

基于高光谱漫透射成像整体检测番茄可溶性固形物含量

张若宇^{1,2}, 饶秀勤^{1,3}, 高迎旺^{1,3}, 胡 栋^{1,3}, 应义斌^{1,3*}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832000;
3. 农业部设施农业装备与信息化重点实验室, 杭州 310058)

摘 要: 为了实现番茄可溶性固形物含量 (soluble solids content, SSC) 的有效检测, 提出高光谱漫透射成像检测方法, 对比该成像方式下不同姿态 (果脐端面姿态 BS、赤道圆周 3 姿态 C1、C2、C3 以及组合姿态 C1C2C3) 的检测效果。首先对采集的不同姿态光谱图像, 通过剪裁消除图像边缘噪声。针对圆周赤道面姿态 C1、C2 和 C3, 进行了拼接处理, 获得组合姿态图像 C1C2C3。其后对以上 5 种姿态图像进行单波段背景分割, 获取目标区域, 并统计不同姿态下番茄漫透射平均光谱。最后利用漫透射光谱结合偏最小二乘回归 (partial least squares, PLS) 方法, 对番茄 SSC 分别在 450~720、720~990、450~990 nm 3 个波段进行定量分析。结果表明, 组合姿态 C1C2C3 在 3 个波段区域上整体检测效果优于单个姿态的检测效果, 其模型验证集均方根误差 (root mean squared error of prediction, RMSEP) 分别为 0.299%、0.133%、0.151%; 相关系数 r_p 分别为 0.42, 0.89, 0.90。说明利用高光谱漫透射成像, 获取组合姿态光谱图像, 可以有效检测番茄 SSC。

关键词: 图像技术, 光谱分析, 果实, 高光谱漫透射成像, 成像姿态, 番茄, 可溶性固形物

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.034

中图分类号: TP751; S641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-23-0247-07

张若宇, 饶秀勤, 高迎旺, 等. 基于高光谱漫透射成像整体检测番茄可溶性固形物含量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 247—252.

Zhang Ruoyu, Rao Xiuqin, Gao Yingwang, et al. Inspection of soluble solid content for tomatoes in different positions based on hyperspectral diffuse transmittance imaging[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 247—252. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 因其营养丰富, 又具药用价值^[1], 深受人们喜爱, 已成为世界第二大蔬菜消费品种^[2]。可溶性固形物含量是番茄制品品质评价的重要指标之一^[3], 决定番茄制品的等级和价格。传统的光电和视觉技术能够实现番茄的外部颜色和缺陷识别, 但难以有效检测可溶性固形物等内部品质^[4-5]。近红外光谱分析技术作为一种无损检测技术已成功用于多种果蔬内部品质的检测, 包括苹果^[6]、脐橙^[7]、土豆^[8]、西瓜^[9]和番茄^[10-12]等。并且上述研究表明, 漫透射检测方式较反射和全透射检测方式更具优势。该检测方式不仅可以获取果蔬

深层信息, 还可以避免其形状大小及果核的影响。虽然近红外光谱能较好地地表征果蔬内部品质信息, 但是这种信息是一维的。由于果蔬形状、大小各异, 内部成分和组织特征空间分布不同, 而光纤探头检测的部位很小, 所以光谱表达的信息不全面, 预测模型缺乏稳健性^[13]。

高光谱成像技术融合了图像和光谱技术, 可同时获取检测对象的空间和光谱信息, 具有全波段连续光谱信息及识别目标对象不同化学组分的能力, 已被逐渐引入果蔬品质检测领域^[14]: 如对土豆含水率^[15], 香蕉总糖、含水率、硬度^[16], 雪花梨含糖量、含水率^[17]等果蔬内部品质的检测。但前期研究发现, 番茄表皮光亮, 易形成表面亮斑, 若反射成像, 采集的光谱图像亮斑现象明显, 严重影响后续番茄内部品质的定量光谱和图像分析。高光谱全透射成像可以获取果蔬深层次内部信息, 但易受果核的影响, 积分时间长, 噪声大, 此成像方法很少用于检测果蔬的内部组分, 多用于检测果蔬的内部缺陷, 如樱桃象鼻虫害^[18]、马铃薯黑心病^[19]、腌制黄瓜的内部缺陷等^[20]。

为了发挥高光谱透射方式成像优势, 同时规避果核等因素影响, 本文提出新的高光谱成像方式即

收稿日期: 2013-08-13 修订日期: 2013-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30825027), 国家科技支撑项目 (2011BAD20B12)

作者简介: 张若宇 (1980—), 男, 安徽临泉人, 博士生, 副教授, 中国农业工程学会高级会员 (E041200545S), 主要从事农产品无损检测研究。杭州 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310058。

Email: ry248@163.com

※通信作者: 应义斌 (1964—), 男, 浙江宁海人, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品/食品品质与安全快速检测技术和智能装备方面的研究。杭州 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 310058。

Email: yingyb@zju.edu.cn

高光谱漫透射成像。搭建了高光谱漫透射成像系统,并在此系统上对番茄可溶性固形物进行检测,以验证该高光谱成像方式对番茄可溶性固形物含量检测的可行性。与此同时,通过对比不同姿态下番茄可溶性固形物含量的检测结果,进而证实番茄可溶性固形物空间分布差异,以寻求较为合理的检测姿态。

1 材料与方法

1.1 试验样本

试验所用番茄购买自杭州蔬菜批发市场,产地为山东苍山。选取 110 个外观色泽基本一致的成熟番茄,用白色纱布将其表面擦拭干净,依次做好标记。番茄质量范围为 80~164 g。

1.2 高光谱漫透射成像系统

自行搭建的高光谱漫透射成像系统组成如图 1 所示。硬件系统主要包括:行扫描成像光谱仪(ImSpector V10E-QE, Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland)、CCD 相机(C8484-05G, Hamamatsu Photonics, Japan)、50W 卤素灯 2 盏、自制激光传感器控制的限高板、电动位移平台(PSA200-11-X, Zolix Instruments Co., Ltd., 北京)、电动升降平台(GZ02DS20, Guangzheng Instruments Co., Ltd., 北京)。成像系统由 PC 机统一控制,由专业高光谱图像采集软件 SpectralCube (Spectral Imaging Ltd., Finland) 进行信息采集。成像光谱仪光谱范围为 400~1 000 nm,曝光时间设定为 5 ms,水平位移速度为 4.5 mm/s。采用 2×2 binning 压缩采集方式,得到拥有 477 波段,672×120 像素大小的高光谱图。

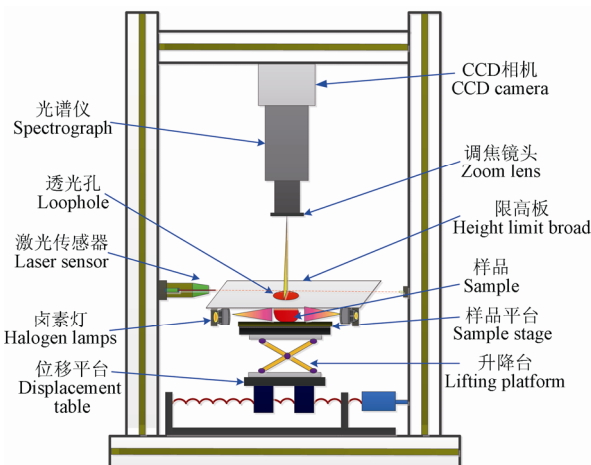


图 1 高光谱漫透射成像系统

Fig.1 Hyperspectral diffuse transmittance imaging system

1.3 光谱图像的采集

1.3.1 番茄光谱成像的姿态

获取不同姿态下番茄漫透射高光谱图像,并对

比各姿态的检测效果。图 2a 所示将番茄果蒂端竖直向下放置,获取果脐端面图像,该姿态简称 BS;图 2b 所示将番茄果蒂端水平放置,获取番茄的圆周赤道面,包含 3 个姿态(C1、C2、C3),每 2 个相邻位置圆周赤道面间隔 120°。另外在后续分析中,将单姿态 C1、C2、C3 进行组合形成组合姿态 C1C2C3。

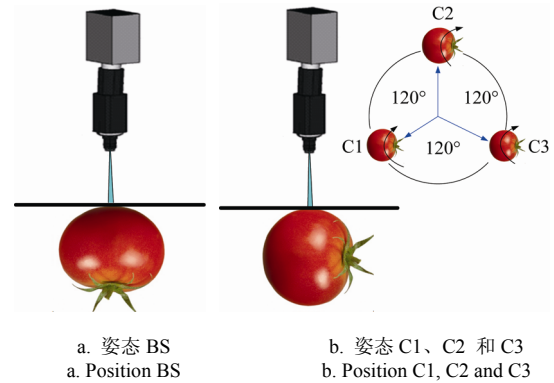


图 2 番茄高光谱漫透射成像姿态

Fig.2 Positions of tomato in hyperspectral diffuse transmittance imaging

1.3.2 光谱图像黑白校正

由于各波段下光源强度分布不均匀及传感器中暗电流的存在,导致在光照强度分布较弱的波段下获得的图像含有较大噪声,因此必须进行标定^[21]。本文采用高光谱图像采集软件 SpectralCube 对采集的光谱图像进行黑白校正。首先获取聚四氟乙烯薄板的全白漫透射图像 I_w ,然后盖上镜头,获取全黑图像 I_D ,最后根据公式(1)进行黑白校正,获取校正后高光谱漫透射图像 I_T 。

$$I_T = \frac{4095(I - I_D)}{(I_w - I_D)} \quad (1)$$

式中, I_T 为校正后高光谱漫透射图像, I 为采集的原始图像, I_w 为全白图像, I_D 为全黑图像。4 095 是系数^[22],因为高光谱系统数据输出为 12 位,数值(digital number, DN)范围为 0~4095。

1.4 可溶性固形物含量测定

应用手持式糖度计(PR-101α, Atago Co., Ltd., Japan)测量番茄可溶性固形物含量。该糖度计的测量范围是 0~45%,具有温度自动补偿功能。将番茄不可食用部分切除后余下部分榨汁,滤纸过滤,滴入糖度计镜面并读取数值。最终样本数量为 109 个。番茄样本的可溶性固形物质量分数范围为 3.20%~5.50%,标准偏差为 0.42%。

2 结果与讨论

2.1 光谱图像的剪裁

为了消除图像边缘噪声,方便后续单波段背景

分割,同时为了减少数据运算量,将黑白校正后的光谱图像剪裁成 200×100 像素大小。

2.2 不同姿态光谱图像的拼接

为了考察组合姿态 C1C2C3 图像对可溶性固形物含量的检测效果,对 C1、C2 和 C3 姿态图像进行拼接(图 3 所示),然后整体进行背景分割,提取所有感兴趣区域像素点,计算组合姿态图像的平均光谱。

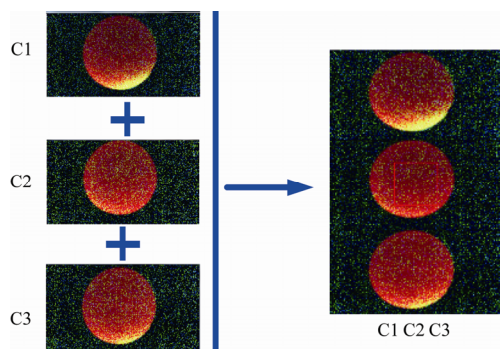
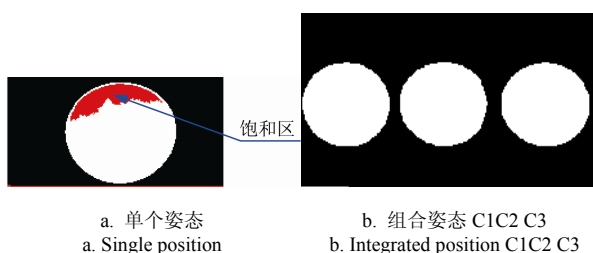


图 3 姿态 C1、C2 和 C3 图像的拼接

Fig.3 Images mosaicing of tomato in position C1, C2 and C3

2.3 单波段背景分割及感兴趣区域提取与统计

采用较少的波段进行背景分割,可以大大减小分割难度,提高分割效率。由番茄原始平均光谱可以看出,第 250 个波段(714.37 nm)是番茄漫透射光谱出现最大波峰处。并且发现番茄漫透射成像区域(regions of interest, ROIs)与背景在该波段的 DN 值差异较大便于分割。因此,选取第 250 个波段图像用来进行背景分割和感兴趣区域提取。番茄漫透射图像采集时,限高板漏光孔边缘偶尔密封不严,引起非漫透射光进入相机,导致饱和区出现。为了避免饱和像素点被统计,设定 DN 值上限为 4090,一旦某像素 DN 值大于 4090 意味着该像素逼近饱和,在计算平均光谱时将其忽略。因此 DN 值大于 4090 判别为饱和区,如图 4a 所示。另外背景在该波段 DN 值远小于 500,最终选取 $500 \leq DN \leq 4090$ 作为感兴趣区域提取的阈值范围。图 4 中白色区域为提取的目标区域,黑色区域为分割后的背景区域。



a. 单个姿态
a. Single position
b. 组合姿态 C1C2 C3
b. Integrated position C1C2 C3

图 4 背景分割和感兴趣区域提取

Fig.4 Background segmentation and extraction of regions of interest

统计感兴趣区域所有像素点,然后计算该区域在 $400 \sim 1\,000 \text{ nm}$ 内的平均光谱曲线,如图 5a 所示。

2.4 光谱预处理

2.4.1 光谱归一化

本文采用的归一化方法是寻找每个样本透射率曲线的最大值,并计算各波段透射率与该最大值的比值,如式(2)所示。

$$T_N = \frac{T_i}{\max(T)} \quad (2)$$

式中, T_N 为归一化透射率, T_i 为各波长透射率, $\max(T)$ 为样本透射率曲线的最大值。

这种方法可以得到各波长上透射率数据之间的相对关系,一定程度上可消除打光和采样环境等因素带来的影响。图 5b 为归一化后的番茄漫透射光谱曲线。

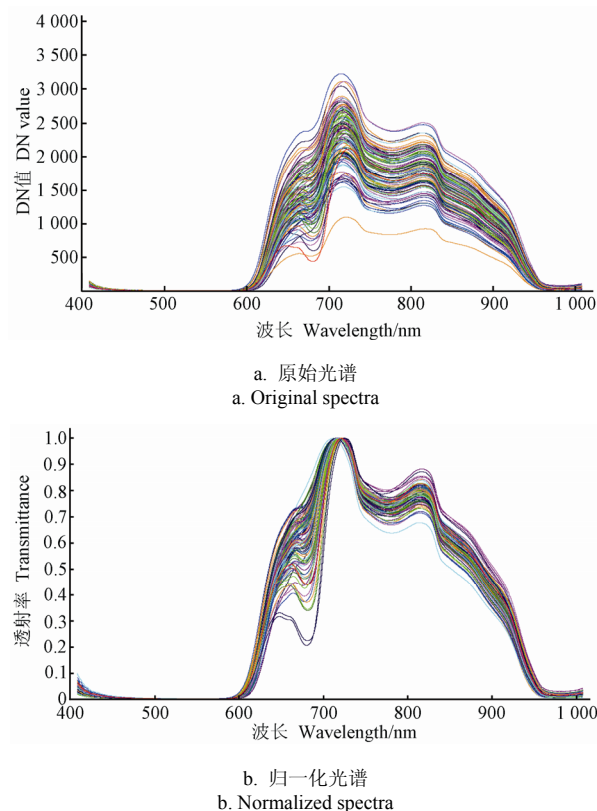


图 5 番茄漫透射光谱曲线 ($400 \sim 1\,000 \text{ nm}$)

Fig.5 Diffuse transmittance spectra ($400 \sim 1\,000 \text{ nm}$) of tomato

2.4.2 光谱校正

标准正态变量 (standard normal variate, SNV) 处理是光谱数据预处理常用方法之一。这种变换是将每个光谱减去平均值后再除以光谱的标准差,使得处理后的数据满足正态归一化特性,可以消除光谱中光程变化、光源功率变化和光强衰减等引起的噪声^[23]。试验中番茄尺寸的差异、光程和测试环境的轻微变化会引起光谱的噪声和基线的偏移,为消

除这些因素的影响,将归一化后的光谱曲线再次采用标准正态变量变换和二次基线漂移去除(quadratic removed baseline)进行校正处理。

2.5 异常样本剔除

为了减少异常样本对检测效果的影响,建立校正模型前需剔除异常样本。同时为避免在判别过程中把非异常样本错误地当作异常样本剔除,本文采用 Chauvenet 检验方法和光谱杠杆值分布综合对异常样本进行判定并剔除^[24]。首先将预处理后获得的样本光谱根据 Chauvenet 检验方法进行异常光谱判别。在 95% 的置信水平下,自动计算出各样本光谱的马氏距离,超过临界线的样本视为异常样本,暂不做处理。与此同时,利用软件查看光谱杠杆值分布。一般当样本具有较高的光谱杠杆值时,视为异常样本。光谱杠杆阈值等于 $2nf/ns$, (ns 为样本数, nf 为因子数)^[25]。当 2 种方法都判定为异常样本时方做剔除处理。最后将余下的样本留作建模分析,其中 75% 样本作为校正集, 25% 样本作为模型验证集。

2.6 可溶性固形物偏最小二乘回归模型建立

图 6 是不同姿态下获取的番茄漫透射光谱与其可溶性固形物含量在全波段(400~1 000 nm)的相关系数分布图。本文选择 450~720、720~990 和

450~990 nm 3 个波段范围作为最重要的光谱区域进行偏最小二乘回归(PLS)对比分析。

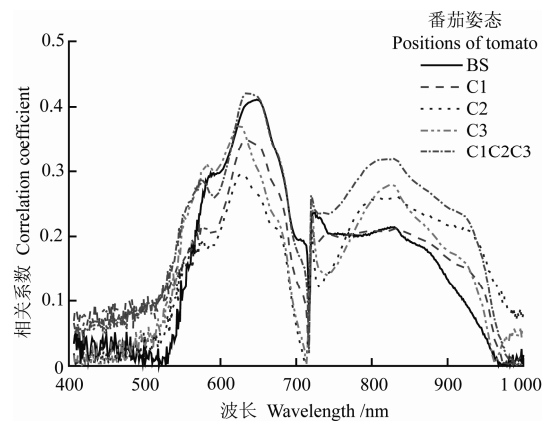


图 6 不同姿态番茄漫透射光谱与其可溶性固形物含量相关系数

Fig.6 Correlation coefficients between tomato spectra and soluble solids content over entire wavelength range

采用 PLS 分别对测得的可溶性固形物含量与预处理后不同姿态下番茄漫透射光谱进行回归分析。模型的准确性用校正集相关系数(r_c)、校正集均方根误差(RMSEC)、验证集相关系数(r_p)和验证集均方根误差(RMSEP)来描述。结果如表 1 所示。

表 1 PLS 模型预测可溶性固形物结果

Table 1 Performance of PLS models for predicting soluble solids content

姿态 Position	异常样本 Outlier samples	波段范围 Wavelength / nm	因子数 Number of factors	校正集 Calibration set		验证集 Validation set	
				均方根误差 RMSEC/%	相关系数 r_c	均方根误差 RMSEP/%	相关系数 r_p
BS	2	450~720	4	0.340	0.60	0.379	0.24
		720~990	9	0.213	0.87	0.243	0.76
		450~990	8	0.302	0.71	0.342	0.44
C1	2	450~720	5	0.326	0.66	0.395	0.23
		720~990	11	0.125	0.96	0.197	0.88
		450~990	17	0.114	0.96	0.224	0.82
C2	3	450~720	4	0.377	0.55	0.342	0.07
		720~990	14	0.056	0.99	0.267	0.57
		450~990	4	0.367	0.58	0.330	0.13
C3	3	450~720	3	0.343	0.60	0.377	0.45
		720~990	8	0.226	0.85	0.360	0.47
		450~990	17	0.119	0.96	0.301	0.67
C1C2C3	1	450~720	9	0.314	0.72	0.299	0.42
		720~990	10	0.192	0.90	0.133	0.89
		450~990	17	0.157	0.94	0.151	0.90

由表 1 可以看出,对于校正集,在 450~720 波段区域,组合姿态 C1C2C3 最优,PLS 模型的 $RMSEC=0.314\%$; $r_c=0.72$ 。在 720~990 nm、450~990 nm 2 个波段区域,分别是单姿态 C2 和 C1 最优。而对于验证集,在 450~720、720~990、450~990 nm 3 个波段区域上,组合姿态 C1C2C3 最优, $RMSEP=0.299\%$ 、 0.133% 、 0.151% ; $r_p=0.42$ 、 0.89 、 0.90 。虽然单姿态 C1、C2 和 C3 在某个波段区域上,

校正集建模效果优于组合姿态 C1C2C3,但他们的验证集与校正集相关系数和均方根误差差别较大,说明其模型稳定性不好,可能是由于该姿态下软件自动划分的验证集没能很好覆盖校正集参数分布区域。从整体看组合姿态 C1C2C3 检测效果明显优于其他 4 个独立姿态的检测效果,这与图 6 所示番茄的漫透射光谱与 SSC 的相关性趋势基本吻合。

对于上述姿态在波段范围 450~720 nm 的检测

效果均比较差,但在波段区域 720~990 nm,除了 C3 外,其他姿态的检测效果略优于该姿态在另外 2 个波段范围 450~720 和 450~990 nm 的检测效果,可能因为该波段包含与可溶性固形物密切相关的含 H 基团(如: C-H 和 O-H、H₂O 等)的特征波长 900、800、740、750 nm 所在区域^[26],虽然 450~990 nm 波段也包含这些基团所在的特征波段,但也许受其他波段区域的影响,整体检测效果变差。

3 结 论

1) 提出了一种用于检测果蔬内部组分含量的高光谱成像新模式即漫透射高光谱成像模式,并设计搭建了高光谱漫透射成像系统。同时利用获取的番茄漫透射光谱对其 SSC 进行预测,最佳预测模型的均方根误差 *RMSEP* 和相关系数 *r_p* 分别达到 0.151% 和 0.90,表明高光谱漫透射成像方法适于检测番茄可溶性固形物含量。

2) 番茄可溶性固形物分布空间上存在差异,依靠单一姿态成像检测,难以获得理想效果。若想提高番茄整体可溶性固形物含量的检测效果,需获取尽量全面的空间光谱信息。另外,选取合适波段区域有助于改善最后的检测效果。

针对其他品种和不同地域番茄可溶性固形物含量的高光谱漫透射成像检测有待验证。关于不同光源功率和打光角度等因素对试验结果的影响有待进一步研究。此外,高光谱漫透射光谱图像含有丰富的纹理信息,利用纹理信息检测番茄可溶性固形物含量及其他内部品质指标的研究也值得尝试。

[参 考 文 献]

- [1] Xie L, Ying Y, Ying T, et al. Discrimination of transgenic tomatoes based on visible/near-infrared spectra[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 584(2): 379—384.
- [2] Dorais M, Ehret D L, Papadopoulos A P. Tomato (*Solanum lycopersicum*) health components: from the seed to the consumer[J]. *Phytochemistry Reviews*, 2008, 7(2): 231—250.
- [3] Alimentarius C. Codex standard for processed tomato concentrates, codex Stan 57-1981, 1981[J]. *Codex Alimentarius*, 1994, 5: 1—6.
- [4] 张殿伟. 计算机视觉系统在番茄品质识别与分类中的研究[D]. 河北农业大学, 2005.
Zhang Guwei. Study on the Computer Vision System of Tomato Quality Testing and Grading[D]. Hebei Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张亚静, Shibusawa Sakae, 李民赞. 基于机器视觉的番茄内部品质预测[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(Supp.2): 366—370.
Zhang Yajing, Sakae Shibusawa, Li Minzan. Prediction of tomato inner quality based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(14): 366—370. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bobelyn E, Serban A S, Nicu M, et al. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: study of the effect of biological variability on spectra and model performance[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2010, 55(3): 133—143.
- [7] Liu Y, Sun X, Zhou J, et al. Linear and nonlinear multivariate regressions for determination sugar content of intact gannan navel orange by Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2010, 51(11/12): 1438—1443.
- [8] Brunt K, Drost W C. Design, construction, and testing of an automated NIR in-line analysis system for potatoes. Part I: off-line NIR feasibility study for the characterization of potato composition[J]. *Potato Research*, 2010, 53(1): 25—39.
- [9] 田海清, 应义斌, 徐惠荣, 等. 西瓜可溶性固形物含量近红外透射检测技术[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(5): 111—113.
Tian Haiqing, Ying Yibin, Xu Huirong, et al. Near-infrared transmittance measuring technique for soluble solids content of watermelon[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(5): 111—113. (in Chinese with English abstract)
- [10] Pedro A M K, Ferreira M. Simultaneously calibrating solids, sugars and acidity of tomato products using pls2 and NIR spectroscopy[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 595(1): 221—227.
- [11] 马兰, 夏俊芳, 张战锋, 等. 基于小波变换的番茄总糖近红外无损检测[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(10): 350—354.
Ma Lan, Xia JunFang, Zhang ZhanFeng, et al. Nondestructive examination of total sugar in tomatoes with near infrared spectroscopy based on wavelet transform[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(10): 350—354. (in Chinese with English abstract)
- [12] Clément A, Dorais M, Vernon M. Multivariate approach to the measurement of tomato maturity and gustatory attributes and their rapid assessment by VIS-NIR spectroscopy[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(5): 1538—1544.
- [13] Sanchez N H, Lurol S, Roger J M, et al. Robustness of models based on NIR spectra for sugar content prediction in apples[J]. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2003, 11(2): 97—108.
- [14] Zhang R, Ying Y, Rao X, et al. Quality and safety assessment of food and agricultural products by hyperspectral fluorescence imaging[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, 92(12): 2397—2408.
- [15] Jun Q, Ning W, Michael O N, et al. Water content and weight estimation for potatoes using hyperspectral imaging[C]// American Society of Agricultural Engineers Annual Meeting Paper. Florida, USA, 2005: 1—11
- [16] Rajkumar P, Wang N, Elmasry G, et al. Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 108(1): 194—200.
- [17] 洪添胜, 乔军, Ngadi Michael O, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 151—155.
Hong TianSheng, QiaoJun, Ngadi Michael O, et al. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(2): 151—155. (in Chinese with English abstract)

- [18] Xing J, Guyer D, Ariana D, et al. Determining optimal wavebands using genetic algorithm for detection of internal insect infestation in tart cherry[J]. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, 2008, 2(3): 161–167.
- [19] 周竹, 李小昱, 高海龙, 等. 漫反射和透射光谱检测马铃薯黑心病的比较[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(11): 237–242. Zhou Zhu, Li Xiaoyu, Gao Hailong, et al. Comparison of diffuse reflection and transmission mode of visible/near infrared spectroscopy for detecting black heart of potato[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(11): 237–242. (in Chinese with English abstract)
- [20] Ariana D P, Lu R F. Hyperspectral waveband selection for internal defect detection of pickling cucumbers and whole pickles[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010, 74(1): 137–144.
- [21] 蔡健荣, 王建黑, 黄星奕, 等. 高光谱图像技术检测柑橘果锈[J]. *光电工程*, 2009, 36(6): 26–30. Cai Jianrong, Wang Jianhei, Huang Xingyi, et al. Detection of rust in citrus with hyperspectral imaging technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(6): 26–30. (in Chinese with English abstract)
- [22] Wang W, Li C, Tollner E W, et al. Shortwave infrared hyperspectral imaging for detecting sour skin (*Burkholderia cepacia*)-infected onions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 109(1): 38–48.
- [23] Candolfi A, Wu W, Massart D L, et al. Comparison of classification approaches applied to NIR-spectra of clinical study lots[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 1998, 16(8): 1329–1347.
- [24] 徐惠荣, 汪辉君, 黄康, 等. PLS 和 SMLR 建模方法在水蜜桃糖度无损检测中的比较研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(11): 2523–2526. Xu Huirong, Wang Huijun, Huang Kang, et al. Comparison of PLS and SMLR for nondestructive determination of sugar content in honey peach using NIRS[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(11): 2523–2526. (in Chinese with English abstract)
- [25] 闵顺耕, 李宁, 张明祥. 近红外光谱分析中异常值的判别与定量模型优化[J]. *光谱学与光谱分析*, 2004(10): 1205–1209. Min Shungeng, Li Ning, Zhang Mingxiang, et al. Outlier diagnosis and calibration model optimization for near infrared spectroscopy analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2004(10): 1205–1209. (in Chinese with English abstract)
- [26] 严衍禄, 赵龙莲, 韩东海, 等. 近红外光谱分析基础与应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2005: 32–33.

Inspection of soluble solid content for tomatoes in different positions based on hyperspectral diffuse transmittance imaging

Zhang Ruoyu^{1,2}, Rao Xiuqin^{1,3}, Gao Yingwang^{1,3}, Hu Dong^{1,3}, Ying Yibin^{1,3*}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Machinery and Electricity Engineering College, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 3. Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture, Ministry of Agriculture, P.R. China, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Soluble solid content (SSC) is one of the most important indexes for quality evaluation of tomato products. Near infrared (NIR) spectroscopy and hyperspectral reflectance imaging have been widely used in quality evaluation of fruits and vegetables including tomatoes. But they have many disadvantages for inspection of SSC in tomato. For example, NIR spectroscopic assessments cannot get the spatial variability of sample materials. Although hyperspectral reflectance imaging can obtain both spatial and spectral information of tomatoes, it's almost impossible to avoid a serious influence of high specula patches on tomatoes. Diffuse transmittance is one kind of transmittance mode. Compared with transmittance, the influence of shape, size, and core of fruit can be reduced through adjusting the lighting angle in diffuse transmittance systems. So diffuse transmittance is more suitable to assess the components of fruits and vegetables. Hyperspectral imaging technique in a diffuse transmittance mode was used to measure the SSC of tomato. First, a hyperspectral imaging platform with diffuse transmittance illumination was set up, and then hyperspectral diffuse transmittance images of tomatoes were captured in different positions including BS, C1, C2, and C3. All images were resized to eliminate boundary noise. The position C1C2C3 was achieved through mosaicing images of position C1, C2, and C3. Then background segmentation on a single wavelength was operated on the images to extract regions of interest (ROIs). Afterwards, the mean diffuse transmittance spectra of tomatoes in each position were calculated and preprocessed using normalization, standard normal variate (SNV), and a quadratic linear removed baseline. Finally, partial least squares regression (PLSR) was used to establish predicting models among the SSC of tomatoes and mean diffuse transmittance spectra in different positions on three different wavebands (450~720 nm, 720~990 nm, and 450~990nm). The results indicated that the prediction precision of integrated position C1C2C3 was much better than that of the other positions on the above three wavebands. RMSEP of the C1C2C3 model on the three wavebands were 0.299%, 0.133% and 0.151%, and the correlation coefficients (rp) were 0.42, 0.89 and 0.90 respectively.

Key words: imaging techniques, spectrum analysis, fruits, hyperspectral diffuse transmittance imaging, imaging positions, tomato, soluble solid content

(责任编辑: 刘丽英)