智能手机数字图片比色分析法概述

范亚军, 李嘉伟, 郭亚平, 谢练武*

(中南林业科技大学理学院, 长沙 410004)

摘 要: 为保护环境与食品安全, 有毒有害物质的现场快速检测以及分析数据即时反馈显得越发重要。随着智能手机的广泛普及与其应用程序的不断完善, 智能手机数字图片比色分析法得到了快速发展。本文简述了智能手机数字图片比色法的基本原理、图片采集设备及其传感器类型、图片颜色模型、图片数字化软件、分析数据处理与网络共享, 以及该方法在食品安全、医疗诊断、生物检测等领域的研究与应用, 对数字图片比色分析法未来的发展也做出了展望。得益于智能手机软硬件的不断完善, 数字图片比色分析法将得到广泛应用。

关键词: 比色分析; 智能手机; 数字图片; 颜色模型; 图像传感器; 食品安全; 快速检测

Summary on digital image colorimetry on smartphone

FAN Ya-Jun, LI Jia-Wei, GUO Ya-Ping, XIE Lian-Wu*

(*College of Sciences*, *Central South University of Forestry and Technology*, *Changsha* 410004, *China*)

ABSTRACT: Rapid detection of toxic and hazardous substances on-site and instant data sharing and feedback are becoming more and more important to protect ecological environment and ensure food safety. With the popularity of smartphones and the increasing advancement of their applications, the digital image colorimetriy (DIC) based on smartphone has developed rapidly. This paper reviewed the basic principles of digital picture colorimetry, image acquisition equipment and its sensor type, image color model, chromaticity processing software, application (APP) for processing analysis data and data online sharing, and its wide researches utilization in such fields as food safety, medical diagnosis, biopharmaceuticals, *etc*. and prospected the future development direction of DIC. It is believed that with the continuous improvement of software and hardware of smartphone, the DIC analysis system will be improved and widely used.

KEY WORDS: colorimetry; smartphone; digital image; color model; image sensor; food safety; rapid detection

1 引 言

近年来, 智能手机在科技与市场的大力推动下迅猛发展, 由于其具有轻巧便携、操作简单、处理功能强、应用程序丰富和数据传输快捷等特点, 在食品、医疗、化学等领域的即时快速检测方面应用前景广阔。

智能手机数字图片比色分析法是一种新的快速检测方法。它通过智能手机拍摄分析样品图片, 分析图片色度值, 确定待测物浓度与色度值之间的线性关系, 实现对样品的定量分析。刘厦等[1]对智能手机便携式检测技术的研究现状进行了综述, 着重描述了其各种应用领域及其发展趋势。本文侧重于概述智能手机数字图片比色分析法的基

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2671)、人社部留学回归人员择优资助项目(2016-176)

Fund: Supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (2018JJ2671), and the Technology Foundation for Selected Overseas Chinese Scholar of Ministry of Human Resources and Social Security of China (2016-176)

***通讯作者:** 谢练武, 教授, 主要研究方向为食品检验学与天然产物化学。E-mail: xielianwu@csuft.edu.cn

***Corresponding author:** XIE Lian-Wu, Professor, Central South University of Forestry and Technology, No.498, South Shaoshan Road, Tianxin District, Changsha 410004, China. E-mail: xielianwu@csuft.edu.cn

本原理、图片采集设备及其传感器类型、颜色模型、图像识别算法、图片数字化软件、分析数据处理与网络共享等，以期为从事该项研究的科研工作者带来指导意义。

2 数字图片比色分析法概述

为满足快速获取检测数据的要求，数字图片比色分析法(digital image colorimetriy, DIC)应运而生[2]。它是通过手机、扫描仪、数码相机等设备采集图片，并经应用软件(application, APP)将图片数字化处理后，比较颜色色度而获取待测组分浓度的一种分析手段。DIC 具有操作简单、轻便快捷的特点，适用于现场检测，尤其是基于智能手机的 DIC。智能手机数据处理能力强，APP 层出不穷，在各行各业都有应用需求[3]。智能手机不仅能获取高质量图片并对图片进行数字化处理，还能即时网络共享分析数据。智能手机 DIC 具有集成度高、操作简单、价格低廉、普及率高的优点，已引起人们高度关注。

数字图片比色分析法基本步骤如图 1 所示，包括：(1) 利用智能手机拍摄分析样品图片；(2) 选定颜色模型，通过取色软件获取颜色色度值；(3) 通过 APP 获得色度值(或其函数值)与浓度间的相关曲线；(4) 测得未知样品的浓度，实现数据网络共享。其中，图片采集、图片数字化和图片识别算法最为关键，图片采集装置多种多样，但其传感器类型却大同小异。

3 图片采集

采集图片的设备有智能手机、数码相机、扫描仪、摄像头、平板电脑等。设备不同会导致图片品质有所差别，常采用同一设备采集图片来消除设备误差。采集设备通过图像传感器捕获颜色，准确量化所接收的红、绿、蓝三原色光学谱线，完成光信号与电信号的转换、输出。图像传感器分为接触式图像传感器(contact image sensor, CIS)、电荷耦合组件(charge-coupled device, CCD)、互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)等 3 种。

扫描仪通过内置的 CIS 或 CCD 读取装置获取扫描件的光学信息，由计算机编辑处理与存储。Soldat 等[4]采用扫描仪获取微孔板图像，设计出一种微量检测分光光度计。摄像头和数码相机也无法单独处理图片信息，必须连接计算机来处理。与之不同，智能手机在获得高质量图片的同时，可用其扩展 APP 即时进行图片数字化。当然，图片数字化处理前需要确定最合适的颜色模型。

4 颜色模型

在色彩学中，以不同维度的空间坐标来表示色彩，即颜色模型，也称色域(color space)[5, 6]，分为 RGB、CMYK、HSV、CIE-XYZ、$L^*a^*b^*$等几种，均可实现图片的数字化。

4.1 RGB 模型与灰度模型

RGB 模型，也叫加色混色模型，使用红色(R)、绿(G)、蓝(B)三原色复现人眼所能识别的所有颜色。常用于数码产品，也广泛用于工业生产中[7]。在其坐标中(图 2)，黑色为原点(0, 0, 0)，从原点出发的坐标轴末端对应三原色：红(1, 0, 0)、绿(0, 0, 1)、蓝(0, 1, 0)，与原点对应的体对角线的顶点表示白色(1, 1, 1)，三原色的互补色分别位于剩下的三个顶点：青色、品红色、黄色，不同数值的三原色混合成不同的颜色点。

灰度模型通过改变基准黑色的饱和度来显示图像[8]。灰度取值 0% ~ 100%，为白色到黑色的亮度值。将原始 RGB 颜色信息转化为灰度，再通过灰度传输，传输完成后重新编码灰度还原为初始图像(RGB 或 CMYK 格式)，以此增加传输速度。

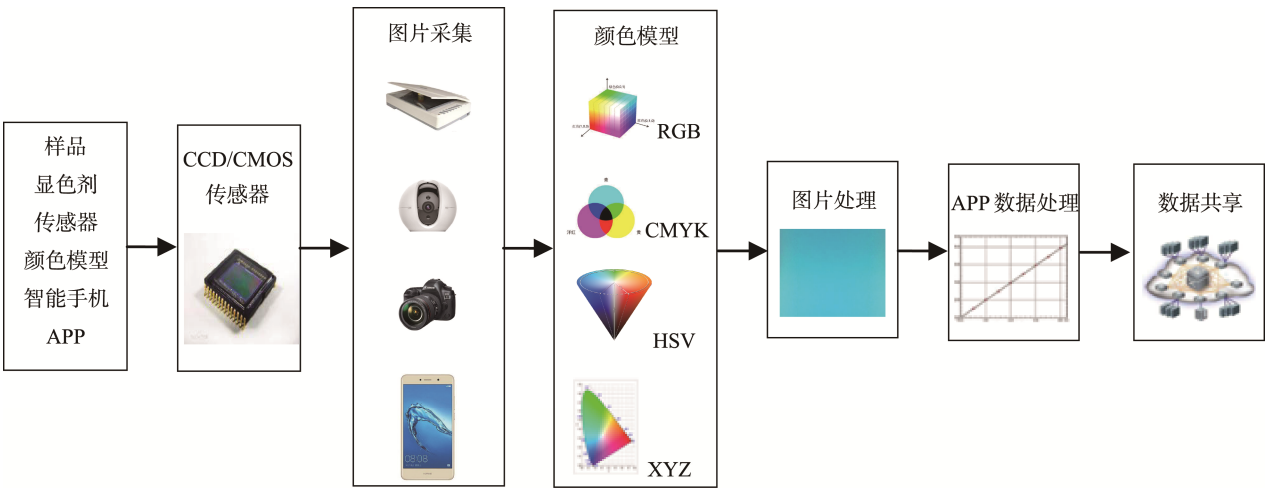


图 1 数字图片比色分析法示意图

Fig.1 General steps for digital image colorimetry

4.2　CMYK 模型

RGB 模型无法满足彩色印刷等特定行业的要求。光被物质吸收后，物质呈现出光的互补色，颜料必须吸收青、洋红、黄色的光才会呈现出 R、G、B 三原色。彩色印刷常用 CMYK 颜色模型(图 3)，一种减色混色模型，C、M、Y、K 分别代表青(cyan)、洋红(magenta)、黄色(yellow)、黑色(black)4 种颜色，称为印刷四原色[9]。每种原色取值 0%~100%。在 DIC 中，CMYK 颜色无法通过设备获取，需经 RGB 转换。由于该模型文件占用存储空间较大，在图片数字化中很少使用[10]。

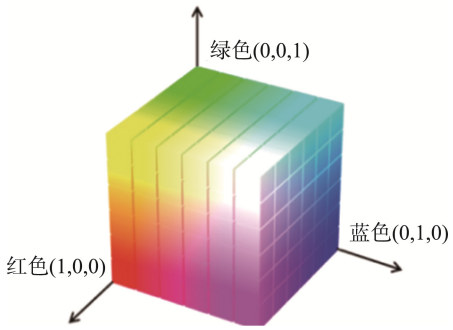


图 2　RGB 颜色模型的坐标表示

Fig.2　Representation coordinates of RGB color model

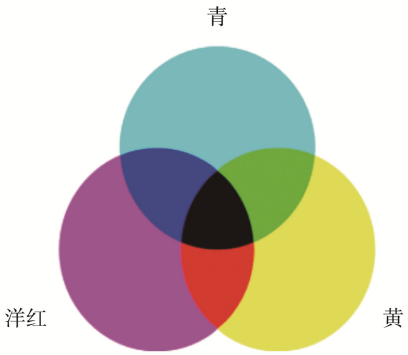


图 3　CMYK 颜色模型的四原色

Fig.3　Four primary colors of CMYK color model

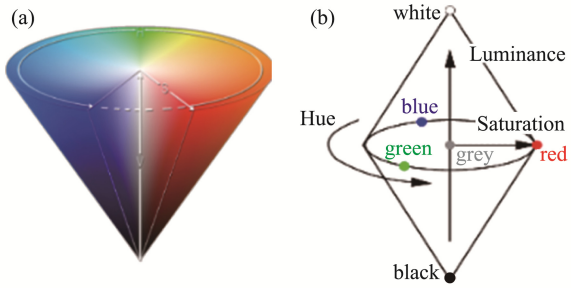
4.3　HSV、HSL 模型

HSV 模型中，H 为色调(hue)，S 为饱和度(saturation)，V 为亮度(value)，也称 HSB 模型[11]。该模型坐标为一个倒置六棱锥形[图 4 (a)]，角度表示为 H，取值 0~360°，饱和度 S 取值 0% ~ 100%，V 取值 0~1。HSV 常用于计算机图像编辑和视觉分析领域，如图像处理软件 photoshop、车辆牌照识别等，将其用于数字图像分析的研究也很多[12,13]。可是，HSV 不适用于光照模型，无法满足与光线、光强相关的运算要求。

HSL 模型[9]与 HSV 模型相似，H 为色调(0~360°)，S 为饱和度(0%~100%)，L 为亮度(0%~100%)，但它反映的是视觉对颜色的感知，而且参数 L 与 HSV 模型的 V 不同，与颜色信息无关。HSL 模型的坐标用双圆锥来表示[图 4 (b)]。

4.4　CIE-XYZ 模型

设备不同，RGB 的定义也有所不同，设备间兼容性较差。国际照明委员会(Commission Internationale de l′Eclairage，CIE)于 1931 年制定一种与设备无关的 CIE-XYZ(X、Y、Z 为三原色分量)颜色模型，用导出的 2 个坐标 x、y($x=\frac{X}{X+Y+Z}$；$y=\frac{Y}{X+Y+Z}$)来表示色度，Y 表示亮度，该模型已被广泛认可[13]。可用一个二维的色品图表示 CIE-XYZ 颜色模型(图 5)，充分体现出颜色混合效果，保真效果也很好，常用于颜色管理与颜色转换，可用于复杂的比色分析。



注: (a) HSV 颜色模型; (b) HSL 颜色模型

图 4　HSV 颜色模型和 HSL 颜色模型[15]

Fig.4　HSV Color model; HSL Color model

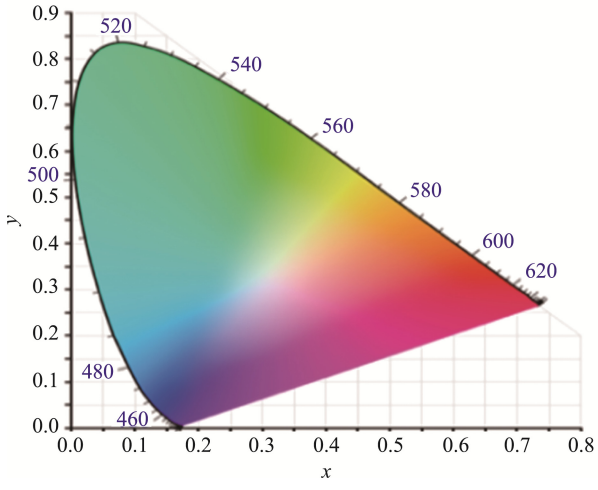


图 5　CIE-XYZ 色度图[16]

Fig.5　Chromaticity diagram of CIE-XYZ

4.5　$L^*a^*b^*$模型

$L^*a^*b^*$模型是在 CIE-XYZ 基础上建立的，也是一种与设备无关的颜色模型，同时也是基于生理特点的颜色模型[17]。该模型包含了人眼所能看见的全部颜色，也是迄今为

止覆盖色最广的颜色模型。$L^*a^*b^*$模型的亮度(L^*)和颜色(a^*和b^*)是独立的, L^*取值 0 ~ 100, a^*、b^*取值均为-128 ~ +127, 但 a^*表示从红色到绿色区间, 而 b^*表示从黄色到蓝色区间(图 6), 因而 $L^*a^*b^*$模型可以大大提高处理效率。

5 图像识别算法

图像识别算法主要分为图像分割、特征提取和图像分类算法等, 首先对图像进行预处理, 再对图像予以分割, 提取图像特征并分类, 对图像识别结果进行处理。随移动智能设备处理性能和功能的不断完善, 图像识别的应用逐渐从大型计算机转移到移动智能设备。移动智能设备的图像识别处理过程中, 不同图像根据目的不同可以选择不同的识别算法。

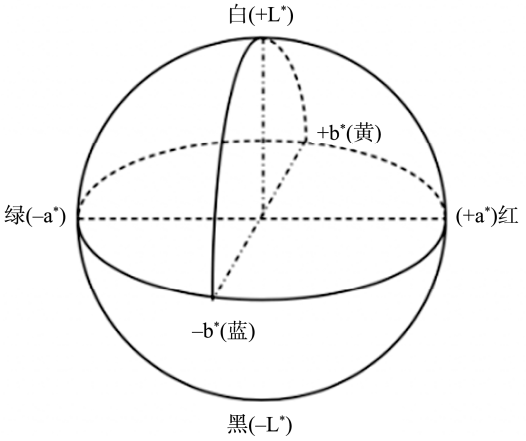


图 6 L^*a^*b 颜色模型示意图

Fig.6 Representation coordinates of the L^*a^*b color model

5.1 图像分割算法

图像分割是将完整图像分割成若干个内部联通且互不重叠的非空子区, 同一个区具有相同或相似特征。图像的精准分割是特征提取的重要基础。图像分割需要根据不同的景物, 选择合适精确高效的算法。刘从等[18]提出了一种融合多信息噪声图像分割算法, 与经典分割算法相比, 对含有离散噪声和几何噪声的图像具有较高精度和较强的处理能力。

5.2 特征提取算法

图像分割算法得到的是不同主题区域的图像, 而特征提取算法可以减少图像分类的误差。图像特征是图像中物体标志性或显著性内容, 分为人为定义经变换得到的图像统计特征[19], 如图像的频谱、矩等, 和人体视觉直接感受的视觉特征[20], 如图像的颜色、纹理、形状等。特征提取是量化图像内容的手段[21]。Saif 等[22]基于矩的特征提取算法(moment-based feature extraction algorithm, MFEA)提取无人机的航拍图像进行运动物体快速检测, 与其他方法相比, 检测移动物体的准确度较高。

5.3 图像分类算法

图像分类的核心是在给定的分类集合中赋予图像一个标签。不同于人眼识别图像, 智能手机等数据处理设备识别的图像是大的像素矩阵, 图像分类算法完成对图像特征提取后的准确分类[23]。图像的变化不是单向、一维的, 分类算法的关键是图像分类器的范围。常用的分类器有支持向量机、随机森林、神经网络等。Cao 等[24]提出了一种基于自适应特征权重更新的图像分类算法, 提取图像中的色调等变换特征进行自适应融合得到最优权值组合, 然后利用支持向量机(support vector machine, SVM)分类器进行并行训练, 随着图像数量和类型的增加, 分类准确率超过 95%。

5.4 图像识别算法应用

图像识别算法在地质勘探[25]、生物医学[26, 27]、刑侦安防和工农业生产[28]等方面广泛应用。Kasar 等[29]通过综述基于人工神经网络(artificial neural network, ANN)算法的不同人脸识别方法在人脸图像处理和识别领域中的优点与局限, 指出今后采用多隐层小波和神经网络相结合的方法, 实现基于真实数据的人脸识别系统准确性。Durić等[30]提出一种基于识别建筑特定窗口形状的半自动算法, 结果证明该算法的性能主要受所观察到的弧形结构元素的视觉特征的影响。顾理琴[31]提出基于图像识别技术的食品种类检测总体设计方案, 证明遗传/BP 神经网络算法对分析不同品种的红枣的 40 种特征向量的平均识别率高达 90%。

6 图片数字化

图片数字化是指在某种颜色模型下利用图片分析软件将颜色信息转换为数字信号, 以便探寻数字信号与待测物浓度之间的相关性。常用的图片分析软件有 Adobe Photoshop CC、Pantone Studio、数码测色计、Image J、Color pilot 等。

Adobe Photoshop CC 是 Adobe 公司开发的一款适用于多系统图片处理软件, 可将颜色信息转换为 R、G、B 值; Pantone Studio 是 Pantone 公司开发的一款 iOS 应用, 拥有超过一万种颜色, 可以方便地提取手机中图像的颜色, 从而获得该颜色的类型及相关信息; 数码测色计是 Apple 公司开发的一款 macOS 系统软件, 它能够显示 RGB、sRGB、Adobe RGB、$L^*a^*b^*$等颜色模型, 移动鼠标即可获取鼠标箭头所指屏幕上任意点的颜色值; Image J 是美国国家心理健康研究所开发的一款基于 Java 语言的多平台图片分析软件, 该软件内置多种插件, 能够编辑处理 8 位、16 位、32 位等多种格式的图片; Color pilot 是一款 Windows 端的图片色彩校正程序, 它可纠正图片非正常色差和可提取所需

的 *R*、*G*、*B* 值, 特别适用于数码相机及扫描仪获取生动鲜活的图片色彩。

7　数据处理及检测 APP

利用上述图片数字化软件提取智能手机拍摄图片的色度值, 研究色度值或色度函数与分析物浓度的相关性, 建立标准曲线。在此基础上, 设计相应样品中分析物在手机上实现浓度直读与检测结果网络共享的 APP, 即可达到数字图片比色分析实现现场快速检测的目的。

7.1　色度与浓度的相关性

在一定浓度范围内, 有色物质色度与其浓度呈线性关系, 建立标准曲线后即可对未知样进行分析。Nitinaivinij 等[32]通过合成的红色纳米银与 H_2O_2 溶液显色, 发现 *R* 色度值与 H_2O_2 在 10 ~ 80 μmol/L 范围内呈良好线性关系, 检测限(limit of detection, LOD)为 6.19 μmol/L。李莎等[33]针对苹果表皮色度, 利用 RGB、$L^*a^*b^*$、YCbCr 等不同的颜色模型对图像进行灰度化, 在不同光照下比较苹果图像的噪声面积, 结果表明, *Cr* 分量相较于 *a**过多保留草地和树叶的噪声, 优先选用 *a**分量判断其成熟度, 该法创新的通过分析从成熟苹果提取的三种颜色模型判断果实特点, 为其他研究开辟了崭新的思路。Peng 等[34]利用手机, 探讨不同 RGB 数学模型对测定 Fe^{3+}浓度的关系, $[(I_X\text{-}I_{X\text{blank}})_{\text{total}}]^{1/2}$ 函数(其中 *X* 代表 *R*、*G*、*B*, I_X 代表样品溶液 *R*、*G*、*B* 通道的色度值, $I_{X\text{blank}}$ 代表空白溶液 *R*、*G*、*B* 通道的色度值)与浓度的线性相关系数更大, 线性范围更宽, LOD 更低。将构建的色度数学模型和被测物浓度的相关模型存储于应用程序, 利用手机直接获取图片 *R*、*G*、*B* 值后计算出对应色度函数值, 自动输入到线性方程中, 即可获得待测物质的浓度值。

7.2　检测分析 APP

研制检测不同目标物的手机 APP, 便于实现样品中待测物的浓度在手机上的直读与数据传输。2019 年, Son 等[35]基于一种比色生物检测试纸开发出一款手机 APP, 通过试纸上 A 型流感病毒核蛋白(nuclear protein, NP)和 NP 抗体相互作用, 在各种浓度的 pH1N1 病毒存在下显示出蓝到红的颜色变化, 使用 APP 拍摄试纸图像即可分析是否有 pH1N1 病毒存在, 该产品研究对其他病毒的目视精度测定提供了良好的思路。Fu 等[36]开发了基于聚对苯二甲酸乙二酯/试纸的一款手机 APP, 通过 APP 分析高分辨率图像的 RGB 来计算 SO_2 浓度, 此平台经济、快捷, 便于更多的商品 SO_2 含量的测定。一般的, 数字图片智能手机检测分析 APP 应包含以下功能: (1)内置色度-浓度线性模型; (2)样品分析物浓度直读; (3)分析数据保存与上传; (4)联网动态分析, 实时查看服务器数据, 进行自动动态分析。

7.3　分析数据网络共享

互联网、人工智能的快速发展, 为搭建快速检测数据共享平台提供了重要前提。通过智能手机图片比色分析获得的数据即时上传对应的网络服务器, 链接生产、制造、流通、市场、消费各环节, 有望实现在数据内联外享基础上的食品安全、生态安全的“智慧”监管[37]。

8　数字图片比色法应用研究

基于智能手机的数字图片比色分析法适用于现场快检, 已在食品安全、生物检测、医疗诊断等领域有许多应用研究实例。针对金属离子、有毒气体、农药残留、生物分子、病毒等的检测, 也有一些智能手机 DIC 的 APP 开发出来(表 1)。

表 1　智能手机数字图片比色法应用举例

Table 1　Application examples of the digital image colorimetry on smartphone

分析物	颜色模型	线性范围	LOD/灵敏度	相对误差/%	APP	参考文献
Fe^{3+}	RGB	0.3~7.0 mg/L	0.16 mg/L	—*	Color Grab	[34]
pH1N1	$L^*a^*b^*$	$<10^4$ $TCID_{50}$	—	—	Virus Detection	[35]
甲醛	RGB	0~25 mg/L	0.46-0.78 mg/L	< 4.2	自主 APP	[38]
白蛋白	—	—	5-10 μg/mL	—	Albumin Tester	[39]
妊娠激素	RGB/灰度	OD 0.28-0.40	—	—	Barcode Scanner	[40]
抗坏血酸	RGB/HSV	0.0024~0.5000 mg/mL	—	—	自主 APP	[41]
Cl_2	RGB	0.06~2.00 ppm	—	—	ClApp	[42]
玉米赤霉烯酮	RGB	—	0.08~0.18 μg/kg	< 2.7	SIAP-App	[43]
砷(III)	RGB	—	710~1278 μg/L	—	HMD	[2]
有机磷农药	yellow color	3.3-666.7 μmol/L	0.42 μmol/L	< 4.1	iDropper	[44]
葡萄糖	RGB/HSV	0.005~1.500 mmol/L	0.21 μmol/L	—	color picker	[45]

*注: “—”表示原文中未予说明。

8.1 食品安全

将比色分析与智能手机加以融合，为食品分析开辟了新的领域。Wongniramaikul 等[22]采用新型可生物降解木薯粉比色薄膜结合的 DIC，实现了食品中甲醛的快速测定，其反应生成的黄色物质在 B 通道色度值与其浓度具有良好的线性关系。Zhang 等[46]开发出 Android 手机 APP 分析水通过离子交换膜的彩色图像，并通过预加载的校准曲线测定水中钙、镁离子浓度。Peng 等[34]结合分散液-液微萃取与 DIC，通过扫描薄层色谱(thin-layer chromatography, TLC)板上的色点并用 Image J 软件将 RGB 信息转换为灰度信息，从而确定水和食物样品中的总铁含量。Sumriddetchkajorn 等[42]通过 DIC 法，利用 3,3-二甲基联苯胺与氯反应的颜色变化，通过基于 Java 的“ClApp”色度计 APP 获取相关颜色信息，程序内置颜色与浓度的标准曲线，实现了水中余氯浓度的直读与低成本监测。Fan 等[47]开发了敏感响应 pH 的生物质碳点纳米探针并与智能手机 DIC 结合，实现了水体低浓度氨含量的快速现场测定。Salah 等[48]采用智能手机应用“PAD Analysis”扫描特定的浸润便携式纸质传感器图像，分析待测样图像的 *R* 和 *G* 颜色强度，从而实现现场快速目视检测 2,4,6-三硝基苯酚。这些方法成本低廉且检测快速，所得结果与分光光度法非常吻合。但值得注意的是，探寻特异性更强、灵敏度更高的显色剂一直是显色分析的重要研究领域，智能手机 DIC 也不例外。

8.2 医疗诊断

快速、准确诊断是医疗的关键，智能手机 DIC 是对医疗诊断手段的有益补充。Wong 等[40]开发出一款手机 APP，通过扫描条形码图案的免疫试纸条来进行诊断，可检测较宽浓度范围的妊娠激素，且灵敏度较高。由于医用检测试纸比色法存在肉眼感知生物信号转化为颜色信号的主观不确定性，Hong 等[41]将光谱法和智能手机结合形成新的临床检测手段，能快速量化颜色信息，通过程序内置的标准曲线将其转化为相关浓度数据，非专业人员也能完成快速诊断。García 等[49]为了从美容角度客观地评估祛疤痕的质量，使用 APP 处理疤痕与健康皮肤的数字图片并进行比色测量，根据二者 RGB 信息的显著差异，得出使用光保护疗法和硅凝胶治疗能够改善疤痕的结论。可以说，智能手机 DIC 在体检、诊断、美容等行业都将得到应用，而且为远程医疗开辟了一条新途径。

8.3 生物检测

智能手机 DIC 还可用于食品质量、生物样本、疾病防控等方面的检测。戴斌等[50]通过手机 APP 直接对装有人血清蛋白(双缩脲显色)的比色皿图片进行 2 次取值和计算，得以测试蛋白质样本的浓度。Shashank 等[51]开发了一款名为“Colorimetric Detector”手机 APP，通过观测大肠杆菌、铜绿假单胞菌、枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌等代谢产生的 H_2S 与纳米银传感器的颜色变化，用于快速诊断由抗生素抗性和非抗性病原体引起的感染和疾病。DIC 法促进了检测设备的智能化、小型化和检测快捷化。不过，智能手机 DIC 法进行生物检测的重复性还有待进一步提高。

9 结语与展望

作为即时检测技术，基于智能手机的数字图片比色分析法具有经济便携、操作简单的特点。本文综述了基于智能手机 DIC 的研究进展，并对其基本原理、基本步骤进行了简单阐述。智能手机 DIC 具有以下突出优点：(1)经济轻便，有利于分析检测从专门实验室走向样品现场；(2) 可广泛普及，智能手机具有强大的数据处理功能，APP 可任意扩展；(3) 智能手机通过对图片进行数字化处理，实现分析结果的即时直读显示与网络共享。

目前，很多研究者已开发出大量适配智能手机 DIC 快检的应用程序，而且还开发出检测血液因子、病毒、农药和重金属等的便携试纸和分析仪器。DIC 分析法具有巨大的发展空间，尤其在食品安全、医疗诊断和生物检测方面前景广阔。当然，DIC 中图片质量的好坏直接影响了分析结果的准确性。环境光照条件的稳定性，手机摄像头与被拍物体的距离，势必会影响图片质量。因此，在探寻特异性更强、灵敏度更高的显色剂的同时，应该重点加强拍摄图片条件均一性、稳定性的相关研究，让基于智能手机的数字图片比色分析技术更好地服务大众，造福人民。

参考文献

[1] 刘厦, 刘畅, 李楠, 等. 智能手机应用于便携式检测技术的研究进展[J]. 分析试验室, 2017, 36(1): 120−124.
Liu X, Liu C, Li N, *et al*. Recent advances in applications of smartphone in portable detection technology [J]. Chin J Anal Lab, 2017, 36(1): 120−124.

[2] Barros JAVA, Oliveira FMD, Santos GDO, *et al*. Digital image analysis for the colorimetric determination of aluminum, total iron, nitrite and soluble phosphorus in waters [J]. Anal Lett, 2017, 50(2): 414−430.

[3] Ravazzi CG, Franco MOK, Vieira MCR, *et al*. Smartphone application for captopril determination in dosage forms and synthetic urine employing digital imaging [J]. Talanta, 2018, (189): 339−344.

[4] Soldat DJ, Barak P, Lepore BJ. Microscale colorimetric analysis using a desktop scanner and automated digital image analysis [J]. J Chem Educ, 2009, 86(5): 617−620.

[5] Logvinenko AD. The geometric structure of color [J]. J Vision, 2015, 15(1): 16.

[6] Kahu SY, Raut RB, Bhurchandi KM. Review and evaluation of color spaces for image/video compression[J]. Color Res Appl, 2019, 44(1): 8−33.

[7] Vidal M, Garcia-Arrona R, Bordagaray A, *et al*. Simultaneous determination of color additives tartrazine and allura red in food products by digital image analysis [J]. Talanta, 2018, 184: 58−64.

[8] Cao LQ, Jiao L, Li ZJ, *et al*. Grayscale image colorization using an

adaptive weighted average method [J]. J Imag Sci Technol, 2017, 61(6): 060502.

[9] Pessoa KD, Suarez WT, dos Reis MF, *et al*. A digital image method of spot tests for determination of copper in sugar cane spirits [J]. Spectrochim Acta A, 2017, (185): 310–316.

[10] Hanbury A. Constructing cylindrical coordinate colour spaces [J]. Pattern Recogn Lett, 2008, 29(4): 494–500.

[11] Zhang Y, Hartemink AE. A method for automated soil horizon delineation using digital images [J]. Geoderma, 2019, (343): 97–115.

[12] Chakkaravarthy AP, Chandrasekar A. An automatic threshold segmentation and mining optimum credential features by using HSV model [J]. 3D Res, 2019, 10(2): 18.

[13] Song J, Liu L, Huang W, *et al*. Target detection via HSV color model and edge gradient information in infrared and visible image sequences under complicated background [J]. Opt Quant Electron, 2018, 50(4): 175.

[14] Trezona PW. Derivation of the 1964 CIE 10 degrees XYZ colour-matching functions and their applicability in photometry [J]. Color Res Appl, 2001, 26(1): 67–75.

[15] Woelk F, Schiller I , Koch R . An airborne Bayesian color tracking system [C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings. IEEE. IEEE, 2005.

[16] Murata H, Saitoh K, Sumida Y. True color imagery rendering for Himawari-8 with a color reproduction approach based on the CIE XYZ color system [J]. J Meteorol Soc Jpn, 2018, (96B): 211–238.

[17] Dufosse L, Galaup P, Carlet E, *et al*. Spectrobolometry in the CIE L*a*b* color space as useful tool for monitoring the ripening process and the quality of PDO red-smear soft cheeses [J]. Food Res Intl, 2005, 38(8): 919–924.

[18] 刘丛, 李咨兴, 唐坚刚. 融合多信息的噪声图像分割算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2019, 40(9): 1940–1945.
Liu C, Li ZX, Tang JG. Study on noise image segmentation based on multiple information fusion [J]. J Chin Comp Sys 2019, 40(9): 1940–1945.

[19] 柳春华, 姚建峰. 基于图像统计特征的新旧纸币识别算法[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2016, 29(4): 617–620.
Liu CH, Yao JF. An recognition algorithm based on statistical feature for damaged degree of paper money [J]. J Xinyang Norm Univ (Nat Sci Ed), 2016, 29(4): 617–620.

[20] 徐绕山, 王爽, 孙正兴. 大规模艺术图像的视觉特征计算组织与可视化[J]. 科技通报, 2017, 33(12): 194–200.
Xu RS, Wang S, Sun ZX. Organizing and visualizing for numerous artistic images with visual features computation [J]. Bull of Sci Technol, 2017, 33(12): 194–200.

[21] Chen YS, Yang Z, Ma L, *et al*. Efficient ectraction algorithm for local fuzzy features of dynamic images [J]. Discrete Cont Dyn S, 2019, 12(4–5): 1311–1325.

[22] Saif AFMS, Prabuwono AS, Mahayuddin ZR. Moment feature based fast feature extraction algorithm for moving object detection using aerial images [J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0126212.

[23] 黄凯奇, 任伟强, 谭铁牛. 图像物体分类与检测算法综述[J]. 计算机学报, 2014, 37(6): 1225–1240.
Huang KQ, Ren WQ, Tan TN. A review on image object classification and detection [J]. Chin J Comp, 2014, 37(6): 1225–1240.

[24] Cao J, Wang M, Li Y, *et al*. Improved support vector machine classification algorithm based on adaptive feature weight updating in the Hadoop cluster environment [J]. PLoS One, 2019, 14(4): e0215136.\

[25] 郝彤, 赵杰. 面向双曲线形态的探地雷达图像识别技术综述[J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1366–1372.
Hao T, Zhao J. A brief review of the hyperbola signature recognition techniques for ground penetrating radar [J]. Acta Electron Sin, 2019, 47(6): 1366–1372.

[26] Xu YY, Shen HB. Review of research on biomedical image processing based on pattern recognition [J]. J Electron Inform Technol, 2020, 42(1): 201–213.

[27] 李贞燕. 国内外医学图像分析算法研究进展概况[J]. 世界最新医学信息文摘, 2017, 17(4): 24–25.
Li ZY. The study progress of domestic and foreign medical image analysis algorithm [J]. World Latest Med Inform, 2017, 17(4): 24–25.

[28] 汪京京, 张武, 刘连忠, 等. 农作物病虫害图像识别技术的研究综述[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(7): 1363–1370.
Wang JJ, Zhang W, Liu LZ, *et al*. Summary of crop diseases and pests image recognition technology [J]. Comp Eng Sci, 2014, 36(7): 1363–1370.

[29] Kasar MM, Bhattacharyya D, Kim TH. Face recognition using neural network: areview [J]. Int J Secur Appl, 2016, 10(3): 81–100.

[30] Duric I, Obradovic R, Viana V, *et al*. Algorithm for image-based architectural element recognition [J]. FME Transa, 2019, 47(2): 287–292.

[31] 顾理琴. 基于图像识别技术的食品种类检测方法[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(2): 186–189.
Gu LQ. Image recognition technology of the food species detection method [J]. Food Res Dev, 2017, 38(2): 186–189.

[32] Nitinaivinij K, Parnklang T, Thammacharoen C, *et al*. Colorimetric determination of hydrogen peroxide by morphological decomposition of silver nanoprisms coupled with chromaticity analysis [J]. Anal Method, 2014, 6(24): 9816–9824.

[33] 李莎, 钱建平, 赵春江, 等. 不同颜色模型识别成熟苹果图像的比较分析[J]. 计算机工程与设计, 2015, 36(6): 1545–1550.
Li S, Qian JP, Zhao CJ, *et al*. Comparing and analyzing different color models on ripe apple image identification [J]. Comput Eng and Des, 2015, 36(6): 1545–1550.

[34] Peng B, Chen G, Li K, *et al*. Dispersive liquid-liquid microextraction coupled with digital image colorimetric analysis for detection of total iron in water and food samples [J]. Food Chem, 2017, (230): 667–672.

[35] Son SU, Seo SB, Jane S, *et al*. Naked-eye detection of pandemic influenza a (pH1N1) virus by polydactylies (PDA)-based paper sensor as a point-of-care diagnostic platform [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2019, (291): 257–265.

[36] Fu LM, Liu CC, Yang CE, *et al*. A PET/paper chip platform for high resolution sulphur dioxide detection in foods [J]. Food Chem, 2019, (286): 316–321.

[37] 张玉春, 王婧. 生鲜农产品供应链信息共享研究综述[J]. 商业经济研究, 2019, (9): 139–141.
Zhang YC, Wang J. A literature review on the information sharing of agri-fresh products supply chain [J]. J Commer Econ, 2019, (9): 139–141.

[38] Wongniramaikul W, Limsakul W, Choodum A. A biodegradable colorimetric film for rapid low-cost field determination of formaldehyde

contamination by digital image colorimetry [J]. Food Chem, 2018, (249): 154–161.

[39] Coskun AF, Nagi R, Sadeghi K, *et al*. Albumin testing in urine using a smart-phone [J]. Lab Chip, 2013, 13(21): 4231–4238.

[40] Wong JXH, Li X, Liu FSF, *et al*. Direct reading of bona fide barcode assays for diagnostics with smartphone Apps [J]. Sci Rep, 2015, (5): 11727.

[41] Hong JI, Chang BY. Development of the smartphone-based colorimetry for multi-analyte sensing arrays [J]. Lab Chip, 2014, 14(10): 1725–1732.

[42] Sumriddetchkajorn S, Chaitavon K, Intaravanne Y. Mobile-platform based colorimeter for monitoring chlorine concentration in water [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2014, (191): 561–566.

[43] 王晓元, 张校亮, 谭慷, 等. 利用智能手机和应用程序确定颜色主波长的 pH 比色法定量[J]. 分析试验室, 2018, 37(3): 291–295.
Wang XY, Zhang XL, Tan K, *et al*. Smartphone-based digital colorimetric pH determination [J]. Chin J Anal Lab, 2018, 37(3): 291–295.

[44] Wei J, Yang L, Luo M, *et al*. Nanozyme-assisted technique for dual mode detection of organophosphorus pesticide [J]. Ecotox Environ Saf, 2019, (179): 17–23.

[45] Alizadeh N, Salimi A, Hallaj R. Mimicking peroxidase-like activity of Co_3O_4-CeO_2 nanosheets integrated paper-based analytical devices for detection of glucose with smartphone [J]. Sensor Actuat B-Chem, 2019, (288): 44–52.

[46] Zhang W, Zhang H, Zhou A. Smartphone colorimetric detection of calcium and magnesium in water samples using a flow injection system [J]. Microchem J, 2019, (147): 215–223.

[47] Zhu FY, Xue DJ, Ying Z, *et al*. A smartphone-coalesced nanoprobe for high selective ammonia sensing based on the pH-responsive biomass carbon nanodots and headspace single drop microextraction [J]. Spectrochim Acta A, 2019, (219): 382–390.

[48] Tawfik SM, Sharipov M, Kakhkhorov S, *et al*. Multiple emitting amphiphilic conjugated polythiophenes-coated CdTe QDs for picogram detection of trinitrophenol explosive and application using chitosan film and paper-based sensor coupled with smartphone [J]. Adv Sci, 2019, 6(2): 1801467.

[49] Fernández GA, Fernández PC, Santoyo GLF, *et al*. Evaluación colorimétrica digital de cicatrices patológicas: Estudio comparativo entre gel de silicona y fotoprotector [J]. Cir Plást Ibero Latinoam, 2010, 36(2): 167–174.

[50] 戴斌, 彭琳, 罗继全, 等. 基于智能手机定量测定蛋白质的方法研究[J]. 分析测试学报, 2018, 37(12): 1463–1468.
Dai B, Peng L, Luo JQ, *et al*. Research on quantitative detection of protein using smart phone [J]. J Instrum Anal, 2018, 37(12): 1463–1468.

[51] Gahlaut SK, Kalyani N, Sharan C, *et al*. Smartphone based dual mode in situ detection of viability of bacteria using Ag nanorods array [J]. Biosens Bioelectron, 2019, (126): 478–484.

(责任编辑：李磅礴)

作者简介

范亚军，硕士，主要研究方向为食品检测。
E-mail: fyjcsuft@126.com

谢练武，博士，教授，主要研究方向为食品检验学与天然产物化学。
E-mail: xielianwu@csuft.edu.cn