

高等植物叶片色域的理论研究

程晓舫, 董金一, 范学良, 丁金磊

(中国科学技术大学热科学和能源工程系, 合肥 230026)

[摘要] 利用叶绿素和类胡萝卜素的经典吸收光谱以及植物叶片中不含色素的其他物质成分的光谱, 分别求得其在 CIE1931 色品图中的理论坐标, 并根据色度学中的加法混色原理确定出高等植物叶色的理论域范围。实验数据与理论相吻合。

[关键词] 高等植物; 色素; 吸收光谱; 色度坐标; 色域

[中图分类号] Q-334 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)12-0066-04

植物的叶色可用来研究植物生长状况、农作物产量和农产品品质, 并为农作物施肥、植物病理诊断等提供科学依据。植物叶子呈现的颜色是叶子中各种色素的综合表现, 而高等植物中主要含有叶绿素和类胡萝卜素两大类色素, 它们的比例和对光的选择吸收是产生叶色的主要原因^[1]。从色度学角度出发, 通过理论计算得出叶子的颜色区域, 依此试图利用一般彩色记录装置记录的叶色数据^[2-4], 为探索单叶或作物群体的非接触式、远距离、无损伤测定植物色素含量^[5]的新方法提供理论基础。

光谱功率分布为 $\varphi(\lambda)$ 的颜色可由色系数方程给出定量描述,

$$\begin{cases} X = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z = k \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 是 CIE1931 标准色度观察者光谱三刺激值; k 为归化系数。在色度学中通常用颜色的各自分量在 (X, Y, Z) 总量中的相对比例来表示颜色,

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z}, \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z}, \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \end{aligned} \quad (2)$$

称 x, y 和 z 为某一颜色的色品坐标。由于 $x + y + z = 1$, 所以只用其中任意两个参数(通常选择 x 和 y) 即可表示一个颜色。一切物理上能实现的颜色均落在图 1 (封 2 彩页) 所示的马蹄形状光谱轨迹曲线和连接 380 nm 和 780 nm 两个谱色点的连线所包围的面积之中^[6]。

1 色素特性

1.1 色素分类

高等植物叶子中的色素被包含在叶细胞细胞质的叶绿体中, 除叶绿体外, 叶细胞中还含有线粒体、高尔基体、核糖体等不含或含极少量色素的其他细胞器, 它们大多为灰体、白色体或透明体^[7]。高等植物叶子中主要含有叶绿素和类胡萝卜素两种色素。叶绿素包含叶绿素 a 和叶绿素 b, 类胡萝卜素包含胡萝卜素和叶黄素, 而含于叶片中的胡萝卜素主要是 β -胡萝卜素^[8]。作者利用它们的吸收光

[收稿日期] 2005-12-08

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59006487); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(97035821)

[作者简介] 程晓舫(1957-), 男, 江苏张家港市人, 中国科学技术大学热科学和能源工程系教授、博士生导师

谱根据色度理论计算其色品坐标。

1.2 色素吸收光谱

1941 年 Zscheile 和 Comar 采用分光光度法分别在特定条件下测定了叶绿素 a 和 b 的吸收光谱^[9] (图 2)。1942 年 Zscheile 和 Jonathan 等又测定了 β -胡萝卜素和叶黄素 (图 3) 及其他几种类胡萝卜素的吸收光谱^[10]。

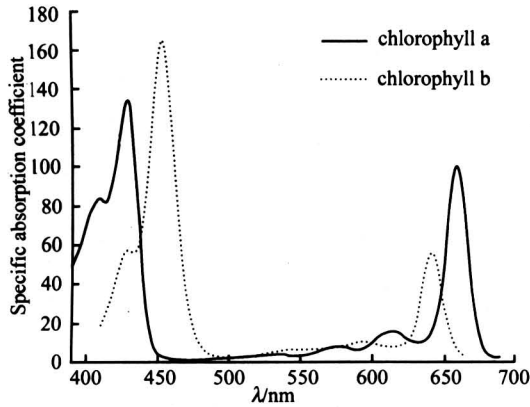


图 2 叶绿素 a, b 在乙醚中的吸收光谱

Fig.2 Absorption spectra of chlorophylls a and b in aether

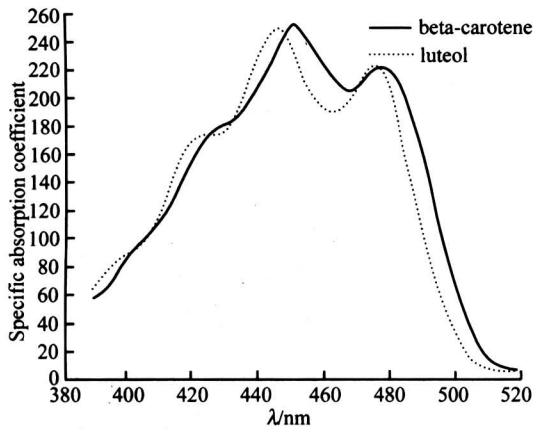


图 3 β -胡萝卜素在己烷中和叶黄素
在乙醇中的吸收光谱

Fig.3 Absorption spectra of beta-carotene in hexane solution and absorption spectra of luteol in ethanol solution

2 色素的色品坐标

2.1 吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 的定义

一束具有 I_0 强度的单色平行光, 照射到非散射的均匀介质时, 一部分被吸收 (I_a), 一部分透过

(I_t), 一部分被介质表面和器皿表面反射 (I_r), 即,

$$I_0 = I_a + I_t + I_r \quad (3)$$

在比色分析时, 因采用同样材质的比色皿, 故反射光的强度相同, 其影响可相互抵消, 则有,

$$I_0 = I_a + I_t \quad (4)$$

沿光束方向在一小的路程长度 dl 中, 光强 I 由于被具有浓度 c 的组分吸收而减少 dI , 1768 年 Lambert 发现 $-dI/I$ 与 dl 成正比, 1852 年 Beer 又发现 $-dI/I$ 正比于 c , 从而可以得到,

$$-dI/I = k(\lambda)cdl \quad (5)$$

其中, 负号是因为光被吸收时其强度减小。

对给定浓度的溶液进行积分, 得到,

$$\int_{I_0}^{I_t} -dI/I = -\ln \frac{I_t}{I_0} = \int_0^l k(\lambda)cdl = k(\lambda)cl \quad (6)$$

以常用对数代替自然对数 ($\ln = 2.303\log_{10}$), 用一具体波长下的吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 来代替 $k(\lambda)/2.303$ ^[11], 可得,

$$A_\lambda = \log_{10} \frac{I_0}{I_t} = \alpha(\lambda)cl \quad (7)$$

A_λ 为某波长下溶液的吸光率。

在叶绿体色素的测量过程中, 通过调整溶液浓度 c 来使 $\log_{10} \frac{I_0}{I_t}$ 的值保持在 0.200 ~ 0.800, 于是吸收系数 (specific absorption coefficient) $\alpha(\lambda)$ 为^[9,10],

$$\alpha(\lambda) = \frac{\log_{10} \frac{I_0}{I_t}}{cl} \quad (8)$$

I_0 —透过溶剂的光强; I_t —透过溶液的光强;
 c —溶质的质量浓度 (g/l); l —光程 (cm)。

2.2 透过率 $\tau(\lambda)$ 的计算

注意到透过率的定义,

$$\tau = \frac{I_t}{I_0}$$

于是有,

$$\log_{10} \frac{I_0}{I_t} = \log_{10} \frac{1}{\tau} = \alpha(\lambda)cl$$

得,

$$\tau(\lambda) = 10^{-\alpha(\lambda)cl} \quad (9)$$

2.3 色素的色品坐标

对于分光光度法测量的色素吸收光谱, 其透过光谱的功率分布为,

$$\varphi(\lambda) = \tau(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (10)$$

其中 $\tau(\lambda)$ 为色素的透射率, $S(\lambda)$ 为照明光源的光谱功率分布 (文中采用 D_{65} 光源)。

将(9)、(10)式代入(1)、(2)式中,可得色素的色品坐标(x, y),

$$\left\{ \begin{aligned} x &= \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} 10^{-\alpha(\lambda)cl} \cdot S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} 10^{-\alpha(\lambda)cl} \cdot S(\lambda) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \\ y &= \frac{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} 10^{-\alpha(\lambda)cl} \cdot S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} 10^{-\alpha(\lambda)cl} \cdot S(\lambda) [\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)] d\lambda} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

其中, $c = 1 \text{ g/L}$, $l = 1 \text{ cm}^{[9,10]}$ 。

将CIE1931标准色度观察者光谱三刺激值 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)^{[6]}$ 和标准光源 D_{65} 光谱功率分布 $S(\lambda)^{[6]}$ 与图2、图3所示的叶绿素及类胡萝卜素的吸收系数 $\alpha(\lambda)$ 数值代入(11)式可得各色素在色品图中的坐标,如图1所示。其中, a :叶绿素a(0.1981, 0.3341), b :叶绿素b(0.2704, 0.5663), c :叶黄素(0.4805, 0.5121)和 β -胡萝卜素(0.4805, 0.5121)。 d 点为植物叶细胞中灰体、白色体及透明体在色品图中的色品坐标(0.3333, 0.3333)。

3 色域的界定

前面讨论了高等植物叶子中各成份的色品坐标,根据加法混色原理,在CIE1931色品图上,两种颜色相加产生的第三种颜色总是位于连接这两种颜色的直线上,可以确定出由叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素和植物叶片中的其他灰体、白色体及透明体的色品坐标 d 点所围成的 $abcd$ 四边形(蓝色虚线围成)的面积即为高等植物叶色的理论色域。

4 实例验证

4.1 利用绿叶对光的吸收规律实验数据确定的色品坐标

图4和图5是文献[12]中给出的大叶黄杨幼嫩绿叶和剑麻浅色新绿叶的光谱特性曲线,取其反射比曲线数据(R),并以 D_{65} 照明光谱进行计算,得到的色品坐标分别为 e :大叶黄杨幼嫩绿叶(0.3601, 0.4426)和 f :剑麻浅色新绿叶(0.3699, 0.4418),均落在理论色域 $abcd$ 区域内(图1)。

4.2 根据绿叶照片确定的色品坐标

图6~13(见封2、封3)右侧是相机摄得的不

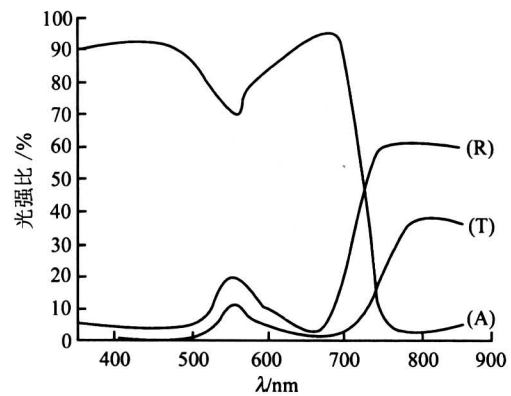


图4 大叶黄杨幼嫩绿叶的(R)反射比曲线;(T)透射比曲线;(A)吸收比曲线

Fig.4 Spectral curves of tender green leaves of *Evonymus gracilis* S

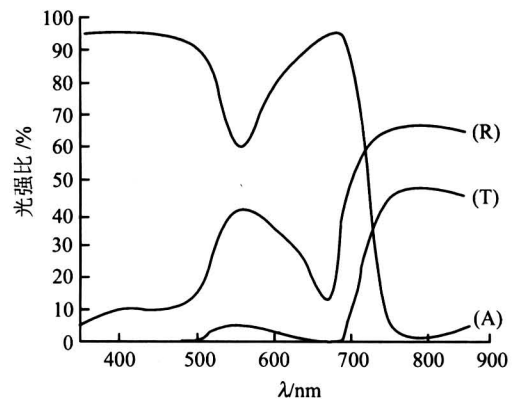


图5 剑麻浅色新绿叶的(R)反射比曲线;(T)透射比曲线;(A)吸收比曲线;

Fig.5 Spectral curves of new green leaves of *Yucca vifolia*

同种类的高等植物叶片的图像,左侧色品图中的各离散点是对构成彩色图像的所有像素点表征的颜色计算出的色品坐标。注意到图像中有叶片以外的色彩存在,所以计算得到色品坐标点并不完全落在色域 $abcd$ 四边形内。

图14(见封3彩页)为大戟科木薯绿叶的彩色图像,图15左侧色品图中的各离散点是对图14整个图像计算出的色品坐标,图16~图18(见封3)是对其部分叶片(矩形框内)进行计算的结果,可见叶片色品坐标均落在前述理论色域 $abcd$ 四边形内。

通过对18科31种高等植物叶片(见表1)的色品坐标的统计计算,与理论值一致。

表 1 18 科 31 种高等植物叶片列表

Table 1 Different higher plants

植物科类	植物名称	植物科类	植物名称
大戟科	五月茶	茜草科	山石榴
	香港算盘		粗叶木
	逼迫子	樟科	潺槁
	木薯		樟树
	白背叶	芸香科	三桠苦
	红柄山麻杆	锦葵科	大红花
		茄科	水茄
		锡叶藤科	锡叶藤
马鞭草科	状元红	榆科	光叶山黄麻
	马缨	桑科	大叶榕
	冬红花	海桐花科	海桐花
	鬼灯笼	爵床科	虾衣花
豆科	假边翘	木兰科	含笑
	美蕊花	楝科	苦楝
睡莲科	莲		
禾本科	水稻		
	夹竹桃		
夹竹桃科	倒吊笔		
	软枝黄蝉		

参考文献

- [1] 束越新. 颜色光学基础理论 [M]. 山东: 山东科学技术出版社, 1981. 505 ~ 509
- [2] Gnanasekharan V, Shewfelt R L, Chinnan M S. Detection of color changes in green vegetables [J]. Journal of Food Science, 1992, 1(57): 149 ~ 154
- [3] 雷 桥, 周颖越. 图像分析法检测蔬菜色泽与叶绿素含量的研究 [J]. 上海农业科技, 2004, (1): 19 ~ 21
- [4] 杨劲峰, 陈 清, 韩晓日, 等. 数字图像处理技术在蔬菜叶面积测量中的应用 [J]. 农业工程学报, 2002, 4(18): 155 ~ 158
- [5] 苏正淑, 张宪政. 几种测定植物叶绿素含量的方法比较 [J]. 植物生理学通讯, 1989, (5): 77 ~ 78
- [6] 汤顺青. 色度学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 45 ~ 50
- [7] Raven P H, Johnson G B. Biology [M]. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 1999. 80 ~ 98
- [8] 潘瑞炽, 董愚得. 植物生理学(上册) [M]. 北京: 人民教育出版社, 1979. 81 ~ 92
- [9] Zscheile F P, Comar C L. Influence of preparative procedure on the purity of chlorophyll components as shown by absorption spectra [J]. Botanical Gazette, 1941, 102: 463 ~ 481
- [10] Zscheile F P, White J W Jr, Beadle B W, Roach J R. The preparation and absorption spectra of five pure carotenoid pigments [J]. Plant Physiology, 1942, 17: 331 ~ 346
- [11] 诺贝尔 P S [美]. 生物物理的植物生理学导论 [M]. 程炳嵩, 王光裕, 程式珊译. 北京: 科学出版社, 1984. 235 ~ 239
- [12] 唐建民, 傅昌余, 王礼兵. 植物绿叶对光的吸收规律的实验研究 [J]. 生物化学与生物物理进展, 1989, 16(2): 130 ~ 133
- [13] 何鹏飞, 王 征, 等. C# 实用编程百例 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004

5 结论

由高等植物叶子中叶绿素 a、叶绿素 b、 β -胡萝卜素、叶黄素以及不含色素的灰体、白色体或透明体的吸收光谱, 依据色度理论给出了它们在 CIE1931 色品图中的色品坐标。结合运用加法混色原理, 在色品坐标图上确定出高等植物叶色的理论域。以植物叶片的光吸收规律实验数据和植物叶子的彩色照片, 实验验证了理论域的正确性。

在确定高等植物叶色理论域时采用的色度学中的加法混色原理, 将为实现对单叶或群体绿色植物叶片快速、无损检测色素含量提供理论计算的依据, 相关的讨论将另文展开。

Theoretical Study of Color Gamut of Higher Plant Leaves

Cheng Xiaofang, Dong Jinyi, Fan Xueliang, Ding Jinlei

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] The chlorophylls and cartotenoids are the main pigments in leaves of the higher plants, which giving the color of leaves. Based on the CIE1931 chromaticity coordinates of the chlorophylls and cartotenoids obtained from their classical absorption spectrum and the law of additive color mixing, the theoretical color gamut of higher plant leaves is determined. The theoretical prediction agrees well with the experimental results.

[Key words] higher plant; pigment; absorption spectra; chromaticity coordinate; color gamut