

周强 编著

涂料调色



化学工业出版社

·北京·

前 言

随着涂料行业的蓬勃发展，涂料生产过程中的调色环节显得越来越重要了。各种产品涂装了适当的色漆之后，会给人带来赏心悦目的感觉，产品的附加值也会增加。为了适应涂料行业的发展，编者在总结多年高职教学经验的基础上，结合在涂料企业的调色工作经历，编写了此书。

本书以培养实用型涂料调色人才为目标，在内容选择上以“必需、够用”为度，在知识结构上力求难易结合，合理过渡，密切衔接。全书以认识颜色、用数据表示颜色、测定颜色、实际调色操作为主线，从颜色的物理学基础讲起，逐渐深入到颜色表示方法，通过对颜色属性、加色混合与减色混合、用数据表示颜色的方法（CIE 1931-XYZ 标准色度系统）的学习，介绍了均匀色空间及孟塞尔表色系统；在此基础上，对颜色的测量原理及测色仪器也作了介绍，最后介绍计算机调色和人工调色方法以及相关技巧，使读者通过对本书的学习，既掌握涂料行业的计算机调色技能，也掌握人工调色技能。

本书内容深入浅出，通俗易懂，给人以启发。本书可作为高等职业院校涂料方向专业的教材，也可供相关专业技术人员及涂料调色人员学习参考。虽然本书以涂料调色为重点，但其中的调色原理及方法完全可以扩展到塑料、纺织印染等行业，可以说，本书既是一本颜色科学的普及性教材，又是一本涂料及相关专业的参考书。

在此书的编写过程中，采用了涉及领域的相关技术数据（附录部分），同时也得到了许多涂料企业的调色技术人员的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，本书难免有不妥之处，恳请同行和读者批评指正。

编者

2008年6月

目 录

第一章 色彩的物理基础和属性	1
第一节 色彩的物理基础	1
一、光与颜色	1
二、可见光谱	2
三、光度学基础	3
四、光度学有关物理量	4
第二节 色彩的属性	7
一、色调	8
二、明度	10
三、饱和度	12
四、颜色三属性的相互关系	14
五、色彩的感情	15
第三节 颜色的粗略表示方法	19
一、颜色的命名	19
二、颜色的色谱表示法	22
三、颜色的光谱表示法	25
习题	27
第二章 色视觉的生理基础	28
第一节 人眼的构造、成像机理、视觉功能	28
一、眼睛的构造	28
二、视网膜成像机理	31
三、人眼的视觉功能	31
第二节 颜色视觉现象	32
第三节 色视觉的主要理论	34
一、三原色学说	34
二、加色混合和减色混合	37

三、对立颜色学说	39
习题	40
第三章 CIE-XYZ 标准色度系统	41
第一节 CIE 1931- <i>RGB</i> 系统	41
一、颜色匹配实验	41
二、 <i>RGB</i> 系统的提出	43
三、色度坐标	44
四、CIE 1931- <i>RGB</i> 系统	47
第二节 CIE 1931- <i>XYZ</i> 系统	48
一、由 CIE 1931- <i>RGB</i> 色度系统向 CIE 1931- <i>XYZ</i> 色度系统转换	48
二、CIE 1931- <i>xy</i> 色度坐标	52
三、CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值	53
第三节 CIE 1964 补充标准色度系统	55
第四节 CIE 标准照明体和标准光源	58
一、黑体和色温度	59
二、标准光源和标准照明体	60
第五节 色度计算方法	63
一、三刺激值的计算	63
二、色度坐标的计算	66
第六节 颜色的主波长和兴奋纯度计算	68
一、主波长的计算	68
二、兴奋纯度和色纯度	70
习题	72
第四章 均匀颜色空间及色差计算	74
第一节 均匀颜色空间	75
第二节 色差计算	79
一、ANLAB 色差公式	79
二、CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 色差公式及色空间	81
三、CIE $L^* C^* H^\circ$ 色空间	83
第三节 色差单位及色差计算的实际意义	84
一、色差单位	84

二、色差计算的现实意义	86
第四节 白度计算	88
一、以喜爱白或理想白为基础推导出的白度计算公式	89
二、在实验样品反射率测定的基础上推导出的白度测定公式	91
习题	93
第五章 孟塞尔表色系统	94
第一节 孟塞尔系统的构成	95
一、表色原理	95
二、颜色三属性的表示法	95
三、孟塞尔图册	98
四、孟塞尔表色系统的均匀性	99
五、孟塞尔表色系统中颜色的表示	100
六、确定颜色的孟塞尔标号需注意的问题	101
第二节 孟塞尔新标系统	102
一、孟塞尔明度	102
二、孟塞尔色相和饱和度	103
三、CIE 1931-XYZ 系统与孟塞尔颜色系统之间的转换关系	105
四、孟塞尔表色系统在涂料调色中的应用	113
习题	116
第六章 颜色的测定及常用测色仪器	117
第一节 颜色的测量方法	117
一、颜色测定方法	117
二、仪器测色的几何条件	119
第二节 荧光样品的分光测色原理	121
第三节 常用的颜色测色仪器	127
一、分光光度测色仪	127
二、光电积分式测色仪	137
习题	143
第七章 调色基础知识	144
第一节 基础漆与色浆	144

一、基础漆	144
二、色浆	146
第二节 色漆的配方设计	148
一、成膜物的选择	148
二、颜料的选择与用量	150
第三节 色漆的调配	165
一、配色的三原则	166
二、配色用颜料	170
三、传统的色漆配制（人工调色）方法	171
四、仪器（计算机）配色	175
五、颜色配色系统	179
习题	179

第八章 调色操作 181

实验一 全自动色差计、Datacolor 400 分光光度仪及手动调色机的 使用	181
一、实验目的	181
二、实验任务	181
三、实验仪器及操作	181
实验二 基础漆数据库的建立	197
一、实验目的	197
二、实验仪器及耗材	197
三、建立基础（原材料）数据库的意义	198
四、实验步骤	198
五、注意事项	201
实验三 色卡样品色的调配	202
一、实验目的	202
二、实验仪器及耗材	202
三、实验步骤	202
四、注意事项	204
实验四 调色配方的修正	204
一、实验目的	204
二、实验仪器和耗材	204

三、实验过程	204
四、注意事项	206
实验五 调色综合训练	206
一、实验目的	206
二、实验仪器耗材	207
三、实验过程	207
四、注意事项	209
五、涂料企业的调色工作	209
附录	211
附录一 CIE 1931-RGB 标准色度观察者光谱三刺激值	211
附录二 CIE 1931 标准色度观察者光谱三刺激值	213
附录三 CIE 1964-RGB 系统补充标准色度观察者光谱三刺激值	216
附录四 CIE 1964 补充标准色度观察者光谱三刺激值	218
附录五 CIE-XYZ 系统权重分布系数	220
附录六 X 、 Y 、 Z 与 V_X 、 V_Y 、 V_Z 的关系	226
附录七 CIE 1931 色度图标准照明体 A、B、C、E 恒定主波长线的 斜率	237
参考文献	247

第一章 色彩的物理基础和属性

第一节 色彩的物理基础

一、光与颜色

在日常生活中人们能看到各种色彩，如蓝蓝的天空、绿色的草原、朵朵白云、鲜红的玫瑰花瓣、绿色的庄稼、黄色的油菜花等。所有这些颜色都是在白天才能看见、分辨，也就是说只有在光线照射的条件下才能呈现出来。人们还注意到，在太阳光下看见某一物体呈现某种颜色，如果再把它放在白炽灯下（特别是某种彩色灯下），该物体的颜色就发生了改变。于是，人们推断人眼之所以能看到色彩，是由于有光的存在，颜色都是光作用在物体表面后，发生了不同的反映，再刺激人的眼睛后产生的。不同的光会产生不同的刺激，所以眼睛看到不同的物体就会有不同的颜色感觉。

人们把自然界的物体根据其自身能否发光，划分为发光体与不发光体两大类。把本身能发射光谱的物体叫做发光体或光源。长期的实践证明，发光体的颜色决定于它们发射出来的光谱。自然界中大部分物体本身不能发光，称为不发光体。按照物体是否透明，又把不发光体分为透明体和不透明体。在黑暗条件下，人眼看不见不发光物体颜色的，只有当外来的光线照射在其表面后，它的颜色才能被人眼感知。所以，颜色是光照射到物体表面后的结果。

颜色与电流、密度等普通物理量不同，它不是一个单纯的物理量。对于不透明物体（对于透明物体是透射光），当外来光线照射到物体表面后，发生反射，反射光刺激人眼后，引起视觉神经冲动（或兴奋），再把信号传递给大脑。也就是说当反射光刺激眼睛视网膜后，还要经过一系列的生理活动和心理的反映，才能产生颜色的感觉。也就是眼睛到底感觉到哪种颜色，除了取决于外来照射光、

2 涂料调色

物体表面结构（决定反射哪些入射光）外，还决定于眼睛被反射光刺激后产生的生理反应和大脑产生的心理反应。对于发光体，颜色决定于其发射的光谱所产生的这一系列生理和心理反映。因此，从物理学角度看，颜色是可见光的特征；从生理学角度看，颜色是反射光（或透射光、发射光）对眼睛视网膜的不同刺激；从心理学角度来说，颜色是反射光（或透射光、发射光）刺激大脑后的反映。

二、可见光谱

光是一种电磁波。电磁波有很大的波长范围。根据波长的不同，按波长从小到大的顺序，可以把电磁波分为 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线和无线电波等（图 1-1）。在电磁波谱中，只有波长在 380~780nm 范围内的那一小部分才能使人眼的视觉神经产生冲动（兴奋），才能被人眼感知。人们把这一波长范围内的电磁波叫做可见光。

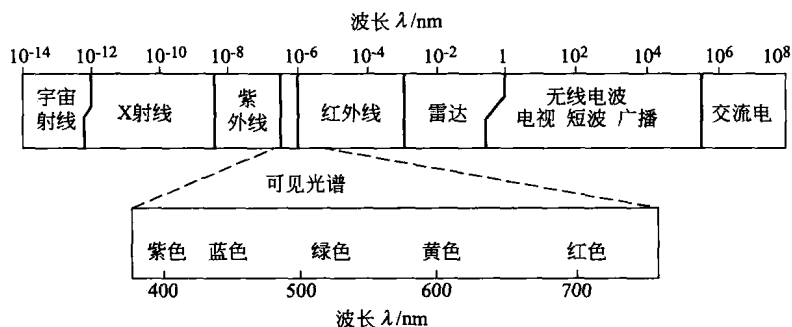


图 1-1 电磁波谱及其中的可见光谱

在日常生活中，不论是自然光源（如太阳）还是人工光源（如电灯、蜡烛），它们发出的光都是连续的电磁波，不过，只有其中波长在 380~780nm 范围内的那部分电磁波才能引起视知觉，其余波长的电磁波人眼是感觉不到的。

（一）光的色散

人们常说的太阳光，是指太阳发射的电磁波谱中，能被人眼感知的那部分，是一段连续光谱，常被称为白光。其实，可见光中，

每一种波长的光都有各自的颜色，所以白光是由多种颜色的光混合而成的，而且人们还可以通过一定的办法把白光中的各种色光分解出来。把白光分解成各种色光的过程叫做光的色散（图 1-2）。白光经色散后，色散光会按波长从大到小的顺序排列成红色、橙色、黄色、绿色、青色、蓝色、紫色的彩色光带，叫做色散光谱。当然，不同种类的白光（如太阳光、烛光、灯光），其光谱组成也不同。

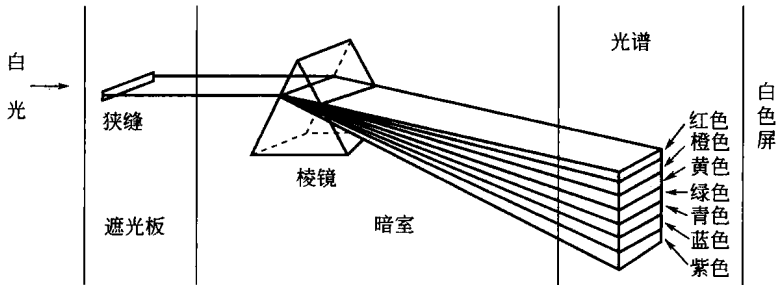


图 1-2 光的色散示意

（二）单色光与复色光

可见光谱中每一种单一波长的光，都具有各自的颜色，把这种具有单一波长不能再分解为几种颜色的光叫做单色光。因为可见光谱的波长是连续的，那么光谱的颜色变化也是连续的，呈逐渐过渡状态。人眼对色光颜色的分辨能力有限，通常情况下，眼睛看起来是同一种颜色的光，实际上还是一定波长范围内的光谱。所以，平常意义上的单色光，并不是严格意义上的单色光。于是，人们就引入了单色光单色性的概念，用来描述单色光的纯度。

由两种或两种以上的单色光混合而成的光叫做复色光。复色光中含有多种（波长的）单色光，例如，太阳光、灯光、烛光、火光等。通过一定的方法（用棱镜、光栅等分色器）又可把复色光分解成单色光。

三、光度学基础

（一）辐射通量

从能量角度看，光是一种辐射能，是沿着光的传递方向进行传

4 涂料调色

播的能量流。在日常生活中，人们常说的“明亮”一词，是定性描述，只能在不严密的情况下使用。例如，激光很“亮”，但不能把它用于室内照明，因为它不具有充足的亮度。又如，用几支和一支荧光灯分别照明同一空间，所获得的亮度是不同的。如同人们用密度（单位体积物质的质量）来衡量物质的轻重一样，光的明亮程度也要用立体角、面积等物理量规格化以后才便于衡量。把定量地测定光的明亮程度的科学叫做光度学（photometry），由光度学得到的规范化的明亮度量叫做光度量（photometric quantity）。

光度量都是用对应的辐射量乘以光谱光视效率得到的，光源在单位时间内所辐射出的总能量称为辐射通量。

（二）光谱光效率函数

光对人眼所引起的视觉强度，不仅与光的能量大小有关，还与光的波长有关。不同波长的可见光，即使辐射能量相同，但人眼看上去明暗程度是不同的。换句话说，就是人眼对不同波长的光的视觉灵敏度不同。把用来度量可见光所引起视觉能力的量，叫做光谱光效能。单一波长可见光的光谱光效能与波长为 555nm 的绿色光的光谱光效能之比，叫做该波长的相对光谱光效率。正常人眼在昼光下对波长为 555nm 的绿光最敏感，此时的可见度达到最大值，将其相对光谱光效率函数（ V_λ ）定义为 1。其他的单一波长的色光再与它作比较，就可得到相应的光谱光效率函数 V_λ 值。

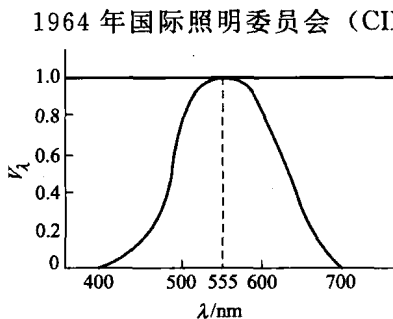


图 1-3 标准白昼视觉的光谱光效率函数曲线

1964 年国际照明委员会（CIE）对各波长色光的可见度进行了测定，获得了正常人眼的标准白昼视觉光谱光效率函数。以波长为横坐标， V_λ 值为纵坐标，就可获得光谱光效率函数曲线，见表 1-1 与图 1-3。

四、光度学有关物理量

（一）光通量和光能量

光源在单位时间内发出

表 1-1 标准白昼视觉的光谱光效率函数值

λ/nm	V_λ	λ/nm	V_λ	λ/nm	V_λ
400	0.0004	530	0.862	650	0.107
410	0.0012	540	0.954	660	0.061
420	0.0040	550	0.995	670	0.032
430	0.0116	555	1.000	680	0.017
440	0.023	560	0.995	690	0.0041
450	0.038	570	0.952	700	0.0032
460	0.060	580	0.870	710	0.0021
470	0.091	590	0.750	720	0.00105
480	0.139	600	0.631	730	0.00055
490	0.208	610	0.503	740	0.00025
500	0.323	620	0.381	750	0.00012
510	0.503	630	0.265	760	0.00006
520	0.710	640	0.175		

的光能量大小称为光通量，光通量是时间的函数，常用 $\Phi(t)$ 来表示。从另一个角度来说，能引起人眼视觉的辐射通量，就称为光通量或光功率。

光能量定义为光通量与时间的乘积，单位是流明·秒 (lumen second)，符号是 $\text{lm} \cdot \text{s}$ 。光通量是时间的函数，所以光能量可定义为：

$$Q = \int \Phi(t) dt \quad (1-1)$$

(二) 发光强度和面发光度

光是一种辐射能，所以各种光源所发出的光能都有一定的强度。这种光能的强度，过去是以标准烛光为计算单位的。即以点燃一种特制的鲸油蜡烛，把它沿水平方向的发光强度定义为基数——1 烛光。现在所用的以电源发光的光源，其光强度的计算单位仍以烛光为标准，称作国际烛光，在习惯上称瓦特。25W 的电灯，其光强度等于 25 国际烛光。自然光照明中，其光强度不是一成不变的，在不同季节、不同时间、不同气象条件、不同高度，光强度都不相同。

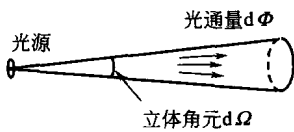
发光强度表示光源发光强弱的特性，例如，太阳光要比电灯光

6 涂料调色

强，电灯光要比煤油灯光强。光源在指定方向上单位立体角内所通过的光通量定义为光源在此方向上的发光强度，即：

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (1-2)$$

式中， Ω 为立体角，单位是球面度（steradian），符号是 sr。



定义是在半径为 r 的球面上面积为 r^2 的面元对球心的张角为 1sr 。对于整个球面，面积是 $4\pi r^2$ ，所以整个球面的立体角为 $4\pi\text{sr}$ 。

图 1-4 发光强度定义的图解

发光强度的单位是坎德拉（candela），符号是 cd。发光强度的定义可用图 1-4 来表示。

从发光度的定义可推知，它不只局限于自身发光的光源，还包括自身不能发光，但是受光源照射后因反射光变成的间接光源，也称为第二光源，第二光源的发光度决定于其被照明的程度。

（三）照度与亮度

当一个物体被光源照射时，它被照明的程度与照射到表面上的光通量和被照面积的大小有关（图 1-5），照度在数值上等于单位面积上所接受的光通量。

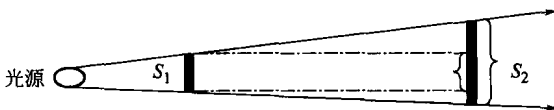


图 1-5 照度的定义图解

亮度一般是针对光源而言的，也可以扩展为自身不发光而被外部光源反射或透射的表面。要衡量表面的反光能力，可以用发光强度这个物理量。但是，要比较两种不同类型光源的明亮程度时，就要用到亮度这一物理量。亮度表征的是在单位面积上的发光强度，即

$$L = \frac{dI}{dS} \quad (1-3)$$

亮度的单位是坎德拉每平方米（ cd/m^2 ）。式（1-3）中的面积是指一个在观察方向上的正投影面积。当观察方向与该面的法线夹角为

θ 时，亮度定义为：

$$L = \frac{dI}{dS \cos\theta} \quad (1-4)$$

所以，光源的亮度的严格定义是在表面某一点处的面元在给定方向上的发光强度与该面元垂直于给定方向的平面上的正投影面积之比，如图 1-6 所示。

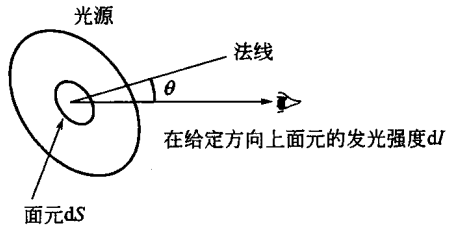


图 1-6 亮度的定义图解

亮度与照度是不同的两个概念，亮度是指光源（包括间接光源）表面发射光强的度量，照度是指光

源照射下某表面接受的光通量多少。被光源照射的表面（间接光源）的亮度与被照面的照度成正比，也就是被照射物体表面的亮度越大，是因为被照面上所受到的照度越大导致的。

第二节 色彩的属性

在五彩缤纷的自然界中，色彩众多。人们经常需要对颜色进行认识、区分、辨别、信息传递和比较。如前所述，色彩虽然是一种自然现象，但又不是一个单纯的物理量，不能用一般的量、质来进行衡量，所以，人们就遇到一个比较复杂的问题。为解决这一难题，国际上统一规定了用于区别不同色彩的三个特殊物理量：色调、明度和饱和度。把色调、明度和饱和度称为色彩的三属性。

色调：用来区别色彩的名称。用符号 Hue 表示，简写为 H 。

明度：用来表征色彩的明暗性质。用符号为 Value 表示，简写为 V 。

饱和度：用来表征色彩的纯度，也就是色彩的饱和状态，用符号为 Chroma 表示，简写为 C 。

可以把自然界中物体表面的颜色划分为两类。一类是消色，它对入射光进行非选择性吸收（对各波长的入射光都进行等比例吸

8 涂料调色

收)后,再把剩余的入射光反射到人眼中,就产生了消色的视知觉。所以,各种消色之间只有反射光多少的差别,也就是明度差别,没有色调和饱和度的区别。能把入射白光全部反射的表面,呈现白色;按等比例无选择地吸收一部分入射光线的表面,在白光下呈现各种灰色;能把入射光线全部吸收的表面,呈现黑色。另一类是彩色,它们是物体表面对入射光进行选择吸收(对各波长的入射光的吸收比例不同)后的结果。各种彩色之间,除有明度差别外,还有色调与饱和度的差别。

所谓的消色就是指黑色、白色、灰色的物体对光源照射到物体表面的光谱成分不是被有选择地吸收与反射,而是等量吸收和等量反射各种入射光谱成分,这些物体看上去便不是彩色的。对各种光谱成分全部吸收的表面,看上去是黑色的;反射全部入射光的表面,看上去是白色的;等量吸收一部分,等量反射一部分的表面,则是灰色的,根据反射部分占入射光谱光通量的比例大小,又可以把灰色分为明灰色、灰色、暗灰色。

消色在生活中的色彩搭配和视觉效果上有很积极的作用,它和任何色彩搭配在一起,都显得和谐、协调,能收到令人满意的色彩效果。此外,由于消色是无彩色,它与任何彩色配置在一起,均可通过对比而使该彩色的色彩特征表露得更加鲜明。

一、色调

色调又叫做色相、色别或色名。它是色彩最主要的特征,是一种颜色不同于另一种颜色的主要区别。例如,红色、绿色、蓝色、青色、品红色、黄色等,只要知道其色调,人们的大脑中就会立刻呈现不同的颜色。当然,色调不只是这几种。这些色彩之间的相互混合,还能产生一系列其他色彩,如橙黄色、蓝绿色、黄绿色、青紫色、红紫色等。认识色调的能力,是准确地鉴别色彩和表达色彩的关键。

(一) 色调的意义和表示方法

人眼对可见光谱中不同波长的光具有不同的颜色感知,这就是各种波长的光具有的特定颜色。如果把一定波长的光或另一些不同

波长的光混合，就会产生更多的颜色感知，呈现出不同的色彩表象，这些表象就称为色调。

颜色的色调是由刺激眼睛视网膜的光的光谱成分所决定的。单色光的色调完全是由其波长决定的，对于复色光，色调除取决于混合光的波长外，还与各波长光的光通量混合比例有关。至于可见光谱中不同波长的光混合，以及按不同光通量比例混合后获得哪种色调的复色光，将在后续章节中作详细介绍。值得注意的是，颜料、染料和色光的混合原理是不同的，而且其色泽纯正性也是无法与光谱色相比拟的。

同种色调的光，其光谱组成不一定相同。换句话说，就是不同光谱组成的光，可能产生同种视觉效果（同种色调）。

（二）人眼对色调的辨别能力

人眼的视网膜受到不同波长的色光刺激后，经视觉通道把信息传递给大脑，就产生了不同的颜色视觉。但是可见光谱中不同波长色光刺激人眼视网膜中的感光细胞后，产生的兴奋程度不同，也就是产生颜色感知的敏感性不同。在可见光谱中，波长在 494nm 附近的青绿色光和 585nm 左右的橙黄色光，只要波长变化 1~2nm，正常人眼就能感觉到是两种颜色的光（正常人眼能辨别出 494nm 的光和 495nm 的光是两种颜色的光）；在绿色光谱段，波长要变化 3~4nm 后，才能感觉到颜色变化；对于可见光谱两端的蓝紫色光谱段和红色光谱段，波长变化几纳米后，人眼根本感觉不到颜色的变化，也就是人眼对这些区段的光谱颜色的辨别能力很差。特别是波长从 655~780nm 和由 380~430nm 这两段波谱中，尽管波长变化了很多，人眼几乎感觉不到颜色的变化。把人眼能感觉到这种颜色变化的最小波长变化叫做颜色辨认阈限。人眼对可见光谱各段的颜色辨认阈限如图 1-7 所示。

一般正常人的眼睛可以从可见光谱中分辨出 100 多种色调，另外，自然界中存在，但可见光谱中没有的谱外色大约有 30 种。实际上有经验的调色、染色工作者能区分的色调要比这些多得多。