

基于图像分析的双孢菇(白菇)白度测定方法

姬江涛^{1,2}, 孙经纬¹, 赵凯旋^{1,2,3*}, 金鑫^{1,2}, 马 溟¹, 朱雪峰¹

¹ 河南科技大学农业装备工程学院 农业工程系 河南洛阳 471003

² 河南省机械装备先进制造协同创新中心 河南洛阳 471003

³ 河南省智能农业装备技术国际联合实验室 河南洛阳 471003)

摘要 双孢菇的白度是评价其新鲜度和品质的重要指标。为实现双孢菇白度的准确评价,本文提出一种基于图像分析的双孢菇(白菇)白度测定方法。通过搭建 D65 标准光源成像系统,构建非线性白度标定模型,实现了图像 RGB 数值到 CIE-XYZ 三刺激值的转换,采用 CIE 甘茨白度公式实现白度的准确测定。使用 8 种灰度等级的色卡结合色度仪对图像系统进行标定,测定不同白度等级的双孢菇。结果表明,图像分析法与色度仪测量结果具有较高的相关性($r=0.99$),测量色差 ΔE_{ab}^* < 2。对于 4 组不同白度等级的双孢菇,各组间图像分析结果具有显著差异性($P < 0.01$)。利用图像分析不同贮藏条件下双孢菇的白度值,发现双孢菇的贮藏时间与白度值之间具有显著相关性,说明图像分析白度值可用于定量评价双孢菇的新鲜度。

关键词 图像分析; 双孢菇; 白度; 新鲜度

文章编号 1009-7848(2022)01-0289-09 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.031

白度是基于目视感知而判断反射物体所能显白的程度。双孢菇白度是其新鲜度和品质的重要评价指标,其受生长环境、杂菌感染、贮藏环境等诸多因素影响^[1-3]。双孢菇工厂化生产过程中,白度评级指标主要依靠人工观察获取,存在主观性强,标准化程度低等缺点。人工白度评级已不能满足农产品标准化、精细化的分级要求。急需建立一种标准化的双孢菇白度测量方法,细化双孢菇白度等级。

白度测量是光度测量的一种,主要应用在纺织、化工、造纸、食品、医疗等行业^[4-7]。常用的白度公式有 3 种^[8-10],分别为:CIE 甘茨白度公式、蓝光白度公式、亨特白度公式。目前,常用的白度测量方法主要依靠人工比色、白度测量仪和分光光度计^[11-12]。受人工比色精度和仪器测量尺寸限制,对非平面和大面积的白度测量仍然存在较大局限性。

为了更好地描述白度,科研人员先后开发了多种白度指数和白度测量方法。Maria 等^[13]通过临

床物理试验,比较 CIE-LAB 色彩系统中的 9 种白度指数、2 个泛黄指数和白色色调,开发了基于 CIE-LAB 的牙齿白度指数。David 等^[14]研究不同光源照射下白度感知的量化问题,研究一种适用于高色温光源的 CIE 白度测量方法,并提出一种适用于任何色温光源的白度测量方法。Minchen 等^[15]和 Ma 等^[16]根据光源中光谱含量不同引起的白度变化,提出在任意光源下,表面颜色的白度可以通过色度适应变换转换为 D65 光源下的样品色度,实现任意光源下的 CIE 白度测量。以上研究既有特定光源下对 CIE 白度公式的改进,又有不同光源下 CIE 白度公式的普适性研究,对双孢菇的白度测量具有借鉴意义。

随着图像分析与处理技术的发展,获取简单、储存方便的彩色 RGB 图像逐渐在表面颜色测量中崭露头角。Briones 等^[17]通过机器视觉系统和图像分析,在牛奶巧克力片的贮藏过程中,从图像中提取包括白度在内的 8 个特征,对巧克力质量进行评估。Luo 等^[18]分别利用临床观察法和图像分析法对牙齿白度进行对比分析,优化了原始的 CIE 甘茨白度公式,开发出新的白度公式(WIO),试验结果表明 WIO 在预测牙齿白度方面表现良好。Liu 等^[19]将 RGB 颜色坐标转换为表示颜色亮度和色度的 YCrCb 颜色坐标,开发出玉米籽粒的白度

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51975186);国家重点研发计划项目(2019YFE0125100);河南省高等学校重点科研项目计划(19A416003)

作者简介: 姬江涛(1965—),男,博士,教授

通信作者: 赵凯旋 E-mail: kzhaohaust@163.com

定义,以及一种快速、准确且易于执行的玉米白度测量方法。现有文献利用图像分析实现了表面白度测量,开发的白度定义和白度公式虽不具备普适性,但可为双孢菇白度测量提供参考。目前对于双孢菇白度定量测定的研究尚未见报道。

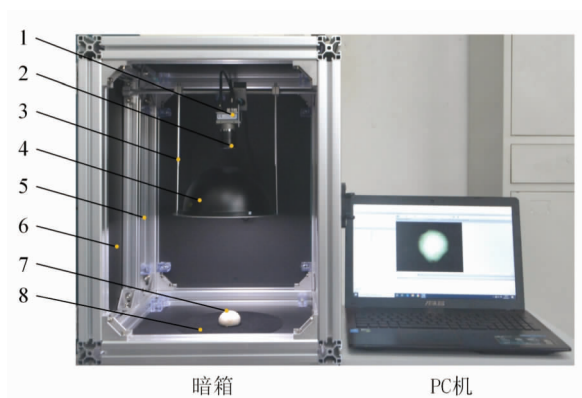
在现有技术和方法的基础上,本文提出一种基于图像分析的双孢菇(白菇)白度测量方法。首先,搭建标准 D65 光源成像系统,并以色度仪测量结果为标准,构建图像分析的非线性白度标定模型,得到图像 RGB 数值与 CIE-XYZ 三刺激值之间的转换关系。然后,使用该成像系统对不同白度等级的双孢菇进行白度测定,研究双孢菇白度与贮藏时间之间的相关性,验证白度测定值用于评价双孢菇新鲜度的可行性。

1 材料与方法

1.1 图像采集

图像采集系统主要包括工业相机(DALSA, G3-GC10-C1280IF, Canada)和光源。相机通过千兆以太网连接到 PC 机(Intel® Core™ i5-7500, 3.40 GHz, 内存 8 GB)。其中,工业相机配备定焦镜头(GXTECH, GX-2514-10M, Japan), 焦距 25 mm;光源为漫反射积分球光源,其光学性能接近 D65 标准光源,由 180 个 LED 灯珠(NICHIA, 2385-6500K, Japan)组合而成,功率 18 W,色温 6 500 K,显色指数>90%,均匀度>90%。工业相机和光源安装在金属支架上,安装高度分别为 20 cm 和 35 cm,金属支架安装在暗箱内,暗箱由铝合金框架和黑色亚克力板搭建,尺寸为长 45 cm、宽 45 cm、高 60 cm,暗箱内部底面铺放黑色吸光布。工业相机位于光源正上方,通过光源进光口与暗箱底面中心点垂直,图像采集系统如图 1 所示。

工业相机工作在手动模式下,通过 DALSA SDK 软件采集样本的 8 位彩色 RGB 图像,分辨率为 1280×1024,并以高分辨率和高质量的 PNG 格式储存。其中,镜头光圈 $f=3.6$,曝光时间 $1/100$ s,自动白平衡模式。将图像导入 Matlab 2016a 软件以提取 8 位 RGB 值,进行动态白平衡以校准颜色。为保证图像采集的均匀性和可重复性,每次采集图像时,样本均位于相机视野中心,并且样本面积不超过相机视野面积的 50%,克服了相机镜头



注:1. DALSA 工业相机;2. GXTECH 工业镜头;3. 金属支架;4. 积分球光源;5. 铝合金框架;6. 亚克力板材;7. 双孢菇;8. 吸光布。

图 1 图像采集系统

Fig.1 Image acquisition system

在将光传输到图像传感器时的位置差异。

1.2 动态白平衡

白平衡是描述红、绿、蓝三基色混合生成白色精确度的指标,它直接决定了相机色彩还原程度。为提高样本图像的色彩还原度,对样本图像的 RGB 三通道值进行动态白平衡。动态白平衡步骤如下:

1) 选取标准色卡若干张,利用图像采集系统(光圈 $f=3.6$,曝光时间 $1/100$ s,自动白平衡模式)采集色卡图像,并获取色卡图像 RGB 三通道值。

2) 利用统计学软件将色卡的标称 RGB 值(R_R, G_R, B_R)和图像 RGB 值(R_I, G_I, B_I)对应起来,将标称 RGB 值减去图像 RGB 值记作差值 $\Delta R, \Delta G, \Delta B$,分别绘制差值曲线 $R_I - \Delta R, G_I - \Delta G, B_I - \Delta B$ 。

3) 将 Matlab 2016a 输出的样本 RGB 值(R_S, G_S, B_S)分别对应到 3 条差值曲线,并计算其差值,动态白平衡之后的样本 RGB 值(R, G, B)表示为公式(1~3):

$$R = R_S + \Delta R \quad (1)$$

$$G = G_S + \Delta G \quad (2)$$

$$B = B_S + \Delta B \quad (3)$$

1.3 白度

为了有效、定量计算白度,长期以来出现了大量的白度计算公式。本文选择国际照明委员会(CIE)推荐的甘茨白度公式,如公式(4)所示,它被

广泛用于表面颜色行业,并被国际标准化组织(ISO)所采用。

$$WI=Y+800\times(x_n-x)+1700\times(y_n-y) \quad (4)$$

式中, Y 和 (x,y) ——在 CIE 标准 D65 光源下样品的亮度因子和色度坐标; (x_n,y_n) ——CIE 标准 D65 光源下标准白板的色度坐标。其中,色度坐标 (x,y) 定义为:

$$x=\frac{X}{X+Y+Z} \quad (5)$$

$$y=\frac{Y}{X+Y+Z} \quad (6)$$

式中, X,Y 和 Z ——CIE-XYZ 系统下的三刺激值。

RGB 数值与 CIE-XYZ 三刺激值的转换是图像分析法进行白度测量的关键。此外,图像感兴趣区域的划分也决定了白度测量模型的精度。对于双孢菇图像,为减少图像边缘虚化造成的白度测量误差,对图像中双孢菇轮廓内切圆进行腐蚀处理,把腐蚀后的内切圆作为感兴趣区域。对于标准色卡,选取色卡的内切圆作为感兴趣区域。将内切圆的 RGB 数值输出并转换为 CIE-XYZ 三刺激值,计算内切圆所有像素点白度值,取内切圆所有像素点白度均值作为感兴趣区域的白度值。

1.4 RGB 数值与 CIE-XYZ 三刺激值转换模型

对于数字相机,物体反射光照射在电荷耦合器件(CCD)传感器,经模数转换和内置处理电路,并结合相机参数及白平衡情况,实现数字图像的 RGB 三通道值计算。由于 CCD 传感器所用彩色滤光片的光谱特性与 CIE 标准观察者的匹配函数不同,而且与设备相关。为了使用甘茨白度公式,任何图像的颜色量化都必须转换为 CIE 三刺激值。双孢菇颜色范围很小,而且本文已经搭建了近似于 CIE 标准 D65 光源的照明系统,因此由照明条件引起的测量误差相对较小。

为了得到计算甘茨白度所需的参数,采用的方法与将数字设备中的 RGB 三通道值转换为 CIE 三刺激值方法相似^[20]。根据国际新闻电信委员会-北美数字新闻照片参数记录(IPTC-NAA)标准,设备相关的 8-bit RGB 数值($R_{8bit}, G_{8bit}, B_{8bit}$)与设备无关 RGB 数值($R_{SRGB}, G_{SRGB}, B_{SRGB}$)可以通过式(7)进行拟合:

$$R_{SRGB}=\left[\frac{(R_{8bit}/255+0.055)}{1.055}\right]^\beta \quad (7)$$

式中, G_{SRGB} 和 B_{SRGB} 的表达式与 R_{SRGB} 完全相似, β 值由成像系统决定。

根据相关文献^[21-22],与设备无关的归一化 RGB 值可以通过式(8)转换为归一化的 CIE-XYZ 三刺激值(X_s, Y_s, Z_s)。

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{SRGB} \\ G_{SRGB} \\ B_{SRGB} \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过进一步采用 IPTC-NAA 标准,可以将归一化的 CIE-XYZ 三刺激值(X_s, Y_s, Z_s),线性转换为 CIE-XYZ 三刺激值,如公式(9)所示:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中, α ——待标定常数。

为了确定公式(7)和(9)中的 α 和 β 值,利用标准白板(复享光学,STD-WS,中国)、色度仪(纸邦自动化,ZB-A,中国)进行标定试验,对标准白板上参考点坐标的三刺激值 X_n 和 Z_n 进行估计,以降低误差。由于数字图像的 RGB 数值与表色系统(CIE-RGB、CIE-XYZ)三刺激值的转换关系并不总是相同,它取决于成像系统的照明条件和相机参数。因此,将数字图像的 RGB 数值与 CIE- $L^*a^*b^*$ 三刺激值相关联。

为了估计标准白板上参考点坐标的三刺激值 X_n, Z_n ,由 CIE- $L^*a^*b^*$ 空间定义^[23]得到:

$$L^*=116\times(Y/Y_n)^3-16 \quad (10)$$

$$a^*=500\times[(X/X_n)^{1/3}-(Y/Y_n)^{1/3}] \quad (11)$$

$$b^*=200\times[(Y/Y_n)^{1/3}-(Z/Z_n)^{1/3}] \quad (12)$$

式中, L^*, a^*, b^* ——CIE- $L^*a^*b^*$ 空间的三通道值; X, Y, Z ——样本在 CIE-XYZ 空间的三刺激值; X_n, Y_n, Z_n ——标准白板在 CIE-XYZ 空间的三刺激值。

由公式(10)将 CIE- $L^*a^*b^*$ 色度坐标中的 L^* 值链接到 CIE-XYZ 色度坐标中的 Y 值,得到:

$$Y_{IA}=Y_n\times[(L^*+16)/116]^3 \quad (13)$$

式中,下标 IA 表示图像分析测量结果。注意,公式(13)的有效性要求不等式 $Y/Y_n>0.008856$,这

适用于双孢菇色度范围。

由公式(7),(8),(9)和(13)可得:

$$\alpha = \frac{[(100 \times (8.621 \times 10^{-3} L^* + 0.1379))^3] / [(0.2126 \times (3.717 \times 10^{-3} R_{86i} + 0.052)^\beta + 0.7152 \times (3.717 \times 10^{-3} G_{86i} + 0.052)^\beta + 0.0722 \times (3.717 \times 10^{-3} B_{86i} + 0.052)^\beta]}{(14)}$$

最后,由公式(9),(10),(11),(12)可以将参考点三刺激值 X_n 和 Z_n 的参考值计算为:

$$(X_n)_{IA} = \alpha X_S \times \left(\frac{a^*}{500} + \frac{L^* + 16}{116} \right)^{-3} \quad (15)$$

$$(Z_n)_{IA} = \alpha Z_S \times \left(\frac{L^* + 16}{116} - \frac{b^*}{200} \right)^{-3} \quad (16)$$

利用搭建的成像系统和色度仪分别测得参考点的 RGB 三通道值 ($R_{86i}, G_{86i}, B_{86i}$) 和 CIE- $L^*a^*b^*$ 空间的三通道值 (L^*, a^*, b^*)。其中,公式(15)和(16)中的 $(X_n)_{IA}$ 和 $(Z_n)_{IA}$ 的值取决于公式(9)中的 α 值,由公式(14)可知 α 值又取决于 β 值。为了确定 α 和 β 的最优值,选取 5 个参考点进行标定,使 $(X_n)_{IA}$ 和 $(Z_n)_{IA}$ 的标准偏差之和最小化,得到 α 和 β 的最优值,确定该成像系统下图像 RGB 数值与 CIE-XYZ 三刺激值的转换关系。

1.5 验证方法

1.5.1 色差评估 为了验证图像分析法确定 CIE-XYZ 三刺激值 (X, Y, Z) 的正确性,选取 8 种灰度等级的标准色卡(灰色逐渐至白色),利用图像分析法测量每个颜色的 CIE- $L^*a^*b^*$ 三刺激值和白度值 W ,并将测量结果与色度仪测量结果进行比较。假设色度仪测量数据是真实的,选择 $L^*a^*b^*$ 色差 (ΔE_{ab}^*) 评估图像分析的准确性^[24],并统计白度误差 ΔW ,对两种方法测得的白度值进行相关性分析。 ΔE_{ab}^* 、 ΔW 和 Pearson 相关系数分别表示为:

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(L_{CO}^* - L_{IA}^*)^2 + (a_{CO}^* - a_{IA}^*)^2 + (b_{CO}^* - b_{IA}^*)^2} \quad (17)$$

$$\Delta W = \left| \frac{W_{CO} - W_{IA}}{W_{CO}} \right| \times 100\% \quad (18)$$

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\sqrt{N \sum (x_i)^2 - \sum (x_i)^2} \sqrt{N \sum (y_i)^2 - \sum (y_i)^2}} \quad (19)$$

式中,下标 CO 表示通过色度仪测得的真实值;下标 IA 表示图像分析测量结果; x_i ——图像分

析法测到的白度值; y_i ——色度仪测得的白度值。

1.5.2 双孢菇白度测量 为了验证本方法的双孢菇白度测量结果,在一个商业化的农场中(奥吉特生物科技有限公司,河南洛阳),采集 400 个双孢菇样本。按照双孢菇人工白度评级标准^[25-26],并结合双孢菇工厂化采收分级需求,将双孢菇样本放置在标准光源箱(D65 标准光源)内进行人工视觉“白度值”分级,分级依据见表 1。选取每个等级的双孢菇各 40 个,采用图像分析法对已知等级的双孢菇进行白度值测量,并统计测量结果。随后,将每个等级的双孢菇分成 20 个一组,分别放置在冷藏环境【温度 $(3 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $90\% \pm 5\%$ 】和常温环境【温度 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$,湿度 $55\% \pm 5\%$ 】中^[27-29],每 24 h 利用图像分析法测量 1 次双孢菇白度值,分析白度值变化规律。

表 1 白度人工视觉分级依据

Table 1 Artificial visual classification basis for whiteness

白度等级	特征
A	纯白,无变色
B	洁白,轻微变色
C	乳白色,存在条状褐变
D	黄褐色,存在区域性褐变

2 结果与分析

2.1 动态白平衡差值曲线

图 2 为动态白平衡中差值 $\Delta R, \Delta G, \Delta B$ 随 RGB 测量值 R_t, G_t, B_t 的变化趋势(差值曲线)。从图中可以看出,自动白平衡之后,相机 RGB 三通道的感光准确性仍然较差,证实了动态白平衡的必要性。进一步分析数据可知,对于 R 通道和 B 通道,测量值小于 160 时,相机获取的测量值小于标称值,测量值大于 160 时,相机获取的测量值大于实际值;上述现象在 G 通道同样出现,然而临界点为 100,说明工业相机对 G 通道的感光程度大于 R 通道和 B 通道。根据差值曲线进行动态白平衡,可实现双孢菇色彩还原,保证了白度测量结果的准确性。

2.2 α, β 最优值和标准白板色度坐标

标定试验时,设定 β 的取值范围为 $[-10, 10]$,图 3 为标准白板上参考点的 $(X_n)_{IA}$ 与 $(Z_n)_{IA}$ 标准

差之和随 β 值变化曲线。由图 3 可知,当 $(X_n)_{IA}$ 与 $(Z_n)_{IA}$ 标准差之和最小时, β 最优值为 2.55。动态白平衡之后,选取的 5 个参考点 R, G, B 平均值分别为 245, 246, 246, 色度仪测得 CIE- $L^*a^*b^*$ 三刺激

值 L^* 的均值为 98.14, 由公式 (14) 可知, α 最优值为 104.17; 由公式 (7~9) 可知, 该成像系统中标准白板的 CIE-XYZ 三刺激值 X, Y, Z 分别为 90.40, 95.31, 104.00, 色度坐标 (x_n, y_n) 为 (0.3120, 0.3290)。

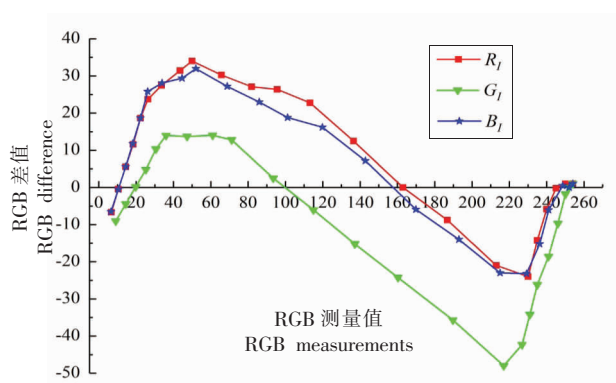


图 2 $\Delta R, \Delta G, \Delta B$ 随 RGB 测量值的变化趋势(差值曲线)
Fig.2 Variation trend of $\Delta R, \Delta G$ and ΔB with RGB measurements (difference curve)

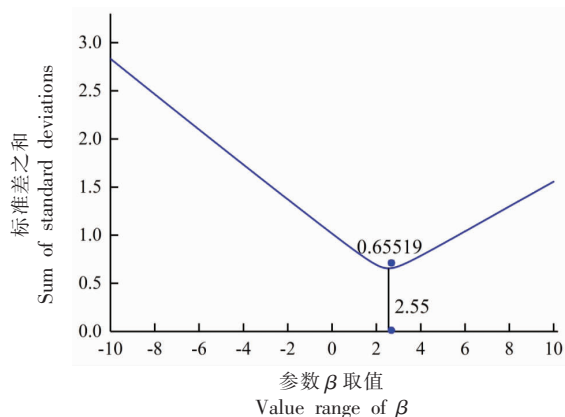


图 3 参考点的 $(X_n)_{IA}$ 与 $(Z_n)_{IA}$ 标准差之和随 β 值变化
Fig.3 The sum of the standard deviations of $(X_n)_{IA}$ and $(Z_n)_{IA}$ at the reference point varies with the β value

2.3 色差评估结果

表 2 为色度仪和图像分析法测得的 8 种标准色的 CIE- $L^*a^*b^*$ 值和白度值 W , 图像分析法测量的平均色差 ΔE^*_{ab} 为 1.25, 通常色差可接受范围为 $\Delta E^*_{ab} < 2$, 这表明: 在该成像系统下, 相机 RGB 数值与 CIE-XYZ 三刺激值的转换关系可靠且误差小。对于同一种颜色, 色度仪测得的白度值 W_{CO} 均小于图像分析法测得的白度值 W_{IA} , 这可能是由于光照差异所致。对于不同颜色, 白度误差最大值为 23.32%, 最小值为 6.08%; 随着白度值的增加, 白

度差 ΔW 逐渐减小, 且两种方法测得的白度值显著相关, Pearson 相关系数 r 为 0.9913, 说明图像分析法能够实现白度解析和区分, 白度值越高测量准确性越高。

从表 2 可以看出, 色度仪测得的亮度因子 L^*_{CO} 均小于图像分析法测得的亮度因子 L^*_{IA} , 这也加强了以上关于光照差异的结论。当白度值 $W_{CO} < 60$ 时(如 CBCC 1704, 1702, 1701, 0921), 白度值 W_{CO} 、 W_{IA} 随亮度因子 L^* 的增大而增大; 当白度值 $W_{CO} < 60$ 时(如 CBCC 1631, 0391, 1321, 0431), 亮度因

表 2 色度仪和图像分析法测得 8 种标准色的 CIE- $L^*a^*b^*$ 值和白度值 W 统计

Table 2 CIE- $L^*a^*b^*$ value and whiteness value W statistics of 8 standard colors measured by colorimeter and image analysis method

颜色属性	色度仪(D65/10°)				图像分析				色差 ΔE^*_{ab}	白度差 $\Delta W/\%$
	L^*_{CO}	a^*_{CO}	b^*_{CO}	W_{CO}	L^*_{IA}	a^*_{IA}	b^*_{IA}	W_{IA}		
CBCC 1704	66.31	-0.79	-0.32	33.02	67.61	-1.36	0.08	36.28	1.47	9.87
CBCC 1702	74.75	-0.44	0.78	38.50	76.51	-0.33	0.48	47.48	1.79	23.32
CBCC 1701	81.58	-0.27	0.40	52.61	82.90	-0.09	-0.34	63.07	1.52	19.88
CBCC 0921	85.08	1.34	0.40	59.20	85.98	0.92	-0.28	68.72	1.20	16.08
CBCC 1631	93.21	-1.64	2.46	67.36	93.76	-1.42	1.64	76.42	1.01	13.45
CBCC 0391	89.32	0.81	-1.24	76.16	90.21	1.30	-1.32	82.42	1.02	8.22
CBCC 1321	93.84	0.36	0.68	76.87	94.63	0.53	0.76	82.65	0.81	7.52
CBCC 0431	90.98	0.40	-2.86	86.97	92.00	0.97	-2.61	92.26	1.19	6.08

子 L 对白度值 W_{CO} 、 W_{L} 的影响作用降低,颜色通道 a^* 、 b^* 对白度值 W_{CO} 、 W_{L} 的影响作用提高,这表明:白度值变化是所有三刺激值的综合影响,在白度评价时应避免使用单一三刺激值进行白度量化。

2.4 双孢菇白度测量结果

利用图像分析法分别对A、B、C、D等级的双孢菇进行白度值测量,统计数据如图4所示。每个等级的双孢菇白度值分布区间分别为[76.60, 94.15], [67.92, 82.35], [54.36, 68.32], [39.78, 55.29], 中位数分别为85.50, 75.36, 61.40, 46.67, 各组数据之间具有显著差异($P < 0.01$)。数据分析可知,每个等级的双孢菇白度均值分别为84.01, 74.88, 61.53, 47.27, 标准差分别为5.50, 3.64, 4.10, 4.85, 白度均值与中位数接近,各等级白度值标准差也接近。从图中可以看出,随双孢菇白度等级下降,图像分析法测得的白度值减小,除A级和B级双孢菇白度值分布区间存在轻微重叠以外,其余各等级的双孢菇白度值区分明显,说明图像分析法能够区分不同白度等级的双孢菇,并对其白度值进行测量。

2.5 白度值随贮藏时间的变化

在冷藏和常温环境下,通过图像分析法测得的双孢菇白度平均值随贮藏时间变化如图5所示。随着贮藏时间的延长,双孢菇白度值逐渐降低。统计分析表明,常温环境中贮藏120 h,不同等级的双孢菇白度值降幅差别较大,分别为41.75,

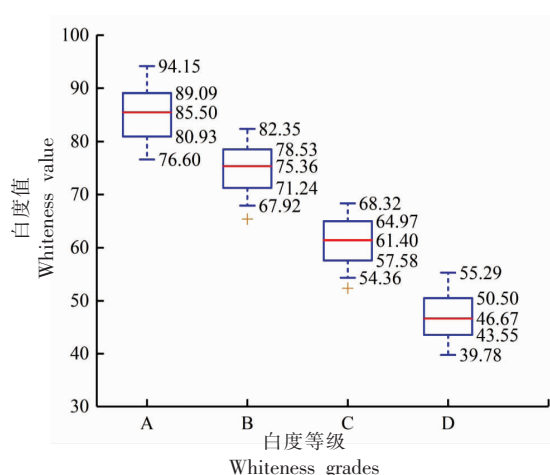


图4 不同等级的双孢菇白度值统计

Fig.4 The whiteness value statistics of different grades of *Agaricus bisporus*

36.01, 33.86, 24.96; 冷藏环境中贮藏120 h,不同等级的双孢菇白度值降幅稳定,分别为19.84, 22.97, 17.72, 18.10。此外,常温环境中,随着贮藏时间的延长,白度值迅速下降后逐渐放缓;当贮藏时间超过72 h,双孢菇表面失水形成保护膜,白度值基本趋于稳定,双孢菇开始出现脱水萎缩、开伞现象,达不到食用标准。冷藏环境中,双孢菇白度值下降速度较常温环境缓慢,当贮藏时间达到120 h,双孢菇尚未出现脱水萎缩、开伞现象。这说明双孢菇适宜于低温环境保存,且环境湿度对双孢菇新鲜度保持至关重要。

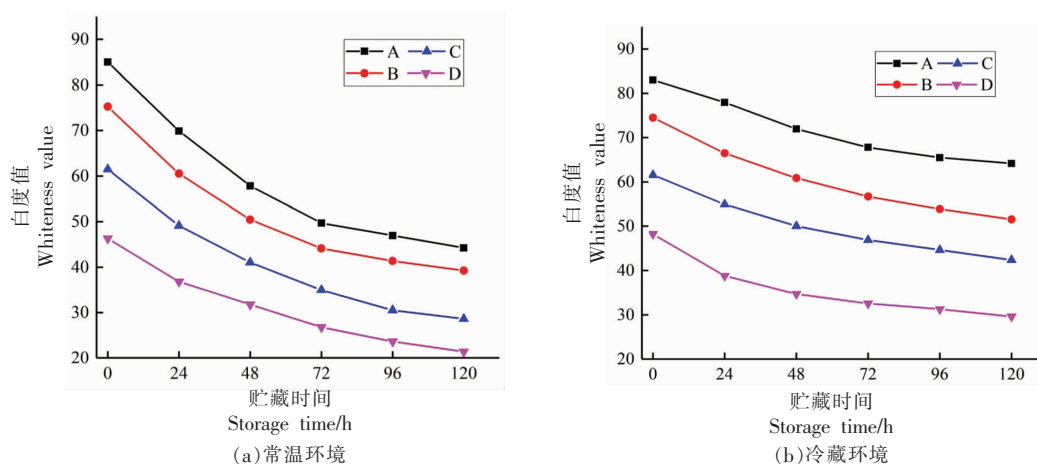


图5 不同环境下双孢菇白度值随时间变化规律

Fig.5 The whiteness value of *Agaricus bisporus* varies with time in different environments

3 结论

1) 搭建了双孢菇图像采集系统,使用LED灯珠实现了D65标准光源。研究了成像系统的色差曲线,提出了RGB图像动态白平衡校正方法,可实现双孢菇色彩准确还原,保证了后续白度测量结果的准确性。

2) 提出了一种图像分析的白度标定模型和方法,能够对双孢菇的整体白度进行精准测定,图像分析法与白度仪测量结果的相关系数达到0.9913,测量色差 ΔE_{ab}^* 小于2。

3) 对4种白度等级的双孢菇进行试验,结果表明各组间成像系统的白度测量结果具有显著性差异。双孢菇摘后贮藏时间与所测得的白度值具有显著相关性,白度值能够用于定量评价双孢菇的新鲜度。

参 考 文 献

- [1] 王相友,张惠,李玲,等.高氧气调后续效应对双孢蘑菇货架品质的影响[J].农业机械学报,2017,48(7):309-316.
WANG X Y, ZHANG H, LI L, et al. Influences of high oxygen atmosphere follow-up effect on shelf-life of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 309-316.
- [2] 孙涵,李玲,王相友.双孢菇高氧动态气调保鲜参数优化[J].农业工程学报,2016,32(24):282-290.
SUN H, LI L, WANG X Y. Parameter optimization of high O₂ dynamic controlled atmosphere storage of *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 282-290.
- [3] EASTWOOD D C, HERMAN B, NOBLE R, et al. Environmental regulation of reproductive phase change in *Agaricus bisporus* by 1-octen-3-ol, temperature and CO₂[J]. Fungal Genetics and Biology, 2013, 55(55): 54-66.
- [4] TUTAK M, DEMIRYÜREK O U, BULUT Ü, et al. Analysis of the CIE whiteness and whiteness tint of optically whitened cellulosic fabrics[J]. Textile Research Journal, 2011, 81(1): 58-66.
- [5] LANNING S, SIEBENMORGEN T. Effects of pre-harvest nighttime air temperatures on whiteness of head rice[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(3): 218-222.
- [6] 黄星奕,吴守一,方如明,等.遗传神经网络在稻米垩白度检测中的应用研究[J].农业工程学报,2003,19(3):137-139.
HANG X Y, WU S Y, FANG R M, et al. Inspection of chalk degree of rice using genetic neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Engineering, 2003, 19(3): 137-139.
- [7] 许长海,靳子昂,陈文华.荧光增白纺织品的白度评价[J].纺织学报,2014,35(10):96-99.
XU C H, JIN Z A, CHEN W H. Whiteness evaluation of fluorescent whitened textiles[J]. Journal of Textile Research, 2014, 35(10): 96-99.
- [8] 张清文,刘忠.关于白度、ISO亮度与D65亮度[J].中国造纸,2005,24(6):56-58.
ZHANG Q W, LIU Z. How to correctly understand the terms of whiteness, ISO brightness and D65 brightness[J]. China Pulp & Paper, 2005, 24(6): 56-58.
- [9] 马诗宁.物体表面色和照明环境的白度研究[D].杭州:浙江大学,2017.
MA S N. Investigation on whiteness of object surface color and illuminant color[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] 曾珊珊.牙齿白度测量系统的研究[D].杭州:中国计量学院,2014.
ZENG S S. Research on the measurement system of teeth whiteness[D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014.
- [11] 张巧杰,王一鸣,凌云.稻米品质检测装置研究[J].仪器仪表学报,2006,27(6):564-568.
ZHANG Q J, WANG Y M, LING Y. Detection technology and an apparatus for grain quality[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 564-568.
- [12] 宁凡,卢勇跃,蒋水秀.基于光电积分法的色度测定仪的研制[J].光学仪器,2009,31(1):65-68.
NING F, LU Y Y, JIANG S X. The development of color meter based on photoelectric integration[J]. Optical Instruments, 2009, 31(1): 65-68.
- [13] MARIA D M P, GHINEA R, JOSE RIVAS M, et al. Development of a customized whiteness index for dentistry based on CIELAB color space[J]. Dental

- Materials Official Publication of the Academy of Dental Materials, 2016, 32(3): 461-467.
- [14] DAVID A, KRAMES M R, HOUSER K W. Whiteness metric for light sources of arbitrary color temperatures: Proposal and application to light-emitting-diodes[J]. Optics Express, 2013, 21(14): 16702-16715.
- [15] MINCHEN W, SIYUAN C, HSIN-POU H, et al. Development of a whiteness formula for surface colors under an arbitrary light source[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18171.
- [16] MA S, WEI M, LIANG J, et al. Evaluation of whiteness metrics[J]. Lighting Research & Technology, 2016, 50(3): 429-445.
- [17] BRIONES V, AGUILERA J M. Image analysis of changes in surface color of chocolate[J]. Food Research International, 2005, 38(1): 87-94.
- [18] LUO W, WESTLAND S, ELLWOOD R, et al. Development of a whiteness index for dentistry[J]. Journal of Dentistry, 2009, 37: e21-e26.
- [19] LIU J, PAULSEN M R. Corn whiteness measurement and classification using machine vision [J]. Transactions of the ASAE, 2000, 43(3): 757-763.
- [20] IPTC. International press telecommunications council (IPTC) and newspaper association of america (NAA) digital newsphoto parameter record version4 [EB/OL]. International Press Telecommunications Council and Newspaper Association of America, 1997: 36-39. <https://www.iptc.org/std/IIM/4.1/specification/Dnprv4.pdf>
- [21] 喻钧, 刘飞鸿, 王占锋, 等. 基于光谱色的迷彩主色提取方法[J]. 兵工自动化, 2014, 33(1): 72-75.
- YU J, LIU F H, WANG Z F, et al. Extraction method of dominant colors of pattern painting based on spectrum colors [J]. Ordnance Industry Automation, 2014, 33(1): 72-75.
- [22] 康文科, 张定华, 余隋怀. 色彩分析仪的色彩转换关键方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(1): 51-53.
- KANG W K, ZHANG D H, YU S H. Study on key algorithm for color conversion based on color analyzer[J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(1): 51-53.
- [23] JOINER A, LUO W. Tooth colour and whiteness: A review[J]. Journal of Dentistry, 2017, 67(s1): 3-10.
- [24] GUAN Y H, LATH D L, LILLEY T H, et al. The measurement of tooth whiteness by image analysis and spectrophotometry: A comparison[J]. Journal of Oral Rehabilitation, 2005, 32(1): 7-15.
- [25] 中华人民共和国农业部. 双孢蘑菇等级规格: NY/T 1790-2009[S]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 3-4.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *Agaricus bisporus* grade specification: NY/T 1790-2009[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2009: 3-4.
- [26] 中华人民共和国农业部. 双孢蘑菇: NY/T 224-2006 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2006: 3-5.
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *Agaricus bisporus*: NY/T 224-2006[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006: 3-5.
- [27] 刘战丽, 王相友. 双孢蘑菇贮藏品质评价方法及适收期研究[J]. 食品科技, 2015, 40(6): 42-46.
- LIU Z L, WANG X Y. Quality evaluation and suitable harvest date of mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Science and Technology, 2015, 40(6): 42-46.
- [28] TAGHIZADEH M, GOWEN A, WARD P, et al. Use of hyperspectral imaging for evaluation of the shelf-life of fresh white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) stored in different packaging films[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(3): 423-431.
- [29] 葛林梅, 邵海燕, 毛金林, 等. 不同包装方法对低温贮藏双孢蘑菇品质的影响[J]. 中国食品学报, 2009, 9(3): 129-134.
- GE L H, GAO H Y, MAO J L, et al. Effects of different package method on the quality of *Agaricus Bisporus* during low temperature storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2009, 9(3): 129-134.

Whiteness Measurement Method of *Agaricus bisporus* (White Mushroom) Based on Image Analysis

Ji Jiangtao^{1,2}, Sun Jingwei¹, Zhao Kaixuan^{1,2,3*}, Jin Xin^{1,2}, Ma Hao¹, Zhu Xuefeng¹

(¹Department of Agricultural Engineering, College of Agricultural Equipment Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, Henan

²Collaborative Innovation Center of Machinery Equipment Advanced Manufacturing of Henan Province,

Luoyang 471003, Henan

³Henan International Joint Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment Technology, Luoyang 471003, Henan)

Abstract The whiteness of *Agaricus bisporus* is an important index to evaluate its freshness and quality. In order to accurately evaluate the whiteness of *Agaricus bisporus*, a method based on machine image analysis was proposed. The imaging system of D65 standard light source is built, and the nonlinear whiteness calibration model is constructed. The conversion from RGB value to CIE-XYZ tristimulus value is realized, and then CIE Ganz whiteness formula is used to realize the accurate measurement of whiteness. The image system was calibrated by using 8 color cards with different gray levels in combination with a colorimeter, and the *Agaricus bisporus* with different whiteness grades were measured. The results showed that there was a high correlation between the results of image analysis and colorimeter ($r=0.99$), and the color difference $\Delta E_{ab}^* < 2$. For the four groups of *Agaricus bisporus* with different whiteness levels, the measurement results of image analysis were significantly different ($P < 0.01$). At the same time, the whiteness value of *Agaricus bisporus* under different storage conditions was measured by image analysis. It was found that there was a significant correlation between the storage time and the whiteness value of *Agaricus bisporus*, which indicated that the whiteness value determined by image analysis can be used to quantitatively evaluate the freshness of *Agaricus bisporus*.

Keywords image analysis; *Agaricus bisporus*; whiteness; freshness