

5

Colorful Spaces

色彩空间

红光、绿光、蓝光，色调、饱和度、明暗度



越是垂垂老矣、病痛缠身、捉襟见肘，我越想创造热情洋溢、井然有序、光彩照人的作品还以颜色。

The more ugly, old, nasty, ill, and poor I become the more I want to get my own back by producing vibrant, well-arranged, radiant colour.

—— 文森特·梵高 (Vincent van Gogh) | 荷兰后印象派画家 | 1853 ~ 1890



- ◀ `colorsys.hsv_to_rgb()` 将 HSV（色相、饱和度、亮度）颜色空间中的颜色值转换为 RGB（红、绿、蓝）颜色空间中的颜色值
- ◀ `matplotlib.pyplot.scatter()` 绘制散点图
- ◀ `numpy.append()` 将给定的数组或值添加到另一个数组的末尾，返回一个新的数组，用于在 NumPy 中实现数组的扩展和拼接操作
- ◀ `numpy.column_stack()` 将两个矩阵按列合并
- ◀ `numpy.copy()` 创建给定数组的副本，返回一个新的数组，使得修改副本不会影响原始数组，用于实现在 NumPy 中进行数组的深拷贝
- ◀ `numpy.empty()` 创建指定形状 NumPy 空（未初始化）数组
- ◀ `numpy.linspace()` 在指定的间隔内，返回固定步长的数据
- ◀ `numpy.meshgrid()` 创建网格化数据
- ◀ `numpy.ones_like()` 用来生成和输入矩阵形状相同的全 1 矩阵
- ◀ `numpy.vstack()` 返回垂直堆叠后的数组
- ◀ `numpy.zeros_like()` 用来生成和输入矩阵形状相同的零矩阵



本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

5.1 色彩

色彩是可见光在物体表面反射、折射或透射时产生的感知效果。人眼感知色彩的过程涉及到视觉系统的不同组成部分。

人眼

人眼感知色彩的基本机制是通过视觉感受器官——眼睛的视网膜上的视锥细胞来完成的。视锥细胞包括三种类型：红色感受器、绿色感受器和蓝色感受器，它们分别对应于不同波长的光。当光线进入眼睛并刺激视网膜上的视锥细胞时，它们会产生相应的神经信号，传递到大脑的视觉皮层。大脑对这些信号进行解析和处理，最终形成我们对色彩的感知。

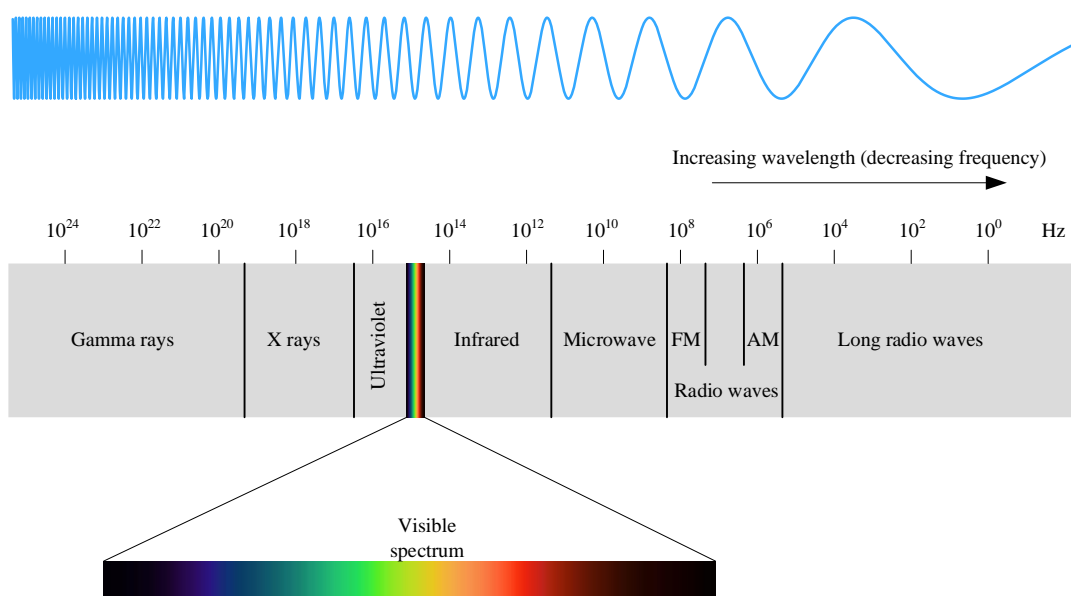


图 1. 光谱

如图 1 所示，可见光只是光谱中一小部分。光谱是指将电磁波按照频率或波长进行分类的方式。从高能量到低能量，光谱的构成包括以下几个部分。

- ▶ 伽马射线是电磁波谱中能量最高的部分，具有极短的波长和高频率。它们常常与核反应、天体物理事件以及放射治疗等相关。
- ▶ X 射线具有比紫外线更高的能量，波长短，频率高。X 射线在医学成像、材料检测和科学研究等领域有广泛应用。
- ▶ 紫外线波长比可见光短，能量较高。
- ▶ 可见光是人眼能够感知的电磁波，波长较长。可见光谱从紫色、蓝色、绿色、黄色、橙色到红色。
- ▶ 红外线波长比可见光长，能量较低。红外线在夜视设备、红外热像仪和通信技术等方面有广泛应用。
- ▶ 广播电波具有非常长的波长和低能量，适合用于无线通信和广播传输。

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

► 长波指波长非常长的电磁波，如无线电波等，常用于无线通信和远程传输。

色彩心理学是研究色彩对人类情感和行为产生影响的学科。其中，冷暖色调是色彩的一种分类方式。冷色调如蓝色、绿色、紫色等给人以凉爽、安静、宁静的感觉，常用于创造宽松和放松的氛围。暖色调如红色、黄色、橙色等则给人以温暖、充满活力的感觉，常用于刺激和激发人们的情感和能量。

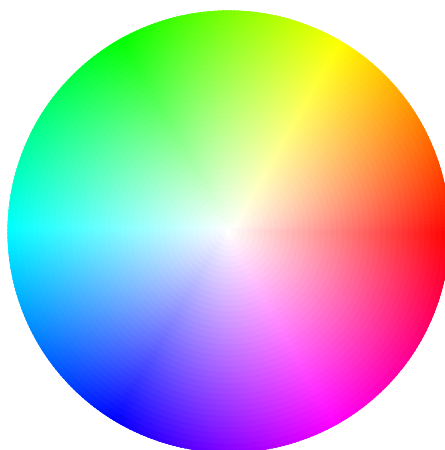


图 2. 冷暖色调色盘

色彩模式

常见的色彩模式有以下几种：

RGB 模式：这是用于数字图像和显示器的最常见的色彩模式。它通过将红、绿、蓝三原色以不同的强度混合来创建各种色彩。本书后续将专门介绍 RGB 色彩模式。

CMYK 模式：这是印刷行业常用的色彩模式。它使用青、洋红、黄和黑四种颜色的墨水混合来创建各种色彩。

HSL/HSV 模式（色调、饱和度、亮度/明度）：这是一种基于人类感知的色彩模式。色调表示色彩的位置，饱和度表示色彩的纯度，亮度/明度表示色彩的亮暗程度。

RGB 颜色模型

如图 3 所示，**三原色光颜色模型** (RGB color model) 将**红** (red)、**绿** (green)、**蓝** (blue) 色光以不同比例混合得到不同的颜色。Matplotlib 大家也会见到 RGBA，A 代表透明度 alpha。

本章后文将用各种可视化方案给大家展示 RGB 颜色模型的色彩空间。

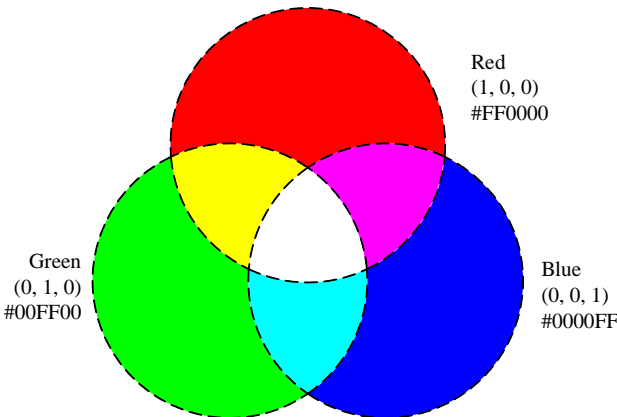


图 3. RGB 三原色模型

Matplotlib 中定义颜色

Matplotlib 中，RGB 颜色可以用数组（色号）、十六进制（hexadecimal 简称 hex）、名称等来表示。

比如，绘制一条纯蓝色线，可以采取如下方式之一设置。

```
color = (0, 0, 1) # 数组
# (red, green, blue)
color = (0, 0, 1, 0.5)
# (red, green, blue, alpha)
# alpha 的含义是透明度
color = [0, 0, 1] # list
color = '#0000FF' # 十六进制 Hex
color = 'blue' # 颜色名称
color = 'b' # 颜色名称简写
```

⚠ 注意，有些软件中颜色采用三个 0 ~ 255 的数值，比如 MS Word。

常用颜色

表 1 所示为常用颜色的设置方式。

表 1. 常用颜色

	数组	简称	全称	Hex
	[1, 0, 0]	'r'	'red'	'#FF0000'
	[0, 1, 0]	'g'	'green'	'#00FF00'
	[0, 0, 1]	'b'	'blue'	'#0000FF'
	[1, 1, 0]	'y'	'yellow'	'#FFFF00'
	[1, 0, 1]	'm'	'magenta'	'#FF00FF'
	[0, 1, 1]	'c'	'cyan'	'#00FFFF'
	[0, 0, 0]	'k'	'black'	'#000000'
	[1, 1, 1]	'w'	'white'	'#FFFFFF'

⚠ 注意，Matplotlib 中，'g' 和 'green' 几乎相同，'g' 的 RGB 色号为 [0.0, 0.5, 0.0]，'green' 的 Hex 色号为 #008000；'y' 的 RGB 色号实际上是 [0.75, 0.75, 0.0]，而

'yellow' 的色号为 [1.0, 1.0, 0.0]; 'm' 的色号为 [0.75, 0.0, 0.75], 而 'magenta' 的色号为 [1.0, 0.0, 1.0]; 'c' 的色号为 [0.0, 0.75, 0.75], 而 'cyan' 的色号为 [0.0, 1.0, 1.0]。

图 15 所示为 Matplotlib 中定义的颜色名称。图 15 参考如下代码, 请大家自行学习:

https://matplotlib.org/stable/gallery/color/named_colors.html

此外, 我们还可以用 [0, 1] 之间的数值定义不同深浅的灰色。如图 4 所示, color = '0' 代表纯黑, color = '1' 代表纯白, color = '0.5' 代表 50% 灰。注意, 必须使用引号, 否则会报错。



图 4. 灰度

图 16 所示为几组渐变色和对应的十六进制值。图 16 参考 *Scientific Visualization: Python + Matplotlib*。下载地址为:

<https://github.com/rougier/scientific-visualization-book>

CMYK 颜色模型

图 5 所示为 RGB 中任意两个颜色混合得到的三种颜色: 青色 (cyan)、品红 (magenta)、黄色 (yellow)。这便是 CMYK 色彩模型的基础。K 代表黑色 (black)。

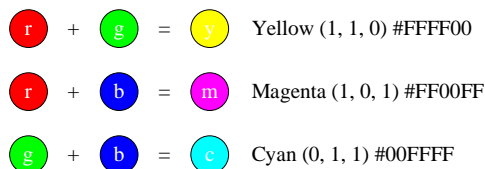


图 5. RGB 中两个颜色混合

如图 6 所示, CMYK 调色盘中, 红、绿、蓝三色颜料均匀调色得到黑色。CMYK 一般用在印刷领域, 本书不展开讲解。

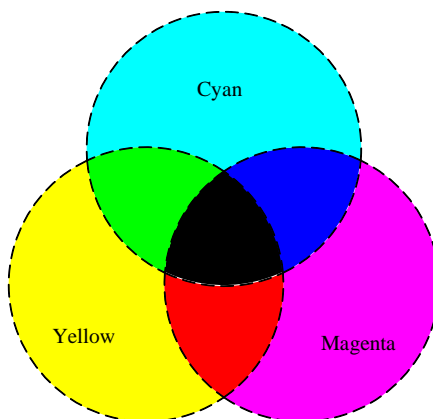


图 6. CMYK 模型基色

5.2 RGB 色彩空间

如图 7 所示，当红、绿、蓝取不同值时，我们便可以得到一个五彩斑斓的 RGB 颜色空间。这个空间可以看成是一个“实心”三维立方体。

这一节，我们将利用平面和三维散点图可视化 RGB 色彩空间。

图 7 的下图，我们仅仅看到 RGB 空间中最鲜亮的三个立面，更多颜色都隐藏在这三个立面之下，比如黑色 $(0, 0, 0)$ 就隐藏在角落里。稍后，我们会用‘切片’可视化空间内部的颜色分布。



《矩阵力量》将用 RGB 色彩空间讲解线性代数中的向量空间。

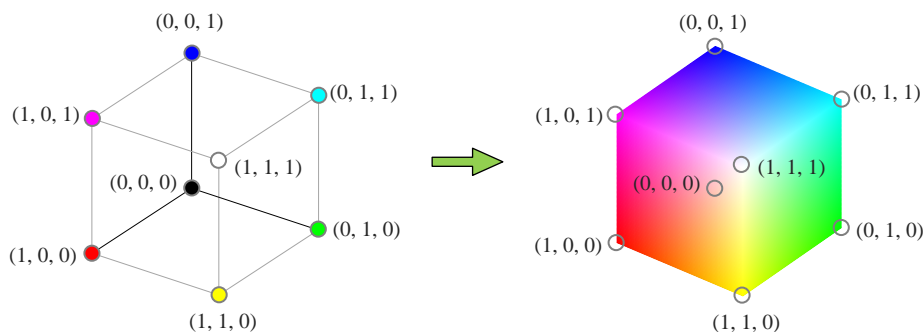


图 7. RGB 色彩空间

6 个外立面

我们可以用平面散点图可视化 RGB 色彩空间的 6 个外立面，具体如图 17 所示。

画一个平面散点图时，我们首先用 `numpy.linspace(0, 1, 21)` 生成 $[0, 1]$ 之间的等差数列。然后，用 `numpy.meshgrid()` 将两个等差数列展成二维数据网格。

举个例子，绘制图 17 (a) 这个蓝绿渐变平面时，蓝色、绿色在 $[0, 1]$ 之间渐变，而红色则用 `numpy.zeros_like()` 生成生成的全 0。绘制散点图时，我们直接指定每个散点的色号。

图 17 (a) 这个蓝绿色平面，将红色色号加 1，便得到图 17 (b)。几何角度来看，这相当于平面平移。



Jupyter 笔记 BK_2_Ch05_01.ipynb 绘制图 17 子图。

有了上面的经验，下一步用三维散点图绘制 RGB 色彩空间的六个外立面。

图 18 所示为 RGB 色彩空间外侧三个颜色最为鲜艳的外立面，而图 19 所示为其内侧三个外立面。

如图 20 所示，这六个侧面之间存在成对平移关系。绘制这三幅三维散点图时，我们也是指定每个散点的色号。



Jupyter 笔记 BK_2_Ch05_02.ipynb 绘制图 18、图 19、图 20 三幅图子图。

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

图 8 所示为利用 Streamlit 搭建的展示 RGB 色彩空间的 App。

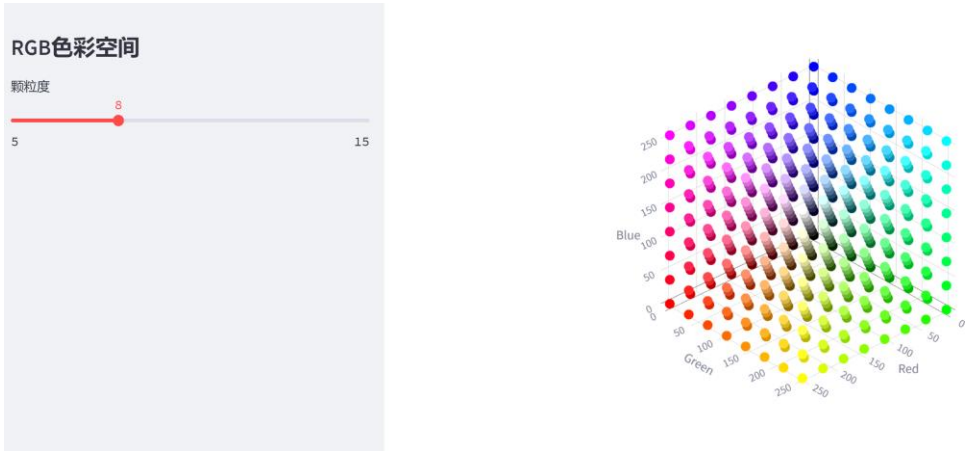

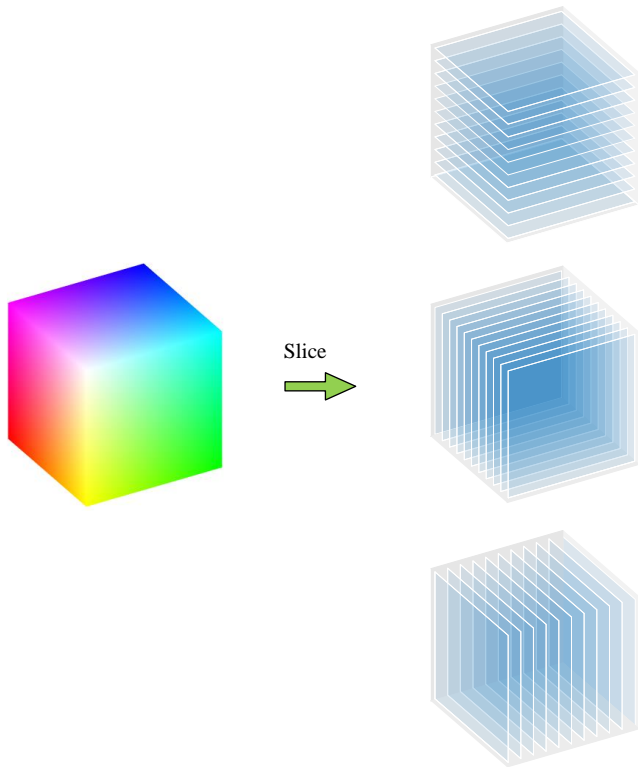


图 8. 展示 RGB 色彩空间的 App, Streamlit 搭建 |  Streamlit_RGB_Space.py

切豆腐

为了看清 RGB 色彩空间的内部，我们采用如图 9 所示的这种“切豆腐”的可视化方案。

图 21 就是用“切豆腐”方法可视化 RGB 空间这个实心立方体的内部。这幅图的子图有三列，每一列子图分别展示红、绿、蓝取特定值 (0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0)。



本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。
版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。
代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>
本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>
欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

图 9. 三种不同切取 RGB 立方体方式



Jupyter 笔记 BK_2_Ch08_3.ipynb 绘制图 21 子图。

5.3 HSV 色彩空间

RGB 和 CMYK 颜色模型都是面向硬件的，而 HSV 模型更贴合人眼对颜色的感知。

HSV 三个字母分别代表**色调** (hue)、**饱和度** (saturation)、**明暗度** (value)。和 HSV 类似的色彩空间叫 HSL；HSL 中的 L 代表**亮度** (lightness)。

`matplotlib.colors.hsv_to_rgb()` 可以将 HSV 色号转换为 RGB 色号。注意，Matplotlib 中 HSV 色号的三个数值也都是在 $[0, 1]$ 之间。

`matplotlib.colors.rgb_to_hsv()` 则将 RGB 色号转换为 HSV 色号。图 22 所示为 RGB 色彩空间到 HSV 和 HSL 色彩空间的转换示意图。特别值得我们关注的是旋转、投影这两步，具体如图 10。本书第 28 章专门讲解三维空间的几何变换。

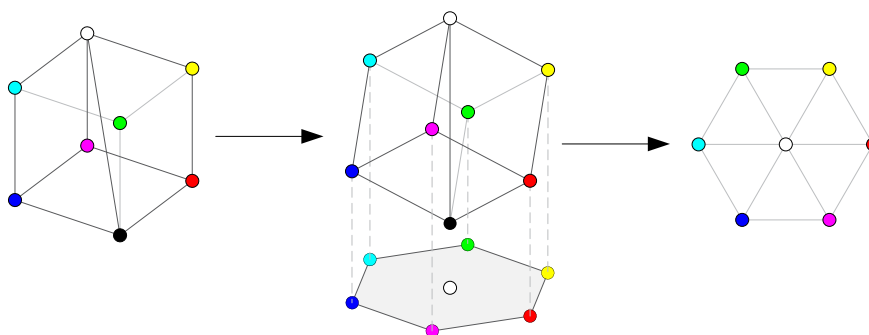


图 10.RGB 色彩空间的旋转和投影，图片改编自 Wikipedia

色调

HSV 中的 H 代表**色调** (hue)。色调一般用角度度量，取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

如图 11 所示，从红色开始按逆时针方向计算，红色为 0° ，绿色为 120° ，蓝色为 240° 。红绿蓝的补色分别是黄色 (60°)，青色 (180°)、品红 (300°)。图 11 采用的就是本书前文介绍的极坐标系。

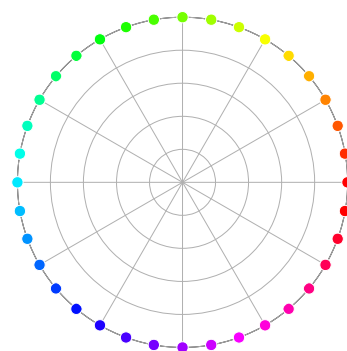


图 11. 色调

饱和度

S 代表**饱和度** (saturation)。饱和度的取值范围为 0% ~ 100%，这个值越大，颜色越艳丽。从极坐标角度来看，H 就是极角，S 就是极径。

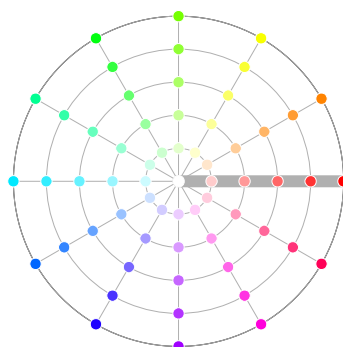


图 12. 饱和度



《数学要素》第 5 章将介绍极坐标系。

明暗度

V 代表**明暗度** (value)。V 通常取值范围为 0% (黑) 到 100%。如图 13 所示，引入 V，我们将平面极坐标延展成三维圆柱坐标系。



本书后续将专门介绍参数方程；而《数学要素》第 6 章介绍圆柱坐标系。

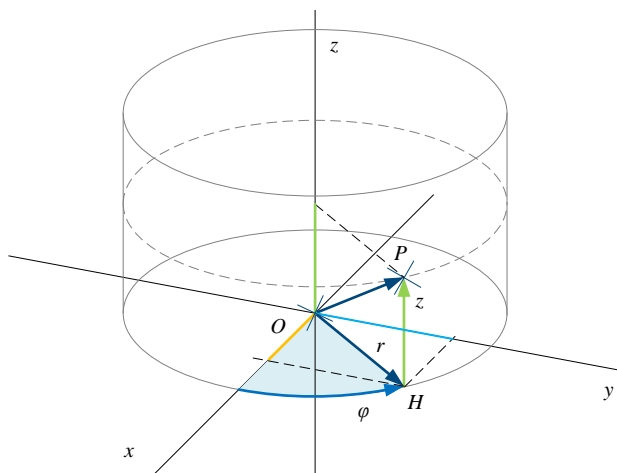


图 13. 圆柱坐标

两种可视化方案

如果说 RGB 色彩空间是一个实心立方体的话，那么 HSV 色彩空间则是一个实心圆柱体；也就是说，其背后的数学工具是圆柱坐标系。下面，我们将讨论 HSV 色彩空间的两种可视化方案，具体如图 14 所示。

图 14 (a) 所示为极坐标网格，图 23 所示为 V 取不同值时 HSV 色彩空间“切片”。容易发现这种可视化方案的缺点是，内外圈的散点数量一样多，越往内圈，散点越密。

图 14 (b) 这个可视化方案解决这一问题，每一层圆圈散点数和圆圈半径成正比。这样整幅图的散点看上去类似均匀分布。图 24 便是采用这种方案绘制的可视化方案。

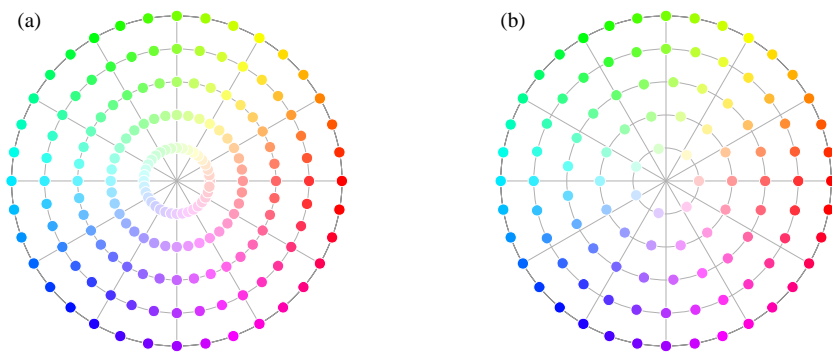


图 14. 两种可视化方案：极坐标网格、均匀分布



Jupyter 笔记 BK_2_Ch05_04.ipynb 和 BK_2_Ch05_05.ipynb 分别绘制图 23、图 24 子图。



本章的关键是各种可视化 RGB 色彩空间、HSV 色彩空间的方案。请大家务必掌握“切豆腐”这种有趣的可视化方案，本书后续还会用到它。本章用到的作图技巧主要是平面散点图、三维空间散点图。核心数学工具有极坐标系和圆柱坐标系。



图 15. Matplotlib 已定义名称的颜色

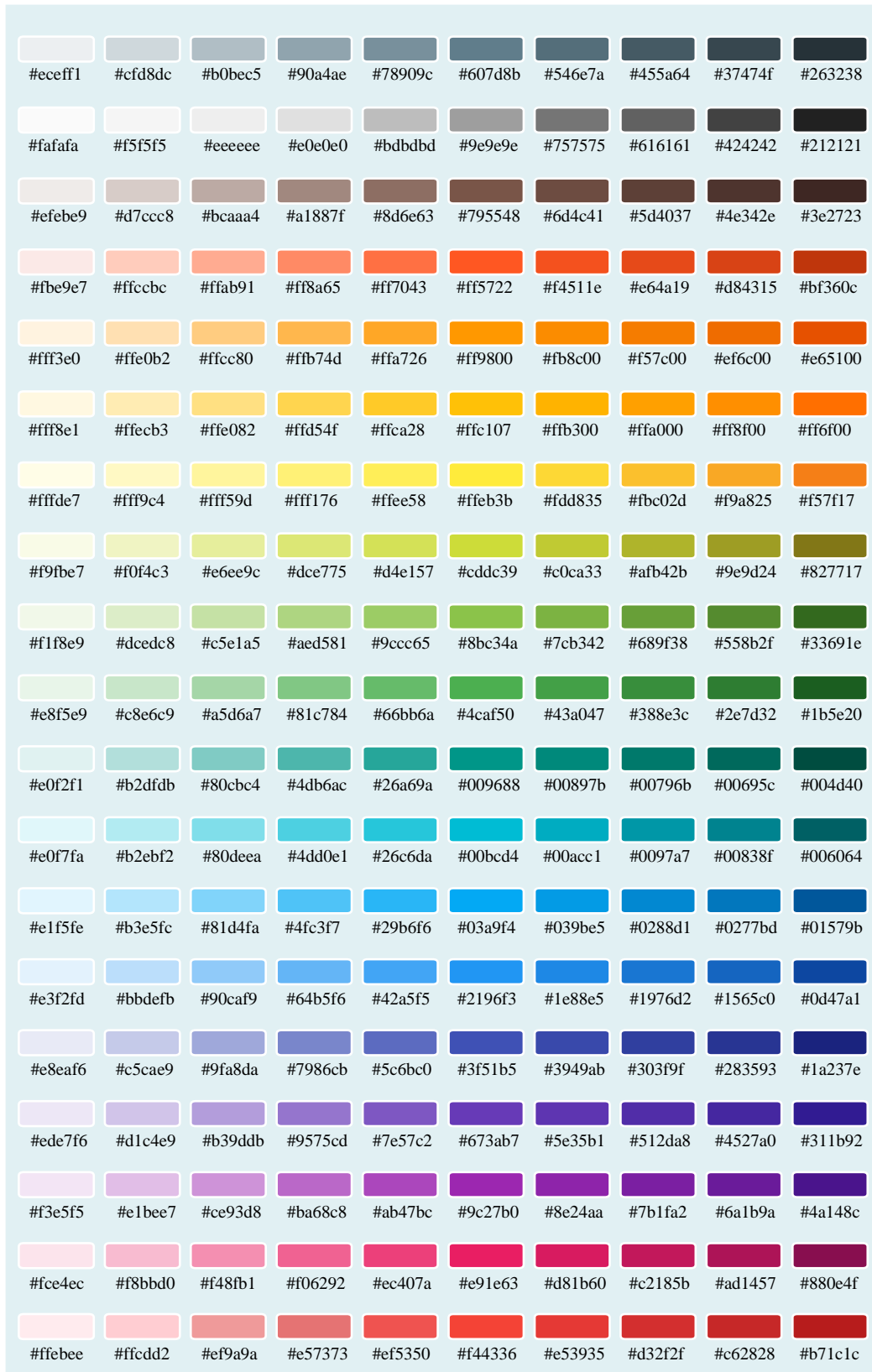
本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

图 16. 几组渐变色和它们的 hex 值; 参考 <https://github.com/rougier/scientific-visualization-book>

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

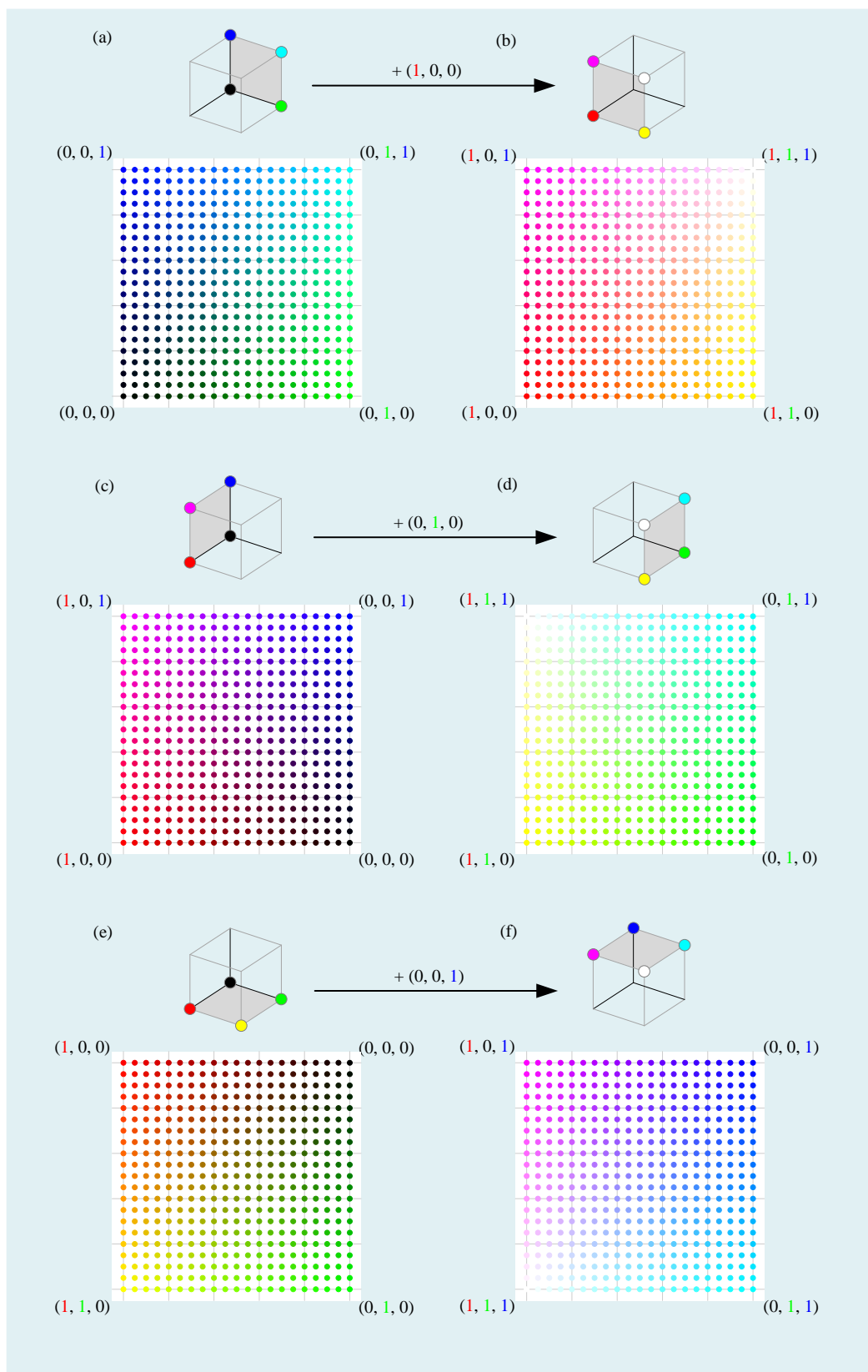


图 17. 用指定色号和平面散点图可视化 RGB 色彩空间的 6 个侧面 | BK_2_Ch05_01.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

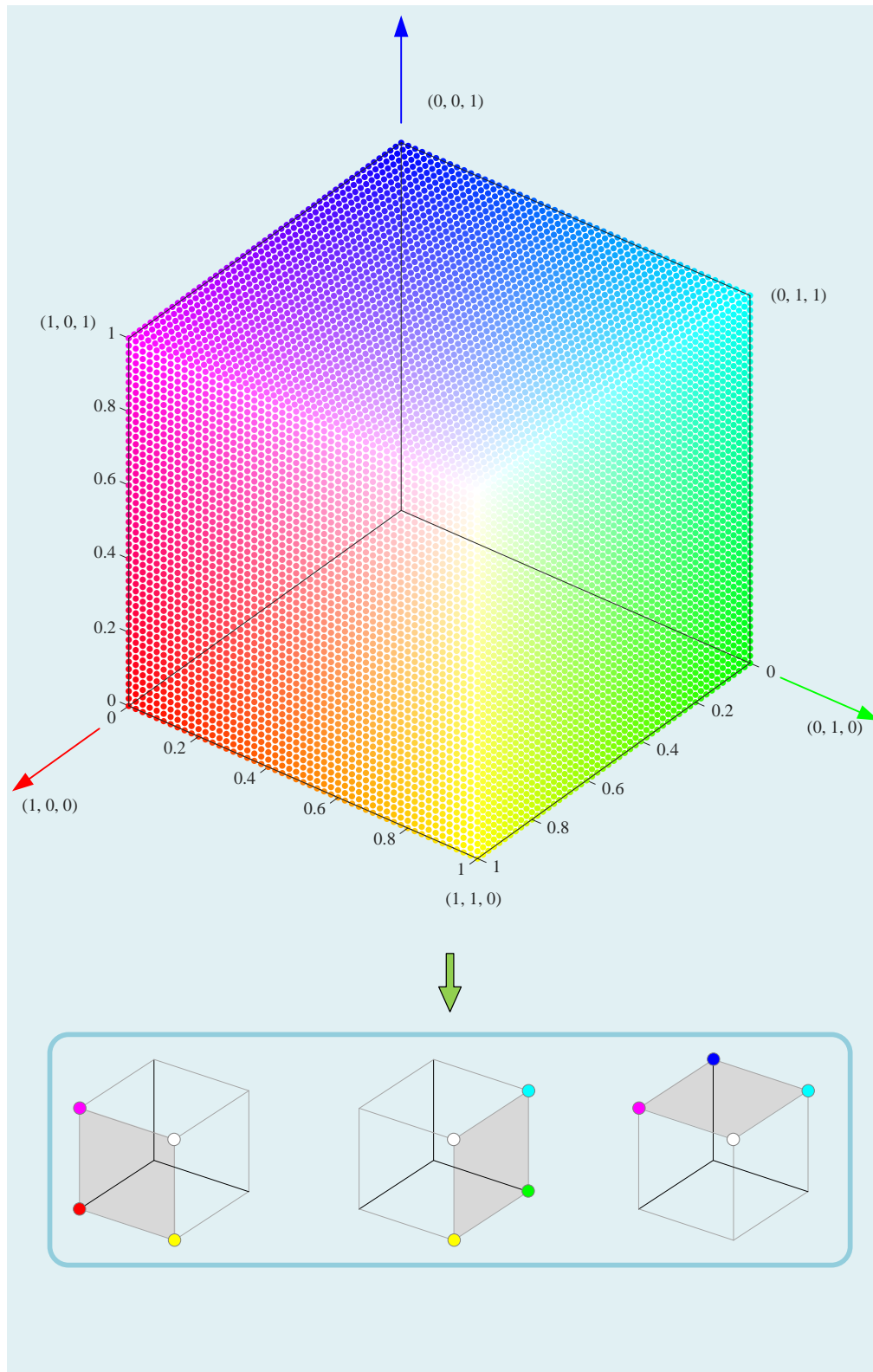



图 18. 三原色张成的彩色空间，外侧三个外立面 |  BK_2_Ch05_02.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

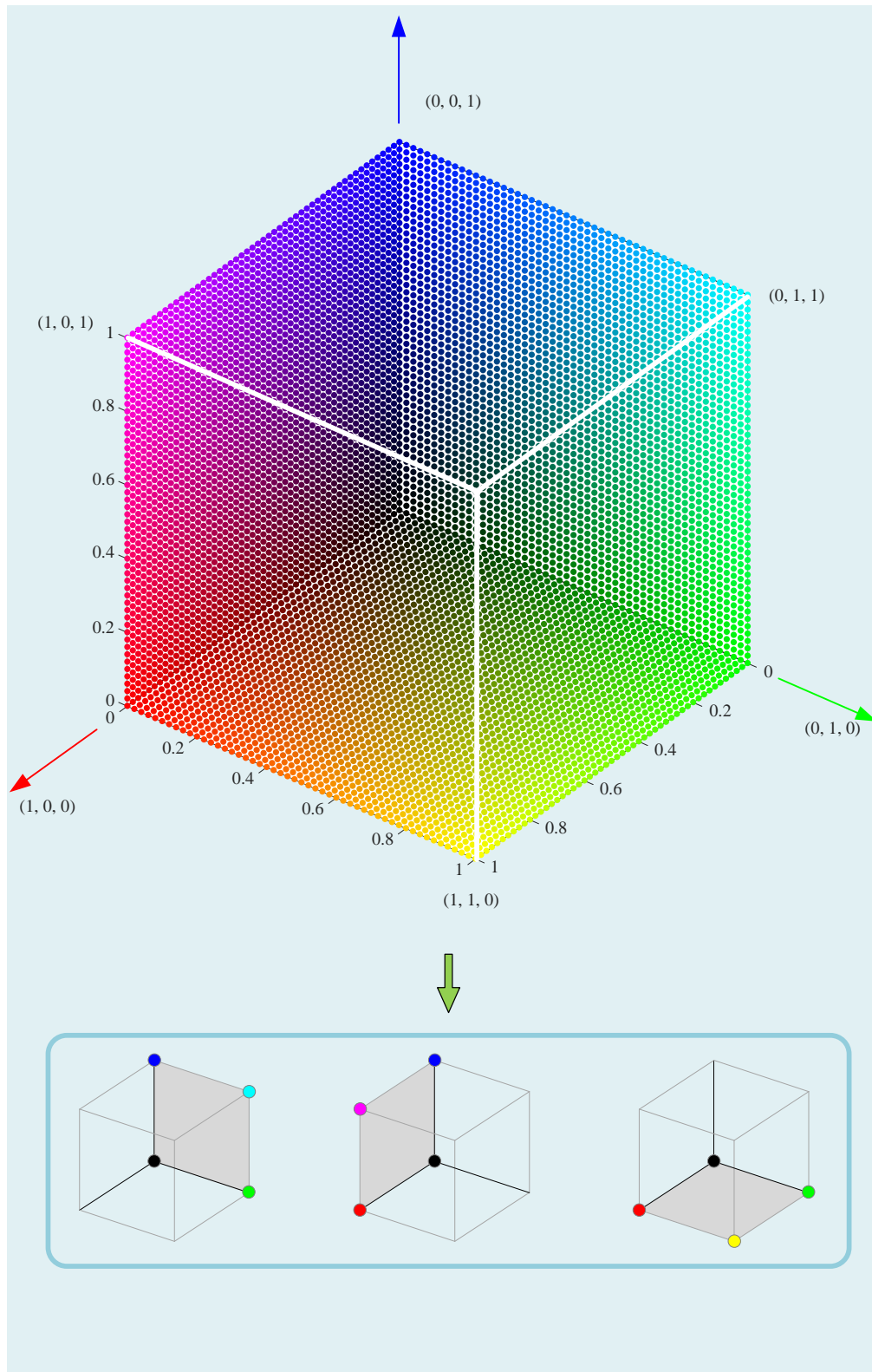



图 19. 三原色张成的彩色空间，内侧三个外立面 |  BK_2_Ch05_02.ipynb

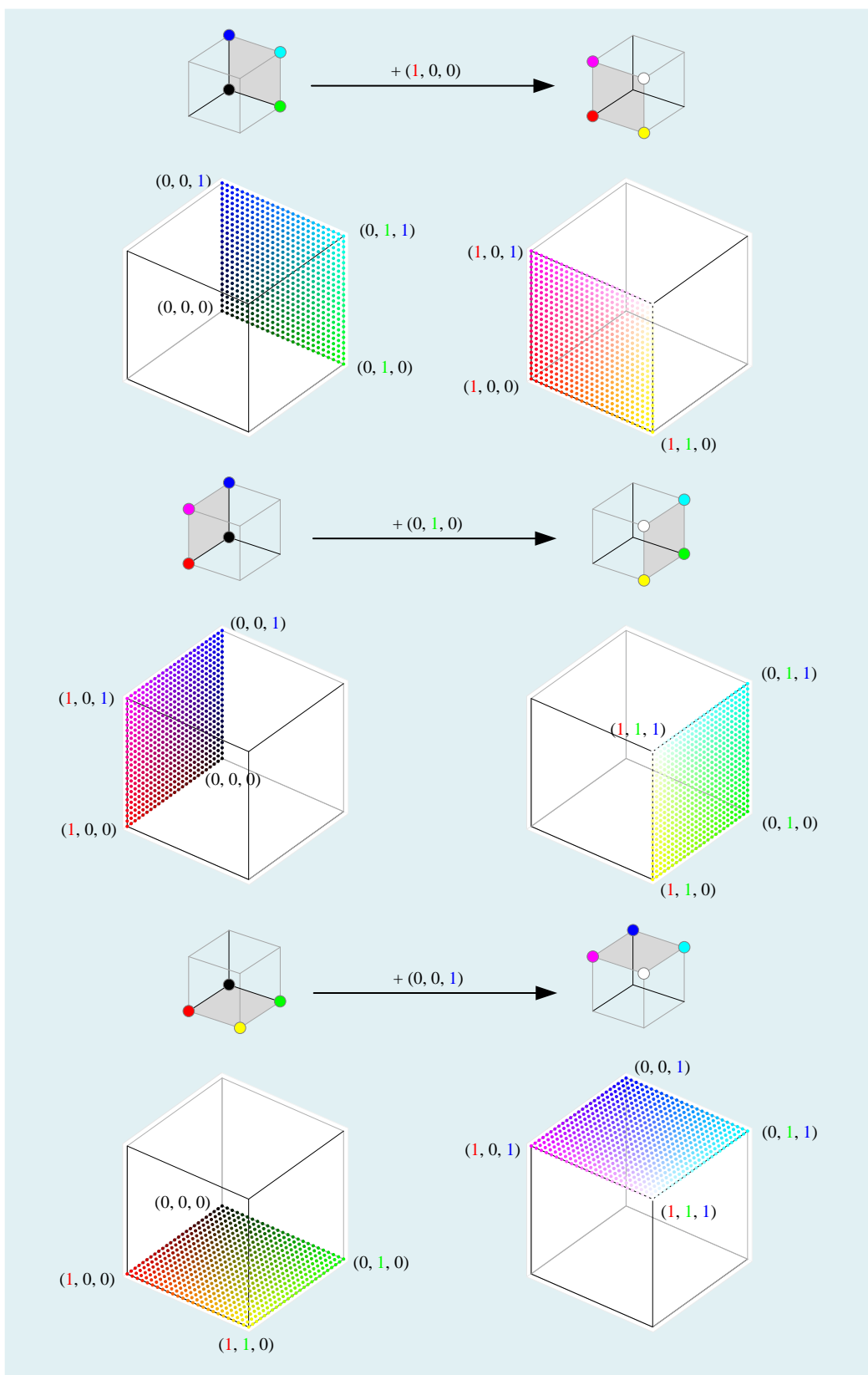


图 20. 三原色张成的彩色空间的六个侧面之间的平移关系 | BK_2_Ch05_02.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

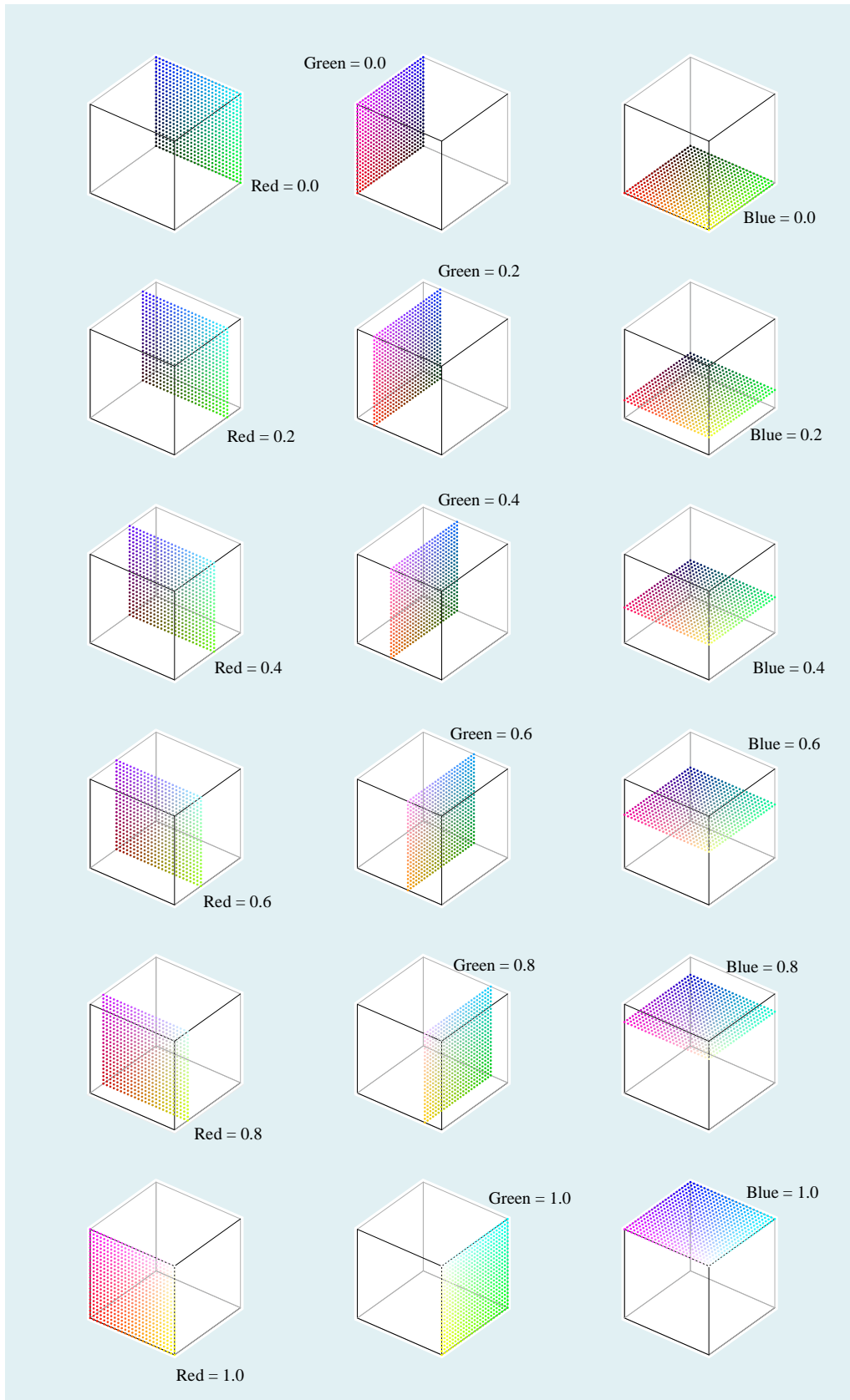



图 21. “切豆腐”可视化 RGB 空间内部 |  BK_2_Ch05_03.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com

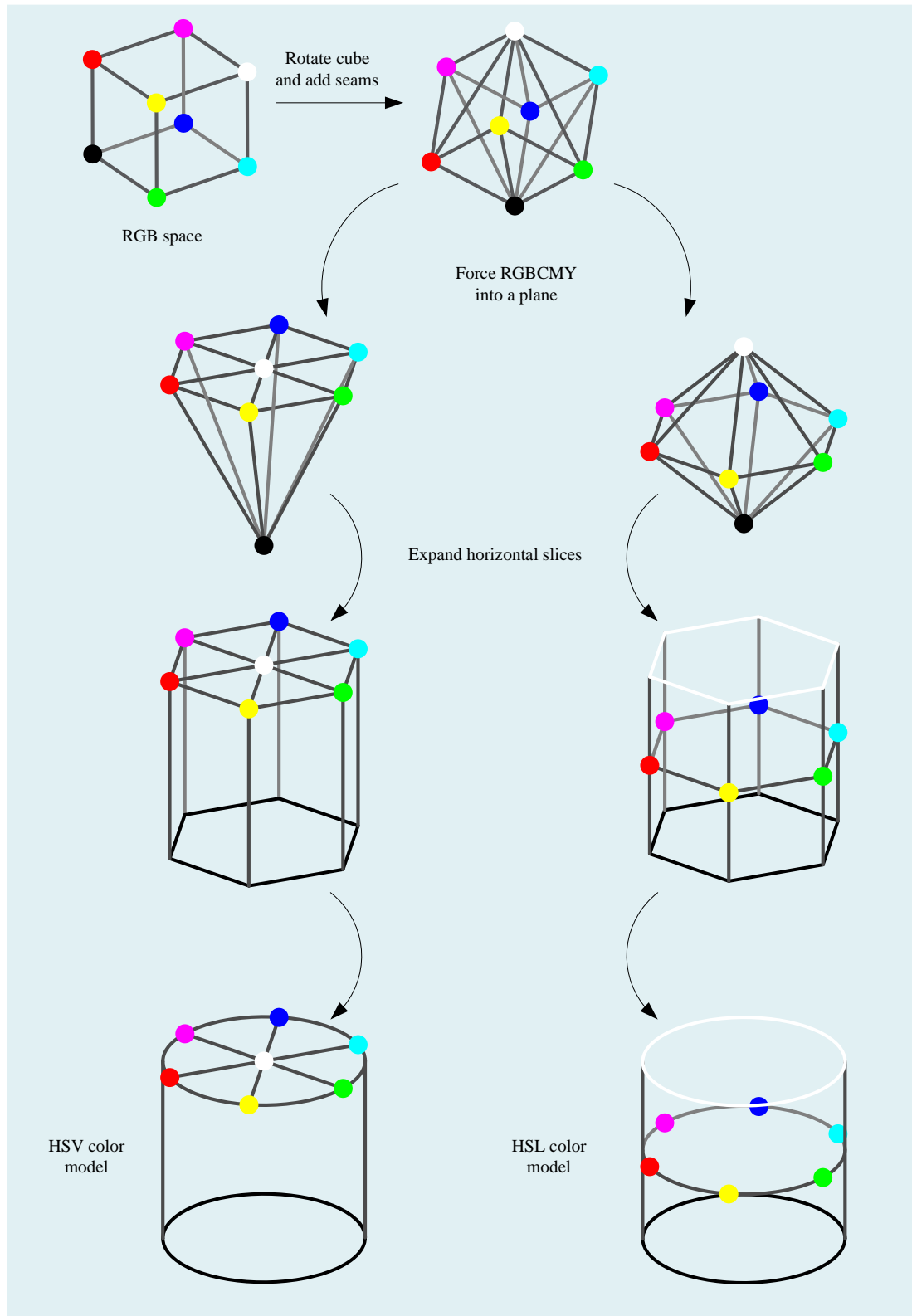


图 22. RGB、HSV、HSL 色彩模型之间的关系，图片改编自 Wikipedia

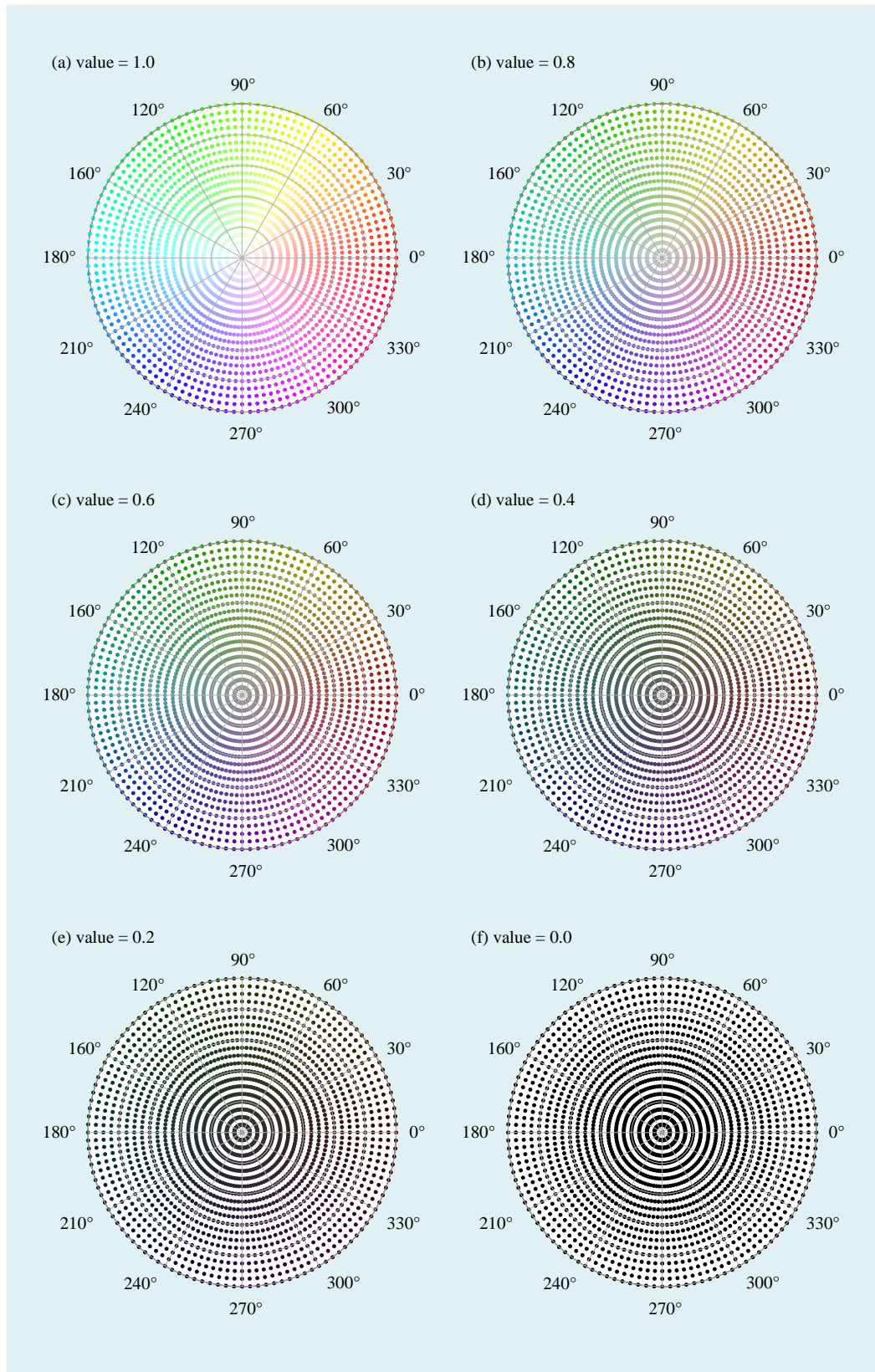


图 23. HSV 色彩空间, 极坐标网格数据 | BK_2_Ch05_04.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿, 发布目的为方便读者在移动终端学习, 终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有, 请勿商用, 引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载: <https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger: <https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教, 本书专属邮箱: jiang.visualize.ml@gmail.com

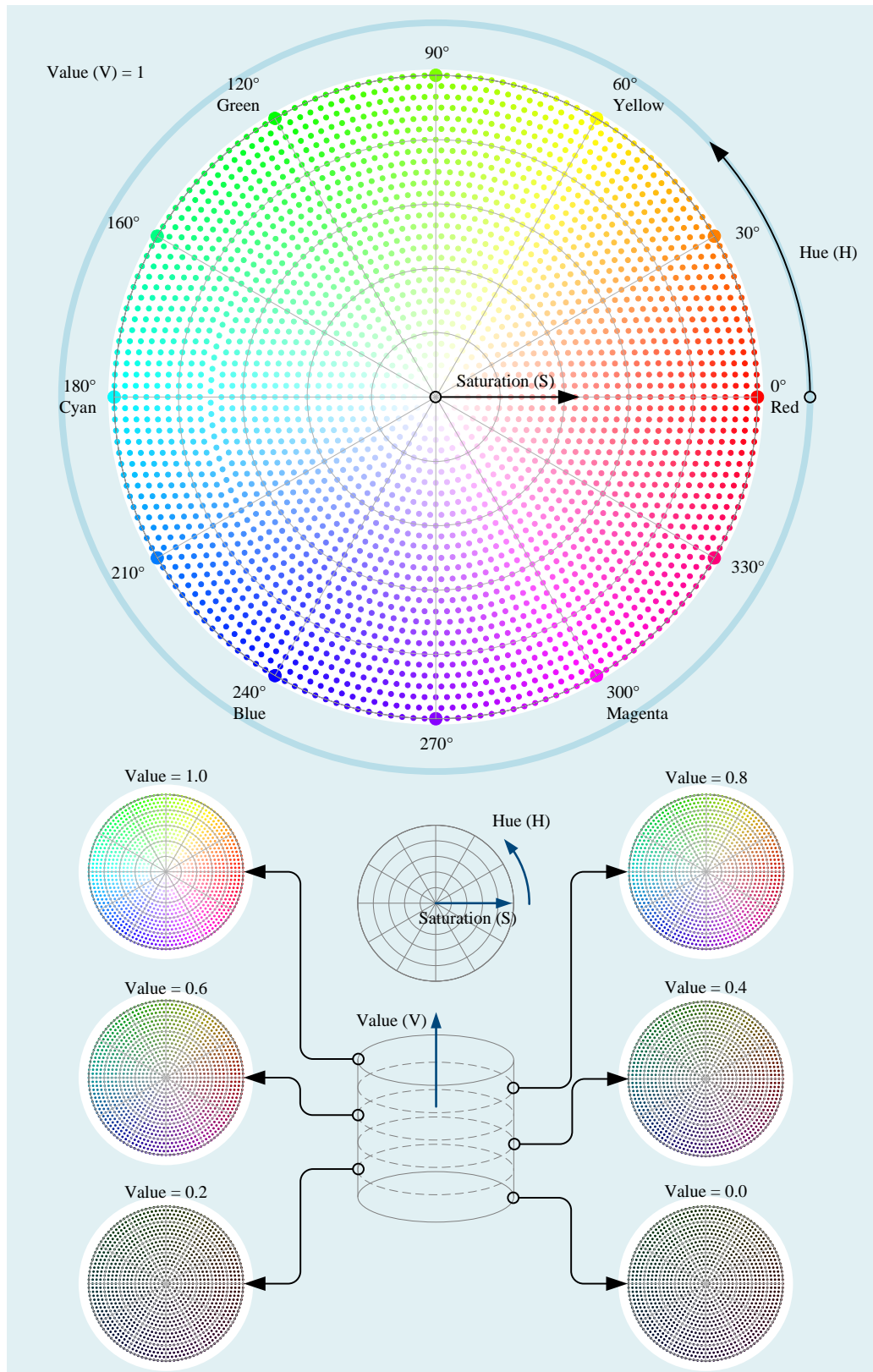


图 24. HSV 色彩空间, 散点均匀 | BK_2_Ch05_05.ipynb

本 PDF 文件为作者草稿，发布目的为方便读者在移动终端学习，终稿内容以清华大学出版社纸质出版物为准。

版权归清华大学出版社所有，请勿商用，引用请注明出处。

代码及 PDF 文件下载：<https://github.com/Visualize-ML>

本书配套微课视频均发布在 B 站——生姜 DrGinger：<https://space.bilibili.com/513194466>

欢迎大家批评指教，本书专属邮箱：jiang.visualize.ml@gmail.com