

文章编号 2095-1531(2018)01-0083-09

基于光谱指数的蜜橘成熟度评价模型研究

刘燕德*, 叶灵玉, 孙旭东, 韩如冰, 肖怀春, 马奎荣, 朱丹宁, 吴明明
(华东交通大学机电与车辆工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 本文探索了基于光谱指数的蜜橘成熟度快速无损评价方法及模型。以2016年9~11月份6个不同采收期的300个蜜橘作为实验样品,采集重量、横纵径、叶绿素、色差、可溶性固形物(SSC)、酸度(TA)、近红外光谱等数据。通过对比分析上述各参数的平均值和偏差,筛选出叶绿素、叶绿素/SSC、叶绿素/固酸比作为蜜橘成熟度评价指标。利用光谱变异系数分析光谱的特征,筛选出649、724、672、1100 nm 4个特征波长,通过特征波长线性组合方法以及相关性分析,得出最佳光谱指数。接着,以225个样品为建模集、75个样品为预测集,在成熟度评价指标与光谱指数间进行多元线性回归(MLR)分析。对比发现,以叶绿素为成熟度评价指标的评价模型的预测结果最准确,建模和预测相关系数分别达到0.98和0.96,建模均方根误差(RMSEC)和预测均方根误差(RMSEP)分别为0.49和0.59,建模和预测偏差分别为 -6.1×10^{-8} 和 -0.014 。实验结果表明,利用光谱指数能便捷、准确地评定蜜橘成熟度,为后续开发低成本测量成熟度的仪器提供了理论依据。

关键词: 蜜橘;成熟度指标;光谱指数;评价模型

中图分类号: TS255.7 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20181101.0083

Maturity evaluation model of tangerine based on spectral index

LIU Yan-de*, YE Ling-yu, SUN Xu-dong, HAN Ru-bing, XIAO Huai-chun,
MA Kui-rong, ZHU Dan-ning, WU Ming-ming

(School of Mechatronics Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

* Corresponding author, E-mail: jxliuyd@163.com

Abstract: Based on the spectral analysis, we explored a rapid nondestructive evaluation method for maturity of tangerine and established an evaluation model. The data of weight, transverse and longitudinal diameter, chlorophyll, color difference, soluble solids (SSC), acidity (TA) and near infrared spectra were collected from 300 tangerines as experimental samples of 6 different picking times from September to November in 2016. The

收稿日期:2017-07-11;修订日期:2017-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(No. 61640417);“十二五”国家863计划课题(No. SS2012AA101306);江西省优势科技创新团队建设计划项目(No. 20153BCB24002);南方山地果园智能化管理技术与装备协同创新中心(赣教高字[2014]60号);江西省研究生创新基金项目(No. YC2015-S238)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61640417);“Twelfth five-year” National 863 Plan Project(No. SS2012AA101306); Jiangxi Advantage Science and Technology Innovation Team Construction Project(No. 20153BCB24002), Center of the Technology and Equipment of the Intelligent Management for the Southern Mountain Orchard Collaborative Innovation(No. 2014-60); Innovative Funds for Jiangxi Graduate Students(No. YC2015-S238)

chlorophyll, chlorophyll/SSC and chlorophyll/solid acid ratio were screened out as the evaluation index of maturity of tangerine by comparing and analyzing the average value and deviation of the above parameters. By using spectral coefficients of variation to analyze the characteristics of the spectra, four characteristic wavelengths of 649, 724, 672, and 1 100 nm were selected. The optimal spectral indexes were obtained by linear combination and correlation analysis of these wavelengths. Then, taking 225 samples as model sets and 75 samples as prediction sets, multiple linear regression (MLR) analysis was conducted for both maturity index and spectral index. By comparison, the prediction model based on chlorophyll as the maturity index was the most accurate, and the correlation coefficient between modeling and prediction was 0.98 and 0.96 respectively. The root mean square error of modeling (RMSEC) and root mean square error of prediction (RMSEP) were 0.49 and 0.59, and the modeling and forecast deviations were -6.1×10^{-8} and -0.014 , respectively. The results showed that the spectral index can be used to conveniently and accurately evaluate the maturity of tangerine, which provided a theoretical basis for the subsequent development of low-cost maturity-measuring instruments.

Key words: tangerine; maturity index; spectral index; evaluation model

1 引言

国标要求柑橘类的水果成熟度达到可食用的适当程度即可^[1]。中国农业科学研究所研究证明果皮色泽和果汁的固酸比值可以作为尾张系柑橘果实的成熟度指标,固酸比一般达到 8:1 以上即认为是成熟^[2]。成熟度是果实品质的评价重要指标,果实成熟度不一,会严重影响其整体品质,同时大大降低了其市场竞争力。目前评价成熟度的指标有硬度^[3]、乙烯含量^[4]等。其中采用硬度的评价方法适用于在成熟过程中硬度变化比较大的水果,例如猕猴桃、香蕉等水果;乙烯评价方法对于成熟过程中释放乙烯较少的水果不适用^[5]。成熟度评价对于水果采摘后的储藏和运输起着重要的作用,采摘早了,果实得不到充分的生长,采摘晚了,在储藏和运输过程中容易腐烂。因此,探索一种准确、有效的成熟度评价方法具有重要意义。

光谱指数 (spectral index) 是由特定的多光谱波段的反射率经过线性或非线性组合而构成的一种光谱参数,其构建的原则是选择适合的波段强化果实的特征信息且弱化环境对光谱影响为目的,定性、定量地评估农作物生长及成熟度等情况^[6-8]。罗丹^[9]等人通过分析 350 ~ 2 500 nm 波

段光谱反射率任意两波段交叉组合的主要高光谱指数与冬小麦叶绿素含量的定量关系,并建立估算模型,结果表明比值光谱指数的效果最好,但这种光谱指数仍未能完全去除干扰信息。Attila^[10]对苹果成熟过程中的光谱特性、叶绿素、类胡萝卜素和水分等进行研究,结果表明,类胡萝卜素与叶绿素的比值适合用来表示苹果的成熟度,其中 678 nm 波长的光谱数据适用于判断苹果是否成熟。水果的成熟度涉及到各项参数指标,这种采用单个波长的信息来判断水果成熟度的方法较为简单,没有对比的参考量,存在很大的不确定性。近年来国外有许多研究者采用基于光谱指数的便携式仪器来研究水果的成熟度。其中 Alejandra^[11]采用 cherry-meters 仪器测量葡萄基于两个波峰 (560 nm 和 640 nm) 的吸光度差异指数,并根据吸光度差异指数的数值将样品分为 10 类,利用主成分分析不同吸光度差异指数的葡萄集群的成熟度。两个波长的光谱指数评价方法比一个波长的光谱指数评价方法较稳定,但前者只有两个波长之间的相对变化,不能对结果进行验证,容易受到外界环境的影响。光谱指数的评定方法已经被国内外学者广泛使用,采用这种方法可以通过选择少量波长,就能实现对蜜橘的成熟度评价,为开发低成本测量成熟度的仪器提供理论依据。

2 材料与方 法

2.1 实验材料

实验样品为江西蜜橘于9月到11月份6次采摘于江西某果园,样品随机选取没有损坏、腐烂以及虫害的新鲜蜜橘。实验样品总数为300个,实验样品每次为50个。将样品表面清洗干净,存放于温度为20°和湿度为60%的环境下存放,并在24 h内采集光谱,同时测量样品重量、横径、纵径、叶绿素、糖度、酸度以及色差等参数,其各种参数范围如表1所示。江西蜜橘为多汁水果,其皮厚约为1 mm,比赣南蜜橘的皮略薄,更适合采用近红外光谱仪进行光谱研究,果皮对实验的影响更小。

2.2 光谱采集

采用 Ocean optics 便携式光谱仪采集光谱,如图1所示,由光源、光纤、检测器和PC机组成。

其中光源为LS-1的白色光源,其光源稳定、强度合适,光谱采集前需将光源预热15 min,检测器的型号为QE65000,使用Spectrasuite软件读取和储存光谱。光谱采集范围:400~1200 nm;分辨率:6 nm;功率:6.5 W;积分时间:100 ms;平均次数:1;平滑度:15,并勾选去除噪声。参数设置好后,分别在样品的赤道部位均布采集3条光谱,沿赤道部位每隔72°采集一次光谱,最后求取平均光谱。

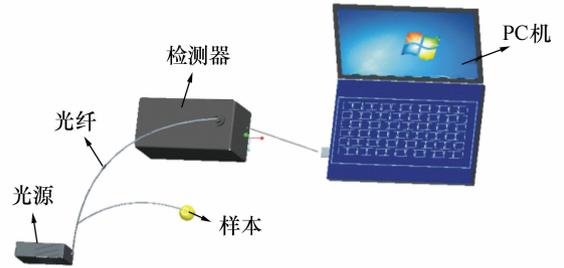


图1 便携式光谱仪

Fig. 1 Portable spectrometer

表1 不同采收期的参数范围

Tab. 1 Parameter ranges of different harvest periods

批次	采摘时间	重量/g	横径/mm	纵径/mm	叶绿素	色差	糖度(Brix°)	酸度/%
1	9月1日	94~116.7	60~63	47~54	5.8~35	-50~-27.9	9.1~11.6	0.53~2.88
2	9月11日	94.43~137.82	60~68	46~54	3.9~40	55.7~66.8	9.2~11.5	0.3~2.41
3	10月9日	110.4~156.1	66~74	46~56	0.1~23.5	57.4~74.4	9.8~12.2	0.47~2.22
4	10月24日	109.87~141.89	62~71	50~59	0.1~13.2	56.6~75.7	9.4~12.8	0.84~1.66
5	11月8日	87.44~136.11	62~71	48~57	0.1~3.2	65.1~76.3	9.5~13.1	0.4~1.4
6	11月28日	108.36~151.73	60~75	46~58	0.1~1.8	58.6~75.7	10.7~13.3	0.41~0.97

2.3 蜜橘理化指标真实值测量

重量:0.01 g,采用电子称量法称量,电子秤型号JM-B;

横纵径:采用游标卡尺分别在蜜橘在赤道和纵向的直径;

色差:使用白色聚乙烯板作为参照,采用AT-AGO色差仪测量蜜橘赤道采集点处的色差(Lab);

叶绿素:在光谱采集点,切下一小块果皮,去掉表皮中白色囊状物之后,采用SPAD-520叶绿素测量仪测量^[12];

可溶性固形物和酸度:为了防止果肉对实验的影响,用纱布将果汁过滤,进而测量其糖度含

量;用移液枪取1 mL果汁放入烧杯中,用纯净水稀释至50 mL,搅拌均匀后用日本爱拓专用于测量柑橘的糖酸度计测量酸度^[13]。

3 结果与讨论

3.1 成熟度评价指标对比分析

蜜橘成熟度指标是一项重要指标,蜜橘从未成熟期到成熟期的各项指标参数先增大(减小)后趋于稳定。如图2、3、4所示,不同采收期的蜜橘横纵径没有显著变化,重量虽然呈上升的趋势,但是趋势并不明显。如图5所示,叶绿素含量随着时间的变化越来越少,且标准偏差越来越小,可

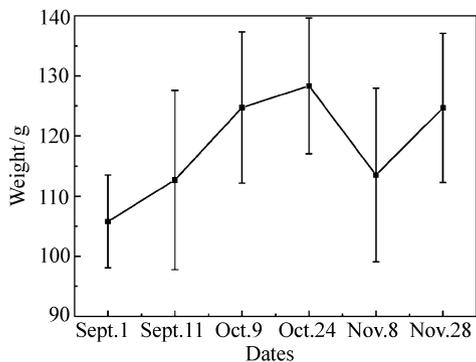


图 2 不同采收期的蜜橘重量

Fig. 2 Tangerine weights in different harvest periods

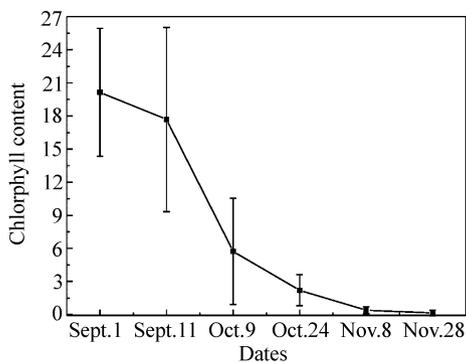


图 5 不同采收期的蜜橘叶绿素

Fig. 5 Chlorophyll in different harvest periods

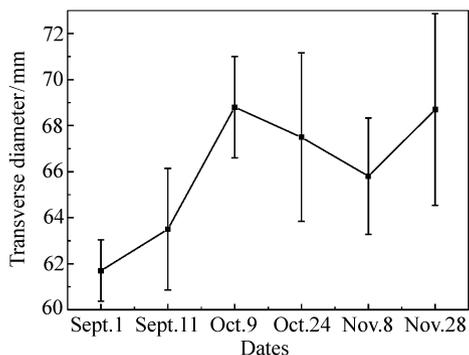


图 3 不同采收期的蜜橘横径

Fig. 3 Transverse diameters in different harvest periods

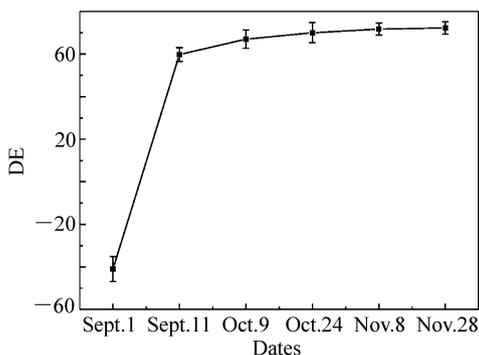


图 6 不同采收期的蜜橘色差

Fig. 6 Chromatic aberrations in different harvest periods

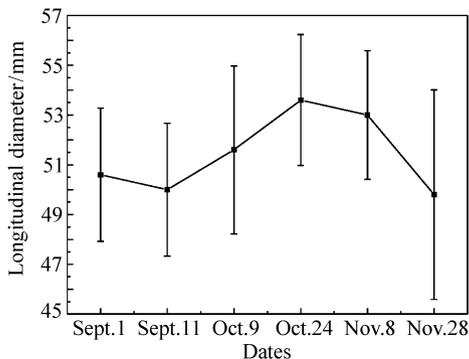


图 4 不同采收期的蜜橘纵径

Fig. 4 Longitudinal diameters in different harvest periods

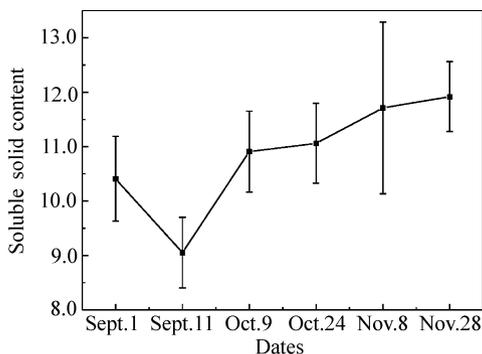


图 7 不同采收期的蜜橘可溶性固形物含量

Fig. 7 Soluble solid contents in different harvest periods

见蜜橘的叶绿素含量可作为蜜橘成熟度指标之一。色差如图 6 所示,第 1 批数值较低表明第一个采收期的蜜橘颜色偏暗,而后面 5 批的蜜橘颜色偏亮,色差基本不变,从色泽上已趋于稳定,但上升的过快不利于判断成熟时期。

蜜橘在成熟过程中淀粉会分解,可溶性固形物的含量会逐渐升高,而酸度会逐渐降低。中国农业科学院柑橘研究所研究结果表明^[2]柑橘成熟时的固酸比 $\geq 8:1$,由图 9 可知,这 6 个采收期

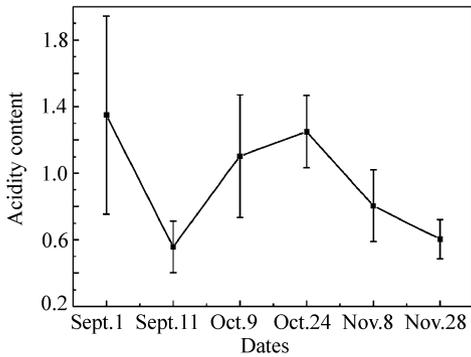


图 8 不同采收期的蜜橘酸度含量

Fig. 8 Tangerine acidity contents in different harvest periods

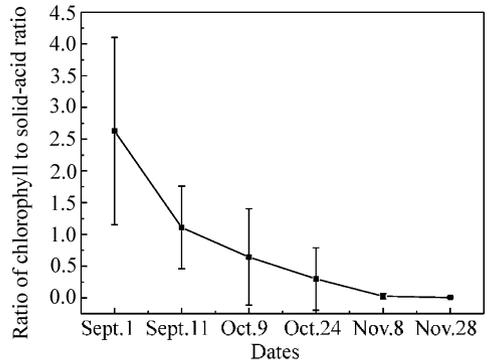


图 11 不同采收期的叶绿素与固酸比的比值

Fig. 11 Ratios of chlorophyll to solid-acid in different harvest periods

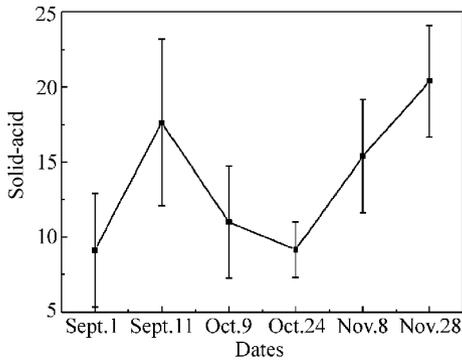


图 9 不同采收期的蜜橘固酸比

Fig. 9 Tangerine solid-acid ratios in different harvest periods

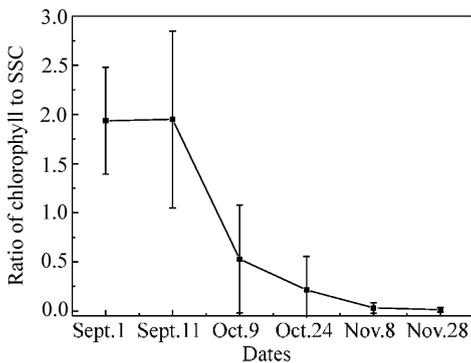


图 10 不同采收期的叶绿素与糖度的比值

Fig. 10 Ratio of chlorophyll to SSC in different harvest periods

期的时候达到最高值,这是由于这 6 个采收期的蜜橘的可溶性固形物的含量没有明显变化(如图 7 所示),但其酸度在第 5 个采收期开始下降,到第 6 个采收期达到最小值(如图 8 所示)。使用叶绿素比上 SSC、叶绿素比上固酸比可得到如图 10 和图 11 所示,其平均值逐渐减小且趋于稳定,偏差也逐渐变小,也可作为江西蜜橘成熟度指标。

3.2 蜜橘光谱特性分析

江西蜜橘样品的反射光谱的平均光谱如图 12 所示,光谱范围 500 ~ 1 500 nm。在 649 nm 和 724 nm 波段处有明显的两个波峰,672 nm 波段处有明显波谷,随成熟期的变化 672 nm 处波谷越来越不明显,渐渐趋近于平缓。这是由于蜜橘中的有机物含有 C-H 键、O-H 键、N-H 键等氢基团,而在蜜橘逐渐成熟的过程中,蜜橘的表皮颜色逐渐由绿色转变成红黄色,蜜橘的内部品质也逐渐改善,口感越来越好。在 672 nm 波段处的波谷可能是由于果皮中的叶绿素造成的,叶绿素吸收波段为 450 ~ 470 nm 和 640 ~ 680 nm^[14],前 3 个采收期的蜜橘表皮颜色偏绿,采集点呈黄色的部位较少,叶绿素含量较多,导致在 672 nm 波段附近形成波谷,而在 649 nm 和 724 nm 两处形成波峰。后 3 个采收期的蜜橘表皮颜色多呈红黄色,叶绿素含量较少,这时光谱显现出来的是红光和黄光的反射能量。由 6 个采收期的平均光谱的吸收带可知,光谱的成熟度与果皮中叶绿素的含量密切相关。

的蜜橘的固酸比平均值均大于 8,适宜食用,但若是确定蜜橘的最佳成熟度,还需要实验研究。在图 9 中前 4 个采收期的固酸比没有明显的变化,在第 5 个采收期固酸比开始上升,在第 6 个采收

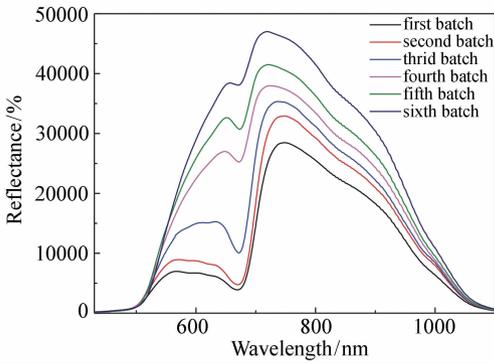


图 12 不同采收期的江西蜜橘近红外光谱特性
Fig. 12 Near infrared spectrum characteristics of Jiangxi orange in different harvest periods

在蜜橘的原始光谱中,不同波长的反射值差异较大,宜采用变异系数^[15]来反应光谱的变化,变异系数公式为:

$$CV = \frac{SD}{MEAN} \quad (1)$$

变异系数越大体现出蜜橘在 6 个采收期的变化越大,如图 13 所示,光谱值从 500 ~ 670 nm 波长呈一个上升的趋势,这个波段的蜜橘的差异越来越大并在 670 nm 达到最大值,从 670 ~ 724 nm 呈下降趋势,并在 724 nm 时降到最低后不再有明显的变化。表明蜜橘的成熟过程中,670 nm 波长时的光谱变化最明显,能体现蜜橘成熟的差异性。而 670 nm 波长正是叶绿素的吸收波峰^[16],因此以光谱特性来看,叶绿素亦适宜作为成熟度参数指标。

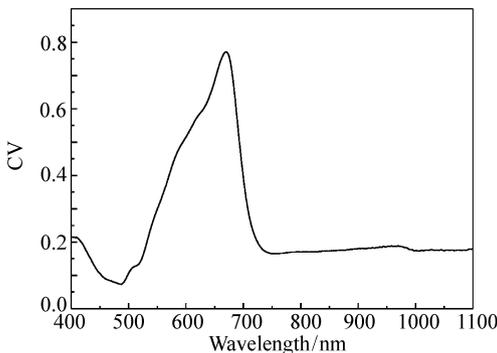


图 13 变异系数曲线
Fig. 13 Variation coefficient curve

3.3 蜜橘成熟度光谱评价指数对比分析

如 3.2 节所述,蜜橘的反射光谱在 649 nm 和

724 nm 形成波峰,在 672 处形成波谷,在 1 100 nm 处亦处于下降的最低点。成熟度光谱的变化速度的快慢,可以通过计算波长对应的光谱值的相关系数来体现。如表 2 所示,采用了 4 种波长对应的光谱值进行了分析。当只采用两个波峰或波谷作为成熟度光谱值评价时, $r = 0.967 8$ 和 $r = 0.955 9$ 。相比之下,将波峰和波谷的光谱值进行处理^[17]后其相关系数有所提高,其中 $\frac{R(649) + R(724)}{R(672) + R(1100)}$ 的效果最好,相关系数为 0.991 6,其对成熟度的变化最为敏感,可作为成熟度光谱评价指数。随着蜜橘的成熟,其反射光谱曲线表明其成熟度与叶绿素的含量有着密切的关系。这 6 个采收期的光谱数值离散图如图 14 所示,成熟度光谱指数数值越来越小逐渐趋近于稳定,同时偏差也逐渐减小。

表 2 光谱评价指数相关性分析

Tab. 2 Correlation analysis of spectral evaluation indices

光谱评价指数	相关系数(r)
$\frac{R(649)}{R(724)}$	0.967 8
$\frac{R(724)}{R(1100)}$	0.955 9
$\frac{R(649) + R(724)}{R(672) + R(1100)}$	0.991 6
$\frac{R(649) - R(724)}{R(672) - R(1100)}$	-0.975 3
$\frac{R(649) + R(724)}{R(672) - R(1100)}$	0.991 2
$\frac{R(649) - R(724)}{R(672) + R(1100)}$	-0.964 3

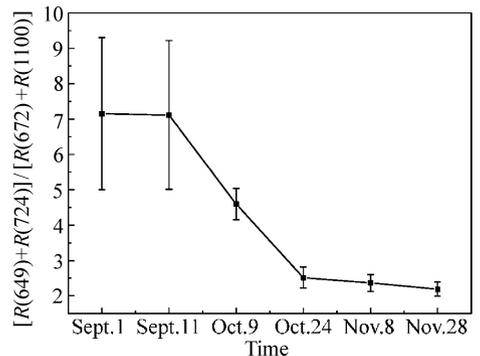


图 14 成熟度光谱指数随采收期的变化
Fig. 14 Maturity spectral index changes with the harvest period

3.4 蜜橘成熟度光谱指数评价模型分析

通过成熟度评价指标和光谱指数建立多元线性回归^[18](MLR)评价模型,成熟度评价指标如3.1节所述为叶绿素、叶绿素比可溶性固溶物、叶绿素与固酸比之比。将3组原始数据按照3:1的比例,分为建模集和预测集,建模集样本为225个,预测集为75个。如表3所示,在3个成熟度指标中,叶绿素与光谱指数建立的MLR模型的效果

最好,其建模集相关系数 r_c 达到0.98,建模均方根误差RMSEC为0.49,建模偏差为 -6.1×10^{-8} ,预测集相关系数为0.96,预测均方根误差RMSEP为0.59,预测偏差为 -0.014 。如图15为叶绿素与光谱指数的MLR模型,建模集的多元线性回归方程为 $y = 0.95x + 0.016$,预测集的多元线性回归方程为 $y = 0.91x + 0.032$ 。

表3 成熟度指标与光谱指数建模结果

Tab.3 Modeling results of maturity index and spectral indices

成熟度指标	r_c	RMSEC	Bias	r_p	RMSEP	Bias
叶绿素	0.98	0.49	-6.1×10^{-8}	0.96	0.59	-0.014
叶绿素/SSC	0.95	0.71	3.7×10^{-7}	0.94	0.82	-0.041
叶绿素/固酸比	0.92	0.97	-4.1×10^{-8}	0.89	1.02	0.084

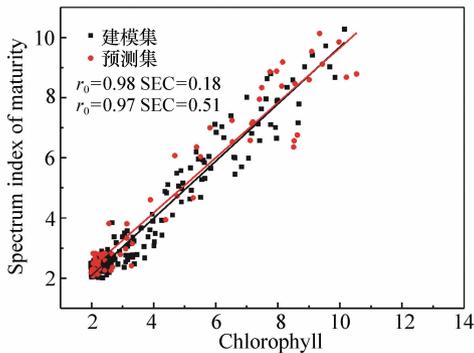


图15 多元线性回归模型

Fig.15 Multiple linear regression model

4 结论

为了对蜜橘的成熟度进行评价,实验测量了9月份到11月份蜜橘的重量、横纵径色差、叶绿素、可溶性固形物和酸度,根据蜜橘成熟时其指标

会逐渐趋近于稳定,选定了叶绿素、叶绿素比可溶性固形物以及叶绿素与固酸比的比值为成熟度指标。采用便携式光谱仪测量了6批蜜橘的光谱,比较不同采收期的平均光谱及变异系数,表明蜜橘的光谱收叶绿素的影响比较大。结合光谱特性分别取出了649 nm、672 nm、724 nm、1100 nm等4个波长,进一步分析出最佳光谱指数为 $\frac{R(649) + R(724)}{R(672) + R(1100)}$,其相关系数为0.9916。最后

采用多元线性回归方法MLR处理成熟度指标和光谱指数,模型最好的是以叶绿素作为成熟度光谱指标的MLR模型,其建模集相关系数 r_c 达到0.98,建模均方根误差RMSEC为0.49,建模偏差为 -6.1×10^{-8} ,预测集相关系数为0.96,预测均方根误差RMSEP为0.59,预测偏差为 -0.014 。结果表明叶绿素作为成熟度指标与光谱指数的多元线性回归模型最好。

参考文献:

- [1] GB/T 12947-2008《鲜柑橘》[S]. GB/T 12947-2008(Fresh citrus)[S]. (in Chinese)
- [2] 应义斌,饶秀勤,马俊福,等. 柑橘成熟度机器视觉无损检测方法研究[J]. 农业工程学报,2004,20(2):144-147. YING Y B, RAO X Q, MA J F, et al. Methodology for nondestructive inspection of citrus maturity with machine vision [J]. Transactions of the CSAE, 2004, 20(2): 144-147. (in Chinese)
- [3] BURDON J, PIDAKALA P, MARTIN P, et al. Postharvest performance of the yellow-fleshed 'Hort16A' kiwifruit in relation to fruit maturation[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014, 92: 98-106.

- [4] NAVARRO G N, MARTINEZ R D, PEREZT O. Assessment of the impact of ethylene and ethylene modulators in citrus limon organogenesis[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2016, 127(2):405-415.
- [5] 王乐妍, 张冬仙, 章海军, 等. 基于激光光致发光光谱的果实成熟度测试方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(12):2772-2776.
WANG L Y, ZHANG D X, ZHANG H J, et al.. Measurement of fruit maturity based on laser-induced photoluminescence spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(12):2772-2776. (in Chinese)
- [6] JONATHAN V B, LAURENT T, BEN S, et al.. Stem water potential monitoring in pear orchards through worldview-2 multispectral imagery[J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(8):9886-9903.
- [7] ZHAO CH J, LI H L, GU X H, et al.. Effect of vertical distribution of crop structure and biochemical parameters of winter wheat on canopy reflectance characteristics and spectral indices[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2017, 55(1):236-247.
- [8] RAYMOND E H, CRAIG S T D, LI L. Feasibility of estimating leaf water content using spectral indices from WorldView-3's near-infrared and shortwave infrared bands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, 37(2):388-402.
- [9] 罗丹, 常庆瑞, 齐雁冰, 等. 基于光谱指数的冬小麦冠层叶绿素含量估算模型研究[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(9):1225-1233.
LUO D, CHANG Q R, QI Y B, et al.. Estimation model for chlorophyll content in winter wheat canopy based on spectral indices[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(9):1225-1233. (in Chinese)
- [10] NAGY A, PETER R, JANOS T. Spectral evaluation of apple fruit ripening and pigment content alteration[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 201:256-264.
- [11] ALEJANDRA R F, MASSIMO N, EMILIO J F, et al.. Assessment of technological maturity parameters and anthocyanins in berries of cv. Sangiovese(*Vitis vinifera* L.) by a portable vis/NIR device[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 209:229-235.
- [12] 刘燕德, 肖怀春, 孙旭东, 等. 基于高光谱成像的柑橘黄龙病无损检测[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11):231-238, 277.
LIU Y D, XIAO H CH, SUN X D, et al.. Non-destructive detection of citrus huanglong disease using hyperspectral image technique[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11):231-238, 277. (in Chinese)
- [13] LI M, LV W B, ZHAO R, et al.. Non-destructive assessment of quality parameters in Friar' plums during low temperature storage using visible/near infrared spectroscopy[J]. *Food Control*, 2017, 73(B):1334-1341.
- [14] 刘凯, 张立福, 杨杭, 等. 面向对象分析的非结构化背景目标高光谱探测方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(6):1653-1657.
LIU K, ZHANG L F, YANG H, et al.. Hyperspectral unstructured background target detection approach based on object-oriented analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(6):1653-1657. (in Chinese)
- [15] 田青, 罗金平, 刘晓红, 等. 生物发光法细菌快速检测仪的研制及应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4):771-778.
TIAN Q, LUO J P, LIU X H, et al.. Development and application of rapid detecting instrument for bacteria based on bioluminescence[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4):771-778. (in Chinese)
- [16] TAMBURINI E, FERRARI G, MARCHETTI M G, et al.. Development of FT-NIR models for the simultaneous estimation of chlorophyll and nitrogen content in fresh apple(*Malus Domestica*) leaves[J]. *Sensors (Basel)*, 2015, 15(2):2662-2679.
- [17] GITELSON AA, MERZLYAK M N. Signature analysis of leaf reflectance spectra-algorithm development for remote sensing of chlorophyll[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(3-4):494-500.
- [18] 王智宏, 张福东, 滕飞, 等. 基于近红外波长组合快速检测油页岩含油率[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2):371-377.
WANG ZH H, ZHANG F D, TENG F, et al.. Rapid detection of oil yield of oil shale by combination of wavelengths in near infrared spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2):371-377. (in Chinese)

作者简介:



刘燕德(1967—),女,江西泰和人,博士,教授,博士生导师,主要从事光机电检测技术方面的研究。
E-mail: jxliuyd@163.com

《发光学报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊,曾于1992年,1996年,2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”,并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年;美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文;2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊;2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中,《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊,A4开本,144页,国内外公开发行。国内定价:40元,全年480元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地 址:长春市东南湖大路3888号
《发光学报》编辑部
邮 编:130033
电 话:(0431)86176862, 84613407
E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
<http://www.fgxb.org>