

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.043

基于反射光谱的苹果叶片叶绿素和含水率预测模型^{*}

冀荣华 郑立华 邓小蕾 张 瑶 李民赞
(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要:为探索苹果叶片叶绿素含量(质量比)、叶片含水率与反射光谱之间的关系,以华北地区苹果树为研究对象,分别测定了各个关键生长期苹果叶片的光谱反射率、叶绿素含量和叶片含水率。分析光谱反射率与叶绿素含量以及叶片含水率之间相关性发现,在不同生长时期,苹果叶片叶绿素 a 含量与反射光谱在 515 ~ 590 nm 和 688 ~ 715 nm 两组波段内具有较高的相关性,且果实成熟期数据显示相关度最高($R^2 = 0.6$)。在 420 ~ 500 nm、640 ~ 680 nm、740 ~ 860 nm 3 个波段叶片含水率与反射光谱有较高的相关性,且果实膨大期的叶片含水率在可见光波段的相关系数最大。根据所选敏感波段,分别利用多元线性回归、主成分分析和人工神经网络建立基于反射光谱的苹果叶片不同生长时期叶绿素和含水率的预测模型。通过对所建立的预测模型进行校验,结果显示,利用主成分分析方法所建立的苹果叶片叶绿素含量预测模型的决定系数最高($R^2 = 0.8852$),校验系数为 0.8289。该模型可以较为准确地预测苹果叶片叶绿素含量。而采用神经网络所建立苹果叶片含水率预测模型的决定系数 $R^2 = 0.862$,校验系数为 0.8375,预测效果最好。

关键词: 苹果叶片 光谱 叶绿素含量 含水率
中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0269-07

引言

快速、有效地监测植物营养和生长发育状况,是植物科学栽培、智能管理的重要基础^[1-3]。叶绿素和叶片含水率是两个非常重要的表征植物营养、生长状况的指标^[4-5]。其中叶绿素含量是植物营养胁迫、光合作用能力和生长状况的重要指示因子,通过测定叶绿素含量可以判断出植物营养状况;而叶片含水率则能直接反映植株水分状况,通过测定叶片含水率可以判断作物水分亏缺程度,从而指导实时适量的灌溉。测量叶绿素含量和叶片含水率的传统方法均通过破坏性采样进行测定。该方法测量精度较高,但是操作繁琐、耗时,且野外采集的样本在保存和运输等方面都比较困难,无法满足现场快速无损检测的要求。

如何快速有效地检测植物生长状况成为实现植物精细管理的首要问题。植物反射光谱特征的差异与植物叶片的叶绿素含量及含水率密切相关,利用植物反射光谱特征诊断植物长势可以获得较高的解析精度^[5-8]。目前大部分相关研究都集中在水稻、玉米等大田作物上^[9-12]。而针对果树等的研究相

对较少。利用各类(多光谱和可见光)图像可实现苹果病虫害防治和产量预测^[13-15]。为了更加有效研究苹果的光谱特性与苹果长势相互关系,特别对苹果的花期冠层特征、花叶与苹果光谱进行了研究,并建立苹果花氮素含量预测模型^[16-18]。国内外基于光谱技术对果树的研究大都局限于病虫害预警、施药、叶面积指数估计和冠层生物量检测、产量预测和果品品质评估^[19-22],而以指导果园生产管理为目标的果树营养和长势监测研究比较少。

苹果园的精细管理可以在保证苹果产量的同时提高果品质量。及时、准确地获取果树的生长信息,并以此指导果树的灌溉、疏花和疏果等管理工作,从而最大程度保证果树的产量和品质,实现果园的精细管理。

苹果树的生长划分为幼树期、生长结果期、盛果期和衰老期 4 个阶段。盛果期是指果树产量最高的时期。处于盛果期的苹果树的果实要经过花期、生理坐果期、果实膨大期以及果实成熟期等一系列生长过程,需要消耗大量的养分和水分。本文以盛果期的苹果树为研究对象,研究盛果期苹果树果实的生长时期(分为花期、生理坐果期、果实膨大期和果

收稿日期: 2013-09-12 修回日期: 2013-09-24
^{*} 国家自然科学基金资助项目(31071330)
作者简介: 冀荣华,副教授,主要从事农业信息化研究,E-mail: jrhcaw@hotmail.com
通讯作者: 郑立华,副教授,主要从事农业信息化研究,E-mail: zhenglh@cau.edu.cn

实成熟期)苹果叶片的光谱反射率,探索反射光谱数据与叶片叶绿素含量、含水率之间的相关性,分别筛选出苹果叶片叶绿素含量和含水率的敏感波段。以此为基础,分别利用多元线性回归、主成分分析和人工神经网络建立多种基于光谱的苹果长势预测模型。通过对所建模型的评价与优选,确定最佳的基于光谱的苹果长势预测模型,为实现苹果树营养快速诊断、长势监测及产量预测提供理论依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

供试苹果树选自北京市昌平区香堂文化新村果园。果树品种为红富士,栽培土壤为沙壤土。在果园内的不同区域随机选取 25 棵苹果树(其中 15 棵结果树,10 棵未结果树),每棵树选取一支向阳主枝作为目标主枝,然后在其 3 个代表性部位(基部、中部、顶部)分别选取若干果叶。

叶片反射光谱利用日本 Shimadzu 公司生产的 UV-2450 岛津光谱仪测量。苹果叶片叶绿素含量利用 Spectrum 752 型紫外可见分光光度计测定。

1.2 实验方法

在 2011 年 4—9 月,采集了 4 次苹果叶片样本,每个部位采集若干代表叶片作为一组样本,每棵树采集 3 组样本,每次共采集 75 组样本。采集叶片样本装入避光塑料袋,快速带回实验室后进行光谱测量和叶绿素、含水率测定。

在实验室内首先利用 UV-2450 岛津光谱仪分别测定所采集叶片样本的反射光谱。波长范围为 300~900 nm,光谱分辨率为 1 nm,数据采集前进行标准白板校正(标准白板反射率为 1),每个样本测定光谱 3 次,取其平均值作为该样本的相对反射率。

利用分光光度法测定苹果叶片叶绿素含量。将叶片首先去除主茎,剪碎、混匀,称取 0.4 g,用 99% 丙酮和无水乙醇 2:1 混合液 25 mL 浸泡 24 h,再使用分光光度计测量其吸光度,计算出叶片叶绿素含量。

苹果叶片含水率采用烘干法测定。首先称量并记录叶片鲜质量,然后放入干燥箱杀青 30 min (105℃下),在 70℃下干燥至质量恒定后再用天平称量,记为叶片干质量。

表征叶片含水率有 2 种方法:湿基含水率(C_w)和干基含水率(C_d),其中

$$C_w = (L_w - L_d) / L_w \times 100\% \tag{1}$$

$$C_d = (L_w - L_d) / L_d \times 100\% \tag{2}$$

式中 L_w ——叶片鲜质量 L_d ——叶片干质量

由于鲜叶片的质量远远大于其干质量,叶片的湿基含水率非常接近,为突出不同叶片间的差异,本

文中采用干基含水率来表征叶片的含水率。

2 分析与建模

在本研究中,首先将每次实验获得的数据集分为两个子集,即校正集和预测集。由于每次采集 75 个样本,设置校正集包括 50 个样本,预测集包括 25 个样本。研究首先对测得的光谱反射率进行光谱预处理,利用移动窗口平均法进行平滑处理以去除噪声,然后利用去除趋势法进行校正,最后将原始光谱数据进行归一化处理。以归一化处理后的光谱与叶片叶绿素含量以及叶片含水率分别进行相关性分析,确定各自的敏感波段,并以此为基础利用多种建模方法建立苹果长势预测模型。

2.1 相关性分析

通过分析不同生长时期苹果叶片叶绿素含量、含水率与光谱反射率之间的关系,以找到其最佳预测时间和建模所需的敏感波段。

2.1.1 叶片叶绿素含量与光谱反射率相关性研究

叶片叶绿体色素包括叶绿素 a 和叶绿素 b。每种叶绿素在蓝光和红光波段处各有一显著的吸收峰。吸收峰的位置随叶绿素种类不同而有所不同。本文分别计算了苹果叶片两种叶绿素与反射光谱之间的相关系数,结果如图 1 所示。

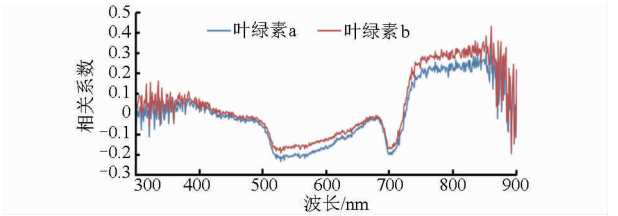


图 1 苹果叶片两种叶绿素含量与反射光谱之间的相关系数曲线

Fig. 1 Correlation coefficient between spectra and two kinds chlorophyll of apple leaves

从图 1 中可以发现,叶绿素 a 和叶绿素 b 与反射光谱之间的相关系数大小接近,变化趋势相似。因此,本文采用叶绿素 a 来表征苹果叶片的叶绿素含量,分析叶绿素 a 与反射光谱之间的相关性。

分别计算了 2011 年 4 月—9 月期间,4 次采集的苹果叶片样本的叶绿素 a 含量与原始反射光谱间的相关系数,如图 2 所示。

从图 2 中可以发现,苹果叶片叶绿素 a 含量与反射光谱之间的相关性在不同时期具有相似的变化规律,均在 515~590 nm 和 688~715 nm 两组波段内具有较高的相关性。即可以选取 515~590 nm 和 688~715 nm 波段作为建立基于反射光谱的苹果叶片叶绿素含量预测模型的敏感波段。从图 2 中还可以发现,不同生长时期,其相关性也有所不同。在这

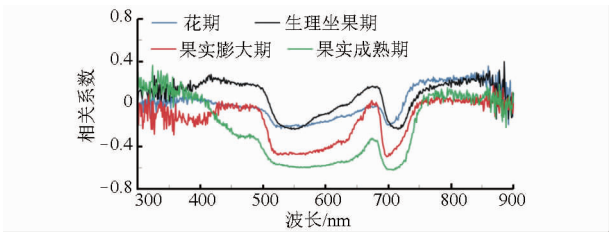


图 2 不同时期苹果叶片中叶绿素 a 含量与反射光谱之间的相关系数曲线

Fig. 2 Correlation between original spectral reflectance and the chlorophyll content of apple leaves

两个敏感波段中,花期和生理坐果期的相关系数较为接近;果实膨大期的相关系数显著提高,达到 -0.47;而果实成熟期的相关系数最大,达到了 -0.6。可见在果实成熟期利用反射光谱预测苹果叶片叶绿素含量将会得到很好的效果。

2.1.2 叶片含水率与光谱反射率相关性研究

利用干基含水率来表示叶片的含水率,分析了 2011 年不同生长时期叶片含水率与反射光谱间的相关系数,结果如图 3 所示。

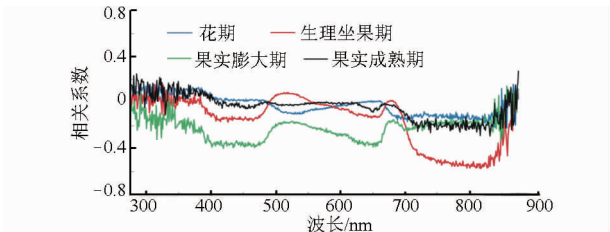


图 3 不同时期苹果叶片含水率与反射光谱之间的相关系数曲线

Fig. 3 Correlation between original spectral reflectance and moisture content of apple leaves

从图 3 中可以发现,在紫外波段和可见光波段,花期、生理坐果期和果实成熟期的叶片含水率与反射光谱的相关系数较低,而果实膨大期叶片含水率与反射光谱具有较高的相关系数。而在近红外波段则表现出不同的规律,生理坐果期叶片含水率与反射光谱相关系数最大达到 0.57,而花期最低(0.13)。果实膨大期叶片含水率在可见光波段的相关系数最大。同时,果实膨大期是苹果树生育的关键时期,是苹果花芽分化期、果实膨大期和果实着色期,也是大量需水的时期。分析结果显示,在果实膨大期利用光谱数据可以较为准确地测定其叶片含水情况。综合考虑叶片反射率与含水率之间的相关系数分布认为,在 420 ~ 500 nm、640 ~ 680 nm、740 ~ 860 nm 3 个波段可定义为水分敏感波段。

2.2 预测模型建立

根据前面所选定的敏感波段,分别利用多元统计分析、主成分分析和神经网络建立预测模型,并加以对比。

2.2.1 苹果叶片叶绿素含量预测模型的建立

通过前面分析发现,反射光谱与苹果叶片叶绿素含量具有一定的相关性,并确定了敏感波段为 515 ~ 590 nm 和 688 ~ 715 nm。同时在不同生长时期,两者间相关性具有较大差异。为此,本文分别采用不同的模型建立基于光谱的苹果叶片叶绿素含量预测模型。

2.2.1.1 多元统计预测模型

在敏感波段中选取 4 个波长(520 nm、540 nm、692 nm 和 700 nm),以其对应光谱反射率(R_{520} 、 R_{540} 、 R_{692} 和 R_{700})作为自变量,进行多元线性回归分析、建模,所建模型为

$$y = 0.0142R_{520} + 0.032R_{550} + 0.047R_{690} + 0.086R_{705} + 1.75 \quad (3)$$

其中, y 为苹果叶片叶绿素含量(质量比)。对于不同生长时期,该预测模型的决定系数有一定的差异性。不同生长时期的叶绿素多元统计预测模型的决定系数:花期为 0.715 4;生理坐果期为 0.713 9;果实膨大期为 0.803 1;果实成熟期为 0.856 2。可以发现该预测模型可以很好地预测果实成熟期的苹果叶绿素含量。

2.2.1.2 主成分预测模型

为充分利用敏感波段中尽可能多的波长信息,利用主成分分析方法建立了苹果叶片叶绿素含量的预测模型。通过主成分分析发现,前 3 个主成分的累积贡献率达到了 93.5%,包含了敏感波段绝大部分信息,因此选用前 3 个主成分作为预测模型的输入。建立的预测模型为

$$y = 0.031X_f + 0.075X_s + 0.022X_t + 1.82 \quad (4)$$

其中 X_f 、 X_s 、 X_t 分别为第 1、第 2 和第 3 主成分分量。不同生长时期的叶绿素主成分预测模型的决定系数:花期为 0.743 1;生理坐果期为 0.765 1;果实膨大期为 0.842 1;果实成熟期为 0.885 2。

2.2.1.3 BP 神经网络预测模型

在 2 个敏感波段中选取 7 个波长(520 nm、540 nm、560 nm、585 nm、692 nm、700 nm 和 710 nm)的光谱反射率作为 BP 神经网络的输入,建立一个 7-3-1 的 BP-CC 预测模型。不同生长时期的叶绿素 BP-CC 预测模型的决定系数:花期为 0.715 4;生理坐果期为 0.713 9;果实膨大期为 0.803 1;果实成熟期为 0.863 5。

可以发现,基于光谱的苹果叶片叶绿素含量预测模型,对果实成熟期的叶片叶绿素含量预测效果最好,其中利用主成分分析法所建立的叶绿素含量预测模型的决定系数最高($R^2 = 0.8852$),根据决定系数的优选原则,利用主成分分析方法建立的模型

较适合用于预测苹果叶片叶绿素含量。

2.2.2 苹果叶片含水率预测模型的建立

通过前面分析,发现反射光谱与苹果叶片含水率具有一定的相关性,并确定了敏感波段为 420 ~ 500 nm、640 ~ 680 nm、740 ~ 860 nm。但在不同生长时期,其相关关系表现出较大差异。为此,本文分别采用不同的建模方法建立基于光谱的苹果叶片含水率预测模型。

2.2.2.1 多元统计预测模型

在叶片含水率 3 个敏感波段(420 ~ 500 nm、640 ~ 680 nm 和 740 ~ 860 nm)中选取 4 个波长(480 nm、650 nm、750 nm 和 850 nm)的光谱反射率(R_{480} 、 R_{650} 、 R_{750} 和 R_{850})作为自变量,进行回归分析和建模。建立模型为

$$y' = 0.0262R_{480} + 0.0193R_{650} + 0.0632R_{750} + 0.0376R_{850} + 1.92 \quad (5)$$

其中, y' 为苹果叶片含水率。不同生长时期的叶片含水率多元统计预测模型的决定系数:花期为 0.723 7;生理坐果期为 0.775 2;果实膨大期为 0.837 5;果实成熟期为 0.715 2。

2.2.2.2 主成分预测模型

在主成分分析时,发现其前两个主成分的累积贡献率达到了 89.6%,包含了敏感波段的绝大部分信息,因此采用前两个主成分作为预测模型的输入,所建立预测模型为

$$y' = 0.049X_f + 0.032X_s + 1.79 \quad (6)$$

不同生长时期的叶片含水率主成分预测模型的决定系数:花期为 0.763 4;生理坐果期为 0.771 2;果实膨大期为 0.851;果实成熟期为 0.732 2。

2.2.2.3 BP 神经网络预测模型

在 3 个敏感波段中选取 8 个波长(453 nm、480 nm、650 nm、660 nm、750 nm、786 nm、820 nm 和

850 nm)的光谱反射率作为 BP 神经网络的输入,建立一个 8-3-1 的 BP-MC 预测模型。不同生长时期的叶片含水率 BP-MC 预测模型的决定系数:花期为 0.774 1;生理坐果期为 0.742 3;果实膨大期为 0.862;果实成熟期为 0.753 2。

可以发现,基于 BP-MC 预测模型决定系数最高,尤其是对果实膨大期的采样数据($R^2 = 0.862$)。说明该模型比较适合用于预测苹果叶片含水率。

2.3 模型检验

利用校正集中 25 个苹果叶片样本对所建立的预测模型进行检验。首先利用 3 种模型分别预测叶片叶绿素含量和含水率。然后用预测样本的实测叶绿素含量和叶片含水率,对所建立的预测模型进行检验。

分析果树叶片叶绿素含量的预测模型检验结果可以发现,用主成分分析法所建立的苹果叶片叶绿素含量预测模型的预测效果最好。图 4 所示为根据果实成熟期数据建立的基于光谱的苹果叶片叶绿素含量预测模型的检验结果。

主成分分析建模中使用前 3 个主成分,其累积贡献率为 93.5%,包含敏感波段的绝大部分信息,所建模型更能利用光谱和叶绿素含量间的关系,因此预测效果更好。

分析果树叶片含水率的预测模型检验结果可以发现,采用神经网络所建立的基于光谱的苹果叶片含水率预测模型,预测效果最好。图 5 所示为根据果实膨大期数据建立的基于光谱的苹果叶片含水率预测模型的检验结果。

BP 神经网络建模中输入数据为 8 个波长的光谱信息,较为充分地利用了光谱数据。所建模型更能利用光谱和叶片含水率间的关系,因此预测效果更好。

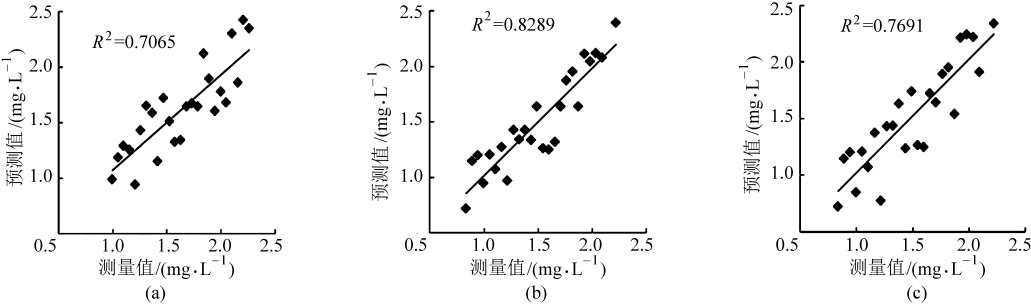


图 4 苹果叶片叶绿素含量不同预测模型的预测结果

Fig.4 Forecasting results of three prediction models for the apple leaf chlorophyll content
(a) 多元回归分析 (b) 主成分分析 (c) BP 神经网络

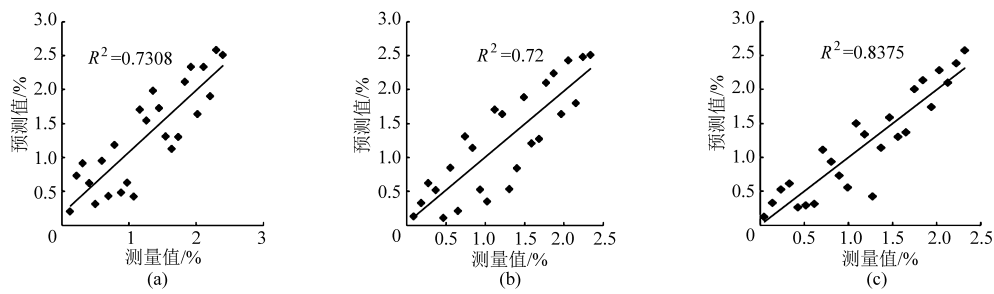


图 5 苹果叶片含水率不同预测模型的预测结果
Fig. 5 Verification results of three prediction models for the apple leaf moisture content
(a) 多元回归分析 (b) 主成分分析 (c) BP 神经网络

3 结论

快速、有效地检测果树的生长状况是果园精细化管理的重要基础。果树的叶片含水率和叶绿素含量能够反映出果树的生长情况。为快速检测并诊断果树的生长情况,本文以华北地区苹果树为研究对象,获取各个关键生长期苹果叶片的光谱反射率、叶绿素含量和含水率,分析了反射光谱数据与叶片叶绿素含量、含水率之间的关系,得出如下结论:

(1)苹果叶片叶绿素 a 含量与反射光谱之间的相关性在苹果不同生长时期的分布规律相似,均在 515 ~ 590 nm 和 688 ~ 715 nm 波段具有较高的相关性。在这 2 个敏感波段中,花期和生理坐果期的相关系数较为接近,为 -0.27。果实膨大期的相关系数显著提高,达到 -0.47,而果实成熟期的相关系数最大,达到了 -0.6。

(2)在可见光和近红外波段,叶片的含水率在苹果不同生长时期是相似的。在 420 ~ 500 nm、640 ~ 680 nm、740 ~ 860 nm 3 个波段具有较高的相关性。花期和果实成熟期的叶片含水率与反射光谱具有较

低的相关性,而生理坐果期和果实膨大期具有较高的相关性。生理坐果期在近红外波段有很高的相关性,苹果叶片含水率与反射光谱的相关系数最大(0.57),而花期最低(0.13)。在可见光波段,果实膨大期具有最大的相关系数,为 0.38。

(3)根据所选择的敏感波段,分别利用多元线性回归、主成分分析和人工神经网络建立了基于光谱的苹果生长预测模型。对所建立的预测模型进行校验。结果显示,利用主成分分析方法所建立的苹果叶片叶绿素含量预测模型的决定系数最高,可以较为准确地预测苹果叶片叶绿素含量。利用果实成熟期采集数据建立的叶片叶绿素含量预测模型,其决定系数 R^2 为 0.885 2,校验系数为 0.828 9。而对于果树叶片水分,采用神经网络所建立的基于光谱的苹果叶片含水率预测模型预测效果最好。根据果实膨大期采集数据建立的叶片含水率预测模型,其决定系数 R^2 为 0.862,校验系数为 0.837 5。

本文通过对所建模型的评价与优选,确定了最佳的基于光谱的苹果长势预测模型,为实现苹果树快速营养诊断、长势监测及产量预测提供了理论依据。

参 考 文 献

1 Olga S, Dimitris P, Stavros S, et al. Band depth analysis of CHRIS/PROBA data for the study of a Mediterranean natural ecosystem. Correlations with leaf optical properties and ecophysiological parameters[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 752 - 766.

2 Veronica Ciganda, Anatoly Gitelson, James Schepers. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content [J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 166(2): 157 - 167.

3 Cheng T, Rivard B, Sanchez-Azofeifa A. Spectroscopic determination of leaf water content using continuous wavelet analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 659 - 670.

4 Cheng Tao, Benoit R, Sanchez-Azofeifa A G, et al. Predicting leaf gravimetric water content from foliar reflectance across a range of plant species using continuous wavelet analysis[J]. Journal of Plant Physiology, 2012, 169(12): 1134 - 1142.

5 Mark W M, Stewart B, Lisl Robertson. An algorithm for detecting trophic status (chlorophyll-a), cyanobacterial-dominance, surface scums and floating vegetation in inland and coastal waters[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 124: 637 - 652.

6 Di Vittorio A V. Enhancing a leaf radiative transfer model to estimate concentrations and in vivo specific absorption coefficients of total carotenoids and chlorophylls a and b from single-needle reflectance and transmittance[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): 1948 - 1966.

7 Luis G V, Evangelos S, Torres Palenzuela J M. Neural network estimation of chlorophyll a from MERIS full resolution data for the coastal waters of Galician rias (NW Spain)[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(2): 524 - 535.

8 Hilker T, Coops N C, Coggins S B, et al. Detection of foliage conditions and disturbance from multi-angular high spectral

resolution remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(2): 421 – 434.

9 Li Fei, Gnypt Martin L, Jia Liangliang, et al. Estimating N status of winter wheat using a handheld spectrometer in the North China Plain[J]. Field Crops Research,2008, 106(1): 77 – 85.

10 唐延林, 王纪华, 黄敬峰,等. 利用水稻成熟期冠层高光谱数据进行估产研究[J]. 作物学报, 2004, 30(8): 739 – 744. Tang Yanlin, Wang Jihua, Huang Jingfeng, et al. Yield estimation by hyperserctral data of rice canopies in mature stages[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(8): 739 – 744. (in Chinese)

11 Gamon J A, Field C B, Goulden M L, et al. Relationships between NDVI, canopy structure, and photosynthesis in three Californian vegetation types[J]. Ecological Applications, 1995, 5(1): 28 – 41.

12 吴华兵, 朱艳, 田永超,等. 棉花冠层高光谱参数与叶片氮含量的定量关系[J]. 植物生态学报, 2007, 31(5): 903 – 909. Wu Huabing, Zhu Yan, Tian Yongchao, et al. Relationship between canopy hyperspectral index and leaf nitrogen accumulation in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2007, 31(5): 903 – 909. (in Chinese)

13 Penuelas J, Filella I, Loret P, et al. Reflectance assessment of mite effects on apple trees[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995,16(14): 2727 – 2733.

14 Delalieux S, van Aardt J, Keulemans W, et al. Detection of biotic stress (*Venturia inaequalis*) in apple trees using hyperspectral data: Non-parametric statistical approaches and physiological implications[J]. European Journal of Agronomy, 2007, 27(1): 130 – 143.

15 Alain A Viau, Jae-Dong Jang, Veronique Payan, et al. The use of airborne LIDAR and multispectral sensors for orchard trees inventory and characterization[C] // Symposium on Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production (FRUTIC 05), 2005.

16 朱西存, 赵庚星, 雷彤,等. 苹果花期的冠层高光谱特征研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(10): 2708 – 2712. Zhu Xicun, Zhao Gengxing, Lei Tong, et al. Study on hyperspectral characteristics of apple florescence canopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(10): 2708 – 2712. (in Chinese)

17 朱西存, 赵庚星, 王凌,等. 基于高光谱的苹果花氮素含量预测模型研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 416 – 420. Zhu Xicun, Zhao Gengxing, Wang Ling, et al. Hyperspectrum based prediction model for nitrogen content of apple flowers[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(2): 416 – 420. (in Chinese)

18 雷彤, 赵庚星, 朱西存,等. 基于高光谱和数码照相技术的苹果花期光谱特征研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(7): 2481 – 2490. Lei Tong, Zhao Gengxing, Zhu Xicun, et al. Research of apple florescence spectral features based on hyperspectral data and digital photos[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(7): 2481 – 2490. (in Chinese)

19 Pratibha Thakuria Das, Liagi Tajo, Jonali Goswami. Assessment of citrus crop condition in Umling block of Ri-Bhoi district using RS and GIS technique[J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2009, 37(2): 317 – 324.

20 苑克俊, 刘庆忠, 李圣龙,等. 利用数码相机测定果树叶面积的新方法[J]. 园艺学报, 2006, 33(4): 829 – 832. Yuan Kejun, Liu Qingzhong, Li Shenglong, et al. A new method for measuring leaf area of fruit trees using digital camera[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2006, 33(4): 829 – 832. (in Chinese)

21 Apan A, Held A, Phinn S, et al. Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using eo-1 hyperion hyperspectral imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(2): 489 – 498.

22 张亚静, 邓烈, 李民赞,等. 基于图像处理的柑橘测产方法[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 97 – 99. Zhang Yajing, Deng Lie, Li Minzan, et al. Estimation of citrus yield based on image processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009, 40(Supp.): 97 – 99. (in Chinese)

Forecasting Chlorophyll Content and Moisture of Apple Leaves in Different Tree Growth Period Based on Spectral Reflectance

Ji Ronghua Zheng Lihua Deng Xiaolei Zhang Yao Li Minzan

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to detect the growth status of apple trees based on spectroscopy, an apple orchard was selected as the experimental site located at the outskirts of Beijing. First, the samples of apple tree leaves at each key growth period were collected. Then the spectral reflectance, chlorophyll content and moisture content of the samples were measured respectively. The characteristics of those spectra were analyzed and the correlation between chlorophyll content, moisture content and their spectra were calculated. The

results showed that the original spectra were most correlated with leaf chlorophyll content from 511 nm to 590 nm and from 688 nm to 715 nm. The correlation coefficients in September were high and the maximum value was 0.6. From the correlation analysis between apples leaves moisture content and their spectra, it was found that the original spectra were most correlated with leaf moisture content at the wavebands of 420 ~ 500 nm, 640 ~ 680 nm and 740 ~ 860 nm, and the correlation coefficients in fruiting period were high. According to the selected sensitive bands, the models for estimating the chlorophyll content and moisture content in apple leaves were built by multiple linear regression analysis (MLRA), principal component analysis (PCA) and artificial neural network (ANN), respectively. The models were tested by the validation set which included 25 samples of apple tree leaves. The forecasting results indicated that the model based on PCA was the best model to predict the chlorophyll content of apple leaves, and the calibration and validation R^2 were 0.885 2 and 0.828 9, respectively. The forecasting model of apple leaf moisture content based on ANN was the best, and the calibration and validation R^2 were 0.862 and 0.837 5, respectively.

Key words: Apple leaves Spectroscopy Chlorophyll content Moisture content

(上接第 177 页)

Development of Remote Automatic Metering Sluice Oriented to Irrigation Water Diversion Project

Zhang Congpeng Luo Xueke Li Leyi Mao Tan Yue Xiangquan

(College of Mechanical Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Based on remote networking technology, a dynamic irrigation water diversion system was developed. The system consisted of automatic metering sluice clusters installed on the canals and remote diversion control and management system working in dispatching center. Combined with open channel flow measurement principle and sensor technology, the metering function of the gate was designed. The symmetrical bidirectional coupled winding wheel pulling mechanism and hollow honeycomb structure gate panel were utilized, which could improve the movement reliability and the energy efficiency. An ARM-based gate controller and software system were developed to achieve the gate intelligent control and wireless remote communication function. Various working modes of the sluice could meet the different applications needs. A solar power system was devised to solve the outdoor power supply problem of the automatic gate. To implement the remote linkage control of the sluice clusters, remote water diversion control software package was developed. The application and experiment results showed that the gate terminal had good adaptability to outdoor environment and stable work performance. The water level control error was less than 5 mm and the gate gap positioning control error was less than 1 mm. Under free flow conditions the flow measurement error was less than 4.6%, and under submerged conditions the flow measurement error was less than 8.3%. The remote automatic metering gate could satisfy all kinds of automatic water conveyance project applications.

Key words: Automatic metering sluice Remote dynamic water diversion Open channel flow measurement Remote wireless control