神经网络建立预测玉米的氮胁迫模型,预测值和测量值之间的相关系数为 0.89^[15]。

Min^[14]等研究了一种基于近红外光谱的、用于果树叶面氮含量测量的传感器^[16],通过对五种不同氮素水平的果树

叶面的漫反射光谱测量,找到了用于氮素测定的敏感波长,结果表明利用逐步线性回归(SMLR)和偏最小二乘法(PLS)建立的模型能进行较好的预测,接着又研究了利用高光谱获取柑橘叶面含氮情况的系统,在 620 ~ 950 nm 和 1 400 ~ 2 450 nm 两个波段,预测值和实际值间的相关系数分别为 0.99 和 0.999^[17]。

Ramalingam 等对利用多光谱图像传感器进行叶面水分测量进行了研究^[18]。通过获取可见光(400 ~ 700 nm)、短波近红外(700 ~ 1 300 nm)和近红外(1 300 ~ 2 500 nm)区域的叶面反射光谱,并利用光谱背景补偿技术以提高叶面水分的预测精度,对叶面水分的测量进行了分析研究,研究后发现可见光、近红外区域受背景影响较小,而短波近红外区域受背景影响较大,光谱背景补偿技术可以显著提高叶面水分的预测精度。

Borhan 等设计了包含红、绿、蓝特征的图像和 550, 710, 810 nm 三个多光谱波段的多光谱图像系统^[19],用于预测生长在温室环境下的马铃薯叶片的叶绿素和硝酸盐含量,均一化的红色分量特征与叶片的叶绿素含量,相关系数为 0.90,多光谱波段图像特征与叶片的叶绿素含量成线性相关,相关系数为 0.95,两者的平均预测精度为 90.5% 和 92.3%,利用均一化的红色分量特征预测硝酸盐含量的平均精度为 75.1%。

1.2 国内研究状况

金仲辉^[20]在研究中指出,大多数类型的植物叶片在近红外波段(700 ~ 1 300 nm)有高的反射率、高的透射率和低的吸收率,在近红外波段的反射率性质主要受叶片内部构造的控制,不同植物叶片的内部构造的差异,造成了它们在近红外波段的反射率明显的差别。研究表明,在可见光波段内大多数类型的植物叶片的反射率差别很小,但是在整个近红外和中红外波段差别却很明显。

吴长山等指出叶绿素含量既表明作物生长的状况,又表征了作物的生产能力,而叶绿素密度是估计农作物群体生产力的重要指标^[21]。对早播稻、晚播稻和玉米的多时相的群体光谱测量数据和相应的叶片叶绿素密度的测量数据进行了相关分析,结果表明早播稻、晚播稻和玉米的群体光谱的反射率数据以及其导数光谱数据与叶绿素密度具有很好的相关性。

唐延林等在其综述中指出可以根据作物叶片反射光谱颜色的变化判定它的营养状况,实施精确施肥;根据作物冠层光谱反射特征所反映的冠层温度、叶水势来判断作物现有水分状况,实施精确灌溉;根据作物叶片光谱吸收特征的变化来判断其生理状况,实施精确喷药^[22]。

金震宇等利用 ASD 野外地物光谱仪在阳光下获取了水稻生育期的光谱反射率数据^[23],并利用 SPAD-502 叶绿素仪测量对应的叶片的叶绿素浓度,对光谱数据和实际测量值之间进行了相关分析研究,结果表明:水稻叶片叶绿素浓度与其光谱反射率之间具有相关性,在 450 ~ 680 nm 和 750 ~ 770 nm 光谱区内相关性较好,且在 686 nm 处两者达到最高的相关性;水稻叶片的“红边”拐点波长位置与其叶绿素浓度之间具有很强的相关性,复相关系数为 0.88。

刘宏斌等对冬小麦田间试验结果表明, 氮素营养水平直接影响冬小麦冠层光谱反射特性, 红光波段和近红外波段是冬小麦氮素营养诊断的敏感波段, 采用红光波段和近红外波段计算的比值植被指数 RVI 可以较为灵敏地反映冬小麦氮素营养水平, 适宜作为氮素营养诊断指标^[24]。

田永超等研究了不同土壤水氮条件下水稻冠层光谱反射特征和植株水分状况的量化关系^[25], 结果表明, 拔节后比值植被指数 (R_{810}/R_{460}) 与水稻叶片含水率和植株含水率呈极显著的线性相关, 比值植被指数 R_{810}/R_{460} 可以较好地监测不同生育期水稻叶片和植株含水率。

孙雪梅等利用美国 ASD 公司光谱仪测定水稻剑叶在抽穗期后不同生育期的高光谱反射率及对应叶片的叶绿素、全氮以及籽粒蛋白等生化组分的含量, 结合水稻光谱曲线特征以及氮素营养胁迫特点, 研究了植被指数和微分参数与叶片叶绿素、全氮含量的相关性^[26], 结果表明这些相关性均达到正显著水平, 尤其是利用绿峰附近的反射率构建的植被指数 GNDVI 与叶绿素含量、 R_{850}/R_{550} 与全氮含量之间的相关性最好, 相关系数分别为 0.876 1 和 0.888 1。

李志伟等指出植物的反射光谱曲线具有显著的特征, 同一种植物的不同生长发育阶段以及施肥条件的不同都会引起植物反射光谱曲线的变化^[27]。因此, 可以利用植被光谱的这一特征, 使用野外光谱仪在一定条件下测定它们对各种波段的一阶微分反射光谱来研究植物的生长状况, 同时, 归一化植被指数 NDVI 与植株中的氮含量存在高度相关性, 在分蘖盛期、孕穗期和抽穗期, 通过光谱测定, 用 NDVI 推算植株的氮含量效果较好。

当植物生长状况发生变化时, 波谱曲线的形态也随之改变, 因此, 比较受损植物与健康植物的光谱曲线, 可以探测植物的病虫害并确定植物受损程度等, 杨可明等根据植被高光谱数据的植被冠层光谱反射特征和诊断性光谱吸收特征, 利用光谱连续统去除法, 探讨光谱一阶微分反射比 (FDR) 和从连续统去除的光谱吸收特征中获得的波段深度 (BD)、连续统去除后微分反射比 (CRDR)、波段深度比 (BDR) 和归一化波段深度指数 (NBDI) 等光谱特征参量^[28], 结合多时相的条锈病小麦 PHI 航空高光谱影像, 分析条锈病对小麦光谱的影响及其光谱特征, 可实现小麦条锈病病害的诊断性探测、评估和识别。

易秋香等使用美国 ASD 公司的光谱仪对不同品种玉米测定了其室内光谱反射率及其对应的全氮含量^[29], 采用相关性分析以及单变量线性与非线性拟合分析技术进行了分析, 结果表明: 全氮含量与原始光谱在 716 nm 处具有最大相关系数 (0.847), 与光谱反射率一阶微分值在 759 nm 处具有最大相关系数 (0.944), 全氮含量除了与黄边位置以及红边面积和黄边面积所构建的比值植被指数和归一化植被指数的相关性较弱之外, 与其余变量均呈极显著相关关系。

冯雷等使用了 FieldSpec 手持式野外光谱辐射仪采集了不同叶绿素仪 SPAD 数值的油菜作物冠层的反射率数值^[30], 发现在绿波段处, 油菜叶面的反射率随 SPAD 数值增大明显减小, 同样的趋势也反映在红波段和近红外波段处, SPAD 数值与叶面反射率没有明显相关关系, 用多光谱成像技术获

取去除土壤背景的可见冠层叶面的反射率数值, 同时用叶绿素仪测得此图像中的可见冠层叶面的叶绿素仪数值, 得到的油菜植被指数与叶绿素仪数值间的线性相关系数达到 0.927, 结果表明综合绿、红和近红外三波段的反射率数据的植被指数, 能够对油菜氮素营养状况进行快速、准确和非破坏性诊断。

Jiang 等分别用傅里叶变换近红外漫反射光谱法测定西红柿叶片中的水分含量和叶绿素, 用偏最小二乘法 (PLS) 建模, 并探讨了不同的光谱处理方法 (不同波长范围、基线校正、平滑、一阶和二阶微分), 从而获得较好的预测模型^[31, 32]。

蒋焕煜等利用傅里叶漫反射近红外光谱技术探讨尖椒叶片叶绿素含量的无损检测方法研究^[33], 利用偏最小二乘法和主成分回归法分别建立了叶片叶绿素含量与漫反射光谱间的数学模型, 同时对不同光谱预处理方法和不同建模波段范围对模型的预测性能进行对比分析, 结果表明经过异常样本剔除后, 在全波段范围内原始光谱经二次微分的预测相关系数达到 0.975 37, 通过研究得出应用近红外漫反射光谱检测叶片叶绿素含量是可行。

2 光谱分析技术尚存在的问题和今后的研究方向

利用光谱技术进行作物的相关信息获取是探测和获取作物营养状态和长势信息的有效手段, 近红外光谱技术、多光谱技术、高光谱技术在作物生长信息获取上均有一定的研究和应用, 但从目前国内外研究进展情况来看, 很多研究还停留在实验室研究上, 在生产上大量应用还有一定距离, 尚需解决很多问题。

(1) 利用光谱技术进行作物生长信息获取, 其主要原理是作物的叶片光谱特性是叶片结构、水分含量和生物化学物质浓度的函数, 因此不能用于作物高度、叶片分布情况等与作物生长发育状况相关的可视物理信息的获取。

(2) 利用光谱技术获取相关信息是为了科学的指导作物的生产, 因此在获取信息的时限和对环境的适应性上提出了特殊要求, 尽管光谱分析技术具有快速、绿色、环保等特点, 能对多种与作物相关的内在信息进行定性和定量的分析, 但还有较多研究仅停留在实验室研究阶段, 需要加快研制能真正应用于生产实际的自动化设备。

(3) 高光谱技术一般结合遥感技术用于大田的植被叶绿素含量评价, 除了光谱仪自身的信噪比外, 植被自身物理参数的确定就存在许多困难, 另外所建立的模型仍然受植被类型、农作物品种、生育阶段、生长条件以及测量环境等诸多因素的影响, 只能适用于特殊的条件, 需解决这些因素的制约。

(4) 多光谱技术和近红外光谱技术获取光谱的范围比较小, 主要用于植株叶面的生长信息获取, 在建立预测模型时容易受到取样位置变化等影响, 测定条件不易完全一致, 因此, 需要减少这些因素对测量精度的影响, 提高校正模型的稳健性。

(5) 目前利用光谱分析技术建立的关于生长信息的预测模型大都是基于在一定条件下完成的, 不同的测量条件和测量环境下获得的模型是不同的, 需要考虑这些因素对模型的影响程度和实现模型校正的方法。

3 今后的研究方向

光谱技术主要获取对象的光谱信息, 而高光谱图像技术

和多光谱图像技术既有图像信息又有光谱信息, 可用于探索内在信息和外在可视信息的综合获取, 也可以将光谱技术和机器视觉技术结合, 融合两者信息综合反映作物的生长状况; 红外成像在作物的病虫害检测方面已经进行了相关研究^[34], 两者技术的结合可以建立基于多信息融合的作物生长状况预测和作物健康状态评价; 测量条件和测量环境对模型有一定的影响, 需要通过模型校正的方法, 提高模型的通用性和稳定性。

参 考 文 献

- [1] CHEN Hong-jin, MA Guang, MEI Shu-fan(陈宏金, 马 广, 梅淑芳). Agriculture and Technology(农业与技术), 2005, 25(5): 54.
- [2] Shibayama Michio, Akiyama Tsuyoshi. Remote Sensing of Environment, 1989, 27: 119.
- [3] Shibayama Michio, Akiyama Tsuyoshi. Remote Sensing of Environment, 1991, 36: 45.
- [4] Shibayama M, Fakahashi W, Morinaga S, et al. Remote Sensing of Environment, 1993, 45: 117.
- [5] Pinar A. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(2): 351.
- [6] Kim Yunseop, Reid John F. Paper Number 023010, 2002 ASAE Annual International Meeting Chicago, Illinois, USA, July 29, 31, 2002.
- [7] Kim Y, Reid J F. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(6): 935.
- [8] Tumbo S D, Wagner D G, Heinemann P H. Trans. of the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2002, 45(3): 815.
- [9] Huang Chengwei, Huang Chunchi, Wu Tehui, et al. Paper Number 031132, 2003 ASAE Annual Meeting. Las Vegas, Nevada, USA, July, 2003.
- [10] Sui Ruixiu, Alex J. Paper number 041081, 2004 ASAE Annual Meeting. Ottawa, Canada, Aug. 1, 2004.
- [11] Sui R, Thomasson J A. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2006, 49(6): 1983.
- [12] Noh Hyun kwon, Zhang Qin, Shin Beom-Soo, et al. Paper Number 031135, 2003 ASAE Annual International Meeting. Las Vegas, Nevada, USA, July 20, 2003.
- [13] Noh Hyun Kwon, Zhang Qin, Han Shufeng. Paper Number 041132, 2004 ASAE Annual Meeting. Ottawa, Canada, Aug. 1, 2004.
- [14] Noh H, Zhang Q, Han S, et al. Trans of the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2005, 48(1): 393.
- [15] Noh H, Zhang Q, Shin B, et al. Biosystems Engineering, 2006, 94(4): 477.
- [16] Min M, Lee W S. Trans of the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2005, 48(2): 455.
- [17] Min M, Lee W S. Paper Number 061061, 2006 ASAE Annual Meeting. Portland, Oregon, USA, July 9, 2006.
- [18] Ramalingam N, Ling P P, Derksen R C. Transactions of the the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2005, 48(1): 375.
- [19] Borhan M S, Panigrahi S, Lorenzen J H, et al. Transactions of the American Society of Agricultural Engineering(ASAE), 2004, 47(2): 599.
- [20] JIN Zhong-hui(金仲辉). Physics(物理), 1993, 22(11): 673.
- [21] WU Chang-shan, XIANG Yue-qin, ZHENG Lan-fen, et al(吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等). Journal of Remote Sensing(遥感学报), 2000, 4(3): 228.
- [22] TANG Yan-lin, WANG Ren-chao(唐延林, 王人潮). Modernizing Agriculture(现代化农业), 2002, (2): 33.
- [23] JIN Zhen-yu, TIAN Qing-jiu, HUI Feng-ming, et al(金震宇, 田庆久, 惠凤鸣, 等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2003, 18(3): 134.
- [24] LIU Hong-bin, ZHANG Yun-gui, LI Zhi-hong, et al(刘宏斌, 张云贵, 李志宏, 等). Scientia Agricultura Sinica(中国农业科学), 2004, 37(11): 1743.
- [25] TIAN Yong-chao, CAO Wei-xing, JIANG Dong, et al(田永超, 曹卫星, 姜 东, 等). Acta Phytocologica Sinica(植物生态学报), 2005, 29(2): 318.
- [26] SUN Xue-mei, ZHOU Qi-fa, HE Qiu-xia(孙雪梅, 周启发, 何秋霞). Acta Agronomica Sinica(作物学报), 2005, 31(7): 844.
- [27] LI Zhi-wei, PAN Jiar-jun, ZHANG Jia-bao(李志伟, 潘剑君, 张佳宝). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2005, 25(6): 979.
- [28] YANG Ke-ming, GUO Da-zhi(杨可明, 郭达志). Geography and Geo-Information Science(地理与地理信息科学), 2006, 22(4): 31.
- [29] YI Qiu-xiang, HUANG Jing-feng, WANG Xiu-zhen, et al(易秋香, 黄敬峰, 王秀珍, 等). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(CSAE), (农业工程学报), 2006, 22(9): 138.
- [30] FENG Lei, FANG Hui, ZHOU Wei-jun, et al(冯 雷, 方 慧, 周伟军, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2006, 26(9): 1749.

- [31] Jiang Huangyu, Ying Yibin, Liu Yande. Proc. of SPIE, 2004, 5587: 245.
- [32] Jiang Huangyu, Ying Yibin, Bao Yingshi. Proc. of SPIE, 2005, 5996: 599612.
- [33] JIANG Huan-yu, YING Yi-bin(蒋焕煜, 应义斌). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2007, 27(3): 499.
- [34] XU Hui-rong, YING Yi-bin(徐惠荣, 应义斌). Journal of Zhejiang University. Agriculture and Life Science(浙江大学学报, 农业与生命科学), 2002, 28(4): 460.

Application of Spectroscopy Technique to Obtain Plant Growth Information

JIANG Huan-yu, YING Yi-bin^{*}, XIE Li-juan

College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

Abstract Detection of plant growth information can predict growth and health status of plant and realize intelligentized management, detection techniques of plant growth information include electrical properties, optical reflectance and machine vision, with the development of spectroscopy technique, near infrared spectroscopy technique, multispectral technique and hyperspectral technique are widely used in plant growth information measurement. Spectroscopy technique is extremely fast, high efficient, cheap to implement and no sample preparation, has been a rapid and non-destructive modern measuring technique. In this paper, the application of spectroscopy technique to measurement of plant growth information was briefly introduced. Some considerable aspects existing in the application were also discussed and it is pointed out that because of real time information obtain and intelligentized management of plant, automation analysis equipment should be developed to improve the speed of plant growth information measurement and cooperating with several other techniques, such as machine vision, thermal imaging technique and spectroscopy technique, is the research trend.

Keywords Spectral analysis; Plant; Growth information; Application

(Received Sep. 16, 2007; accepted Dec. 28, 2007)

^{*} Corresponding author