

基于图像分析检测青菜叶绿素含量

孙宇露,王德海*,朱国建

(浙江工业大学 材料科学与工程学院,浙江 杭州,310014)

摘 要 为研究利用图像分析技术快速测定青菜叶绿素含量的方法,本研究将青菜分别置于不同环境进行贮藏,采用图像分析技术和分光光度计法测定了贮藏期间青菜叶颜色参数值(L^* 、 a^* 、 b^* 、 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 、色差 ΔE)和叶绿素含量,并使用不同函数模型($y = Ax + B$ 、 $y = A/x + B$ 、 $y = A \ln x + B$ 和 $\ln(\ln y) = A \ln x + B$)对颜色参数和叶绿素含量进行拟合分析。结果表明:不同贮存环境下,青菜叶颜色参数 ΔE 与叶绿素含量之间存在稳定的线性关系,可以用函数模型 $y = Ax + B$ 进行表达。利用图像分析技术建立青菜叶颜色参数 ΔE 与叶绿素含量之间关系定标模型相关系数为 0.990 9,其定标均方根误差为 0.071 7,用未参与定标的纸盒贮藏青菜叶作为预测集,其预测相关系数为 0.992 8、预测均方根误差为 0.010 4。

关键词 青菜;颜色参数;图像分析;叶绿素含量

青菜,属种子植物门,双子叶植物纲,是我国普遍种植的蔬菜之一。国内外学者多研究其培育方式或保鲜试验^[1],而对其颜色变化及以此为变量的叶绿素含量的预测鲜有研究。

颜色是反映蔬菜品质的重要物理性质^[2]。目前,颜色评价方法主要有主观评价和仪器检测,其中,主观评价易受评价人员主观影响。近年来,利用精确、高效的仪器评判颜色一直是蔬菜品质评价研究领域的技术应用热点^[3-4]。叶绿素含量是评价绿色蔬菜品质的重要指标^[5],传统的分光光度计测定叶绿素含量方法需用有机溶剂提取,不仅破坏被测样品,而且过程繁琐;采用色差计测定颜色,虽较准确,但对样品的形状、大小、色泽均匀度、表面平整度有一定的要求,有文献报道^[6]使用色差计测定青花菜颜色值,研究了颜色值 $-a/b$ 与叶绿素含量的关系,并建立了基于 $-a/b$ 值的叶绿素含量预测模型,但决定系数 R^2 只有 0.944 1。

近年来,国内外利用图像分析技术对蔬菜的颜色进行评价也初见成效^[7-11],其颜色参数易于保存,不受时间限制。蒋丽华等^[10]报告了一个图像采集系统及相关的软件系统,能够在对作物图像进行合理的分割和特征提取,最终实现叶绿素的含量的快速测定,但并未提出具体叶绿素转换公式。MANNINEN 等^[7]

使用数码相机和图像处理软件获取绿豆图像的 L^* 、 a^* 、 b^* 、 $(a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 、 ΔE 值,并定量地描述了绿豆颜色随时间的变化,但并未研究颜色参数与叶绿素含量之间的定量关系。

总之,目前利用图像分析技术测定的颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 与叶绿素含量之间的定量关系以及此关系是否具有普遍性的研究鲜有报道。

本研究利用数码相机结合 Photoshop 软件获取不同贮藏环境(空气、保鲜袋、纸盒)下青菜叶图像颜色参数,筛选出与叶绿素含量相关性较高的颜色参数并以此建立青菜叶绿素含量预测模型,从而可根据图像颜色参数快速、准确的检测叶绿素的含量。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

青菜(品种为“上海青”),购于杭州市德胜市场;保鲜袋(洁成聚乙烯保鲜袋(食品级,超市),规格:25 cm × 35 cm),苏州工业园区优诺塑业有限公司;纸盒(规格:20 cm × 16 cm × 5 cm),东泽纸品包装有限公司;丙酮、无水乙醇(分析纯),杭州双林化工试剂有限公司。

Canon PowerShot A610 数码相机,日本佳能公司;Lambda 750 紫外可见分光光度计,美国 PE 公司;Color Quest XE 色差仪,美国 Hunter Lab 公司;Adobe Photoshop CS6 软件。

1.2 实验方法

挑选色泽均匀的青菜样品分别置于空气、纸盒、

第一作者:硕士研究生(王德海教授为通讯作者,E-mail:wdh@zjut.edu.cn)。

收稿日期:2016-01-12,改回日期:2016-02-17

PE 保鲜袋中进行贮藏,贮藏温度 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$,每隔 5 d 进行颜色参数和叶绿素含量测试。

1.3 测定方法

1.3.1 叶绿素含量测定采用分光光度法^[12]

叶绿素含量计算利用 Arnon 公式

$$\text{叶绿素总含量}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}) = (20.2 D_{645} + 8.02 D_{663}) \times \frac{V}{1\,000 \times m} \quad (1)$$

式中: V 是浸提液的最终体积; m 为叶片鲜重。

1.3.2 颜色参数测定

分别采用 Color Quest XE 色差仪和图像分析技术。

色差仪:采用 L^* 、 a^* 、 b^* 模式,平行测定 3 次,取平均值。

图像分析技术:使用数码相机采集青菜叶片样品正面图像时,以白纸作为背景,将数码相机闪光灯设置于关闭状态,分辨率为 $1\,600 \times 1\,200$,设置相机在 M 模式下,拍摄参数为 $1/100$,F8.0,ISO400。白平衡自动,调整镜头焦距为 20 cm,拍摄光源分为自然光源和人工光源 D65。采用 JPG 格式存储图像并传入计算机;应用 Adobe Photoshop CS6 图像处理软件中快速选择工具做青菜叶选区(不包含菜叶上的茎脉部分),设置笔尖大小为 8 像素。执行滤镜工具中的模糊平均命令,将选区内的所有像素颜色参数值平均化,读取 L^* 、 a^* 、 b^* 值,如图 1 所示。

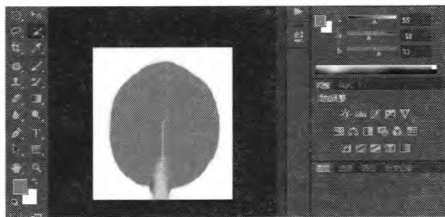


图 1 青菜叶图像颜色参数提取

Fig. 1 The extraction of green vegetables leaf image color parameters

1.4 数据处理

青菜叶图像的颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值分别计算 ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 、色差 $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$,采用 Origin 8.0 软件对颜色参数与叶绿素含量进行线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 颜色参数的选择

青菜贮藏过程中,由于叶绿素降解,颜色由绿变黄。因此尝试探讨青菜贮存过程中由图像分析技术测得的青菜叶颜色参数与叶绿素含量的关系。

CIE-Lab 表色系中的 L^* 值为明度,反映样品的明暗程度(从 0 ~ 100 变化,0 是黑色,100 是白色),颜色参数 a^* 值为红度(正值代表红色,负值代表绿色), b^* 值为黄度(正值代表黄色,负值代表蓝色)。其中,明度差为 $\Delta L^* = L_2^* - L_1^*$;色品差 $\Delta a^* = a_2^* - a_1^*$ 和 $\Delta b^* = b_2^* - b_1^*$; $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 反映的是颜色二维空间的变化;色差 ΔE 可用空间几何距离表示: $\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$,集中体现了颜色体系三要素,能够更全面地反映颜色三维空间的变化。

颜色是由光源作用在物体之上,通过物体的吸收、透射,最终由物体反射给观察者,再由观察者做出视觉反应。因此,光源可能会对颜色产生一定影响。本试验分别测定了 2 种不同光源下(人工光、自然光)拍摄的青菜叶图像颜色值,结果见表 1。

可见青菜叶样品在不同光源下,其 L^* 值波动大概在 1 ~ 3, a^* 、 b^* 值基本不变,而颜色参数变化 (ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^*) 基本不变。因此,我们在后续的研究中主要利用自然光源照明。

表 2 显示由色差计和图像分析技术测得的青菜叶(空气)颜色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 有一些波动,但由 2 种方法所得的颜色参数变化 (ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^*) 基本一致,

表 1 不同光源条件下,图像分析技术测定的青菜叶(空气)颜色值

Table 1 Color values of green vegetables leaf detected by image analysis technology under different light conditions

| 时间/d | L^* | | a^* | | b^* | | ΔL^* | | Δa^* | | Δb^* | |
|------|-------|-----|-------|-----|-------|-----|--------------|-----|--------------|-----|--------------|-----|
| | 人工光 | 自然光 | 人工光 | 自然光 | 人工光 | 自然光 | 人工光 | 自然光 | 人工光 | 自然光 | 人工光 | 自然光 |
| 0 | 58 | 55 | -16 | -16 | 21 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 60 | 57 | -15 | -15 | 23 | 23 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 10 | 63 | 60 | -13 | -13 | 24 | 24 | 5 | 5 | 2 | 2 | 3 | 3 |
| 15 | 66 | 63 | -12 | -12 | 26 | 25 | 8 | 8 | 4 | 4 | 5 | 4 |
| 20 | 66 | 62 | -7 | -8 | 29 | 29 | 8 | 7 | 9 | 8 | 8 | 8 |

表 2 青菜叶(空气)颜色的色差计、图像分析技术测定值和叶绿素含量

Table 2 Chlorophyll content and color values of green vegetables leaf detected by color difference meter, image analysis technology

| 时间/d | 叶绿素含量/ (mg · g ⁻¹) | 色差计 | | | 图像分析技术 | | | | | | | | |
|------|-----------------------------------|----------|----------|----------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | <i>L</i> | <i>a</i> | <i>b</i> | ΔL^* | Δa^* | Δb^* | <i>L</i> [*] | <i>a</i> [*] | <i>b</i> [*] | ΔL^* | Δa^* | Δb^* |
| 0 | 3.5 | 57.45 | -16.07 | 20.96 | 0 | 0 | 0 | 55 | -16 | 21 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 3.01 | 59.38 | -15.05 | 22.92 | 1.93 | 1.02 | 1.96 | 57 | -15 | 23 | 2 | 1 | 2 |
| 10 | 2.54 | 62.51 | -14.06 | 23.95 | 5.06 | 2.01 | 2.99 | 60 | -13 | 24 | 5 | 2 | 3 |
| 15 | 2.12 | 65.56 | -12.10 | 24.90 | 8.11 | 3.97 | 3.94 | 63 | -12 | 25 | 8 | 4 | 4 |
| 20 | 1.59 | 64.59 | -8.05 | 28.97 | 7.14 | 8.02 | 8.01 | 62 | -8 | 29 | 7 | 8 | 8 |

随贮存时间延长,各颜色参数逐渐增大,而由分光光度计测得叶绿素含量随时间延长逐渐减小,说明青菜贮藏过程中叶绿素不断降解,外在表现为青菜叶逐渐褪绿黄化,颜色参数的变化与叶绿素含量之间存在逆变关系。试验结果初步表明使用图像分析技术获取的颜色参数适合用于不同贮藏条件下青菜叶绿素含量的预测。

2.2 青菜叶颜色参数与叶绿素含量的定量关系

为了进一步研究青菜叶颜色参数与叶绿素含量间的关系,采用不同函数模型($y = Ax + B$ 、 $y = A/x + B$ 、 $y = A\ln x + B$ 和 $\ln(\ln y) = A\ln x + B$)对青菜颜色参

数 $-a^*$ 、 b^* 、 Δa^* 、 Δb^* 、 $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 、 ΔE 与叶绿素含量进行回归分析,结果见表3。综合比较标准差值*s*和决定系数 R^2 ,标准差值愈小、决定系数越接近1,表示拟合的回归模型愈好。

结果表明,对于不同贮藏环境下的青菜样品,颜色参数 Δa^* 与叶绿素含量间的关系使用 $y = A\ln x + B$ 模型拟合, Δb^* 、 $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ 与叶绿素含量间的关系使用 $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ 模型拟合, ΔE 与叶绿素含量间的关系使用 $y = Ax + B$ 模型拟合,以上4种回归模型拟合效果相对较好($R^2 > 0.98$)。

表 3 青菜叶绿素含量(y)与颜色参数(x)回归分析表

Table 3 Chlorophyll content (y) and color parameters regression analysis

| 样品贮存环境 | 颜色参数 | 拟合模型 | 拟合结果 | | | |
|--------|---|---------------------------|-----------|----------|---------------|-----------------|
| | | | <i>A</i> | <i>B</i> | 决定系数(R^2) | 标准差(<i>s</i>) |
| 空气 | $-a^*$ | $y = Ax + B$ | 0.232 0 | -0.417 7 | 0.920 6** | 0.209 7 |
| | | $y = A\ln x + B$ | 2.576 9 | -3.946 9 | 0.848 7* | 0.371 5 |
| | | $y = A/x + B$ | -27.085 9 | 4.797 | 0.762 6 | 0.363 1 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | 1.423 9 | -3.751 6 | 0.983 6** | 0.050 1 |
| | b^* | $y = Ax + B$ | -0.242 7 | 8.474 5 | 0.911 8** | 0.221 2 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.102 1 | 3.389 5 | 0.956 6** | 0.187 4 |
| | | $y = A/x + B$ | 151.87 | -3.743 1 | 0.952 7** | 0.161 9 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -3.230 6 | 10.141 5 | 0.979 3** | 0.078 7 |
| | Δa^* | $y = Ax + B$ | -0.224 8 | 3.226 3 | 0.879 8* | 0.258 3 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.675 1 | 3.017 | 0.997 0** | 0.033 0 |
| | | $y = A/x + B$ | 1.487 3 | 1.617 8 | 0.858 4* | 0.227 6 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.405 8 | 0.165 0 | 0.903 2** | 0.116 7 |
| | Δb^* | $y = Ax + B$ | -0.242 7 | 3.377 3 | 0.911 8** | 0.221 2 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -1.025 4 | 3.662 8 | 0.970 4** | 0.103 9 |
| | | $y = A/x + B$ | 3.814 7 | 1.162 6 | 0.976 4** | 0.092 8 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.639 0 | 0.582 8 | 0.982 0** | 0.052 2 |
| | $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ | $y = Ax + B$ | -0.167 1 | 3.313 9 | 0.904 9** | 0.229 8 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.843 0 | 3.592 5 | 0.956 3** | 0.133 4 |
| | | $y = A/x + B$ | 3.850 1 | 1.361 3 | 0.964 8** | 0.116 1 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.528 2 | 0.543 6 | 0.993 ** | 0.021 1 |
| | ΔE | $y = Ax + B$ | -0.141 7 | 3.558 5 | 0.996 4** | 0.044 8 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.895 1 | 4.047 4 | 0.923 3** | 0.167 4 |
| | | $y = A/x + B$ | 4.567 0 | 1.532 9 | 0.754 4* | 0.299 7 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.514 4 | 0.738 7 | 0.722 2* | 0.198 5 |
| 保鲜袋 | $-a^*$ | $y = Ax + B$ | 0.142 1 | 1.196 1 | 0.984 0** | 0.105 3 |

续表 3

| 样品贮存环境 | 颜色参数 | 拟合模型 | 拟合结果 | | | |
|--------|---|---------------------------|----------|----------|-----------------------|---------|
| | | | A | B | 决定系数 R^2 | 标准差 s |
| | b^* | $y = A\ln x + B$ | 0.972 7 | 0.602 0 | 0.793 7 [*] | 0.379 4 |
| | | $y = A/x + B$ | -3.700 8 | 3.129 0 | 0.443 4 | 0.623 3 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | 0.503 2 | -1.184 4 | 0.951 6 ^{**} | 0.088 9 |
| | | $y = Ax + B$ | -0.332 5 | 10.37 | 0.876 7 [*] | 0.300 7 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -8.048 | 27.93 | 0.898 6 ^{**} | 0.266 4 |
| | | $y = A/x + B$ | 193.3 | -5.731 | 0.923 6 ^{**} | 0.231 3 |
| | Δa^* | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -4.057 3 | 12.617 6 | 0.988 8 ^{**} | 0.003 9 |
| | | $y = Ax + B$ | -0.268 9 | 3.105 1 | 0.796 7 [*] | 0.341 0 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.550 9 | 2.628 9 | 0.986 4 ^{**} | 0.053 7 |
| | | $y = A/x + B$ | 1.182 1 | 1.513 3 | 0.962 6 ^{**} | 0.089 3 |
| | Δb^* | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.368 3 | -0.006 0 | 0.972 ^{**} | 0.052 0 |
| | | $y = Ax + B$ | -0.273 6 | 3.446 6 | 0.976 2 ^{**} | 0.116 4 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -1.189 7 | 3.915 8 | 0.978 1 ^{**} | 0.068 3 |
| | | $y = A/x + B$ | 5.331 0 | 0.875 0 | 0.994 4 ^{**} | 0.018 6 |
| | $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$ | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.804 0 | 0.867 7 | 0.998 4 ^{**} | 0.011 5 |
| | | $y = Ax + B$ | -0.200 3 | 3.339 4 | 0.935 4 ^{**} | 0.192 2 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -0.923 6 | 3.663 6 | 0.971 4 ^{**} | 0.078 1 |
| | | $y = A/x + B$ | 4.814 9 | 1.13 | 0.985 4 ^{**} | 0.031 4 |
| | ΔE | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.624 4 | 0.697 7 | 0.989 1 ^{**} | 0.021 9 |
| | | $y = Ax + B$ | -0.140 7 | 3.544 8 | 0.990 9 ^{**} | 0.0717 |
| | | $y = A\ln x + B$ | -1.014 3 | 4.296 8 | 0.939 5 ^{**} | 0.113 6 |
| | | $y = A/x + B$ | 7.287 0 | 1.189 7 | 0.861 9 ^{**} | 0.171 6 |
| | | $\ln(\ln y) = A\ln x + B$ | -0.653 4 | 1.055 | 0.823 1 [*] | 0.130 6 |

注：^{*}：相关性显著， $P < 0.05$ ；^{**}：相关性极显著， $P < 0.01$ ，表 4 同。

为了比较回归模型在不同贮藏环境下的普适性，将以上 4 种回归方程系数 A、B 进行差值分析，而使用文献报道的颜色参数 $-a^*/b^*$ 与青菜叶绿素含量进行线性回归，决定系数 R^2 达到 0.98，比前人文献中的要高，所以本文也将其回归方程分析结果列于表 4，结果表明： ΔE 与叶绿素含量间的关系使用 $y = Ax + B$ 模型线性拟合时，不仅拟合效果最好， $R^2 > 0.99$ ，而且 A、B 的差值最小，分别为 0.001、0.013 7。所以

ΔE 可以作为快速预测叶绿素含量的颜色参数，从而建立基于 ΔE 值的青菜叶绿素含量的定标模型，结果如下：

$$Cchl = -0.141\ 2\Delta E + 3.551\ 6\ (R^2 = 0.990\ 9) \quad (2)$$

式(2)中：Cchl 为叶绿素含量，mg/g。

该模型有较高的检测精度，决定系数比前人文献^[6]报道得更高，且对于不同包装贮藏环境下的青菜样品叶绿素含量的预测具普遍性，可靠性较高。

表 4 回归方程系数 A、B 差值分析表
Table 4 Regression equation coefficient A and B analysis table

| 回归方程 | A | | | B | | | R^2 | |
|--|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-----------------------|-----------------------|
| | 空气 | 保鲜袋 | A 的差值 | 空气 | 保鲜袋 | B 的差值 | 空气 | 保鲜袋 |
| $y = A\ln \Delta a^* + B$ | -0.675 1 | -0.550 9 | 0.124 2 | 3.017 | 2.628 9 | 0.388 1 | 0.997 0 ^{**} | 0.986 4 ^{**} |
| $\ln(\ln y) = A\ln \Delta b^* + B$ | -0.639 0 | -0.804 0 | 0.165 0 | 0.582 8 | 0.867 7 | 0.284 9 | 0.982 0 ^{**} | 0.998 4 ^{**} |
| $\ln(\ln y) = A\ln(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} + B$ | -0.528 2 | -0.624 4 | 0.096 2 | 0.543 6 | 0.697 7 | 0.154 1 | 0.993 ^{**} | 0.989 1 ^{**} |
| $y = A\Delta E + B$ | -0.141 7 | -0.140 7 | 0.001 | 3.558 5 | 3.544 8 | 0.013 7 | 0.996 4 ^{**} | 0.990 9 ^{**} |
| $y = A(-a^*/b^*) + B^{①}$ | 2.895 9 | 3.077 9 | 0.182 | 1.303 9 | 1.317 8 | 0.013 9 | 0.983 6 ^{**} | 0.982 1 ^{**} |

注：①参考文献^[6]方法拟合。

2.3 青菜叶绿素定标模型验证

为了验证定标模型的准确性，利用建立的基于青菜叶 ΔE 值的叶绿素含量的定标方程对纸盒包装青菜叶绿素含量进行预测，并将预测值和实测值进行比较(图 2)。

验证结果显示，应用本研究构建的基于青菜叶 ΔE 值的叶绿素含量的定标模型所获得的叶绿素含量预测值与实测值间均方根误差 RMSEP = 0.010 4，预测相关系数是 0.992 8，预测值和实测值具有很高的一致性，说明模型的拟合精确度较高。

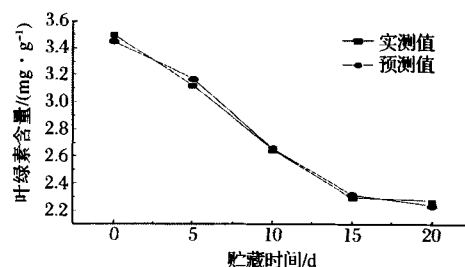


图2 青菜(纸盒中)叶绿素含量实测值和预测值(基于 ΔE 值)

Fig.2 Plot of predicted versus measured values of chlorophyll content of green vegetables stored at paper carton

3 结论

(1)使用青菜数码照片可以对其叶绿素含量进行检测,为青菜叶绿素含量高效、定量、无损检测提供了新方法。

(2)颜色参数 ΔE 可以作为快速预测青菜叶绿素含量的特征参数,基于 ΔE 的青菜叶绿素含量最佳定标模型为 $Cchl = -0.141\ 2\Delta E + 3.551\ 6$ ($R^2 = 0.990\ 9$)。

参 考 文 献

- [1] 关文强,陶晓彦,张娜,等. 高湿度冰箱对青菜和西芹的保鲜效果[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4):265-269.
- [2] 刘静波,殷涌光. 塑料包装袋透气性对保鲜蔬菜颜色的影响[J]. 中国食品学报, 2003, 3(1):48-52.
- [3] 杜锋,雷鸣,闫志农. 颜色信息识别在食品工业中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(3):80-83.

- [4] WU D, SUN D W. Colour measurements by computer vision for food quality control [J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 29(1):5-20.
- [5] GUNAWAN M I, BARRINGER S A. Green color degradation of blanched broccoli (brassica oleracea) due to acid and microbial growth [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2000, 24(3):253-263.
- [6] 许凤,杨震峰,裴娇艳,等. 基于颜色参数变化的青花菜叶绿素含量预测模型[J]. 食品科学, 2011, 32(13):54-57.
- [7] MANNINEN H, PAAKKI M, HOPIA A, et al. Measuring the green color of vegetables from digital images using image analysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2):1184-1190.
- [8] MOHAMMADI V, KHEIRALIPOUR K, GHASEMI-VARNAMKHAHI M. Detecting maturity of persimmon fruit based on image processing technique [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 184(8):123-128.
- [9] DU C-J, SUN D-W. Learning techniques used in computer vision for food quality evaluation: a review [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 72(1):39-55.
- [10] 蒋丽华. 基于计算机视觉技术的叶绿素含量检测系统[D]. 苏州:苏州大学, 2009.
- [11] 袁道军,刘安国,原保忠,等. 基于计算机视觉技术的油菜冠层营养信息监测[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12):174-179.
- [12] 杨敏文. 快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J]. 光谱实验室, 2002, 19(4):478-481.

Detection of chlorophyll content of green vegetables leaves based on image analysis technology

SUN Yu-lu, WANG De-hai*, ZHU Guo-jian

(College of Materials Science and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

ABSTRACT In order to explore the rapid methods detecting chlorophyll content of green vegetables during storage by the image analysis technology, the color parameters L^* , a^* , b^* , ΔL^* , Δa^* , Δb^* , $(\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$, ΔE value and chlorophyll content of green vegetables stored at PE bags, paper carton and without packing were determined by the image analysis technology, and chlorophyll content determined by Spectrophotometer method. In addition, the relationship model between chlorophyll content and color parameters were developed based on different function model ($y = Ax + B$, $y = A + B/x$, $y = A \ln x + B$ and $\ln(\ln y) = A \ln x + B$), respectively. The results show that the chlorophyll content and ΔE have better fitting effect using the function model $y = Ax + B$. Thus we developed the calibration model between ΔE and chlorophyll content by using image analysis technique, the correlation coefficient is 0.990 9, the root mean square error is 0.071 7; and we use the green vegetables leaf stored at paper carton as the prediction set, the correlation coefficient is 0.992 8, the root mean square error is 0.010 4. Thus we can calculate the chlorophyll content based on color parameter ΔE . Also it is a beneficial exploration for rapid, nondestructive detection method of chlorophyll content and vegetables preservation research.

Key words green vegetables; color parameters; image analysis; the chlorophyll content