

# 利用python/RGB色彩数据分析平台 快速测定还原糖浓度

陈慧<sup>1,2</sup>, 郝锦亨<sup>1,2</sup>, 袁志涛<sup>1,2</sup>, 罗佳伟<sup>1,2</sup>, 陈胤熹<sup>1,2</sup>, 郑少鹏<sup>1,2</sup>, 黎佩瑜<sup>1,2</sup>, 吕咏镔<sup>1,2</sup>, 梁世濠<sup>1</sup>, 赖林浩<sup>1,2,3</sup>,  
曹诗林<sup>1,2,3</sup>

(1. 佛山科学技术学院食品科学与工程学院, 广东佛山 528000) (2. 可持续生物化学与合成生物工程中心, 佛山无远生物科技有限公司, 广东佛山 528000) (3. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

**摘要:** 本文探讨了运用 python 处理食品生物化学实验中还原糖浓度测定的新方法。分别将稀释成不同浓度的还原糖检测样品放在 96 孔酶标板上, 利用扫描仪对其扫描, 得到 tiff 格式的颜色位图, 以利用本课题组自行开发的在线分析平台上的 RGB 分析模块读取样品溶液的 RGB 颜色数据。通过考察样品取样量、最适图片分辨率等条件, 建立一种基于 RGB 色彩体系的食品中还原糖快速检测方法。检测葡萄糖的结果, 在葡萄糖浓度相同, 样品取样量为 100  $\mu$ L, 图片分辨率为 1200 dpi 的条件下, 拟合系数大于 0.98; RGB 颜色数据与葡萄糖浓度之间的关系准确度更高, 该结果与分光光度法结果相近, 但本方法更方便、快速、可多通道处理。与此同时, 通过测定实际样品中还原糖的含量, 并与分光光度法测定结果比对, 验证了利用 python/RGB 色彩数据分析平台快速测定食品中还原糖浓度的可靠性和可行性。

**关键词:** RGB; 还原糖; 扫描仪; 成像; 脚本

文章编号: 1673-9078(2021)07-315-320

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.7.0898

## Python/RGB Color Data Analysis Platform for Rapid Detection of Reducing Sugar Concentration

CHEN Hui<sup>1,2</sup>, HAO Jin-heng<sup>1,2</sup>, YUAN Zhi-tao<sup>1,2</sup>, LUO Jia-wei<sup>1,2</sup>, CHEN Yin-xi<sup>1,2</sup>, ZHENG Shao-peng<sup>1,2</sup>,  
LI Pei-yu<sup>1,2</sup>, LYU Yong-si<sup>1,2</sup>, LIANG Shi-hao<sup>1</sup>, LAI Lin-hao<sup>1,2,3</sup>, CAO Shi-lin<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Foshan University, Foshan 528000, China)

(2. Sustainable Biochemical & Biosynthetic Engineering Center, Foshan Wu-Yuan Biotechnology Co. Ltd.,  
Guangdong Biomedical Industrial Base, Foshan 528000, China)

(3. College of Food Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** A new method for determining reducing sugar concentration through food biochemical experiments using python was investigated in this study. Reducing sugar-containing samples were diluted to different concentrations and placed on the 96-well plates, before being scanned by the scanner to obtain the color images in tiff. The RGB color data of the samples were collected by the RGB  
引文格式:

陈慧, 郝锦亨, 袁志涛, 等. 利用 python/RGB 色彩数据分析平台快速测定还原糖浓度[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 315-320

CHEN Hui, HAO Jin-heng, YUAN Zhi-tao, et al. Python/RGB color data analysis platform for rapid detection of reducing sugar concentration [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 315-320

收稿日期: 2020-09-26

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金佛山市联合基金(粤佛联合基金)青年基金项目(2019A1515110621); 广东普通高校青年创新人才项目(自然科学类)(2017KQNCX217); 佛山科学技术学院高层次人才启动项目(GG07016); 大学生创新创业训练计划项目(201911847023; S201911847097; S201911847091; XJ2019213; S202011847068; S202011847086; XJ2020219; XJ2020220); 广东省科技创新战略专项资金项目(pdjh2020b0627); 广州无远生物科技有限公司-企业科研基金(012319705010)

作者简介: 陈慧(1999-), 女, 本科生, 研究方向: 生物合成与生物转化; 共同第一作者: 郝锦亨(2000-), 男, 本科生, 研究方向: 生物合成与生物转化

通讯作者: 曹诗林(1987-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 生物合成与生物转化

analysis module of the online analysis platform developed by our research group. By investigating the conditions such as the sampling size and optimal image resolution, a rapid detection method for reducing sugar in food based on RGB color system was established. For glucose detection, the fitting coefficient was higher than 0.98 when the concentration of glucose remained the same with the sample size as 100  $\mu\text{L}$  and the image resolution as 1200 dpi. The accuracy of the relationship between RGB color data and the concentration of reducing sugar was higher, and the result was similar to the that obtained by spectrophotometry, but this method is more convenient and faster and allowed multi-channel processing. At the same time, through measuring the content of reducing sugar in the real sample and comparing with the results obtained by spectrophotometry, the reliability and feasibility of using Python/RGB color data analysis platform to determine quickly the concentration of reducing sugar in food were verified.

**Key words:** RGB; reducing sugar; scanner; imaging; script

食品生物化学实验教学中,包括了对食品中常见的成分进行定量分析的教学内容。食品中糖类物质与蛋白质的含量检测是食品检测的常见项目,也是食品生物化学实验教学的一个重要的部分。可见分光光度法是根据郎伯比尔定律<sup>[1]</sup>,根据颜色深浅变化,在特定波长处测定被测物质的吸光度,可对其物质进行定量分析,具有应用广泛,灵敏性高等优点。在这个方法中,需要使用分光光度计来进行定量检测。然而,普通的分光光度计不便携带、便携式分光光度计价格昂贵。因此,设计一种简单可行的分析方法,并考察其是否有进一步开发为便携设备的可能,是一个很有意思的研究课题。

基于 3,5-二硝基水杨酸(DNS)<sup>[2]</sup>,苯酚硫酸法<sup>[3]</sup>,是经典的还原糖的检测方法。DNS 法的原理是:3,5-二硝基水杨酸溶液与还原糖溶液共热后被还原成棕红色氨基化合物,颜色随浓度变化而变化,随着浓度增大,颜色加深。

由于以上两种方法中,待测溶液颜色随待测样品浓度变化而呈现一定的规律,因此,待测溶液的颜色数据有可能与待测样品的浓度具有相关性。如何提取待测溶液的颜色数据是建立上述相关性的一个难点,其主要在于获得待测样品的图像,并从中提取出数据。RGB 色彩体系是一种应用极其广泛的颜色系统,利用红(R)、绿(G)、蓝(B)三个颜色通道数据来表征所有的颜色特征<sup>[4]</sup>。通过数码成像方法,可以获得 RGB 数据。数码成像<sup>[5]</sup>的原理是通过电荷耦合原件(CCD<sup>[6]</sup>)将色彩信号转换成电信号。CCD 的色彩信号由红绿蓝(RGB<sup>[7]</sup>)三色信号混合而成。因此,在分析过程中,通过读取被染色溶液中的 RGB 数据,并进行进一步处理,可望在不进行分光的情况下,对样品的浓度进行准确的测量。在本课题组前期研究中,利用 python 脚本建立了在图片中批量读取样品 RGB 颜色数据的方法。因此,本文在此基础上,进行了以下研究:(1)进一步开发出了基于 RGB 的在线分析平台;(2)进而研究了还原糖待测样品浓度与

RGB 数据的关系;(3)研究了还原糖最适图片分辨率、吸光度和 RGB 向量三者之间的关系。最后建立了基于 RGB 色彩体系的食品中还原糖快速检测方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

无水葡萄糖为上海伯奥生物科技有限公司产品;3,5-二硝基水杨酸国药集团化学试剂有限公司产品;酒石酸钾钠为天津市福晨化学试剂厂。

### 1.2 仪器

酶标仪为 BioTek Instruments, Inc 公司产品;水浴锅为巩义市予华仪器有限责任公司产品;电子天平为上海浦春计量仪器有限公司产品;扫描仪为精工爱普生公司产品。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 基于 python 的 RGB 色彩分析模块的思路

本文自行设计了一个用于自动批量抓取颜色数据的脚本,具体的设计思路如下:先本研究利用 96 孔板作为装载待测溶液的容器。由于 96 孔板中每一个圆孔中心与相邻圆孔中心距离相同,在图像中圆孔中心与相邻圆孔中心的距离以像素来计算也是一定的。因此,通过 python 脚本程序读取特定中心点像素区域的 RGB 值,可获得待测液颜色数据。

首先设置两个字符集,分别命名为 Charset X 和 CharsetY。Charset X 用于记录酶标板短板的像素位置(8 列),CharsetY 用于记录酶标板长板的像素位置(12 行)。以每个中心点为基准, $\pm n$  个像素的 x 和 y 的区域为数据读取区域。

数据读取的顺序是先读中心点( $x_1, y_1$ )至( $x_1, y_{12}$ ),再按顺序读  $x_2$  的  $y_1$ - $y_{12}$ ,如此类推读至  $x_8$  的

$y_1$ - $y_{12}$ 。故每次最多能读取 96 组样品数据。

利用 skimage 数字图像处理包抓取每个数据区域平均的 RGB 数据值, 输出后进行分析。

利用 1.3.1 中的 python 脚本对扫描得到的图片进行分析, 通过运行该程序一次性读取所有样品的 RGB 颜色数据, 最后将所得的 RGB 颜色数据与待测溶液的浓度、吸光度进行整合、分析, 建立三者之间的内在联系, 同时探究出最适的样品取样量以及最适图片分辨率。

### 1.3.2 在线分析平台的建立

在线分析平台上, 由图 1 可知, RGB 模块的工作流程为: (1)客户端通过网络界面上需要读取的图片文件 (tiff 格式) 与 XY 轴坐标文件 (csv 格式), 随后提交计算请求。(2)服务器收到请求后通过 Thinkphp 框架调用 RGB 脚本进行计算, 最后通过 Linux 自带的压缩打包命令来实现输出文件的整理压缩。本分析平台已部署在互联网, 用户可登陆以下网址使用: <https://atomevo.com/>。

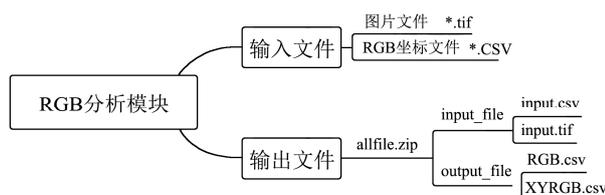


图 1 RGB 分析模块流程图

Fig.1 The flow-process diagram of RGB analysis module

### 1.3.3 DNS 试剂的制备

用电子天平精确称取 1 g 3,5-二硝基水杨酸于 100 mL 烧杯中, 加入 20 mL 1 mol/L NaOH 溶液和 50 mL 蒸馏水, 再加 30 g 酒石酸钾钠, 搅拌溶解, 冷却后加蒸馏水定容至 100 mL, 贮于棕色瓶中备用。

### 1.3.4 葡萄糖标准溶液的配制和稀释

将无水葡萄糖充分溶解于蒸馏水, 配制成 1 mg/mL 的葡萄糖标准溶液。随后各取 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 mL 于 10 个相同的比色管中, 编号 0~9 (葡萄糖含量分别为 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 mg), 向其中补充蒸馏水至 2 mL。

### 1.3.5 绘制葡萄糖标准曲线

向上述的每支比色管中均加入 1.5 mL DNS, 充分摇匀后在沸水浴中准确加热 5 min, 随后冷却至室温, 用蒸馏水定容至 10 mL, 加塞后颠倒混匀。依次取各葡萄糖浓度的待测溶液 200、150、100  $\mu$ L 于 96 孔板, 使用酶标仪在 520 nm 波长处测定其吸光度, 绘制标准曲线, 得到葡萄糖浓度与吸光度之间的关系。

### 1.3.6 数码成像

将上述装载好待测溶液的 96 孔板放置在扫描仪中, 分别在 150、300、600、1200 dpi 下进行扫描, 使样品成像。

### 1.3.7 探究不同扫描样品量以及不同图片分辨率对 RGB 颜色分析法检测效果的影响

利用 1.3.2 中在线分析平台上的 RGB 分析模块对上述扫描所得的 tiff 格式图片进行快速检测分析, 获取葡萄糖浓度、葡萄糖吸光度与 RGB 向量数据, 在不同条件下建立三者之间的内在联系, 探究不同扫描样品量以及不同图片分辨率对 RGB 颜色分析法检测效果的影响, 从而得到最适样品取样量和最适图片分辨率。

### 1.3.8 样品前处理

样品处理: 准确称取 0.5 g 苹果放置在研钵中, 充分研磨。随后转移至烧杯, 加入 100 mL 蒸馏水并混匀, 将待测样品溶液在 3000 r/min 条件下离心 5 min 之后, 上清液置于阴暗干燥处备用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Magical-RGB 计算平台的构建及使用说明

在 RGB 模块中, 首先需要准备输入文件, 包括图片 (\*\*\*.tiff) 与图片的坐标 (\*\*\*.csv), 选择文件之后点击上传到服务器, 之后点击执行计算等待输出的文件。任务完成之后可以在处理结果一栏对输出文件 (allFile.zip) 进行下载以获得输出的结果, 界面与结果可见图 2。

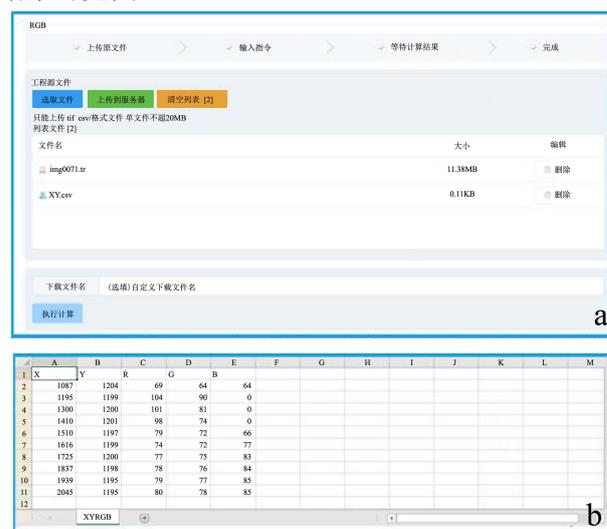


图 2 Magical-RGB 模块

Fig.2 The module between magical and RGB

### 2.2 利用在线分析平台进行葡萄糖的快速检测

由图 3 可知, 葡萄糖浓度与葡萄糖在波长为 520 nm 下吸光度值呈现出良好的线性关系。因此接下来需要验证在何种条件下, 其葡萄糖浓度或吸光度与 RGB 向量之间的关系也呈现良好的线性关系, 从而建立三者之间的内在联系, 尝试更加便捷, 高通量的检测方法。

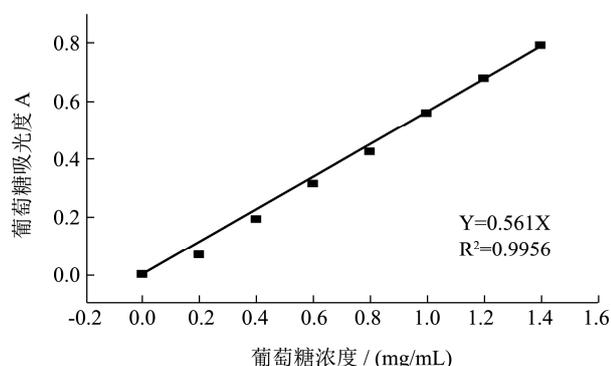


图 3 葡萄糖浓度-葡萄糖吸光度之间的关系

Fig.3 The relationship between glucose concentration and glucose absorbance

### 2.2.1 样品取样量对 RGB 颜色分析法检测效果的影响

在探究具体条件对 RGB 颜色数据的影响之前, 将装载待测样品的 96 孔板放置在扫描仪中, 通过改变不同扫描条件可得到类似如图 4 所示的图片, 随后用 Python 程序脚本对该图片进行读取和分析 RGB 颜色数据, 探究出最适的成像条件。

根据表 1 可知, 在葡萄糖浓度相同, 图片分辨率为 150 dpi, 而样品取样量不同的条件下, 葡萄糖浓度与 RGB 向量可以呈现良好的线性关系, 但拟合系数  $R^2$  因样品取样量的不同而有所差异, 结果表明, 当样品取样量为 100  $\mu\text{L}$  时, 所得曲线拟合系数最大, 达 0.9858。根据表 2 可知, 在上述相同的条件下, 葡萄糖吸光度与 RGB 向量也能呈现良好的线性关系。同样在 100  $\mu\text{L}$  条件下拟合系数最大, 达 0.9870。

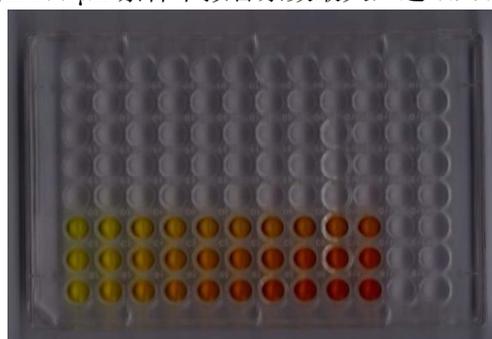


图 4 扫描样品图

Fig.4 Scanning sample map

### 2.2.2 最适图片分辨率对 RGB 颜色分析法检测效果的影响

在探究出最适样品取样量为 100  $\mu\text{L}$  后, 只改变扫描时的图片分辨率, 分析数据可得表 1。由此可知, 葡萄糖浓度与 RGB 向量仍然可呈现良好的线性关系, 且当图片分辨率为 1200 dpi 时, 所得曲线拟合系数最大, 达 0.9957。

表 1 葡萄糖浓度-RGB 向量之间的关系

Table 1 The relationship between Glucose concentration and RGB vectors

序号	图片分辨率/dpi	样品取样量/ $\mu\text{L}$	浓度范围/(mg/mL)	回归公式	$R^2$
1	150	100	0.0-1.6	$Y=56.777X$	0.9858
2	150	150	0.0-1.6	$Y=72.837x$	0.9857
3	150	200	0.0-1.6	$Y=81.127X$	0.9823
4	150	100	0.0-1.6	$Y=56.777X$	0.9858
5	300	100	0.0-1.6	$Y=54.533X$	0.9787
6	600	100	0.0-1.6	$Y=58.589X$	0.9799
7	1200	100	0.0-1.6	$Y=53.596X$	0.9957

表 2 葡萄糖吸光度-RGB 向量之间的关系

Table 2 The relationship between Glucose absorbance and RGB vectors

序号	图片分辨率/dpi	样品取样量/ $\mu\text{L}$	浓度范围/(mg/mL)	回归公式	$R^2$
1	150	100	0.0-0.8	$Y=102.46X$	0.9870
2	150	150	0.0-0.8	$Y=131.69x$	0.9768
3	150	200	0.0-0.8	$Y=146.45X$	0.9612
4	150	100	0.0-0.8	$Y=102.46X$	0.9870
5	300	100	0.0-0.8	$Y=98.67X$	0.9749
6	600	100	0.0-0.8	$Y=405.93X$	0.9709
7	1200	100	0.0-0.8	$Y=97.028X$	0.9953

表3 平行实验的变异系数

点	1	2	3	4	5	6	7
平均值	8.233	16.55	29.78	39.07	47.46	55.73	62.24
标准偏差	0.233	1.183	1.614	1.743	3.170	2.187	2.728
变异系数/%	2.832	7.146	5.421	4.461	6.680	3.925	4.383
MCV/%	4.843						

在上述条件不变情况下,分析葡萄糖吸光度与RGB 向量之间的关系,从表2中可以看出两者之间能呈线性关系,同样在1200 dpi时拟合系数最大,达0.9953。

通过以上两组实验数据的相互对比,可以得出在样品取样量为100 μL,图片分辨率为1200 dpi时,葡萄糖浓度、吸光度、RGB 向量三者之间均能呈现良好的线性关系。通常,图片分辨率越大,通过扫描仪扫描得到的图片清晰度更高,更能准确的反映待测样品溶液的颜色,因此所得到的RGB 颜色数据更加准确。

### 2.2.3 平行实验的探究

为了增强本研究方法的准确性和稳定性,在探究出最适成像条件后,同时进行了7组平行实验。将各测点RGB 向量分别取平均值,计算标准偏差及变异系数,按下式计算合并变异系数MCV%<sup>[8]</sup>。

$$MCV/\% = \frac{\sqrt{(n_1-1)(CV_1)^2 + (n_2-1)(CV_2)^2 + \dots + (n_j-1)(CV_j)^2}}{(n_1+n_2+n_3+\dots+n_j) - j}$$

式中: j 为测定点数, n 为测定次数。

$$\text{当 } n_1=n_2=n_3=\dots=n_j \text{ 时, } MCV/\% = \sqrt{\frac{(n-1)\sum(CV)^2}{j(n-1)}}$$

由此得出如表3所示的各测点相关数据。

### 2.2.4 RGB 色彩数据分析法与纸上荧光数码成像法的比较

对本文研究的RGB 色彩数据分析法与纸上荧光数码成像法<sup>[9]</sup>进行了比较,经过对比可知,纸上荧光数码成像法具有试剂消耗量少,成本低廉的特点。但RGB 色彩数据分析法检测所需的材料更少,RGB 色彩数据法只需要一张图片即可对其进行RGB 快速检测。因此在追求快速检测的测定中,RGB 色彩数据分析法更具有优势。

### 2.2.5 RGB 色彩数据分析法与紫外分光光度法在实际应用中的比较

苹果中还原糖的测定:分别吸取0.2 mL 样品待测液于两个10 mL 比色管中,用蒸馏水补齐至2 mL,随后各加入1.5 mL DNS,充分摇匀后在沸水浴中准确加热5 min,随后冷却至室温,用蒸馏水定容至10 mL,加塞后颠倒混匀。吸取待测溶液100 μL 于96

孔板,使用酶标仪在520 nm 波长处测定其吸光度。将上述装有待测样品的96孔板在1200 dpi条件下扫描得到tiff格式图片。利用在线分析平台分析得到葡萄糖浓度并与紫外分光光度法测得的葡萄糖浓度进行对比,如表4所示。

表4 RGB 分析方法与分光光度法测定苹果中还原糖含量的比较

RGB 分析方法		分光光度法	
样品浓度	0.3743 0.3780	样品浓度	0.3877 0.3762
平均值 A	0.3761	平均值 B	0.3820

样品误差:  $\frac{A-B}{A} \times 100\%$ , 故本次测量苹果中还

原糖含量,两种方法误差为1.6%。

## 3 结论

本文探讨了食品生物化学实验教学中还原糖分析的新方法,利用RGB 色彩空间原理,建立了一个基于RGB 色彩体系中的食品中还原糖的快速检测方法。该方法在RGB-PYTHON 检测方法中已经取得一定的成果,包括获得2020年广东省大学生生物化学实验技能大赛一等奖、2020年第五届全国大学生生命科学创新创业大赛创新组一等奖。本研究尝试了在不同检测的条件下,使用在线分析平台的RGB 分析模块分析葡萄糖浓度,吸光度和RGB 向量三者之间的关系。结果表明,葡萄糖浓度和RGB 向量呈现良好的线性相关,说明本研究用RGB 向量表征物质的浓度的设想是可行的。目前,该方法仍然有进一步改进的空间,比如通过机器学习方法降低数据区域选取时由于图像色泽不均匀带来的检测不确定性、通过设计更好的用户图形界面(GUI)增加该分析平台的易用性。相关技术还有进一步拓展的空间,可以通过显色反应或者分光光度法进行检测的物质比如蛋白质,也使用本方法和分析模块,从而开发出更多简便、灵敏的食品检测方法。

## 参考文献

- [1] 侯亚辉.基于朗伯-比尔定律的食品安全快速检测仪的设计与实现[D].北京:中国地质大学,2017  
HOU Ya-hui. Design and implementation of a fast food safety detector based on Lambert-beer law [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017
- [2] 李志霞,聂继云,闫震,等.响应面法对 3,5-二硝基水杨酸比色法测定水果中还原糖含量条件的优化[J].分析测试学报, 2016,35(10):1283-1288  
LI Zhi-xia, NIE Ji-yun, YAN Zhen, et al. Optimization of 3,5-dinitrosalicylic acid colorimetric method for determination of reducing sugar content in fruits by response surface methodology [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(10): 1283-1288
- [3] 周红霞,梁启超,苏柯,等.苯酚-硫酸法研究玫瑰花多糖含量[J].牡丹江医学院学报,2017,38(5):19-21  
ZHOU Hong-xia, LIANG Qi-chao, SU Ke, et al. Study on rose polysaccharide content by phenol-sulfuric acid method [J]. Journal of Mudanjiang Medical College, 2017, 38(5): 19-21
- [4] 刘国宏,于竞翔,任丽君.RGB检测方法研究进展[J].分析科学学报,2020,36(4):133-138  
LIU Guo-hong, YU Jing-xiang, REN Li-jun. Research Progress of RGB Detection Methods [J]. Journal of Analytical Science, 2020, 36(4): 133-138
- [5] 乐薇,刘乐.数码成像比色法测定牛乳中蛋白质的含量[J].食品科学,2016,37(4):154-157  
LE Wei, LIU Le. Digital imaging colorimetric method for determination of protein content in milk [J]. Food Science, 2016, 37(4): 154-157
- [6] 魏珏.简谈 CCD 原理[J].实用影音技术,2003,6:70-72  
WEI Jue. Briefly on the principle of CCD [J]. Practical Audiovisual Technology, 2003, 6: 70-72
- [7] 靳涛.基于 RGB 原理的地震多属性显示技术研究与应用[D].济南:山东大学,2010  
JIN Tao. Research and application of seismic multi-attribute display technology based on RGB principle [D]. Jinan: Shandong University, 2010
- [8] 刘东梅.用分光光度法绘制标准曲线时应注意的问题[J].甘肃环境研究与监测,1996,4:49-52  
LIU Dong-mei. Problems to be noticed when drawing standard curve by spectrophotometry [J]. Gansu Environmental Research and Monitoring, 1996, 4: 49-52
- [9] 乐薇,曹艳蓉,杨立.纸上荧光数码成像法快速测定花生壳中的木犀草素含量[J].现代食品科技,2020,36(8):340-346  
LE Wei, CAO Yan-rong, YANG Li. Rapid determination of luteolin in peanut shell by fluorescence digital imaging method on paper [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(8): 340-346

---

(上接第 343 页)

- [71] XIANG Yu, LU Yi. An invasive DNA approach toward a general method for portable quantification of metal ions using a personal glucose meter [J]. Chemical Communications, 2013, 49(6): 585-587
- [72] XIANG Yu, LU Yi. Using personal glucose meters and functional DNA sensors to quantify a variety of analytical targets [J]. Nature Chemistry, 2011, 3(9): 697-703
- [73] FU Li-bing, ZHUANG Jun-yang, LAI Wen-qiang, et al. Portable and quantitative monitoring of heavy metal ions using DNAzyme-capped mesoporous silica nanoparticles with a glucometer readout [J]. Journal of Materials Chemistry B, 2013, 1(44): 6123-6128
- [74] ZHANG Jin, TANG Ying, TENG Liu-mei, et al. Low-cost and highly efficient DNA biosensor for heavy metal ion using specific dnzyme-modified microplate and portable glucometer-based detection mode [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2015, 68: 232-238
- [75] CHEN Guan-hua, CHEN Wei-yu, YEN Yu-chun, et al. Detection of mercury (II) ions using colorimetric gold nanoparticles on paper-based analytical devices [J]. Analytical Chemistry, 2014, 86(14): 6843-6849
- [76] GAN Ying, LIANG Tao, HU Qiong-wen, et al. In-situ detection of cadmium with aptamer functionalized gold nanoparticles based on smartphone-based colorimetric system [J]. Talanta, 2020, 208: 120231
- [77] ZHANG Ling-ling, WONG Jessica X H, LI Xiao-chun, et al. Detection and quantitation of heavy metal ions on bona fide DVDs using DNA molecular beacon probes [J]. Analytical Chemistry, 2015, 87(10): 5062-5067