

色彩构成

一. 我们是如何看到光和颜色的

当我们谈到颜色的时候，需要考虑三个影响维度：

物体、眼睛、大脑。

人眼本身的结构是非常复杂的，基本无法百分百使用机器还原它的组织结构。人眼的几个重要结构：

1. 瞳孔 (Pupil)

指的是虹膜 (Iris) 中心的开口，相当于人眼的光圈，可以通过收缩或者放大来控制进入人眼的光线数目。

2. 晶状体 (Lens)

光线穿过虹膜后就会经过人眼的晶状体，相当于人眼的镜头，通过放大或缩小它的宽度可以控制光线的聚焦范围。

3. 玻璃体 (Vitreous)

经过晶状体折射聚焦后的光线会穿过玻璃体，它是一种浓稠的半透明凝胶类物质，填充了人眼的大部分区域，并撑起了视网膜。

4. 视网膜 (Retina)

相当于人眼的胶片。它负责接收传进人眼的图像并将其转化成电脉冲，再由视神经传递给大脑。

5. 感光细胞 (Photoreceptors)

视网膜由感光细胞组成，这些细胞可以分成两种：视杆细胞 (Rods) 和视锥细胞 (Cones)。

1) 视杆细胞

对光感十分敏感，因此在夜视力和外围视力上发挥很重要的作用，但由于缺少足够的光敏色素因此难以形成色觉（无法分辨颜色）。

2) 视锥细胞

在较亮的光照下更能发挥作用，主要负责颜色识别。主要有三种锥形感光细胞，分别对红色（波长 600nm 左右）、绿色（波长 550nm 左右）和蓝色（波长 450nm 左右）的光最敏感。

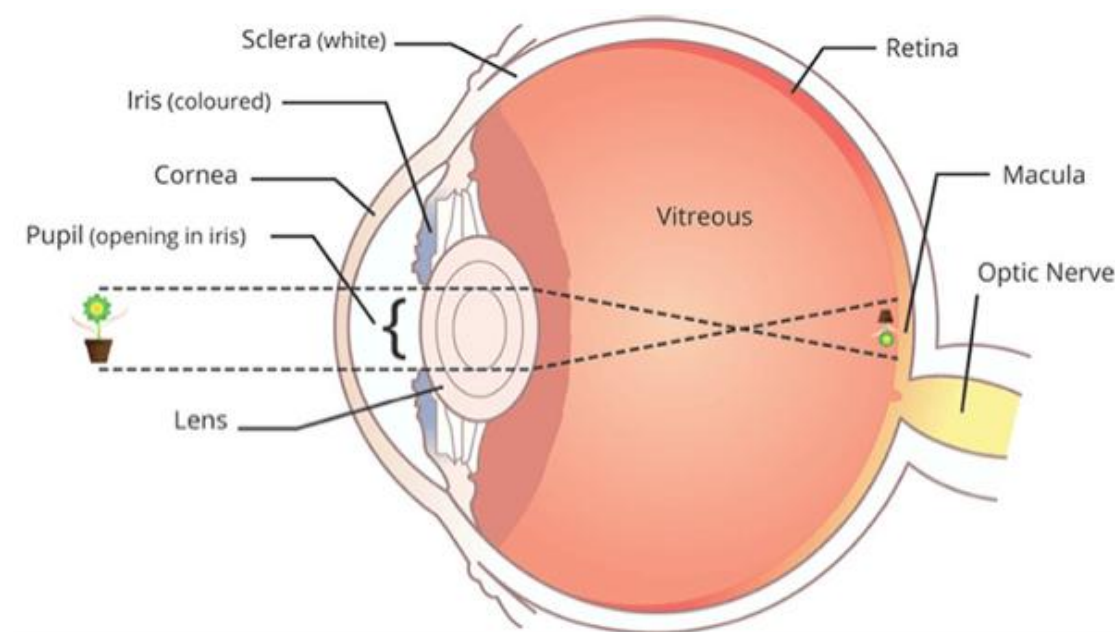


图 1. 人眼重要结构

最后，大脑会负责处理所有的数据信号，例如：**实际视网膜上的成像是上下颠倒的，大脑会把它正过来**。所以，我们“看到的”并不是真正打到人眼上的光线，而是我们大脑根据人眼提供的信号所重建出来的效果。

人眼的结构（三种视锥细胞）决定了我们能够感知到的色域范围。和其他生物相比，人眼的色彩感知能力是很鸡肋的，例如螳螂虾拥有 16 种不同的颜色感知细胞。但下面我们会看到，也幸好我们只有三种，不然色彩管理体系会变得更加更加更加复杂。

二. 什么是光和颜色

1. 光

光通常指的是人类眼睛可以见的电磁波（可见光），视知觉就是对于可见光的知觉。可见光只是电磁波谱上的某一段频谱，一般是定义为波长介于 400 至 700 奈（纳）米（nm）之间的电磁波，也就是**波长比紫外线长，比红外线短的电磁波**。有些资料来源定义的可见光的波长范围也有不同，较窄的有介于 420 至 680nm，较宽的有介于 380 至 800nm。光既是一种高频的电磁波，又是一种由称为光子的基本粒子组成的粒子流。

因此**光同时具有粒子性与波动性，或者说光具有“波粒二象性”**。

总体来说，**光是一种能量，这种能量可以以电磁波的方式传播**。把复色光通过色散系统（例如棱镜）进行分光后，可以依照光的波长（或频率）大小依次排列形成一个图案，我们把这个图案叫做光谱（Spectrum）。光谱中只有一部分可见光谱是可以被人眼看到的，这部分的波长范围大约在 400nm 到 750nm，这部分被称为可见光。

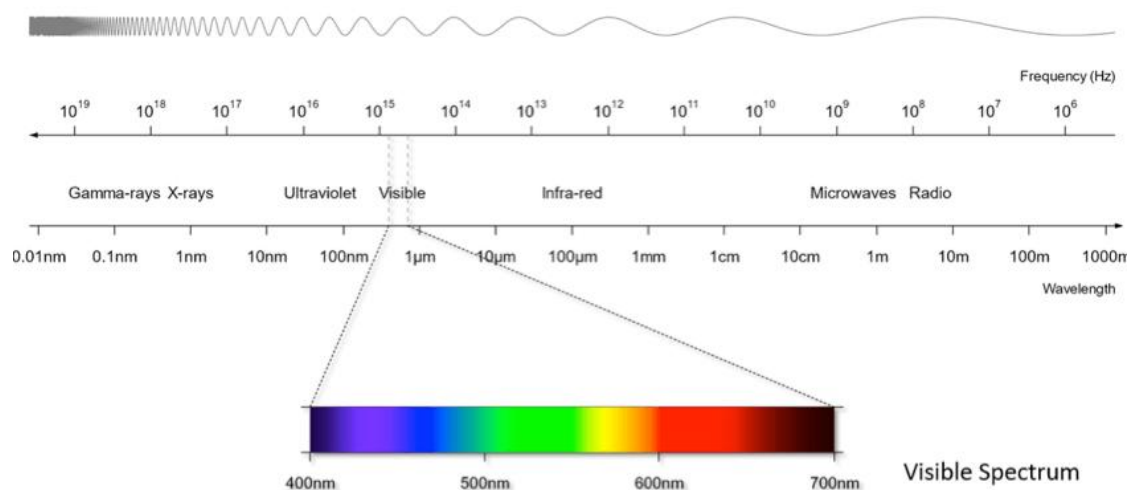


图 2. 可见光谱

2. 颜色

颜色是眼、脑和我们的生活经验对光的颜色类别描述的视觉感知特征，其名称有红色、橙色、黄色、绿色、蓝色或紫色。这种对颜色的感知来自可见光谱中的电磁辐射对人眼视锥细胞的刺激。颜色的种类和颜色的物理规格是通过反射光的波长与物体相联系的。这种反射是由物体的物理性质决定的，如光的吸收、发射光谱等。但人对颜色的感觉不仅仅由光的物理性质所决定，还包含心理等许多因素，比如人类对颜色的感觉往往受到周围颜色的影响。

我们所谓的“颜色”其实是来自可见光谱中的电磁辐射对人眼视锥细胞的刺激。但是，大脑对颜色的感知不仅仅由光的物理性质所决定，比如人类对颜色的感觉往往受到周围颜色的影响，参考著名蓝裙子还是白裙子事件。



图 3. 蓝裙子还是白裙子

三. 光谱

光学频谱，简称光谱，是复波长光通过色散系统（如光栅、棱镜）进行分光后，依照光的波长（或频率）的大小顺次排列形成的图案。光谱中的一部分可见光谱是电磁波谱中人眼可见的唯一部分，在这个波长范围内的电磁辐射被称作可见光。光谱并没有包含人类大脑视觉所能区分的所有颜色，譬如褐色和粉红色，其原因是粉红色并不是由单色组成，而是由多

种色彩组成的。

实际生活中，我们很少会看到光谱上的单色光（monochromatic light），看到的是由很多不同强度和波长的光混合而形成的各种丰富的色彩。一种很容易想到的表示光的方式是使用光谱能量分布（Spectral Power Distribution, PSD），即以波长为横坐标、以光谱辐射度（Spectral Radiant Existence）（亮度、强度、通量）为纵坐标作图：

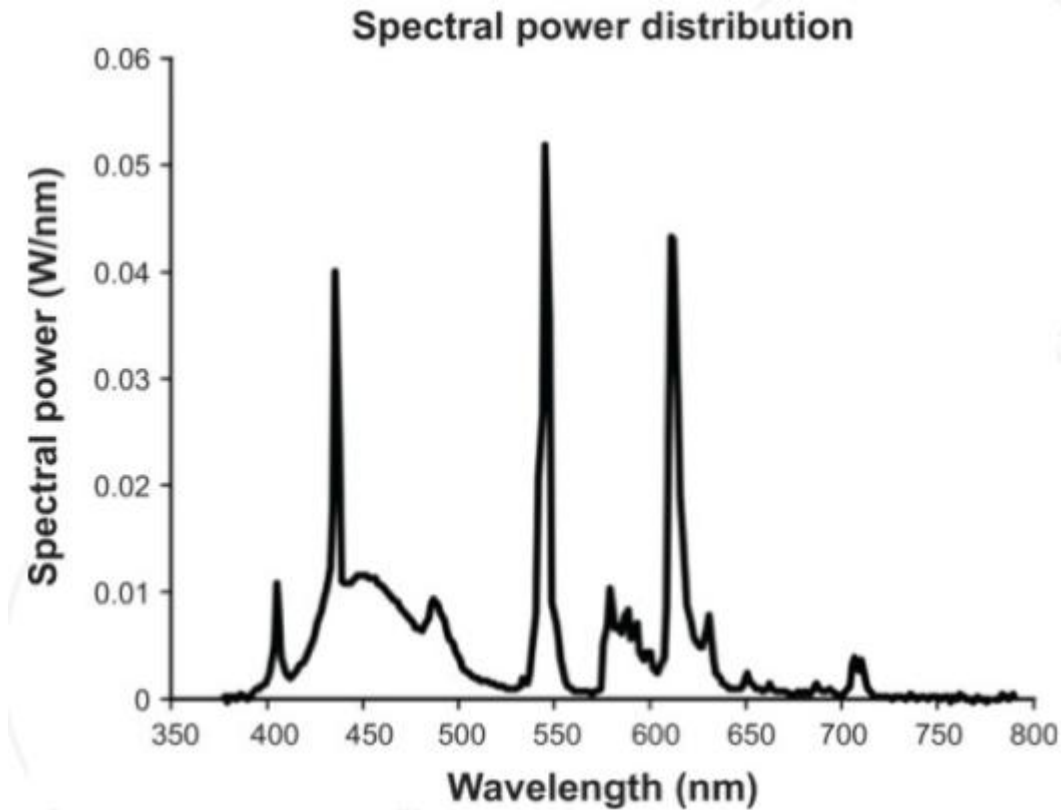


图 4. 光谱能量分布

简单总结：“光”是一种物理概念，我们可以使用光谱能量分布来描述它。而“颜色”是人脑基于可见光谱的电磁辐射对视锥细胞的刺激所得到的一种视觉感知，很多时候甚至是感性的。光和颜色就像一对理性和感性的兄弟如影随形。

四. 量化颜色-Color Matching Functions

光谱能量分布实际上提供了一种量化光的方式。给定任意可见光，我们使用光谱上所有的单波长光作为横坐标，每种单波长光的能量作为纵坐标就可以得到一张 2D 图表。对于很多领域来说，例如：渲染，我们真正关心的不是每种光到底有什么物理特性，而是它在人眼看来是什么颜色。光谱能量分布图对于这些领域来说需要记录的数据还是太多了，毕竟可见单色光的波长范围有 400nm 到 750nm 这么多。如果说是光谱能量分布是一种常见的量化光的方式，那我们需要一种更加简洁的量化颜色的方式。

这里人眼从接收光到看到颜色的工作方式给了我们启发。回想大脑是如何看到颜色的，这源于人眼里的三种视锥细胞传递进来的电信号，这三种视锥细胞分别对短波（S）、中波（M）、长波（L）的光最为敏感。也就是说，任意光无论它们的光谱多么复杂，最后到达人脑的永远只有三种信号源。更进一步讲，即便有两个光谱能量分布完全不一样的复色光，在我们人眼看来它们可能是同样的“颜色”，只要它们对视锥细胞产生的刺激是一致的。也就是说，颜色和光的关系是一对多的，这种现象也被称为条件等（Metamerism）。

等色匹配实验（color matching experiment）就这样开始了。人们选取了三个单波长光，把它们称为 primaries（三元光）。对于可见光谱中的每一个单波长光，找出三个参数分别对

应每个 primary 的强度，使得人眼对它们的颜色感知是一致的。这样对可见光谱中的所有单波长光进行测量，我们就可以得到一组函数 $r(\lambda)$ 、 $g(\lambda)$ 、 $b(\lambda)$ ，把它们画到一张表上就是。

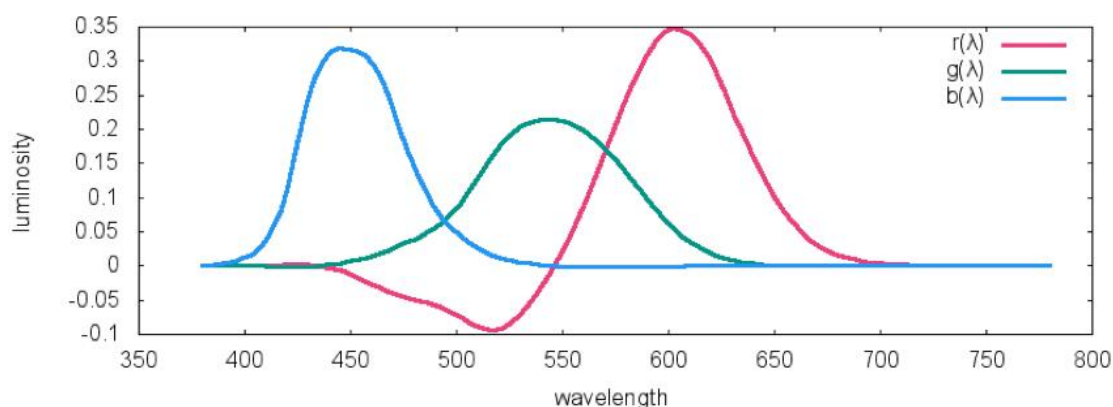


图 5. 颜色匹配

这组函数就是 color matching functions。历史上做了很多这样的等色匹配实验，其中最著名也是应用最广泛（之一）的是 1931 年的 CIE 1931 RGB color matching functions。CIE（International Commission on Illumination）（小知识：为什么缩写不是 COI 而是 CE 呢？因为缩写来源于它的法语名）是一个 1913 年成立的组织，致力于制定国际通用的和光与颜色相关的标准。CIE 1931 RGB 使用的三元光波长分别是 700nm（R）、546.1nm（G）、435.8nm（B）。

可以注意到，上述 color matching functions，是有负值的，例如对于上图中的波长 610nm 来说，它的三个函数值如下：

$$\lambda = 610\text{nm}$$

$$r(\lambda) = 0.34756$$

$$g(\lambda) = 0.04776$$

$$b(\lambda) = -0.00038$$

也就是说，我们无法使用三个正值的三元光来表示可见光谱上的所有单波长光，必须引入负值，那么如何在实验里得到“负数光”呢？下面演示了对于波长 520nm 的实验示意图：

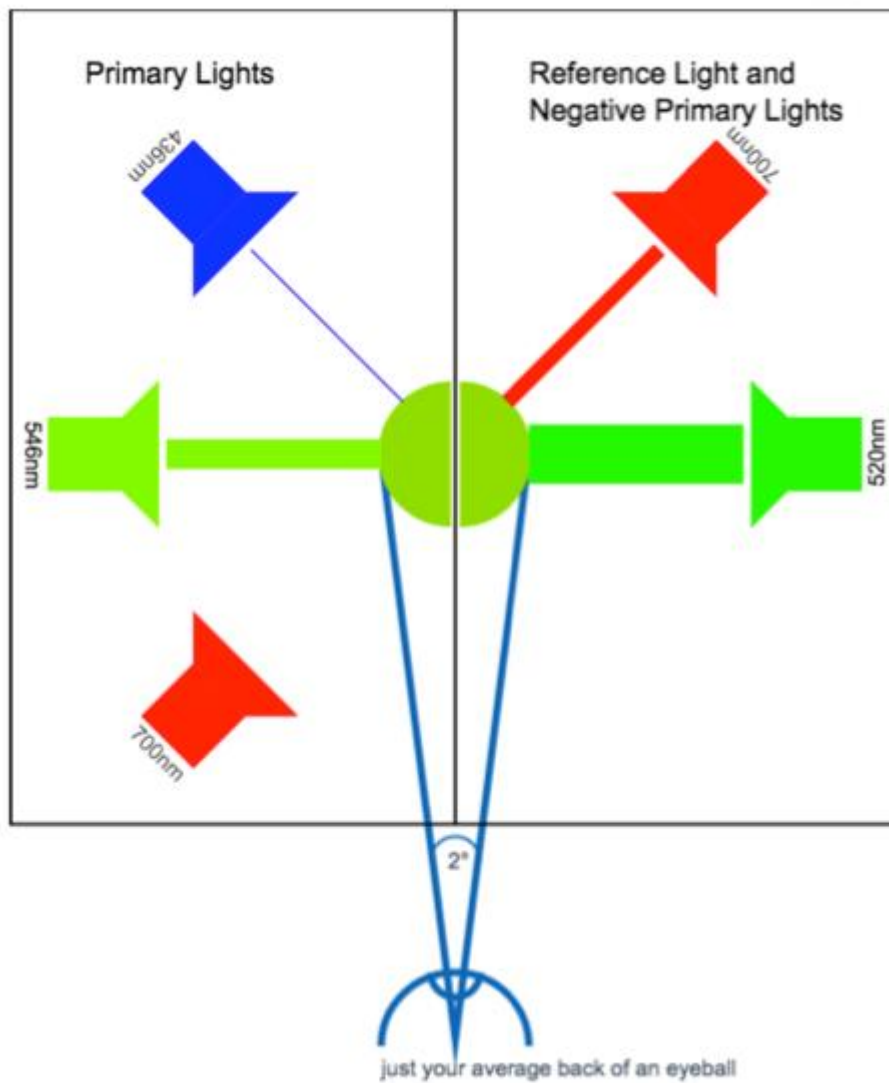


图 6. 等色匹配实验

可以看到，要复现 520nm 这样的亮绿色，我们需要使用一个“负红光”，这可以在 Reference Light 一侧、Primary Red Light 的对面位置使用某个强度值的红光来抵消，这个红光的值就是负值。

下面的动图演示了一个完整的对可见光谱的等色匹配实验过程：

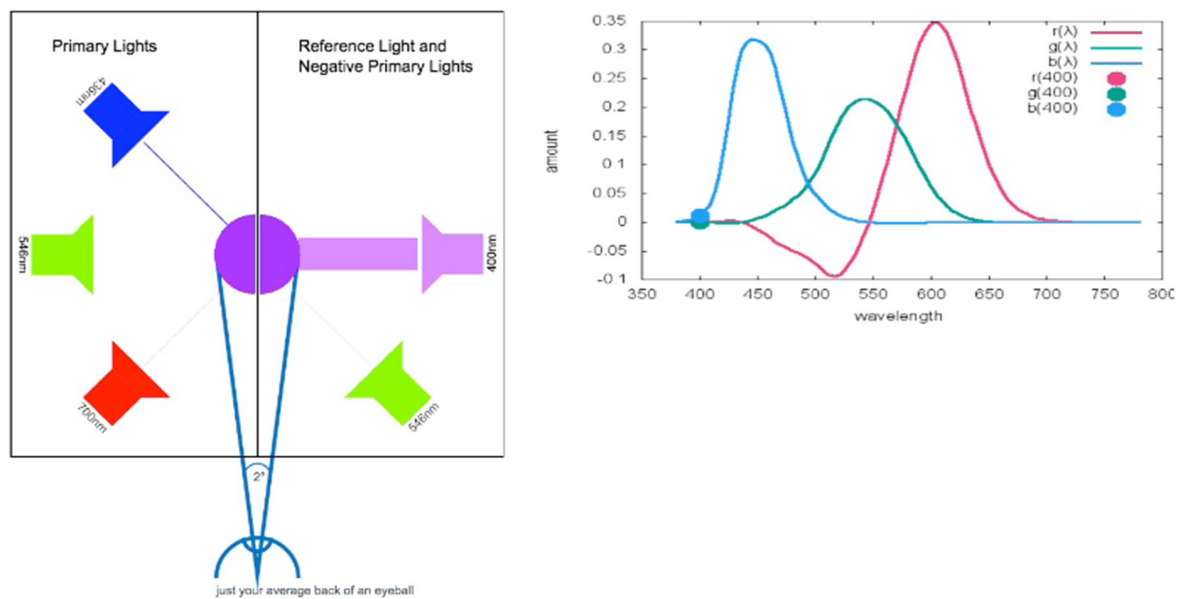


图 7. 等色匹配实验动图

虽然 color matching functions 表示的是对单一波长的可见光源的测量，但由于光的叠加性，我们可以对任意频谱的光源做这样的匹配函数。如果把 RGB 分别作为三维空间的三个坐标轴，把 CIE 1931 color matching functions 的三个函数依次画到这个三维空间里，我们可以得到一条三维空间里的彩色线条，这条曲线就被称为光谱轨迹（Spectral Locus）：

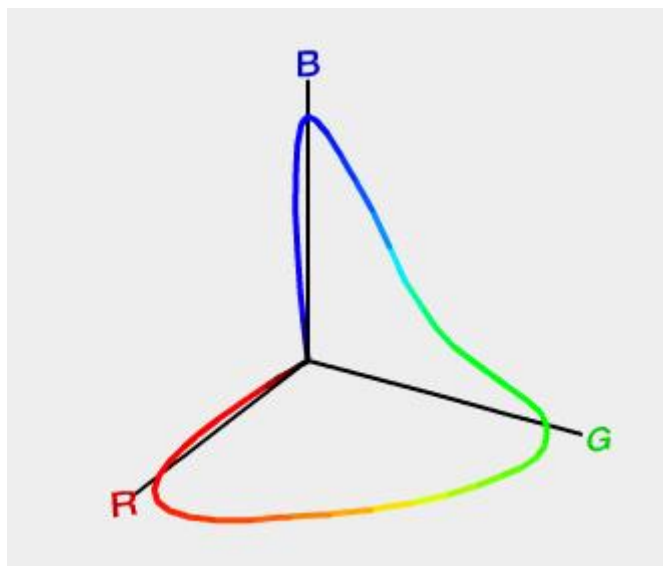
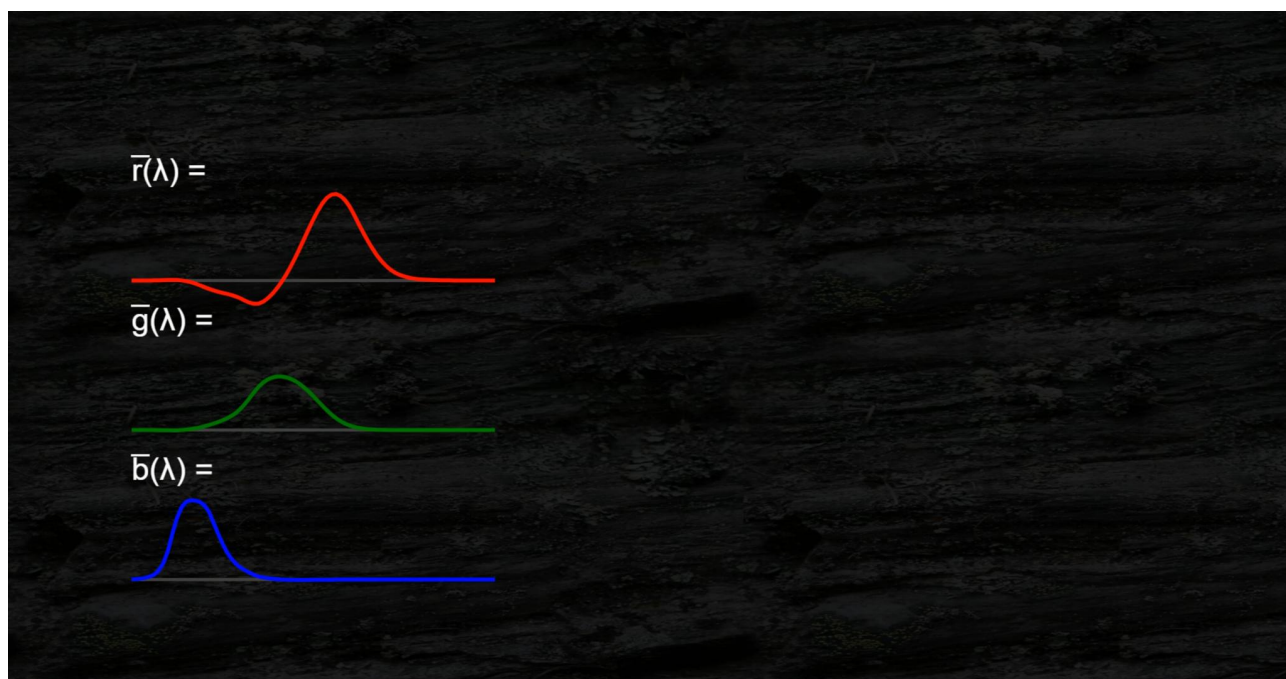


图 8. 光谱轨迹

通过对这条曲线朝着接近或远离原点的方向进行缩放，我们将不同亮度的单色光在这个空间下表示。我们通过把原点和这条曲线上的每一个点相连都可以得到一条射线，沿着无限远的方向延伸每条射线就可以得到一个曲面，这个曲面表示了各种波长的单色光在不同亮度下的三色值，这个曲面所围成的体空间表示了通过混合各种不同波长不同亮度的光源我们能够观察到的所有颜色。这个视频非常形象地表示了这个过程：



上面这个三维空间就是 CIE 1931 RGB color space（注意不要和后面的 CIE 1931 XYZ color space 弄混），它是由 CIE 1931 RGB color matching functions 中的各组数据定义而来的。对于任意可见光，我们可以使用该 color space 下的三色值（tristimulus values）来表示它（回忆之前提到的条件等色现象，这也意味着我们可以使用相同的三色值来表示光谱不同的各种光源）。

对应到人眼，我们可以简单认为三种视锥细胞对光谱的敏感度组成了一个 LMS color space（L for long, M for middle, S for short），它可以用来简单量化人眼的色彩空间。

1. 将负值优化掉

之前提到，CIE RGB color space 是有负值存在的，这些负值都出现在 R 分量上。为了消灭这些负值，CIE 那帮家伙想出了一个好主意，就是从 RGB color space 扩展出另一个颜色空间即 XYZ color space，我们可以使用一个 3x3 的空间变换矩阵在两个颜色空间做转换。

XYZ color space 的三个基向量不像 RGB color space 那样有真正的物理意义是真正的物理灯光，XYZ 的三个轴完全是想象出来的，因此 XYZ 也被称为 imaginary color。这也意味着，我们没法真的在现实世界中构造出 XYZ 三个物理灯光，并像上面提到的那样基于它们做颜色匹配实验。但 XYZ color space 有很多好处，最明显的特点就是 XYZ color matching functions 全是正值，另一个特点是它的 Y 轴是刻意挑选出来的，它的走向和亮度函数是匹配的，也就是说 Y 值越大亮度也会越大。这就是 CIE 1931 XYZ color space，是由它的 color matching functions $x(\lambda)$ 、 $y(\lambda)$ 、 $z(\lambda)$ 所定义的。

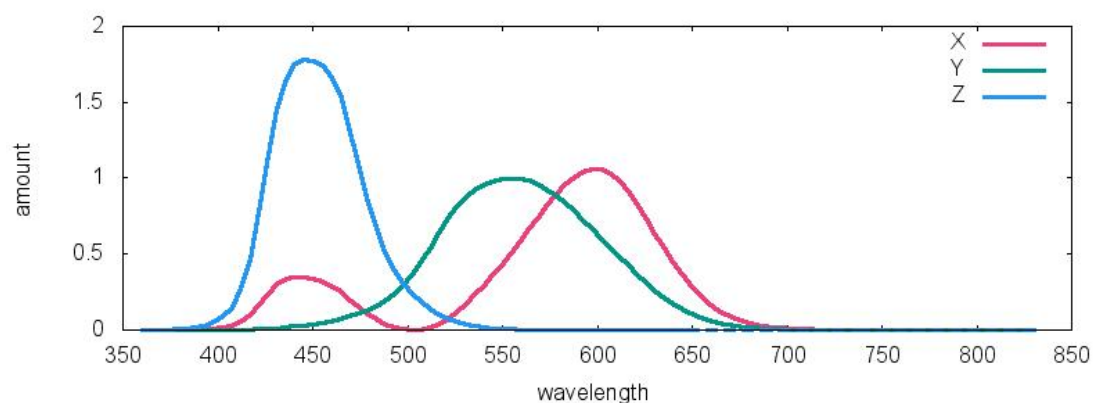
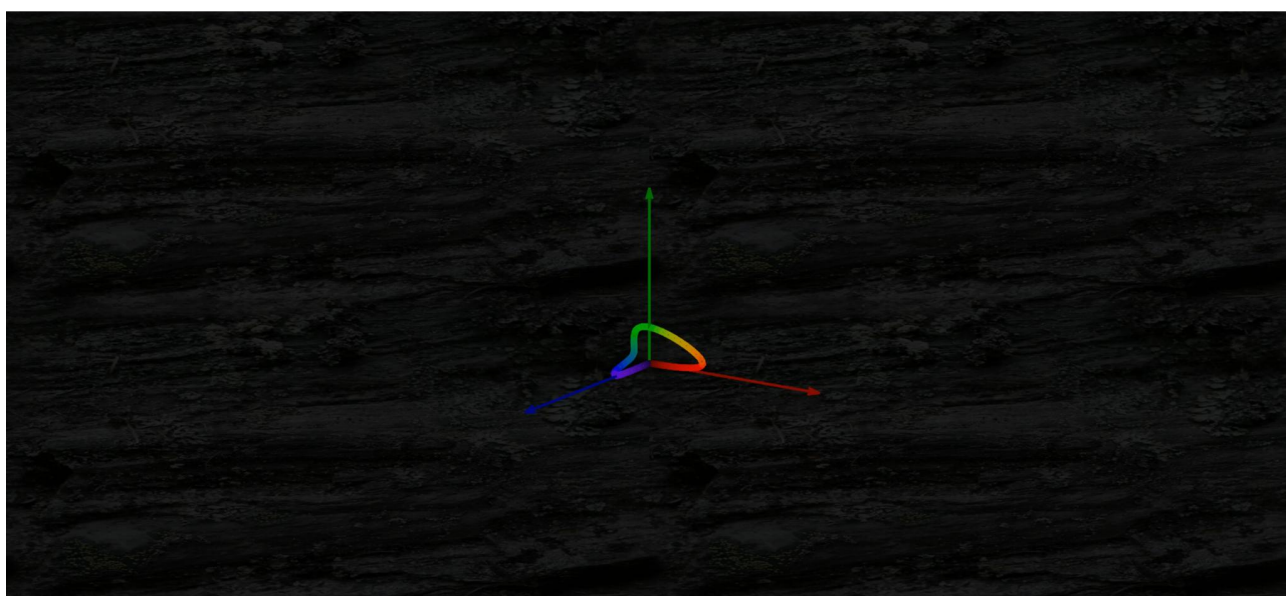


图9. CIE 1931 XYZ color space

下面这个视频，形象地表示了从 RGB color space 到 XYZ color space 的转换过程。



2. 降维以消灭亮度

XYZ color space 虽然很好，但要在这样一个三维空间里讨论一个颜色还是有点困难。很多时候我们其实只关心颜色的色度和饱和度，不关心它的亮度，这意味着我们可以把颜色表示从三维降维到二维表示。通常来说，我们可以把一个颜色从 XYZ color space 投影到 $X+Y+Z=1$ 的平面上。

这个二维色度空间 (chromaticity color space) 就被称为 CIE 1931 xy color space (是的！就是变成了小写字母)。有了 $x+y+z=1$ 这个约束，实际上我们只需要两个值就可以指定一个色度 (chromaticity)。通常，我们选择留下 xy 丢掉 z，即把上述 $x+y+z=1$ 的平面再投影到 XY 平面上，这样我们就可以只使用 xy 值来指定一个色度了。



这就是大名鼎鼎的 CIE 1931 xy chromaticity diagram（即色度图）了，它表示了在不考虑亮度的情况下我们能看到的**所有可见颜色**。这个马蹄形的边界对应了各个波长的单色光对应的颜色，即光谱轨迹（Spectral Locus）。

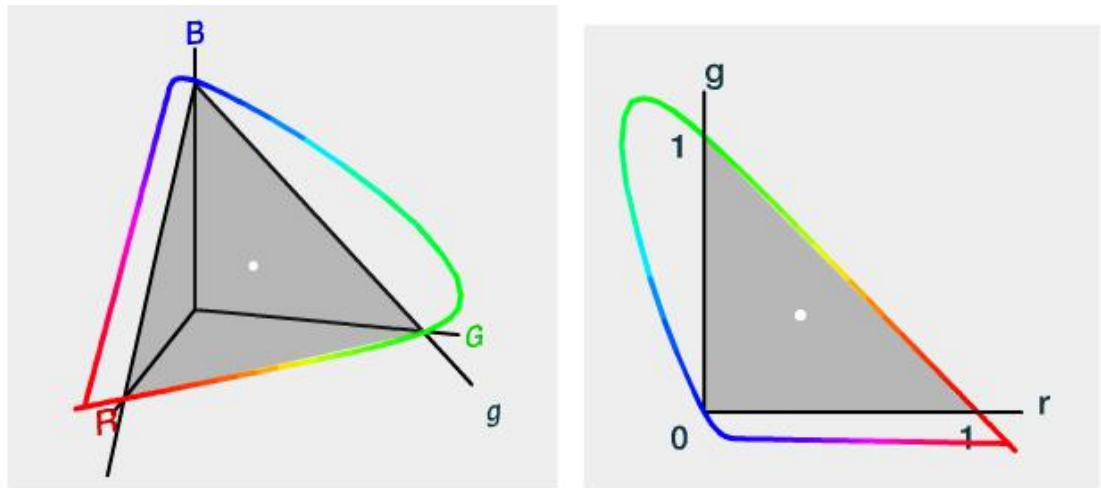


图 10. 投影到二维屏幕上的过程

光谱轨迹线所围成的区域代表了通过混合各种不同波长单色光，我们能感知到的颜色。

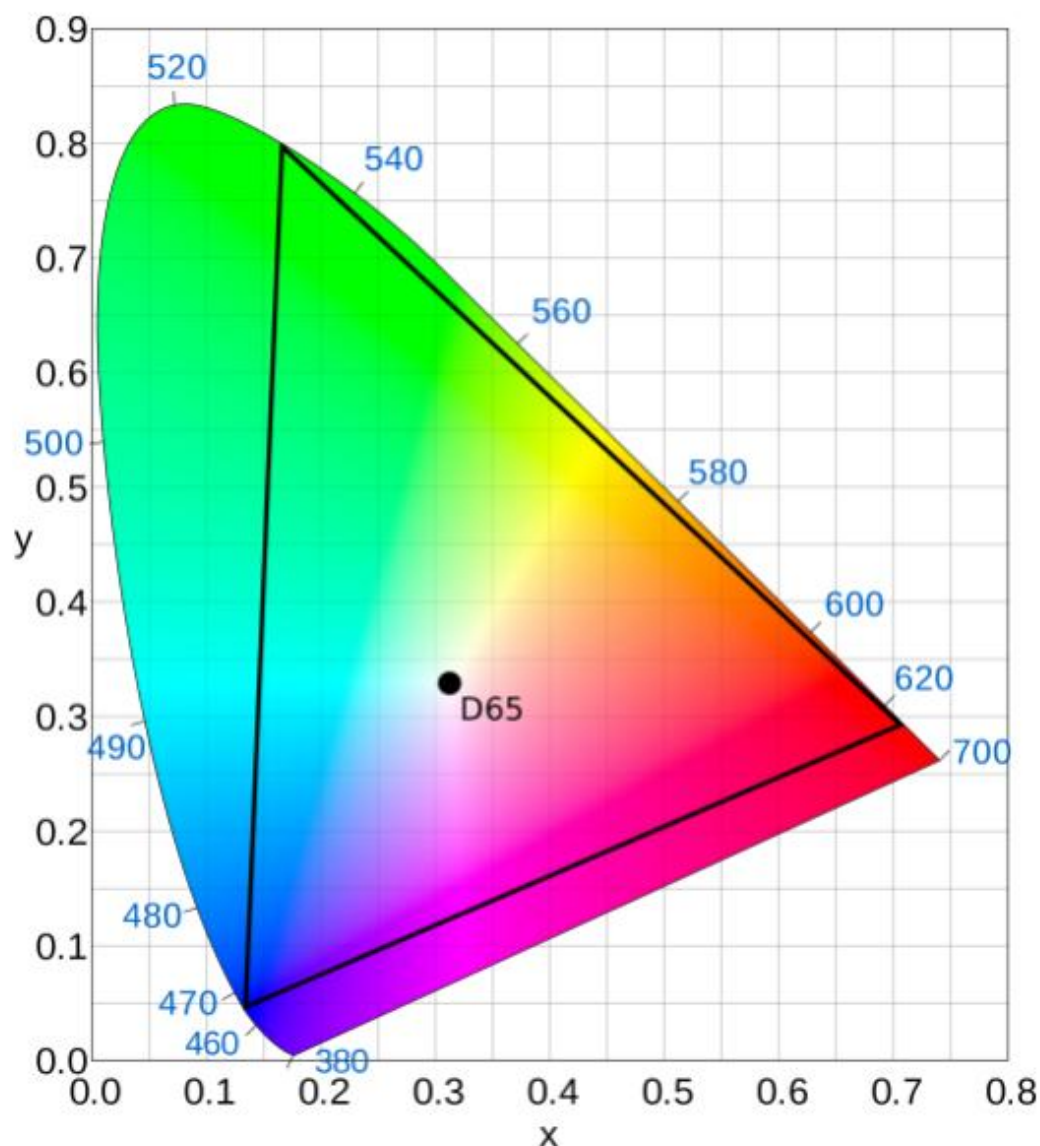


图 11. 色彩空间色域图像

色度图（chromaticity diagram）给我们提供了一种讨论颜色的标准，各行各业的人都可以在色度图里讨论某个特定的颜色，不会因为硬件显示等因素而产生歧义。

五. 三原色

原色是指不能透过其他颜色的混合调配而得出的“基本色”。以不同比例将原色混合，可以产生出其他的新颜色。以数学的向量空间来解释色彩系统，则原色在空间内可作为一组基底向量，并且能组合出一个“色彩空间”。

1. 光学三原色-RGB

一般来说叠加型的三原色是红色、绿色、蓝色（又称三基色，用于电视机、投影仪等显示设备）。使用这三种原色可以产生其他颜色，例如红色与绿色混合可以产生黄色或橙色，绿色与蓝色混合可以产生青色（Cyan），蓝色与红色混合可以产生紫色或品红色（Magenta）。当这三种原色以等比例叠加在一起时，会变成灰色；若将此三原色的强度均调至最大并且等量重叠时，则会呈现白色。

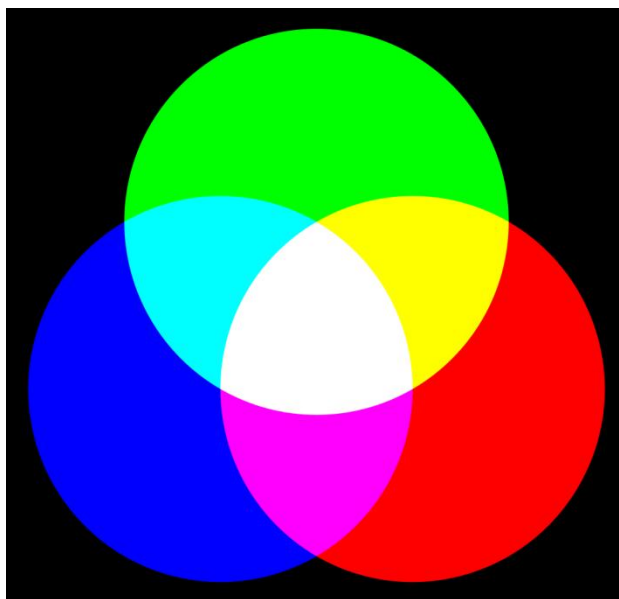


图 12. RGB 色彩空间

这套原色系统常被称为“RGB 色彩空间”，亦即由红（R）绿（G）蓝（B）所组合出的色彩系统。

2. 颜料三原色-CMYK

而消减型的三原色是品红色、黄色、青色（用于书本、杂志等的印刷）。减型原色又称为减色原色，一般来说以反射光源或颜料着色时所使用的色彩是属于“消减型”的原色系统。

在传统的颜料着色技术上，通常红、黄、蓝会被视为原色颜料，这种系统较受艺术家的欢迎。当这三种原色混合时可以产生其他颜色，例如黄色与青色混合可以产生绿色，黄色与品红色混合可以产生红色，品红色与青色混合可以产生蓝色。当这三种原色以等比例叠加在一起时，会变成灰色；若将此三原色的饱和度均调至最大并且等量混合时，理论上会呈现黑色，但实际上由于颜料的原因呈现的是浊褐色。

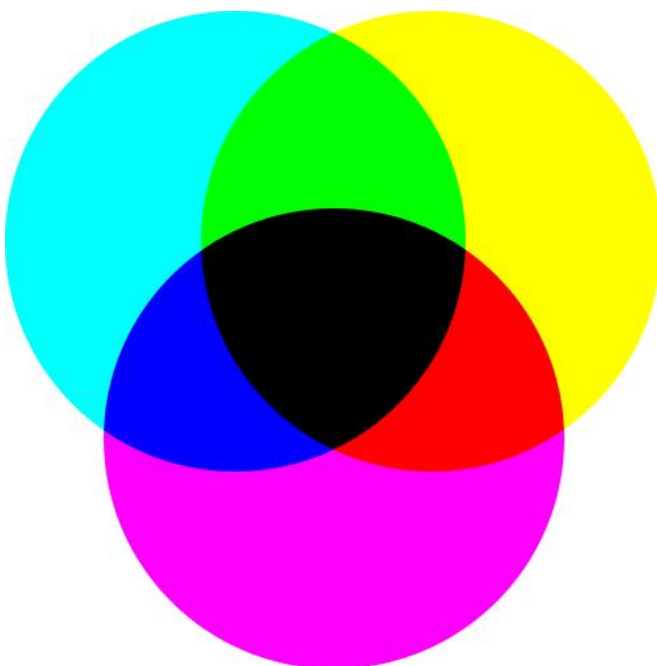


图 13. CMYK 色彩空间

正因如此，在印刷技术上，人们采用了第四种“原色”——黑色，以弥补三原色之不足。

这套原色系统常被称为“CMYK 色彩空间”，亦即由青（C）品红（M）黄（Y）以及黑（K）所组合出的色彩系统。

在消减型系统中，在某颜色中加入白色并不会改变其色相，仅仅减少该色的饱和度。

3. 心理原色

心理原色为蓝色、黄色、红色、绿色、橙色和紫色这六种心理原色加上黑白两色，形塑了色彩感知，理论上还能让人产生不同的心理作用。大脑根据三组色彩和无彩色讯息，处理视网膜上的视觉资讯：红色与绿色、蓝色与橙色、黄色与紫色、白色与黑色。

六. 色系

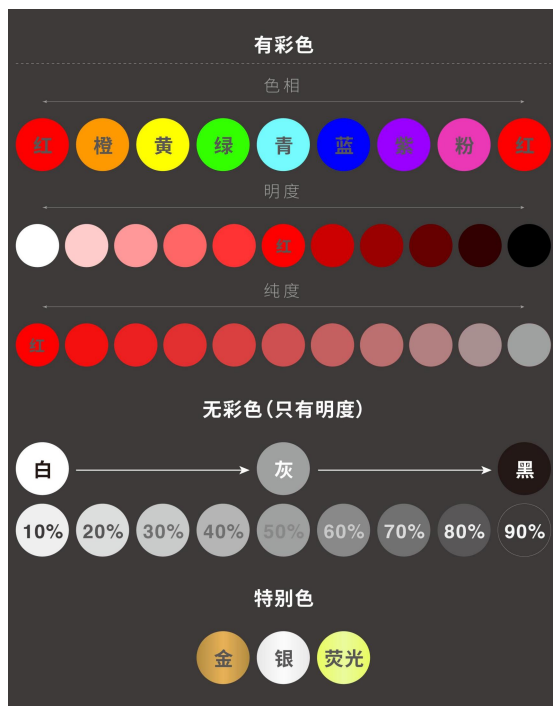


图 14. 色系分类

1. 有彩色

包括了可见光中的所有色彩，以红、橙、黄、绿、青、蓝、紫为基本色，基本色混合进而产生众多的色彩。彩色系中的任何一种颜色，都具有色相、明度和纯度三种属性——色彩三要素。

2. 无彩色

黑色、白色、灰色称为无彩色系，它们没有色相和纯度，只有明度。从最亮的白色开始，依次为白、亮灰、浅灰、亮中灰、中灰、灰、暗灰、黑灰、黑等，共 11 个层级。

3. 特别色

在实际运用中，还有一类色彩在使用时的效果不同于以上两种色彩，具有特殊性，被称为特别色，比如金色、银色、荧光色。可以丰富设计师的表现方式和效果。

七. 色相—Hue¹

色相是指色光由于光频率和波长的不同，而形成地特定色彩的性质，也有人把它叫做色阶，色纯，彩度，色别，色质，色调等。按照太阳光谱的次序把色相排列在一个圆环上，并使其首尾衔接，就称为色相环，再按照相等色彩差别分为若干主要色相，这就是红，橙，黄，绿，青，紫，等主要色相。

¹ n. 色相、色调



图 15. 色相环

1. 间色

是两种原色的等量混合，也称二次色。

2. 复色

是两种间色或三原色的适当混合，也称三次色。在伊顿的 12 色相环中，红橙、黄橙、黄绿、蓝绿、蓝紫、红紫是复色。

3. 同类色

两种以上的颜色，主要的色系倾向比较接近，色相环上间隔小于 30° 。如红色系的朱红、大红、玫瑰红；如黄色系中的柠檬黄、中铬黄、土黄；蓝色系的普蓝、钴蓝、湖蓝、群青等…

4. 类似色

两种以上的颜色，色相环中间隔 45° 左右，彼此相距两个数位的两个色相，互为类似色。将类似色进行组合，对比较弱，色相分明，是属于极为协调和单纯的色彩搭配。

5. 邻近色

两种以上的颜色，色相环中间隔 60° 的色彩。将邻近色进行组合，给人以统一而调和的感觉。

6. 中差色

两种以上的颜色，色相环中间隔 90° 。

7. 对比色

色相环中间隔 120° 的颜色互为对比色。搭配容易出效果但不好控制。

8. 临近互补色

是一种色相组合，与他的补色在色相环上的左边或右边的色相进行组合。进行互补色的搭配，可以通过明确处理主色与次色之间的关系达到调和，也可以通过色相有序排列的方式，达到和谐的色彩效果。

9. 互补色

色相环中间隔 180° 的任一两色互为互补色。互补色是对比最强烈的色彩组合，给人视觉刺激，并且产生不安定感。搭配不恰当，容易产生生硬、浮夸、急躁的效果。

10. 冷暖色

心理学上根据心理感觉，把颜色分为**暖色调**（红、橙、黄、棕）给人膨胀、迫近、温暖、兴奋之感；**冷色调**（绿、青、蓝、紫）给人寒冷、收缩、开阔、凉爽、通透之感；和**中性色调**（黑、灰、白）。

八. 明度（亮度）

在色度学和色彩理论中，明度，也称为色值或色调，是颜色明度的表示。它是颜色外观模型中的颜色外观参数之一。

明度是指物体反射出来地光波数量地多少，即**光波的强度**，它**决定了颜色的深浅程度**。某一色相的颜色，由于反射同一频率光波地数量不同而产生明度差别，例如粉红反射光波较多，其亮度接近浅灰的程度，比大红反射的光波量较少，其亮度接近深灰的明度，他们的色相相同，明度却不同。

还有一个因素影响色彩亮度，人类的正常视觉对不同色光的敏感程度是不一致地，人们对黄、草绿、天蓝色的敏感程度高，所以感觉这些颜色较亮，对红、深蓝视觉敏感度低，所以觉得这些颜色比较暗，人们通常用从白到灰到黑的颜色划成若干明度不同地接替，作为比较其他各种颜色亮度地标准明度色阶。

因此，明度的**通俗理解**就是，这个**颜色加了多少白颜料，加了多少黑颜料**。加的白颜料越多，其明度越高；加的黑颜料越多，其明度越暗。

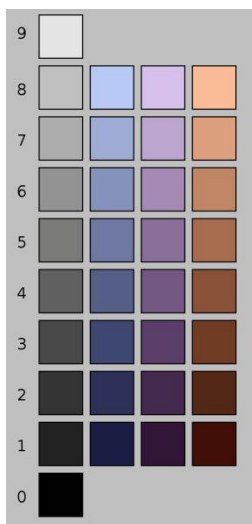


图 16. 在相同的色相中，从上到下展现不同的色彩明度。

九. 纯度-饱和度

1. 理论

纯度是指物体**反射光波频率的纯净程度**，单一或混杂的频率决定所产生颜色的鲜明程度。这是一个外来词汇，由于翻译的不同，也有把它翻译为：饱和度、彩度、色纯、色度、色阶，这些词的含义是一样的。当然，有些译法容易混淆，值得商榷。**单一频率的色光纯度最高**，随着其他频率色光的混杂或增加，纯度也随之减低。物体色越接近光谱中红、橙、黄、绿、青、蓝、紫系列中的某一色相，纯度越高；相反的。颜色纯度越低时，越接近黑、白、灰这些无彩色系列的颜色。



图 17. 较高饱和度与较低饱和度

左边的图片拥有较高的饱和度，因此整体的色彩比较鲜艳，右边的图片拥有相对较低的饱和度，因此整体的颜色更加偏向于灰色。一张照片的**饱和度越高**，画面的“攻击性”就越强，就**越能引起人的注意**，但是过高的饱和度有时候会让人产生反感的情绪。



图 18. 较高饱和度的照片

一张照片的饱和度越低，画面就越“平和”，就越能给人安静、舒适的视觉感受，但是过低的饱和度有时候会让画面产生不通透感。

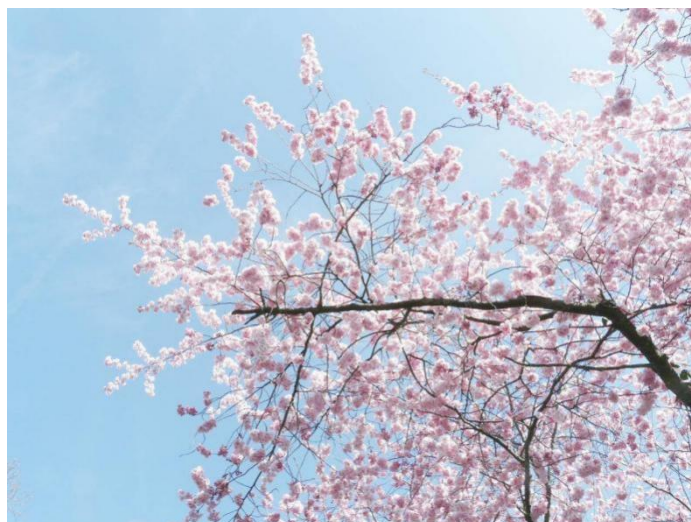


图 19. 较低饱和度的照片

2. 饱和度的应用

1) 增强画面表现力

如果有时候我们感觉画面有些沉闷，我们可以尝试提高画面的饱和度，让画面的色彩更加鲜艳，从而让画面拥有更强的色彩表现力。

例如这张照片的色彩饱和度就较低，因此画面整体看起来比较沉闷，我们提高饱和度就可以让画面更加鲜艳，也更能凸显出色彩的层次。



图 20. 左为原图，右为提高饱和度后的图像

2) 削弱色彩攻击性

画面饱和度过高会让色彩的“攻击性”增强，但是过高的饱和度容易让画面对人产生过度的刺激，有时候过高的饱和度还会让画面显得沉重，或者画面显得比较脏。这时候我们就可以通过降低画面的饱和度削弱色彩的攻击性。

3) 黑白照片

当我们把画面的饱和度将至最低时，画面就会变成黑白照片。



图 21. 将饱和度降至最低

4) 局部色彩

我们可以去分别调整不同颜色或不同区域的饱和度,让画面形成高饱和和低饱和并存的局部色彩效果,可以更好的凸显画面主体、增强画面的视觉表现力。

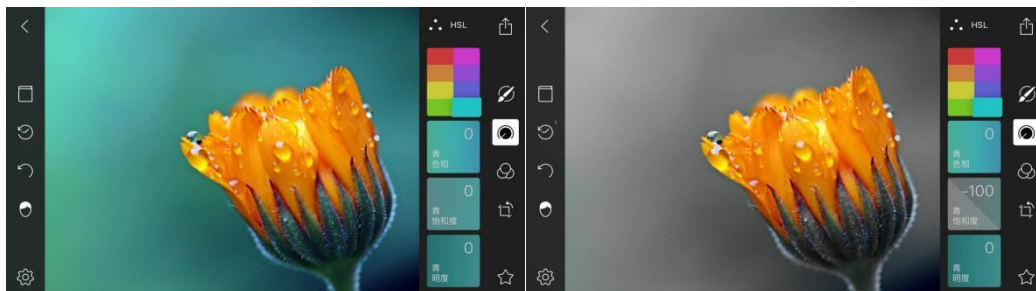


图 22. 左为未应用局部饱和度的原始图像,右为应用局部饱和度的图像

十. 色调

色调不是指颜色的性质,而是指一幅作品色彩外观的基本倾向。从色相、明度、纯度、冷暖四个方面来定义一幅作品的色调,哪种因素起主导作用,我们就称之为某种色调。

色相是最纯净的颜色形式,而色调则是混合色。

色相是最纯净也最明亮的色彩。

1. 色调的种类

1) 从色相角度划分

红色调: 有兴奋、华丽、刺激之感;

绿色调: 有柔顺、平静、典雅之感;

蓝色调: 有深邃、幽雅、清澈之感。

2) 从明度角度划分

明清色调: 在纯色中混合“白色”形成的色调,有明朗、清新、轻柔之感;

中明色调: 在纯色中混合“灰色”形成的色调,有含蓄、稳重、明确之感;

暗清色调: 在纯色中混合“黑色”形成的色调,有深沉、凝重、神秘之感。

3) 从纯度角度划分

高纯色调：有兴奋、华丽、活泼之感；

中纯色调：有浑厚、凝重、丰富之感；

低纯色调：有稳重、朴素、含蓄之感。

4) 从冷暖角度划分

冷色调：有文静、理性、透明之感；

暖色调：有热烈、活泼、浑厚之感；

中性色调：有介于冷暖色调之间之感。