

# 食品调色技术

曹雁平 刘玉德 主编



化学工业出版社

# 食品调色技术

曹雁平 刘玉德 主编

化学工业出版社  
·北京·

(京)新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

食品调色技术/曹雁平,刘玉德主编. —北京:化学工业出版社, 2003.7

ISBN 7-5025-4520-4

I. 食… II. ①曹… ②刘… III. 食品-调色  
IV. TS205

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 056839 号

---

**食品调色技术**

曹雁平 刘玉德 主编

责任编辑: 孟 嘉

文字编辑: 林 媛

责任校对: 郑 捷

封面设计: 潘 峰

\*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

http: // www. cip. com. cn

\*

新华书店北京发行所经销

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 14 字数 324 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4520-4/TS·102

定 价: 30.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 前 言

伴随着中国经济的飞速发展，中国人民的生活水平日益提高，对饮食质量和食品风味的要求达到了前所未有的高度，食品已不再是仅仅为了维持生命活动和补充营养为目的的果腹，人们已经开始了更高的追求，美味成为第一需要，这是中国人民真正走向富裕和繁荣的标志之一。

中华饮食自古讲究食品的色香味。色、香、味、形乃食品美味的四个方面，缺一不可。在食品的风味中，色的超距离享受特点以及对心理的刺激作用都是不可替代的，历来为烹调大师、食品调味师和食品工艺师极尽所能予以利用。食品调色是食品风味设计和调配技术的重要组成部分，食品调色包括调色、补色、发色、护色等技术，与食品的加工制造工艺和贮运有密切关系，并受到消费者的嗜好、情绪、传统等主观因素，以及光线、背景等客观环境因素的影响。食品的色作为食品质量指标越来越受到食品研究开发者、生产厂商和消费者的重视，在食品加工制造中有举足轻重的地位。

食用调色剂是食品调色的重要原料之一，是食品添加剂的重要门类。1865年英国人发明了第一种合成色素——苯胺紫以后，合成色素以色泽鲜艳、染色牢固、抗酸碱、抗紫外光和抗氧化性能优良、价格低廉曾备受喜爱，独占食品调色领域百余年。随着对合成色素安全性的研究，其对人类健康的危害世人皆知，已成为百姓特别关注的对象和采购时必须认真审查的项目。在崇尚天然、追求绿色的今天，天然食用色素的使用既是必然，也成为追求。由于天然食用色素的着色力和对酸、碱、紫外光、热等稳定性较差的缺陷，更要求食品调味师、食品工艺师全面掌握有关天然食用色素的各种性质，能够根据所用原料、采取工艺和产品质量要求，以及贮运、消费特点，灵活运用食品调色、补色、发色、护色等技术，保证食品颜色质量符合标准，并可根据食品调色的需要适当调整工艺。

食品调色历史久远，涉及多个相关学科，资料浩如烟海，每天都有大量新的研究成果出现，掌握尽可能多的资料是做好食品调色的基础。但是，至今在国内尚无一本从颜色的科学、调色原料、各类食品色素色变机理和控制、各类食品调色技术、食品色调评价和安全性等方面全面述及有关内容的专著。为方便食品工艺师、食品调色剂开发技术人员以及相关的工程技术人员和管理人员的工作，特编写《食品调色技术》一书以满足日益增长的需要，相信此书会为广大食品工业的工程技术人员以及相关行业的有关人士提供便利和帮助，希望能为我国现代食品工业的发展尽一点绵薄之力。

编者尽可能收集与食品调色有关的各方面资料，并分门别类地进行归纳整理。全书共八章，曹雁平负责全书的统稿以及第二章、第四章、第五章、第七章的编写；刘玉德负责第一章、第三章、第六章的编写；顾红负责第八章的编写。食品工业历史悠久，产品众

多，生产技术、工艺各异且特点突出，在质量控制、检测、参数等方面都有各自的方法。为符合国家科技单位使用规范，又不至影响读者对历史资料的应用，我们在编写中尽可能做到两者兼顾，在用百分数表示浓度时，若无特别声明，则是指质量分数。在此，感谢所有文献、资料的著者和研究人员；感谢曲凤桐、李建宇教授百忙之中通读书稿，并提出宝贵意见；感谢王锐光、曹梦漪、丁向红、刘海明等帮助录入、整理资料和通校。

由于编者水平有限，有关食品调色的技术发展很快，新的研究成果不断涌现，书中难免存在错误和不妥之处，恳请专家、学者和广大读者批评指正。

**编 者**

**2003年2月16日**

**于北京工商大学**

## 内 容 提 要

本书是一本系统介绍有关食品颜色调配方法的技术专著，概述了食品的调色、补色、发色、护色技术的原理、工艺、应用和安全性等内容。首先，介绍了调色技术的基础——颜色科学、食品色光性质、食品色变机理与控制等理论；然后对各类着色剂、护色剂等原料的性质、特点、应用范围进行了详述，特别重点介绍了天然着色剂的相关内容，以适应当前消费者对“绿色”、“天然”的追求；之后是全书的核心内容，详细阐述了各类食品的调色技术，包括蔬菜、水果、饮料、花卉、豆类、乳制品、肉制品、冷食等产品的具体应用技术；最后针对目前最受关注的食品安全问题与调色技术的关系，介绍了国际、国内的概况和发展趋势。

本书内容理论系统、技术实用、实例丰富，提供给读者最广泛的信息量，对从事食品开发、色素研发的科研技术人员，以及食品专业大专院校师生有很大的参考使用价值。

# 目 录

第一章 颜色的科学与食品色光性质 .....	1	二、常用食品调色剂 .....	57
第一节 颜色光学 .....	1	三、食品调色剂的发展趋势 .....	65
一、色光关系与视觉 .....	1	第二节 重要的食用天然着色剂 .....	68
二、颜色的属性与色彩图 .....	12	一、焦糖 .....	68
第二节 食品色光性质 .....	16	二、红曲红 .....	70
一、颜色与分子结构的关系 .....	16	三、姜黄素 .....	73
二、食品的色泽功能 .....	17	四、 $\beta$ 胡萝卜素 .....	74
第二章 食品色变机理与控制基础 .....	23	五、辣椒红 .....	75
第一节 果蔬色素和颜色变化 .....	23	六、栀子黄 .....	77
一、花色苷类色素 .....	23	七、甜菜红 .....	78
二、类黄酮类色素 .....	27	八、红花黄 .....	80
三、类胡萝卜素类色素 .....	29	九、紫胶红 .....	81
四、四吡咯类色素 .....	30	十、多穗柯棕 .....	82
五、醌类色素 .....	31	十一、玫瑰茄红 .....	83
六、单宁 .....	32	十二、叶绿素铜钠 .....	84
七、甜菜苷 .....	32	第三节 重要的食用合成着色剂 .....	85
八、无色花色素 .....	32	一、苋菜红 .....	85
九、血红素 .....	33	二、胭脂红 .....	87
第二节 天然色素的稳定技术 .....	36	三、赤藓红 .....	87
一、辅色素与稳定化 .....	36	四、新红 .....	88
二、改性与稳定化 .....	37	五、柠檬黄 .....	88
第三节 褐变机理与控制 .....	38	六、日落黄 .....	90
一、美拉德反应褐变 .....	38	七、靛蓝 .....	90
二、酶促褐变 .....	41	八、亮蓝 .....	92
三、抗坏血酸氧化褐变 .....	41	九、色淀 .....	92
第四节 食品色泽控制要点 .....	43	第四节 常用食品护色剂 .....	93
一、钝化氧化酶系 .....	44	一、亚硝酸盐类护色剂 .....	93
二、限制氧气 .....	45	二、硝酸盐类护色剂 .....	94
三、适当的热处理 .....	46	第五节 漂白剂 .....	94
四、控制 pH .....	46	一、二氧化硫和硫磺 .....	95
五、控制好金属离子的作用 .....	47	二、亚硫酸钠 .....	95
六、降低色变底物含量 .....	47	三、焦亚硫酸钠和亚硫酸氢钠 .....	96
七、其他应注意的问题 .....	48	四、低亚硫酸钠 .....	96
参考文献 .....	49	第四章 果蔬类食品的调色技术 .....	97
第三章 食品调色与食品调色剂 .....	50	第一节 蔬菜类食品的调色技术 .....	97
第一节 食品调色技术通论 .....	50	一、绿色类蔬菜食品的调色技术 .....	97
一、食品调色技术 .....	50	二、红色类蔬菜食品的调色技术 .....	100

三、浅色类蔬菜食品的调色技术 .....	103	第五节 乳及豆奶制品的调色技术 .....	159
四、其他类蔬菜食品调色技术 .....	105	参考文献 .....	160
第二节 水果类食品的调色技术 .....	107	<b>第七章 糖果、冷食和软饮料及发酵类</b>	
一、简单褐变类水果食品的调色技术 ..	107	产品的调色技术 .....	161
二、复杂变色类水果食品的调色技术 ..	109	第一节 糖果、冷食和软饮料的调色	
三、工艺操作对水果制品色泽的影响 ..	115	技术 .....	161
四、水果制品生产中的特殊漂白技术 ..	117	一、糖果的调色技术 .....	161
参考文献 .....	118	二、冷食的调色技术 .....	162
<b>第五章 其他植物类食品的调色技术 .....</b>	<b>121</b>	三、软饮料的调色技术 .....	165
第一节 茶与茶饮料的调色技术 .....	121	四、膨化小食品的调色技术 .....	171
一、茶 .....	121	第二节 啤酒的调色技术 .....	171
二、茶饮料 .....	123	一、啤酒生产过程中色度的变化 .....	172
第二节 竹类食品的调色技术 .....	126	二、啤酒调色技术 .....	174
第三节 花卉类食品调色技术 .....	126	第三节 葡萄酒的调色技术 .....	175
一、花卉色泽特点 .....	127	一、葡萄酒中的呈色物质 .....	175
二、一些花卉食品调色技术 .....	127	二、影响葡萄酒色泽的因素 .....	176
第四节 食用菌类食品的调色技术 .....	129	三、葡萄酒调色技术 .....	178
第五节 谷物、薯类、豆类等食品的		第四节 其他酒类的调色技术 .....	180
调色技术 .....	131	一、黄酒调色 .....	180
一、谷物食品的调色技术 .....	131	二、配制果酒调色 .....	180
二、薯类食品的调色技术 .....	135	三、白酒的脱色技术 .....	181
三、豆类食品的调色技术 .....	137	第五节 发酵调料的调色技术 .....	181
四、坚果类食品的调色技术 .....	139	一、酱油的调色技术 .....	181
参考文献 .....	139	二、食醋类调色技术 .....	183
<b>第六章 肉制品、油脂和乳制品的调色</b>		参考文献 .....	184
技术 .....	141	<b>第八章 食品色调评价与调色安全性 .....</b>	<b>185</b>
第一节 肉及肉制品的调色技术 .....	141	第一节 食品色调的评价方法 .....	185
一、肉的变色及其控制 .....	141	一、啤酒生产过程色度测定 .....	185
二、肉制品的变色及其控制 .....	142	二、发酵调味品色度测定 .....	189
第二节 肉制品中的护色剂和助色剂的		三、焦糖色素色度的测定 .....	192
使用方法 .....	145	四、固体食品色度的测定 .....	194
第三节 各类肉制品的调色技术 .....	149	五、影响测定结果准确性的因素 .....	195
一、烟熏肉制品的调色技术 .....	149	第二节 食品安全与食品调色 .....	195
二、肉肠的调色 .....	151	一、导致食品安全问题的原因 .....	195
三、羊肉制品的色泽控制 .....	154	二、食品调色的安全问题 .....	199
四、肉制品罐头的色泽控制 .....	154	第三节 食品调色的无害化 .....	210
五、鱼、肉等冻干食品的色泽变化 .....	155	一、生态种养 .....	210
六、鱼及其罐头的色泽控制 .....	155	二、清洁生产 .....	212
第四节 油脂的调色技术 .....	157	参考文献 .....	213
一、植物油脂的色变 .....	157	<b>主要参考文献 .....</b>	<b>214</b>
二、植物油脂的色泽控制 .....	157		



# 第一章 颜色的科学与食品色光性质

## 第一节 颜色光学

颜色光学是一门综合性的边缘科学。它是以物理学、光学为主体,同时综合心理学、生理学、生物物理学的一些内容,形成的一整套独特的科学体系。经过多年的发展,目前在理论和应用上都已经趋于成熟。

颜色光学包括物理光学(physical optics)、光度学(photometry)、色度学(colorimetry)、心理颜色(adaptation and contrast)、色差与颜色立体、颜色视觉(color vision)等方面内容。

### 一、色光关系与视觉

#### (一) 色与光的关系

##### 1. 色与光的关系

在大自然中到处都有五颜六色、色彩斑斓的奇妙景物。但这些景物的色彩并不是其本身固有的性质,而与光线的照射、人体视觉器官的反映和所感知的状态有关。比如在阳光的照射下,人可以看到鲜艳的花朵,碧绿的青草,蔚蓝的海水。但是,当太阳落山后,在没有光线的大地上,无论景物多么鲜艳,都将被夜色吞没。甚至在没有任何光线的夜晚,不但看不见物体的颜色,有时连物体的外形也分不清。这说明光是人们感知颜色的必要条件,没有光就没有色,色来源于光,是人们感知颜色的源泉。所以说,光是色的源泉,色是光的表现。此外,即使有光线的照射,还需要人们视觉器官的感应。如果闭上眼睛,就感知不到物体的色彩。而一旦视觉器官出现生理缺陷(如失明、弱视或色盲),也不能感知或正确感知物体的颜色。所以,颜色实际上是一定波长的散射波或反射波刺激人的视觉器官而产生的感觉。科学研究表明,光的颜色是由光的波长决定的,不同波长的光在反射或散射刺激人的视觉器官时产生了不同的颜色。此外光的能量决定了光的强度。当光映像到人的眼睛时,波长不同决定了光的色相不同。波长相同能量不同,则决定了色彩明暗的不同。

##### 2. 光的本质

光学是物理学中的一个分支,其发展很早。我国古代就有关于光现象的记载。在《墨经》中就有“景,光之人,煦若照;下者之人也高,高者之人也下,足蔽下光,故成景于上;首蔽上光,故成景于下”。在南宋沈括所著的《梦溪笔谈》中,对针孔成像、虹霓、月食等现象都做了详细的叙述。对于光的本质,古希腊科学家曾认为:太阳和其他一切发光与发热的物体发出微小粒子,这些粒子能引起人们光和热的感觉。17世纪,出现了牛顿的微粒说和惠更斯的弹性波动说。19世纪初,人们发现光有干涉、衍射和偏振的性质,与光的微粒说相矛盾。19世纪60年代,麦克斯韦建立了光的电磁理论,

认识到光是一种电磁波。19世纪末20世纪初，随着光电效应等新现象的发现，人们又认识到了光的波粒二象性，形成了现代光的波粒二象性理论。

根据研究发现，光既具有干涉、衍射和偏振等波动的特征，又具有反射、吸收、光电效应等粒子的特征，因此光具有波粒二象性。

光实际上是一种电磁波。当然，并不是所有的电磁波都能引起人的视觉。在电磁波辐射范围内，只有波长380~780 nm ( $1\text{ nm}=10^{-6}\text{ mm}$ )的辐射能引起人们的视感觉，这段光波叫做可见光。如图1-1所示。

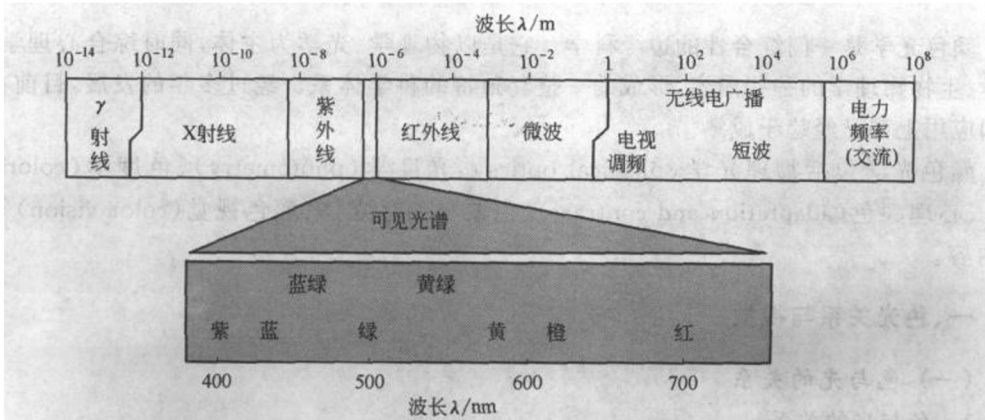


图 1-1 各种电磁波及可见光谱范围

在可见光谱内，不同波长的辐射引起人们的不同色彩感觉。1666年牛顿发现，当太阳光经过三棱镜折射，再投射到白色屏幕上时，在屏幕上会出现一条像彩虹一样美丽的光带谱，依次是红、橙、黄、绿、青、蓝、紫7种颜色。经过研究发现，这是因为日光中包含有不同波长的辐射能，当它们分别刺激人的眼睛时，会产生不同的色光，而它们混合在一起并同时刺激人的眼睛时，则是白光，而感觉不到其各自的颜色。当白光经过三棱镜时，由于不同波长的折射系数不同，折射后投影在屏幕上的位置也就不同，所以一束白光通过三棱镜便分解为上述7种不同的颜色，这是光的散射现象。从图1-2中可以看到红色的折射率最小，紫色最大。这条依次排列的彩色光带称为光谱。在光谱中，具有单一频率的光波称为单色光。但实际上任何光源发出的光波都有一定的频率范围，波长范围越窄，则称光的单色性越好。由单色光混合而成的光叫做复色光，自然界中的太阳光等光线都是复色光。其色散所产生的各种色光的波长如表1-1所示。

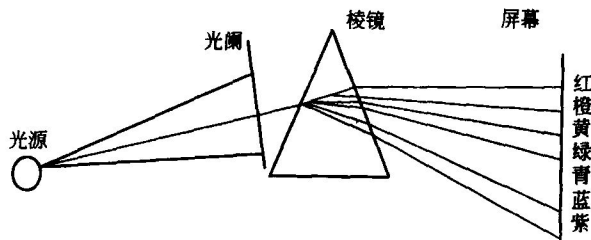


图 1-2 光的散射现象

表 1-1 散射后各种色光的波长

光 色	波长 $\lambda$ /nm	代表波长/nm	光 色	波长 $\lambda$ /nm	代表波长/nm
红(red)	780~630	700	青(cyan)	500~470	500
橙(orange)	630~600	620	蓝(blue)	470~420	470
黄(yellow)	600~570	580	紫(violet)	420~380	420
绿(green)	570~500	550			

## (二) 相对光谱能量分布

光的物理性质由它的波长和能量来决定。一般的光源是不同波长的色光混合而成的复色光，如果将它的光谱中每种色光的强度用传感器测量出来，就可以获得不同波长色光的辐射能的数值。图 1-3 表示了一种用来测量各波长色光的辐射能仪器的简要原理，这种仪器称为分光辐射度计。

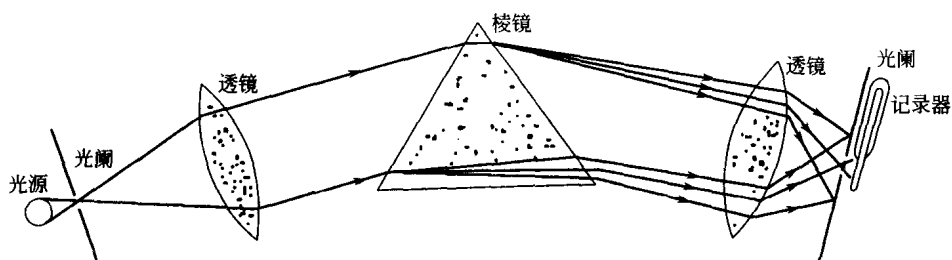


图 1-3 分光辐射度计原理

从图 1-3 可以看出，光源经过左边的隙缝和透镜后变成平行光束，投向棱镜的入射平面，当入射光通过棱镜时，由于光的折射，使不同波长的色光以不同的角度弯折，从棱镜的入射平面射出。所有分解后的光谱色光在离开棱镜时，仍保持为一束平行光，再由右边的透镜聚光，通过隙缝射在光电接收器上转换为电能。如果右边的隙缝是可以移动的，就可以把光谱中任意一种谱色挑选出来。所以，在光电接收器上记录的是光谱中各种不同波长色光的辐射能。将光谱密度定义为在以波长  $\lambda$  为中心的微小波长范围内的辐射能与该波长的宽度之比。则有

$$\varphi_e(\lambda) = d\varphi_e / d\lambda$$

式中， $\varphi_e$  表示光的辐射能； $\lambda$  表示光谱色的波长。从公式中可以看出光谱密度表示了单位波长区间内辐射能的大小。通常情况下光源中不同波长色光的辐射能是随波长的变化而变化的，因此，光谱密度是波长的函数。光谱密度与波长之间的函数关系称为光谱分布。

在实际中主要以光谱密度的相对值与波长之间的函数关系来描述光谱分布，称为相对光谱能量（功率）分布，记为  $S(\lambda)$ 。相对光谱能量分布可用任意值来表示，但通常是将波长  $\lambda = 555 \text{ nm}$  处的辐射能量定为 100，作为参考基点，其他的波长与之相比较得到。若以光谱波长  $\lambda$  为横坐标，相对光谱能量分布  $S(\lambda)$  为纵坐标，就可以绘制出光源相对光谱能量分布曲线。

光源的相对光谱能量分布反映了光源的颜色特性，所以光源的颜色特性取决于发出的光线中不同波长上的相对能量比例，而与光谱密度的绝对值无关。光谱密度绝对值的大小只反映光的强弱，而与光源颜色无关。图 1-4 所示的是几种光线的波长与能量的关系。从图中可以看出：正午的日光有较高的辐射能，它除了在蓝紫色波段能量较低外，在其余波

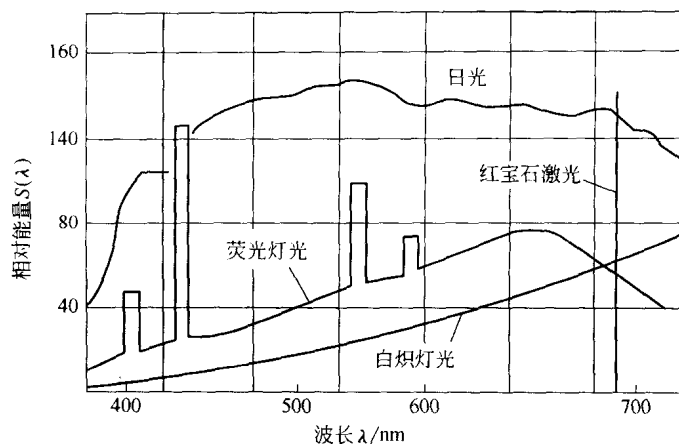


图 1-4 光线的波长与能量的关系

段能量分布均较均匀，基本上是无色或白色的。荧光灯光源在 405 nm、430 nm、540 nm 和 580 nm 出现 4 个线状带谱，峰值在 615 nm，而在长波段（深红）处能量下降，这表明荧光光源在绿色波段（550~560 nm）有较高的辐射能，而在红色波段（650~700 nm）辐射能减弱。对比之下，白炽灯光源在短波蓝色波段辐射能比荧光光源低，而在长波红色区间有相对高的能量，因此白炽灯光源总带有黄红色。红宝石激光器发出的光，其能量完全集中在一个很窄的波段内，大约为 694 nm，是典型的深红色。在颜色测量计算中，为了使其测量结果标准化，通常采用国际照明学会（Commission International de l'Eclairage, CIE）标准光源（如 A、B、C、D<sub>65</sub> 等）。

### （三）视觉器官的构造与视觉

人的眼睛由眼球、视神经和附属器官（泪腺、眼睑等）组成，如图 1-5 所示。当有光线进入时，光线首先通过角膜、前房水、瞳孔、水晶体、玻璃体，再聚焦到视网膜上，刺激视网膜上的感光细胞，感光细胞再将接受到的色光讯号传递到神经元细胞，再经过神经元的传递，由视神经传到中枢系统，到达皮质视区后，形成视觉印象。

眼睛观察物体时，进入眼睛的并非是各种颜色，而是各种波长不同的电磁波，也就是光线。这些光线到达视网膜后，刺激视网膜上的感光细胞，引起光化学作用，并在视网膜上产生了电位变化，引起电冲动，再经过视网膜第二层、第三层神经元组织将电冲动传入大脑皮层。由于在综合分析时常带有一定的心理因素，因此人眼观察颜色时，与仪器观察有着不同的结果和差异。

从人的视觉生理特性来看，人眼的视网膜上

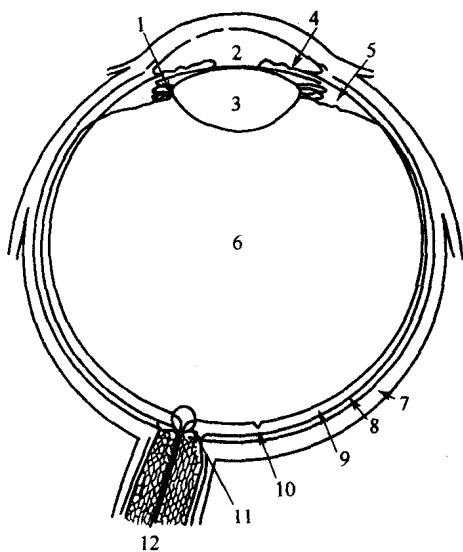


图 1-5 眼球的构造

- 1—悬韧带；2—前房；3—水晶体；
- 4—虹膜；5—睫状肌；6—玻璃体；
- 7—巩膜；8—脉络膜；9—视网膜；
- 10—中央窝；11—视神经乳头；12—视神经

有三种感色视锥细胞，即感红细胞、感绿细胞、感蓝细胞。这三种细胞分别对红光、绿光、蓝光敏感。当其中一种感色细胞受到较强的刺激时，就会引起这种感色细胞的兴奋，则产生该色彩的感觉。同时人眼的这三种感色细胞还具有合色的能力。当一种复色光刺激人眼时，人眼感色细胞可将其分解为红、绿、蓝三种单色光，然后混合成一种颜色。正是由于这种合色能力，人们才能识别除红、绿、蓝三色之外的更大范围的颜色。

#### (四) 色度学基础

色度学是一门研究彩色计量的科学，其任务在于研究人眼彩色视觉的定性和定量规律及应用。彩色视觉是人眼的一种明视觉。彩色光的基本参数有明亮度、色调和饱和度。明亮度是光作用于人眼时引起的明亮程度的感觉。它反映的是亮度感觉。通常情况下，彩色光能量越大则越亮，越小则越暗。色调反映的是颜色的类别，如红色、黄色、绿色等。彩色物体的色调取决于在光照明下所反射光的光谱成分。当发射光中的某种颜色的成分较多时，则显现出这种颜色，其他成分则被吸收掉。而对于透射光，其色调则由透射光的波长分布或光谱所决定。饱和度是指彩色光所呈现颜色的深浅或纯洁程度。同一色调的彩色光，其饱和度越高，颜色就越深，也就越纯；而饱和度越小，颜色就越浅，纯度就越低。当白光进入到高饱和度的彩色光中时，可以降低彩色光的纯度或使颜色变浅，变成低饱和度的色光。所以饱和度是色光纯度的反映。100%饱和度的色光就代表完全没有混入白光的纯色光。色调与饱和度又合称为色度，它既说明彩色光的颜色类别，又说明颜色的深浅程度。

##### 1. 颜色的构成与三基色原理

尽管不同波长的色光会产生不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以由不同的光谱成分组合。在自然界中所有彩色都可以由三种基本彩色混合而成，这就是三基色原理。

所谓的三基色就是这样的三种颜色，它们相互独立，其中任意一种颜色都不能由其他两种颜色混合产生。并且所有其他颜色都可以由这三种基本颜色按不同的比例混合产生。它有两种基色系统，一种是加色系统，其基色是红、绿、蓝；另一种是减色系统，其三基色是黄、青、紫（或品红）。

不同比例的三基色光相加得到的色彩称为相加混色。

红 + 绿 = 黄

蓝 + 绿 = 青

红 + 蓝 = 紫

红 + 蓝 + 绿 = 白

彩色还可由混合各种比例的绘画颜料或染料来配出，这就是相减混色。因为颜料能吸收入射光光谱中的某些成分，未吸收的部分被反射，从而形成了该颜料特有的彩色。当不同比例的颜料混合在一起的时候，它们吸收光谱的成分也随之改变，从而得到不同的彩色，其规律为：

黄 = 白 - 蓝

黄 + 青 = 白 - 蓝 - 红 = 绿

紫 = 白 - 绿

紫 + 青 = 白 - 绿 - 红 = 蓝

青 = 白 - 红

黄 + 紫 + 青 = 白 - 蓝 - 绿 - 红 = 黑

黄 + 紫 = 白 - 蓝 - 绿 = 红

对于视觉来说，三基色实际上就是三种单色光波能量对视觉细胞的刺激。所以有时也把三基色的能量强度称为三刺激值。

通过改变三基色的相对量配比和亮度，可以配出任何颜色和亮度的光。因而，任何一

种颜色都可以通过三刺激值作为变量表示，也就是说颜色可以通过数值表示。

## 2. 光源与色温

能自行发光的物体叫做光源。光源发光主要有三种类型：温度辐射、荧光和运动辐射。运动辐射是由电子或其他带电粒子高速运动所引起的电磁波辐射，在日常生活中一般不用作光源。

用作标准光源的辐射应该有连续的光谱，一般采用温度辐射。不同的光源，由于发光物质不同，其光谱能量分布也不相同。一定的光谱能量分布表现为一定的光色，对光源的光色变化，一般采用色温来描述。

根据能量守恒定律，物体吸收的能量越多，加热时它辐射的本领愈大。黑色物体对光能具有较大的吸收能力。如果一个物体能够在任何温度下全部吸收任何波长的辐射，那么这个物体称为绝对黑体。把任一光源发出的光的颜色与黑体加热到一定温度下发出的光的颜色相比较，来描述光源的光色。所以色温就是当某一种光源的色度与某一温度下的绝对黑体的色度相同时绝对黑体的温度。因此，色温是以温度的数值来表示光源颜色的特征。

在人工光源中，只有白炽灯灯丝通电加热与黑体加热的情况相似。对白炽灯以外的其他人工光源的光色，其色度不一定准确地与黑体加热时的色度相同。所以只能用光源的色度与最相近黑体的色度的色温来确定光源的色温，这样确定的色温叫相对色温。

色温用绝对温度“K”表示，绝对温度等于摄氏温度加 273。如正午的日光具有色温为 6500 K，就是说黑体加热到 6500 K 时发出光的颜色与正午的颜色相同。表 1-2 列出了一些常见光源的色温。

表 1-2 常见光源的色温

光 源	色 温/K	光 源	色 温/K
晴天室外光	13 000	昼光色、荧光灯	6500
全阴天室外光	6500	氙灯	5600
白天直射日光	5550	炭精灯	5500~6500
45°斜射日光	4800		

色温是光源的重要指标，一定的色光具有一定的相对能量分布。当温度逐渐升高时，其相对光谱能量分布的峰值部位将向短波方向变化，所发的光带有一定的颜色，其变化顺序是红—黄—白—蓝。

## 3. 光源显色性

光源显色性是指在不同的光源照射下，显示同色能力的强弱。在长期的生产生活实践中，人们已经习惯于在日光下辨认颜色。尽管日光的色温和光谱能量分布随着自然条件的变化有很大的差异，但人眼的辨认能力依然是准确的。这是人们在自然光下长期实践对颜色形成了记忆的结果。尽管随着科学技术的发展，已经出现了许多与日光相似的光源，如荧光灯、汞灯等，但在有些人工光源下观察到的颜色与日光下看到的颜色是不同的，这就涉及到光源的显色性问题。

通过研究发现，虽然人造光源的颜色与日光相似，但光谱能量分布与日光却有很大的差别。在其光谱中缺少某些波长的单色光成分，由于同一个颜色样品在不同的光源下可能使人眼产生不同的色彩感觉，而在日光下物体显现的颜色是最准确的。因此，可以用日光作标准（参照光源），将白炽灯、荧光灯、钠灯等人工光源（待测光源）与其比较，显示

同色能力的强弱叫做该人工光源的显色性。我国国家标准《光源显色性评价方法》(GB 5702—1985)中规定用普朗克辐射体(色温低于 5000 K)和组合日光(色温高于 5000 K)做参照光源。为了检验物体在待测光源下所显现的颜色与在参照光源下所显现的颜色相符的程度,采用“一般显色性指数”作为定量评价指标。显色性指数最高为 100。显色性指数的高低,就表示物体在待测光源下“变色”和“失真”的程度。光源的显色性是由光源的光谱能量分布决定的。日光、白炽灯具有连续光谱,连续光谱的光源均有较好的显色性。

通过对新光源的研究发现,除连续光谱的光源具有较好的显色性外,由几个特定波长色光组成的混合光源也有很好的显色效果。如 450 nm 的蓝光,540 nm 的绿光,610 nm 的橘红光以适当比例混合所产生的白光,虽然为高度不连续光谱,但却具有良好的显色性。用这样的白光去照明各色物体,都能得到很好的显色效果。

光源的显色性以一般显色性指数  $R_a$  值区分, $R_a$  值为 100~75 显色优良;75~50 显色一般;50 以下显色性差。

光源显色性和色温是光源的两个重要的颜色指针。色温是衡量光源色的指针,而显色性是衡量光源视觉质量的指针。因此当光源色与人们所习惯的色温相近时,显色性就成为光源质量的更为重要的指针。这是因为显色性直接影响着人们所观察到的物体的颜色。

#### 4. 标准光源

由于照明光源对物体颜色的影响比较大,因此在颜色的测定和管理中,必须要规定标准的照明光源。因为光源的颜色与光源的色温密切相关,所以国际照明委员会(CIE)规定了四种标准照明体的色温标准。

标准照明体 A:代表完全辐射体在 2856 K 发出的光( $X_0 = 109.87$ ,  $Y_0 = 100.00$ ,  $Z_0 = 35.59$ )。

标准照明体 B:代表相关色温约为 4874 K 的直射阳光( $X_0 = 99.09$ ,  $Y_0 = 100.00$ ,  $Z_0 = 85.32$ )。

标准照明体 C:代表相关色温约为 6774 K 的平均日光,光色近似阴天天空的日光( $X_0 = 98.07$ ,  $Y_0 = 100.00$ ,  $Z_0 = 118.18$ )。

标准照明体  $D_{65}$ :代表相关色温约为 6504 K 的日光( $X_0 = 95.05$ ,  $Y_0 = 100.00$ ,  $Z_0 = 108.91$ )。

标准照明体 D:代表标准照明体  $D_{65}$  以外的其他日光。

CIE 规定的标准照明体是指特定的光谱能量分布,是规定的光源颜色标准。但并不是必须由一个光源直接提供,也不一定必须用某一光源实现。为了实现 CIE 规定的标准照明体的要求,还必须规定标准光源,来实现标准照明体所要求的光谱能量分布。CIE 推荐下列人造光源来实现标准照明体的规定。

标准光源 A:色温为 2856 K 的充气螺旋钨丝灯,其光色偏黄。

标准光源 B:色温为 4874 K,由 A 光源加罩 B 型 D-G 液体滤光器组成。光色相当于中午日光。

标准光源 C:色温为 6774K,由 A 光源加罩 C 型 D-G 液体滤光器组成,光色相当于有云的天空光。

CIE 标准光源 A、标准光源 B、标准光源 C 的相对光谱能量分布曲线如图 1-6 所示。

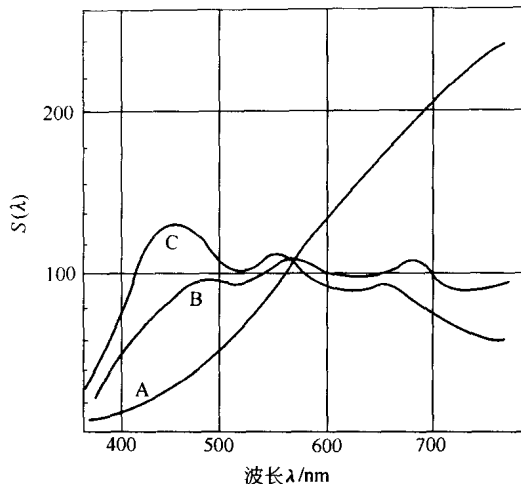


图 1-6 标准光源 A、标准光源 B、标准光源 C 的相对光谱能量分布曲线

### 5. 颜色的物理表示

根据颜色的成色原理，CIE 于 1931 年建立了两种颜色的表示系统，简称表色系。一种为 RGB 表色系，一种为 XYZ 表色系。其基本出发点是既然颜色可以由三个变量表示，那么矢量空间就代表一切色光。如图 1-7 所示，矢量  $OC$  的长度表示色光的强度，也称为色度。矢量的方向代表颜色。矢量与坐标系的  $(1,1,1)$  平面交点  $S$  坐标表示为：

$$s_1 = \frac{p_1}{p_1 + p_2 + p_3},$$

$$s_2 = \frac{p_2}{p_1 + p_2 + p_3},$$

$$s_3 = \frac{p_3}{p_1 + p_2 + p_3}$$

式中， $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  为  $C$  点的坐标； $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  为  $S$  点坐标，表示各单色光刺激在色光总刺激中所占比例，称为三刺激系数或三刺激比值（trichromatic coefficients）。

如图 1-7 所示，矢量  $OC$  线上的色光具有相同的三刺激系数，而色度不同。三刺激值的配比  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  决定着颜色的色调， $OC$  的长度决定色光亮度。为了将所有色调绘制在同一个平面上，以三原色  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  为顶点作成一个等边三角形，称之为色品三角，又称为麦克斯韦三角。如果取色品的三角高度为 1，则三角形内任意一点  $S$  的距离  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$  也表示各单色光刺激中所占的比例，称为色品。各单色光色品所连成的曲线称为光谱轨迹（spectrum locus）。色品轨迹所围成的表示各种色调的图形称为色品图。

(1) CIE-RGB 表色系 国际照明委员会（CIE）规定红（red）、绿（green）、蓝（blue）三原色的波长分别为 700 nm、546.1 nm、435.8 nm，RGB 表色系就是取三原色为色品三角形的三个顶点。对等能量单色光谱用标准观察者求出它们的同色光三刺激值曲线。CIE-RGB 光谱三刺激值是 317 位正常视觉者，用 CIE 规定的红、绿、蓝三原色光，对等能光谱色从 380 nm 到 780 nm 所进行的专门性颜色混合匹配实验得到的。把两个颜色调整到视觉相同的方法叫颜色匹配，颜色匹配实验是利用色光加色来实现的。实验时，匹配光谱每一波长为 1 的等能光谱色所对应的红、绿、蓝三原色数量，称为光谱三刺激



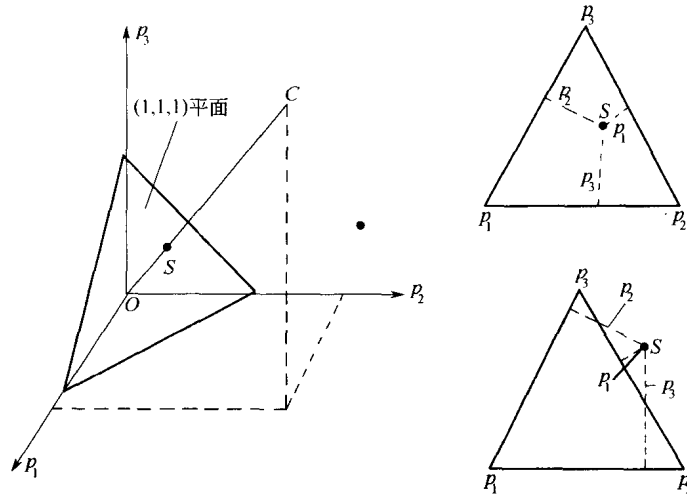


图 1-7 色光矢量与色品坐标

值。根据 1931CIE-RGB 系统标准观察者光谱三刺激值求出光谱色色度坐标：

$$r = \frac{\bar{R}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}, \quad g = \frac{\bar{G}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}, \quad b = \frac{\bar{B}}{\bar{R} + \bar{G} + \bar{B}}$$

然后在  $r$ 、 $g$ 、 $b$  坐标系统中绘制出 1931 CIE-RGB 系统色度图。如图 1-8 所示。图 1-9 所示的是 CIE 的 RGB 色品图。

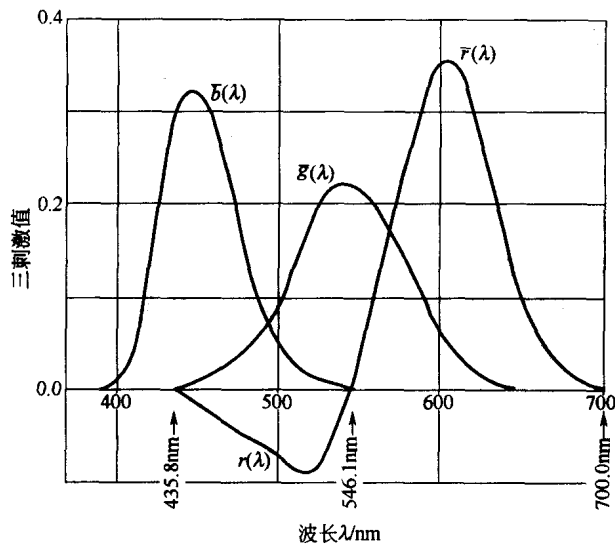


图 1-8 CIE-RGB 表色的等色函数

从图 1-8 中可以看出，如果从现实的色光谱中求三原色，为了取得某同色光谱配比，会有一个原色出现负值。在图 1-9 的色品三角形中，这种颜色可能在三角形外。其原因是待配色为单色光，其饱和度很高，而三原色光混合后饱和度必然降低，无法和待配色实现匹配。为了实现颜色匹配，在实验中必须将上方红、绿、蓝一侧的三原色光之一移到待配色一侧，并与之相加混合，从而使上下色光的饱和度相匹配。