

智能手机的主要叶类蔬菜品质和新鲜度指标的光谱检测

简 讯^{1,2}, 张立福¹, 杨 杭^{1*}, 孙雪剑¹, 代双凤¹, 张红明¹, 李晶宜¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 蔬菜品质和新鲜度的高低不仅影响食用时的口感, 而且营养程度也不一样。作为蔬菜品质和新鲜度重要参考指标之一的叶绿素和含水量的检测, 已经越来越受到国内外学者的重视。相比于传统的肉眼目视判断的检验方法, 可见-近红外光谱分析具有快速高效、无损、非接触等独特的优势, 更加适合蔬菜的实时检测。目前相关研究主要集中在生长中植被叶绿素和含水量的反演, 对市场上成品蔬菜的研究较少, 或者研究对象单一, 缺乏市场普适性。此外, 光谱数据的获取需要专业的光谱仪采集, 费时费力, 各种生理生化指标的研究离实用化还有很长的距离。为了与实际相结合, 基于智能手机光谱系统(SCSS)建立了快速、准确、普适性强的反演蔬菜叶绿素和含水量的模型, 并通过地面光谱仪 SVC 数据验证了该系统的可靠性。选取市场典型的五种蔬菜(菠菜、小油菜、油麦菜、生菜和娃娃菜)作为实验样本, 分别进行常温保存和冷藏保存来模拟现实中菜市场 and 超市的蔬菜储存环境。每隔 24 h 进行一次数据采集。对获取的原始光谱数据进行波段选择和小波变换去噪的预处理。构建蔬菜叶绿素反演指数($VCRI_{(m, n)}$)和蔬菜含水量反演指数($VWRI_{(i, j)}$), 分别提取该两个指数与叶绿素和含水量实测值的相关系数 R 作为权重系数, 最终建立了叶绿素和含水量的加权平均反演模型。实验结果表明, SVC 仪器和 SCSS 两者数据针对蔬菜叶绿素和含水量的敏感波段基本一致, 叶绿素反演的敏感波段在 730~980 nm 之间, 反演精度 R^2 分别为 0.863 和 0.808 1, 标准差为 8.679 5 和 8.892 5; 含水量反演的敏感波段在水汽吸收波段 950~1 000 nm 之间, 反演精度 R^2 分别为 0.742 9 和 0.712 9, 标准差为 8.789 9% 和 8.861 4%。SVC 实验数据跟 SCSS 实验数据结果十分接近, 验证了新型智能手机光谱系统实时监测蔬菜叶绿素和含水量的有效性。智能手机光谱系统具有体积小、价格便宜的优势, 结合网络云端服务和实时数据反馈的特点, 能够实现蔬菜品质和新鲜度指标的智能检测, 让光谱分析真正应用于人们日常生活中。

关键词 蔬菜; 智能手机光谱系统; 叶绿素值; 含水量; 实时无损检测

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)05-1524-06

引 言

绿叶蔬菜作为日常饮食中不可或缺一部分, 其品质和新鲜程度是人们最为关注的话题。消费者在购买蔬菜时, 一般都是用肉眼来判断, 但是这种方法会因为个人的实际经验、感官能力和标准等主观因素而产生不同差异。因此, 如何能够方便准确地实时检测蔬菜品质和新鲜程度变得尤为重要。

叶绿素含量是植物重要的生理生化指标之一, 反映其长势及营养状况^[1-3]。通过光谱快速、无损地反演蔬菜叶绿素含量已成为可行^[4], 而不同传感器的光谱响应的差异会影响

叶绿素的反演结果。目前许多研究通过多光谱数据的特定波段, 通过归一化植被指(normalized difference vegetation index, NDVI)和比值指数指数(ratio vegetation index, RVI)建立回归模型, 对植被的叶绿素含量进行了评估。国外也有学者通过高光谱影像来评估菠菜叶的品质^[5]。

蔬菜的含水量是衡量其新鲜程度的重要参考指标^[6-8], 而植物光谱中水汽吸收带的存在则为精确反演含水量提供了可能性。归一化水指数(normalized difference water index, NDWI)的构建, 可以用来评估小麦的水含量^[9]。国内有研究通过对角斜率指数的改进, 构建了近红外角度归一化指数(near infrared angle normalized index, NANI)和近红外角度

收稿日期: 2018-04-07, 修订日期: 2018-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871352, 41701474)和国家重点研发计划项目(2017YFC1500901)资助

作者简介: 简 讯, 1988 年生, 中国科学院遥感与数字地球研究所博士研究生 e-mail: jianxun9968@163.com

* 通讯联系人 e-mail: yanghang@radi.ac.cn

斜率指数(near infrared angle slope index, NASI), 在植被含水量反演上具有了更高的精度。

目前针对反演生长期植被的叶绿素和含水量实验较多, 针对成品蔬菜的研究较少, 光谱数据都是利用非常专业的地面光谱仪获取, 仪器价格高, 专业技术要求高, 导致测量技术和方法难以推广。本研究使用轻巧便利的智能手机光谱系统 SCSS 和地面光谱仪 SVC HR-1024 共同采集光谱数据, 通过构建的蔬菜叶绿素反演指数 VCRI 和蔬菜含水量反演指数 VWRI, 建立了简单、快速、普适性强的蔬菜叶绿素和含水量反演模型。为 SCSS 应用于蔬菜品质 and 新鲜度的实时检测提供了技术支持, 人们还可以通过 SCSS 连接的智能手机上传数据到网络云端, 获取更多相关信息。

1 实验部分

1.1 材料

选用新鲜饱满叶类蔬菜五种, 分别是菠菜、小油菜、油麦菜、生菜和娃娃菜, 这五种菜品的消费量大, 民众关注度高, 针对这五种菜品开展研究具有重要的社会意义和经济价值。该五种蔬菜的叶绿素含量有一个明显的梯度分布, 建立叶绿素反演模型具有较强的普适性。

实验过程分为常温保存和冷藏保存, 模拟实际生活中菜市场 and 超市里蔬菜贮藏环境。验室温度为 20~25 °C, 冷藏室温度设定为 8 °C。

1.2 仪器与数据采集

光谱测量使用 Spectra Vista Corporation 公司生产的 SVC HR-1024 地面光谱辐射计, 以及中国科学院遥感与数字地球研究所高光谱应用研究室自主研制的智能手机光谱系统(smart cellphone spectral system, SCSS)(见图 1)同步测量。SCSS 的传感器部分通过蓝牙与智能手机连接, 并自带稳定光源, 采集的光谱数据通过网络可以实时传输网络云端, 经分析处理后, 将结果反馈回客户端, 整体系统结构如图 2 所示。SVC 作为遥感领域最常使用的地面光谱仪之一, 测量精度与稳定性已经得到大众认可, 通过 SVC 光谱数据与 SCSS 光谱数据共同建模对比, 为新型便携式智能光谱仪提供技术支撑。蔬菜叶绿素含量的测量使用型号为 SPAD-502 Plus 的叶绿素计, 测得的 SPAD 值表示叶绿素的相对含

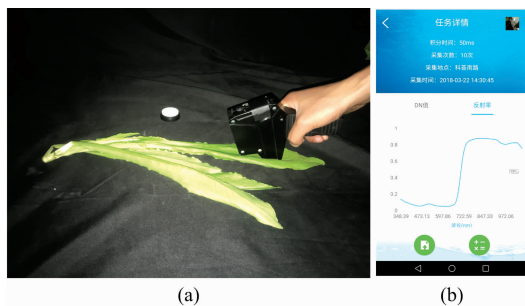


图 1 智能手机光谱系统 SCSS 的传感器部分 (a) 和操作端光谱采集界面 (b)

Fig. 1 The sensor of Smart Cellphone Spectral System (a) and interface of spectrum collecting on operation side (b)

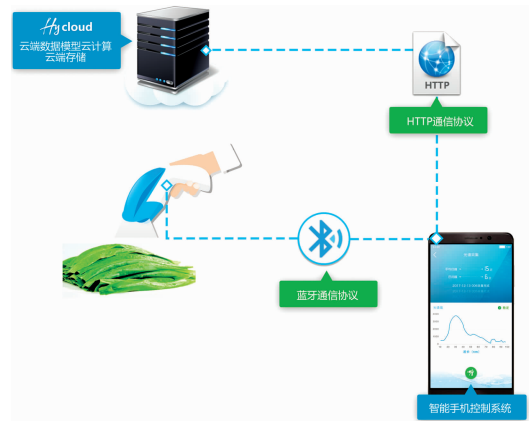


图 2 智能手机光谱系统整体结构图
Fig. 2 The holistic structure of smart cellphone spectral system

量, 单位为 SPAD。叶片称重使用型号为 BL-01 电子秤, 测量精度为 0.01 g。

在样品制作当天以及之后每 24 h 进行一次数据采集, 共开展 5 次实验。蔬菜含水量通过每次实验称重与最后蔬菜干重之间差值变化来计算。每次实验的 SPAD 测量和光谱数据采集均在同一叶片的相同部位进行, 并采用五次测量数据的平均值作为最终结果。光谱采集在暗室中进行, 卤素灯光源电压稳定, 光照强度、入射角以及光纤探头的角度保持不变。

1.3 数据预处理

为了排除异常数据, 提高反演模型精度, 需要对原始光谱数据进行预处理。SCSS 光谱仪的波段范围为 330~1 080 nm, 光谱分辨率为 1.5~2 nm。SVC 波段范围为 330~1 080 nm, 光谱分辨率为 1.5~2 nm, 该仪器内部有三个独立的传感器, 波长范围在连接部分有所重叠, 所以需要对其光谱进行波段选择, 去除冗余光谱, 并提取光谱范围与 SCSS 保持一致。然后利用小波变换去噪方法进去光谱平滑。本实验考虑到室内实验光源稳定、噪声干扰较小等因素, 最终采用 db3 作为小波基, 并使用软阈值方法对小波系数进行过滤, 确保光谱平滑的同时尽可能保留光谱特征。SVC 与 SCSS 去噪前后光谱对比如图 3 所示。

由图 3 可以看出, SVC 与 SCSS 在可见近红外波段光谱曲线一致度很高, 但是在 1 010 nm 波段附近, 由于是 SVC 内部两个传感器的光谱连接处, 其差异性导致了光谱值陡然增加的情况出现, 而 SCSS 在此处的光谱变化较为平滑, 更为符合高光谱曲线的变化趋势。

2 叶绿素含量分析及建模

为了建立光谱特征波段与蔬菜叶绿素含量的反演模型, 我们构建蔬菜叶绿素反演指数 (vegetable chlorophyll retrieval index, VCRI), 与叶绿素进行相关性分析。VCRI 表达式为

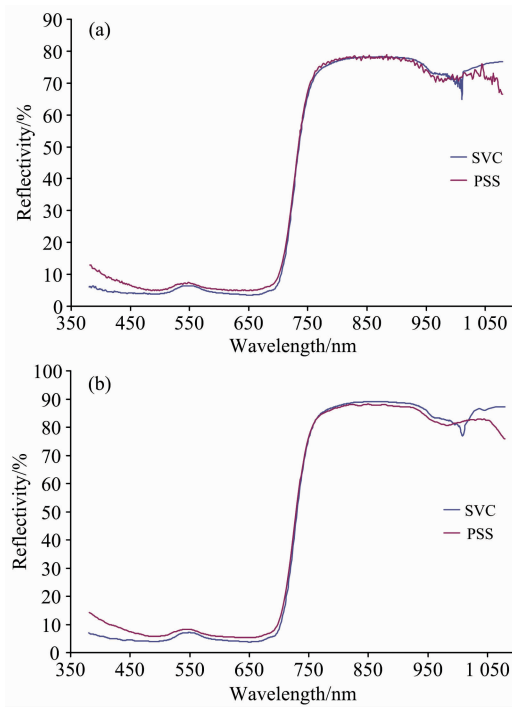


图 3 SVC 与 SCSS 数据去噪前 (a) 和去噪后 (b) 光谱曲线对比

Fig. 3 The comparison of SVC and SCSS spectral curves before (a) and after (b) denoising

$$VCRI_{(m,n)} = \frac{\rho_m - \rho_n}{\rho_m + \rho_n} \quad (1)$$

其中 ρ_m 和 ρ_n 分别为波段 m 和波段 n 的反射率值。

我们保留 10% 的 SVC 和 SCSS 光谱数据作为验证数据, 选择依据要包含不同实验组、不同菜品和不同时间段的数据。建立叶绿素反演模型过程为分别把所有波段反射率值逐一代入式(1)中, 计算所有 $VCRI_{(m,n)}$ 与实测叶绿素值的相关系数 $r_{(m,n)}$, 结果以二维密度分割影像显示, 相关系数图如图 4 所示。

图 4(a)与图 4(b)中相关性系数最高的为红色区域(正相关)和黄色区域(负相关), SVC 为 0.95~0.96(-0.96~-0.95), SCSS 为 0.9~0.92(-0.92~-0.9), 且对应的波长十分接近, 均在 730~980 nm 之间, 说明两种仪器在几乎相同的敏感波段范围内有较高相关性关系, 可以很好地来反演蔬菜叶绿素值。

为了提高模型的稳定性, 我们提取红、黄区域内所有的点(共计 k 个)来建模。每个点采用二次多项式来拟合 $VCRI_p$ 与绿素值实测值, 然后再取加权平均值作为最终反演模型, 如式(2)和式(3)所示

$$SPAD^* = \sum_{p=1}^{p=k} \omega_p^{VCRI} [a_p (VCRI_p)^2 + b_p VCRI_p + c_p] \quad (2)$$

$$\omega_p^{VCRI} = \frac{R_p}{\sum_{p=1}^{p=k} R_p} \quad (3)$$

其中 $SPAD^*$ 为叶绿素值预测值, a_p, b_p, c_p 为点 p 处 $VCRI_p$

与叶绿素实测值的拟合系数, ω_p^{VCRI} 为点 p 的权重系数, R_p 为点 p 处 $VCRI_p$ 与叶绿素值的相关性系数, k 为参与建模的点的总个数。结合式(2)和式(3)最终求得叶绿素反演模型的函数形式如式(4)

$$f(x_1, x_2, \dots, x_k) = A_1 x_1^2 + A_1 x_2^2 + \dots + A_k x_k^2 + B_1 x_1 + B_1 x_1 + \dots + B_k x_k + C \quad (4)$$

式(4)中, $A_1, A_2, \dots, A_k, B_1, B_2, \dots, B_k$ 和 C 均为常数。

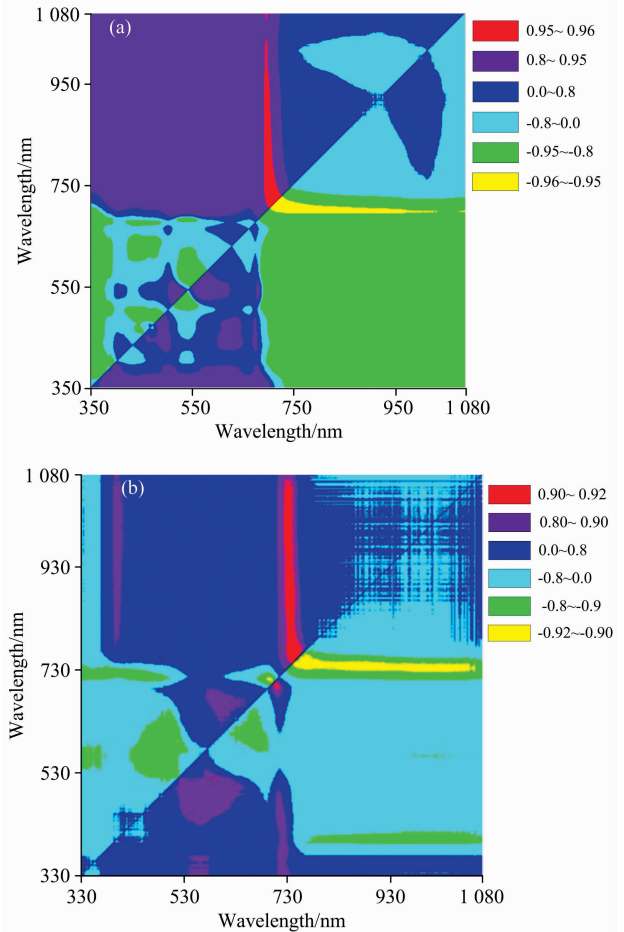


图 4 SVC 数据 (a) 与 SCSS 数据 (b) 所有 VCRI 与叶绿素值的相关性分析

注: 横轴坐标分别表示高光谱数据各波段波长, 坐标系中每个点的值代表对应波长计算的 $VCRI_{(m,n)}$ 与叶绿素实测值的相关系数 $r_{(m,n)}$

Fig. 4 Correlation analysis between VCRI and chlorophyll in SVC data (a) and SCSS data (b)

Illustration: x -axis and y -axis mean the wavelength of hyperspectral data; Every point's value means the correlation coefficient r between $VCRI_{(m,n)}$ and chlorophyll calculated by SPAD

把建立的叶绿素反演模型应用到 10% 的实验数据中进行精度验证。预测值与实测值之间进行线性回归分析, 结果如图 5 所示。其中 SVC 数据反演精度 $R^2 = 0.863$, 标准差为 8.679 5; SCSS 数据反演精度 $R^2 = 0.808 1$, 标准差为 8.892 5。

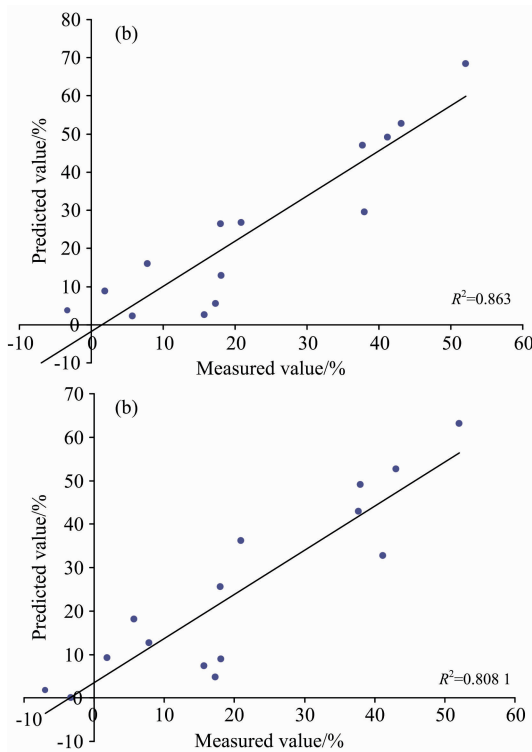


图 5 SVC 数据 (a) 和 SCSS 数据 (b) 叶绿素反演模型精度验证

Fig. 5 Precision validation of chlorophyll retrieval models in SVC data (a) and SCSS data (b)

3 含水量含量分析建模

通过每次试验时对蔬菜的称重和最终蔬菜的干重, 可以计算蔬菜的含水量。设蔬菜含水量百分比为 T^* , 可以通过式(5)计算

$$T_d^* = \left(\frac{W_d - W_0}{W_d} \right) \times 100\% \quad (5)$$

其中 T_d^* 为第 d 天的实际含水量百分比, W_d 为第 d 天的称重, W_0 为样本干重。

首先构建蔬菜含水量反演指数 (vegetable water retrieval index, VWRI), 其表达式为

$$VWRI_{(i,j)} = \frac{\rho_i - \rho_j}{\rho_i + \rho_j} \quad (6)$$

其中 ρ_i 和 ρ_j 分别代表波段 i 和波段 j 的反射率值。

分别计算 SVC 和 SCSS 数据所有光谱通道组合的 $VWRI_{(i,j)}$ 与实测含水量的相关系数 $r_{(i,j)}$, 结果以二维密度分割图显示, 见图 6。

由图 6 可以看出, 两种仪器数据对含水量共同敏感的波段范围在 950~1 000 nm 水汽吸收带附近, 提取红、黄区域内所有的点 (共计 s 个) 建立蔬菜含水量反演模型, 如式(7)和式(8)

$$WV^* = \sum_{q=1}^{q=s} \omega_q^{VWRI} [e_q (VWRI_q)^2 + f_q VCRI_p + g_p] \quad (7)$$

$$\omega_q^{VWRI} = \frac{r_q}{\sum_{q=1}^{q=s} r_q} \quad (8)$$

式中 WV^* 为通过模型反演的含水量, e_q , f_q 和 g_q 表示点 q 处 $VWRI_q$ 与含水量的拟合系数, ω_q^{VWRI} 为点 q 的权重系数, r_q 为点 q 处 $VWRI_q$ 与含水量的相关系数, s 为参与建模的点的总个数。结合式(7)和式(8)求得叶绿素反演模型的函数形式如式(9)

$$f(x_1, x_2, \dots, x_s) = E_1 x_1^2 + E_2 x_2^2 + \dots + E_s x_s^2 + F_1 x_1 + F_2 x_2 + \dots + F_s x_s + G \quad (9)$$

式中, $E_1, E_2, \dots, E_s, F_1, F_2, \dots, F_s$ 和 G 均为常数。

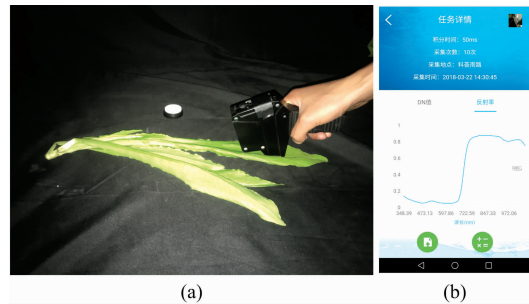


图 6 SVC 数据 (a) 与 SCSS 数据 (b) 所有 VWRI 与含水量的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between VWRI and water content in SVC data (a) and SCSS data (b)

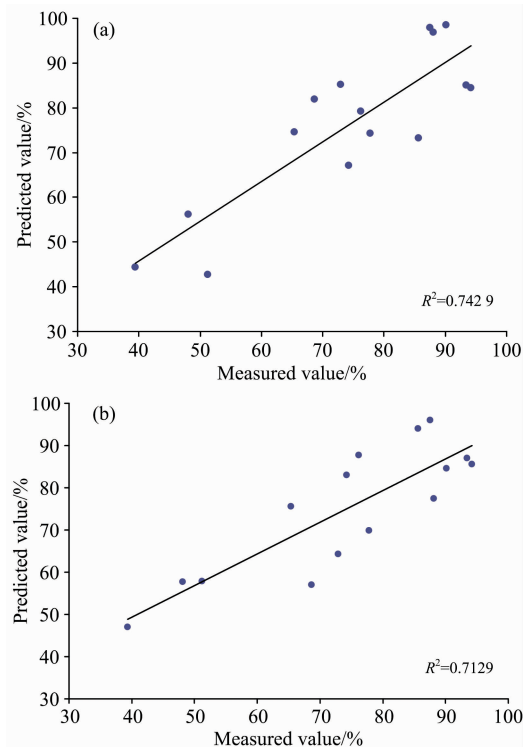


图 7 SVC 数据 (a) 和 SCSS 数据 (b) 含水量反演模型精度验证

Fig. 7 Precision validation of water content retrieval models in SVC datas (a) and SCSS datas (b)

对建立的含水量反演模型进行精度验证, 预测值与实测值之间线性回归分析结果如图 7 所示。其中 SVC 数据反演精度 $R^2=0.7429$, 标准差为 8.789 9%; SCSS 数据反演精度 $R^2=0.7129$, 标准差为 8.861 4%。

4 结 论

利用可见近红外光谱, 提出了快速、无损反演蔬菜叶绿素和含水量的方法。通过 730~980 nm 之间的波段组合, 以及蔬菜叶绿素反演指数 VCRI 与叶绿素实测值相关系数 R 构建的权重系数, 建立了蔬菜叶绿素加权平均反演模型, 具有较高精度; 通过水汽吸收带 950~1 000 nm 之间的波段组合, 以及蔬菜含水量反演指数 VWRI 与含水量实测值相关系数 r 构建的权重系数, 建立了蔬菜含水量加权平均反演模

型, 满足反演精度的要求。由于模型的构建所使用的数据包含了多种蔬菜的常温保存和冷藏保存两种方式, 使得模型具有较强普适性。

SVC 数据与 SCSS 数据建模所使用的光谱波段在很大程度上是一致的, 通过 SCSS 数据构建的蔬菜叶绿素和含水量反演模型与 SVC 数据构建的反演模型在精度上也十分接近, 体现了智能手机光谱系统反演蔬菜参数的可靠性。而 SCSS 的微小型、便携式和价格便宜的特点更加符合市场需求, 可以应用到实际生活中, 更加具有现实意义。SCSS 通过网络与云端服务器实时数据共享, 人们可以便捷实时地获取蔬菜光谱之后, 通过网络云端的算法模型反演计算叶绿素和含水量。同时, 网络云端的大数据系统还可以反馈目标产品的更多其他参数信息。届时, 更多食品种类以及更多营养参数的反演还需要更多的思考。

References

- [1] LIU Ren-jie, FANG Jun-long, LI Min-zan, et al(刘仁杰, 房俊龙, 李民赞, 等). Journal of Agricultural Mechanization Research(农机化研究), 2016, 4: 141.
- [2] Blackburn G A. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(4): 855.
- [3] XU Jin, MENG Ji-hua(徐 晋, 蒙继华). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2016, 31(1): 74.
- [4] Park Y W, Anderson M J, Mahoney A W. Journal of Science, 1982, 47(5): 1558.
- [5] Diezma B, Lleo L, Roger J M, et al. Postharvest Biology and Technology, 2013, 85: 8.
- [6] WU Qiong, ZHU Da-zhou, WANG Cheng(吴 琼, 朱大洲, 王 成). Food Safety and Quality Detection Technology(食品安全质量检测学报), 2012, 3(6): 685.
- [7] Liu X J, Tian Y C, Yao X, et al. Scientia Agricultura Sinica, 2012.
- [8] Lara M A, Lleo L, Diezma-Iglesias B, et al. Journal of Food Engineering, 2013, 119(2): 353.
- [9] CHENG Xiao-juan, YANG Gui-jun, XU Xin-gang, et al(程晓娟, 杨贵军, 徐新刚, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2014, 34(12): 3391.

Spectral Detection for Quality and Freshness Index of Main Leaf Vegetables Based on Smart Cellphone

JIAN Xun^{1, 2}, ZHANG Li-fu¹, YANG Hang^{1*}, SUN Xue-jian¹, DAI Shuang-feng¹, ZHANG Hong-ming¹, LI Jing-yi¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The quality and freshness of vegetables not only affect the taste, but the nutrient content. The research on detection of chlorophyll and water content that are important reference indexes of vegetables quality and freshness has become more attention to the researchers both at home and abroad. With the quickness, high efficiency, non-destruction and non-contact features, the novel visible/near-infrared spectral analysis technology is more suitable for real-time detection of vegetables, comparing with traditional estimating methods by naked eyes. The relevant research is primarily focus on retrieval of growing vegetation chlorophyll and water content at present. There is little research aiming at ripe vegetables in market, or lacking of universality because of single species. Moreover, collecting of spectral data requires professional Field Spectrometer, wasting time and energy. There is a distance between research of physiological and biochemical index and practical application. In order to combining the research with the real life, this paper builds quickly, precise, universal models that can retrieve chlorophyll and water content in vegetables, based on Smart Cellphone Spectral System(SCSS). Simultaneously, SVC are used to validate the reliability of SCSS. Five kinds of common vegetables (spinach, rape, romaine, lettuce and baby cabbage) are selected as samples in experiment, and the ways of cold storage and normal temperature preservation are used to simulate the market and supermarket environment. Datas

are collected per 24 hours. Then Band-Selecting and Wavelet-Transform preprocessing are adopted to improve the quality of spectral data. This paper constructs Vegetable Chlorophyll Retrieval Index (VCRI) and Vegetable Water Retrieval Index (VWRI), and extracts the correlation coefficients between the two indexes and measured values of chlorophyll and water content as weight coefficients. Finally, the chlorophyll and water content retrieval models are built. The result shows, SVC and SCSS have the same sensitive bands to chlorophyll and water content. The sensitive wavelength for chlorophyll retrieval is from 730 to 980 nm. The precision R^2 are 0.863 and 0.8081, and standard deviation are 8.679 5 and 8.892 5 respectively. The sensitive wavelength for water content retrieval is from 950 to 1 000 nm. The precision R^2 are 0.742 9 and 0.712 9, and standard deviation are 8.789 9% and 8.861 4% respectively. The result of SVC and SCSS is similar enough to prove the validation of new-style Smart Cellphone Spectral System. Furthermore, SCSS has the advantage of small size and low price. It can smartly detect the quality and freshness index of vegetables, with the features of internet cloud services and data feedback in real-time. This makes the spectral analysis technology applying to the people's daily life.

Keywords Vegetable; Smart cellphone spectral system; Chlorophyll; Water content; Nondestructive detection in real-time

(Received Apr. 7, 2018; accepted Aug. 19, 2018)

* Corresponding author