

智能手机光学检测技术用于检测水体中污染物的研究

金超 罗克菊 杨显双

(重庆市北碚区生态环境监测站, 重庆 400700)

摘要 数字图像比色法(Digital Image Colorimetry, DIC)作为一种传感器方法具有简易、灵敏、成本低廉的优点, 广泛应用于环境监测、化学及生物化学等领域。以 LED 面光源作为数字图像比色法的光源对六价铬水样进行了检测, 显色反应后的溶液通过手机免费软件获取 R(红)、G(绿)、B(蓝)颜色值。由于 RGB 模型为非均匀的颜色参数, 故把 R、G、B 值转化为不同的数学模型, 并比较各种数学模型所得出的标准曲线的线性相关性, 其中灰度吸光度模型的线性相关系数最高($R^2=0.999\ 2$)。检测方法的线性范围为 0.02~1.0 mg/L, 检出限为 0.006 mg/L, 加标回收率为 96.5%~107%, 方法具有简便快捷、灵敏度高, 适用于快速现场检测。

关键词 数字图像比色法; 智能手机; 定量检测; 六价铬

中图分类号: O657.32; TH744.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-1035(2020)01-0025-07

Research on the Use of Smartphone Optical Detection Technology to Detect Pollutants in Water

JIN Chao, LUO Keju, YANG Xianshuang

(Beibei District Ecological Environment Monitoring Station, Chongqing 400700, China)

Abstract As a sensor method, Digital Image Colorimetry (DIC) has the advantages of simplicity, sensitivity and low-cost, and it is widely used in environmental monitoring, chemical, biochemical and other fields. We used the LED surface light source as the light source of the digital picture colorimetric method to detect the hexavalent chromium of water sample, the solution after the color reaction obtained the R (red), G (green) and B (blue) color values through the free software of the mobile phone. Since the RGB model is a non-uniform color parameter, we convert the R, G, and B values into different mathematical models, and compare the linear correlations of the standard curves obtained by various mathematical models, where the linear correlation of the gray-scale absorbance model is the highest ($R^2=0.999\ 2$), and the correlation coefficient can be compared with the national standard method. The linear range of the detection method is 0.02—1.0 mg/L, the detection limit is 0.006 mg/L, and the spike recovery is 96.5%—107%. The method is simple, rapid and sensitive, and is suitable for rapid on-site detection.

Keywords Digital Image Colorimetry; smartphone; quantitative detection; hexavalent chromium

收稿日期: 2019-05-03 修回日期: 2019-11-15

基金项目: 重庆市北碚区科研计划项目(2018-22)

作者简介: 金超, 男, 工程师, 主要从事环境监测研究。E-mail: jinchao1619@163.com

本文引用格式: 金超, 罗克菊, 杨显双. 智能手机光学检测技术用于检测水体中污染物的研究[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(1): 25-31.

JIN Chao, LUO Keju, YANG Xianshuang. Research on the Use of Smartphone Optical Detection Technology to Detect Pollutants in Water[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020, 10(1): 25-31.

前言

铬是一种重金属元素,广泛存在于天然环境中,其化合物的价态主要有三价和六价,而六价铬的毒性约是三价铬的 100 倍^[1-2]。与三价铬相比,六价铬因其强氧化性、剧毒性、致癌性、非生物降解性而臭名昭著,对环境和人类健康构成严重威胁。一般来说,即使接触低浓度的六价铬也可能导致溶血,肾脏、肝功能衰竭甚至各种类型的癌症。随着皮革鞣制、电镀、冶炼、印染等行业不断发展,生产过程中产生了大量的含铬工业废水,直接损害到水产和人体的健康安全。因此,开发一种简易实用的检测水体中六价铬的方法具有重要意义。

目前,六价铬的检测方法主要包括硫酸亚铁铵滴定法^[3]、可见分光光度法^[4-5]、原子吸收光谱法(AAS)^[6-7]、离子色谱法(IC)^[8-9]、液相色谱法^[10]、电感耦合等离子体发射光谱法^[11]、电感耦合等离子体发射光谱-质谱联用法(ICP-MS)^[12]等。这些检测方法主要应用在实验室检测方面,其中二苯基碳酰二肼分光光度法具有操作简单、适用范围广等优点,该方法早在国家标准 GB7467—1987 中得到应用。

上述方法通常都依赖于精密仪器以及专业的操作,在现场以及缺乏专业设备的地区很难开展。而即时检测(point-of-care, POC)旨在提供快速实时检测,具有操作简单、成本低、耗时少的优点,该技术在食品安全检测、医疗诊断、环境监测等领域发挥着越来越重要的作用。数字图像比色法(Digital Image Colorimetry, DIC)是一种新式的比色分析方法,主要是通过使用数码设备(智能手机、数码相机、扫描仪等)对检测区拍照,然后对检测区的数字图像的颜色参数值进行分析,包括灰度(Gray)、RGB(红、绿、蓝)、CMYK(青色、洋红、黄色、黑色)、HSB(色调、色饱和度、亮度)、Lab(亮度、红绿、黄蓝),来确定样品浓度与颜色参数值的某种线性或者非线性定量关系,从而对待测样品进行定量检测^[13]。已有研究利用智能手机^[14-16]、数码相机^[17]、扫描仪^[18]、CCD 摄像头^[19]等设备进行物质浓度的检测,其中智能手机使用数量庞大并且具有强大的硬件和软件功能,能够快速对图像进行采集和分析,显著提高了检测系统的实用性与操作性^[20]。数字图像比色法通常 R(红)、G(绿)、B(蓝)三原色模式使用最多,而 R、G 和 B 三原色值会受到拍摄距离、拍摄角度和光源强度等多种分析条件的影响,因此要获得较高精密度的数据,一般需要在暗室中完成,除此之外,还需要

严控拍摄距离等拍摄条件,甚至还要用参比物质。RGB 模型为非均匀的颜色参数,R、G、B 值单独作为定量参数,其与样品浓度的线性关系不显著。因此,本文主要探讨在不变的拍摄条件下采用不同的数学模型对 RGB 三通道的颜色值进行处理,使得处理后的颜色信号值能够与样品浓度之间有良好的线性关系。

1 实验部分

1.1 实验原理

在酸性条件下,二苯基碳酰二肼作为显色剂能够与待测溶液中的六价铬反应生成紫红色络合物。生成的紫红色络合物可直接用于数字成像比色装置进行检测,图像采集装置如图 1 所示。该络合物在 540 nm 处出现最大吸收峰,可进行分光光度法测定。

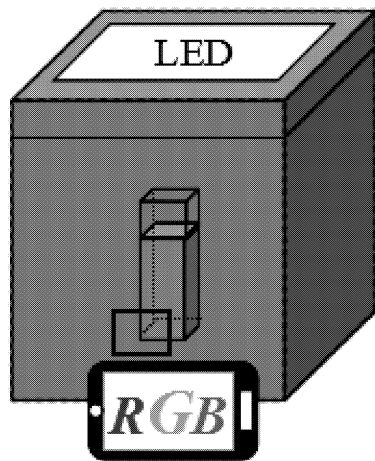


图 1 手机图像采集装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of acquisition device using Digital Image Colorimetry.

1.2 仪器和试剂

LED 面光源(斯丹德 X180LED 摄影灯,尺寸:14.5 cm×7.5 cm,12 W),华为 M5 手机,自制测试木箱(内部尺寸:19.5 cm×9.0 cm×11.0 cm,内贴 A4 白色纸,手机摄像头与比色皿距离为 12 cm,LED 面光源固定在木箱顶部),TU-1901 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)。拾色软件:Color Grab 软件(可以在手机软件商店中免费下载)。

六价铬标准储备溶液(500 mg/L,水利部水环境检测评价研究中心),二苯基碳酰二肼(DPCI)和丙酮为分析纯,浓磷酸和浓硫酸均为优级纯,实验用水为二次去离子水。

磷酸溶液:将浓磷酸与水等体积混合。

硫酸溶液:将浓硫酸缓慢加入等体积的水中,混匀。

二苯碳酰二肼溶液(2.0 g/L):称取 0.2 g 二苯碳酰二肼溶于 50 mL 丙酮中,加水稀释至 100 mL,摇匀,储存于棕色瓶,至冰箱中 4 ℃ 保存。

六价铬标准储备中间溶液(5.0 mg/L):吸取 5.0 mL 六价铬标准溶液置于 500 mL 容量瓶中,用水稀释至标线,混匀。

六价铬标准储备溶液:用移液管分别吸取 0、0.20、0.50、1.00、2.00、4.00、6.00、8.00 和 10.00 mL 六价铬标准中间溶液置于 9 个 50 mL 比色管中,用去离子水稀释定容,混匀,配制的标准溶液浓度分别为 0、0.02、0.05、0.10、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00 mg/L。

1.3 实验步骤

在装有 50 mL 的六价铬标准使用溶液或实际样品中加入 0.5 mL 硫酸溶液、0.5 mL 磷酸溶液,摇匀。再加入 2 mL 二苯碳酰二肼溶液,摇匀,5 min 后进行测定。将标准显色溶液和样品显色溶液倒入 1 cm 比色皿中,将其放在手机图像采集装置中或利用分光光度计进行检测。

手机图像采集:自制测试木箱中用手机应用软件 Color Grab 读取显色溶液 R、G、B 值 5 次,取其平均值。

2 结果与讨论

2.1 光源及其参数的确定

一般数字图像比色法使用的是 LED 灯珠作为光源,但是一旦 LED 灯珠的位置摆放不合适,就会引起检测区的图像有阴影,对测定会造成影响。因此,使用 LED 面光源(LED 摄影灯)作为图像采集的光源。LED 摄影灯尺寸足够大能够完全覆盖待测样品,并且该 LED 面光源射出的光线平行度很好,当其安装在样品上方时,手机采集到的图像没有发现阴影,避免了由于光源而引起的图像失真问题。

考察了不同色温(3 200~5 600 K)对标准空白溶液和显色样品溶液(六价铬浓度为 0.40 mg/L)的检测信号 R、G、B 值的影响,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,不管对于空白溶液还是显色样品溶液,它们的 R、G、B 值受到色温的影响比较大。当色温从 5 600 K 降到 4 000 K 时,光变为淡黄色,六价铬样品溶液颜色已经开始失真,此时空白溶液的 R、G、B 值和样品溶液的 R、B 值变化比较明显;当色温大于

5 000 K 时,两种溶液的 R、G、B 值变化波动相对较小。由于设备误差,在某个色温进行测量时,色温的大小会在这个色温值上下范围内轻微波动,为了获得稳定的 R、G、B 值,可以在色温为 5 000~5 600 K 进行测量。同时,当色温大于 5 000 K 时,色温逐渐变为冷色温,而冷色温设备产生热量小,并且功耗低,有助于保持环境温度,从而提高检测稳定性,因此可以选 5 600 K 的色温作为光源参数进行检测。

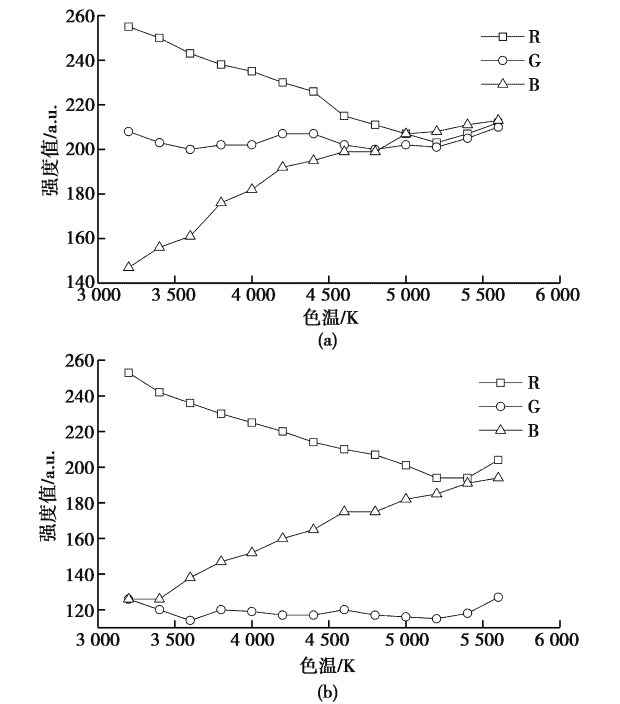


图 2 RGB 值和色温的关系曲线:(a)标准空白溶液;
(b)显色样品溶液(六价铬浓度为 0.40 mg/L)
Figure 2 Relationship curve between RGB value
and color temperature curve:
(a) standard blank solution; (b) color sample solution
(hexavalent chromium concentration of 0.40 mg/L).

2.2 RGB 颜色空间不同数学模型对定量测定的影响

在 RGB 颜色空间中,采用不同的数学模型来探讨 RGB 的颜色值与六价铬浓度之间的关系。主要以直接获得的 RGB 颜色参数值用公式将 RGB 值进行处理后的数值,建立与六价铬浓度定量关系,其线性范围、线性方程、线性相关系数、检出限等列于表 1 中。

$$\begin{aligned} A_R &= \log(I_{R0}/I_R) & (1) \\ A_B &= \log(I_{B0}/I_B) & (2) \\ A_G &= \log(I_{G0}/I_G) & (3) \\ A_{total} &= A_R + A_G + A_B & (4) \end{aligned}$$

$$Gray = 0.299I_R + 0.586I_G + 0.114I_B \tag{5}$$

$$A_{Gray} = \log(Gray_0/Gray) \tag{6}$$

$$\sqrt{(I_X - I_{X0})^2_{total}} = \sqrt{(I_R - I_{R0})^2 + (I_G - I_{G0})^2 + (I_B - I_{B0})^2} \tag{7}$$

$$I_{total} = I_R + I_G + I_B \tag{8}$$

$$S_R = I_R / (I_R + I_G + I_B) \tag{9}$$

$$S_G = I_G / (I_R + I_G + I_B) \tag{10}$$

$$S_B = I_B / (I_R + I_G + I_B) \tag{11}$$

其中 I_R 、 I_G 、 I_B 分别表示有色样品溶液 R、G、B 三个通道的色彩强度值由手机软件 Color Grab 直接读出; A_R 、 A_G 、 A_B 为有色样品溶液的 R、G、B 通道的吸光度值; $Gray$ 为有色样品溶液的灰度值; A_{Gray} 为有色样品溶液的灰度吸光度值; I_{R0} 、 I_{G0} 、 I_{B0} 为空白溶液的 R、G、B 值; A_{R0} 、 A_{G0} 、 A_{B0} 为空白溶液 R、G、B 通道的吸光度值; A_{Gray0} 为空白溶液的灰度吸光度值。

表 1 基于数字图像比色法的不同数学模型下的线性参数

Table 1 Linear parameters under different mathematical models based on Digital Image Colorimetry

实验参数	线性范围/(mg·L ⁻¹)	线性方程	线性相关系数(R ²)	检出限/(mg·L ⁻¹)
Abs(UV-Vis)	0.048~1.0	y = 0.698 1x + 0.004 1	0.999 7	0.012
I _R	0.004~1.0	y = -28.519x + 213.31	0.978 0	0.001
I _G	0.000 05~1.0	y = -183.07x + 208.15	0.988 9	0.000 02
I _B	0.003~1.0	y = -54.526x + 215.32	0.997 0	0.000 5
A _R	0.02~1.0	y = 0.062 1x + 0.002 3	0.978 5	-
A _G	0.006~1.0	y = 0.737 1x - 0.026 2	0.989 3	0.002
A _B	0.02~1.0	y = 0.125 5x + 0.000 3	0.995 0	-
A _{total}	0.007~1.0	y = 0.924 6x - 0.023 6	0.991 2	0.002
Gray	0.000 3~1.0	y = -120.56x + 208.64	0.991 6	0.000 1
A _{Gray}	0.02~1.0	y = 0.351 7x - 0.002 5	0.999 2	0.006
$\sqrt{(I_X - I_{X0})^2_{total}}$	0.005~1.0	y = 25.299x - 53.656	0.933 4	0.001
I _R + I _G + I _B	0.000 07~1.0	y = -266.12x + 636.78	0.994 7	0.000 02
I _R /(I _R + I _G + I _B)	0.223~1.0	y = 0.151 5x + 0.33	0.998 8	0.067
I _G /(I _R + I _G + I _B)	0.077~1.0	y = -0.239 3x + 0.334 6	0.999 0	0.023
I _B /(I _R + I _G + I _B)	0.02~1.0	y = 0.087 8x + 0.335 5	0.994 7	-

从表 1 得知 I_R 、 I_G 、 A_R 、 A_G 和 $\sqrt{(I_X - I_{X0})^2_{total}}$ 模型的线性相关系数均小于 0.99,表明这些模型的线性关系不够充分,不能用于定量分析。由于显色后的溶液为紫红色,其互补色为绿色,因此 I_G 颜色值相比 I_R 、 I_B 值变化最大(即斜率最大),但是 I_G 的线性关系不是很好,这是由于 RGB 颜色空间具有不均匀性^[21],溶液浓度发生变化,其单一通道(R、G、B)的颜色值不一定呈现对等的变化。实际上, $\sqrt{(I_X - I_{X0})^2_{total}}$ 模型为 RGB 颜色空间的色差公式,相较于均匀的颜色空间 CIE1976 L×a×b^[22],由于 RGB 颜色空间为不均匀的颜色空间, $\sqrt{(I_X - I_{X0})^2_{total}}$ 模型的线性关系也很差。因此需要对 R、G、B 值进行统一处理后的模型更能体现颜色值随浓度的变化情况。从表 1 中可以看出, $I_R + I_G + I_B$ 、 $I_R/(I_R + I_G + I_B)$ 、 $I_G/(I_R + I_G + I_B)$ 、 $I_B/(I_R + I_G + I_B)$ 、 $Gray$ 模型都比 I_R 、 I_G 线性关系要好。 $Gray$ 为有色溶液的灰度值, $Gray$ 模型只有一个变量,那就是亮度,可以直观地反应出颜色的亮度,从表 1 中看出灰度模型也有较好的线性关系。

另外,对 I_R 、 I_G 和 $Gray$ 值进行类似朗伯比尔定律的处理(即 $A = \log(I_0/I)$),其线性关系要优于未进行处理的模型,尤其是对灰度进行处理之后的灰度吸光度(A_{Gray}),其线性相关系数(R^2)甚至可以达到分光光度法的要求($R^2 \geq 0.999$),这可能是由于进行灰度吸光度处理后,减小了溶液中显色物质对光吸收引起图像灰度的轻微变化所导致的误差^[22-23]。因此可以使用 A_{Gray} 模型进行六价格的定量分析。

2.3 标准曲线和检出限

按照实验步骤绘制了灰度吸光度方法的标准曲线(图 3),其标准曲线方程为 $y = 0.351 7x - 0.002 5$ ($R^2 = 0.999 2$),同时按照国家标准 GB/T7467—1987方法绘制了分光光度法标准曲线,其标准曲线方程为 $y = 0.698 1x + 0.004 1$ ($R^2 = 0.999 7$)。由图 3 可知,本方法线性相关系数接近分光光度法,能够满足定量测定要求。利用图像采集装置对空白溶液进行 11 次重复实验,通过计算得到空白溶液浓度测定值的标准差(δ),按照检出限 $LOD = 3\delta/s$ (s 为标准曲线斜率),得到该方法的检

出限为 0.006 mg/L。图 4 中,将灰度吸光度方法和分光光度法作线性拟合,线性拟合系数达到 0.998,这证明了灰度吸光度方法的可靠性及准确性。同时为了进一步验证灰度吸光度方法标准曲线的准确性,又在第二天和第四天分别绘制了标准曲线,其标准曲线方程分别为 $y=0.361\ 4x-0.009\ 6$ 和 $y=0.352\ 8x-0.005\ 0$,计算出相对于第一天,第二天和第四天标准曲线斜率变化的相对误差分别为 2.8%和 0.3%,可以看出斜率变化比较小,表明第一天的标准曲线可以使用至少超过一天,从而不用每天都要进行标准曲线的绘制。

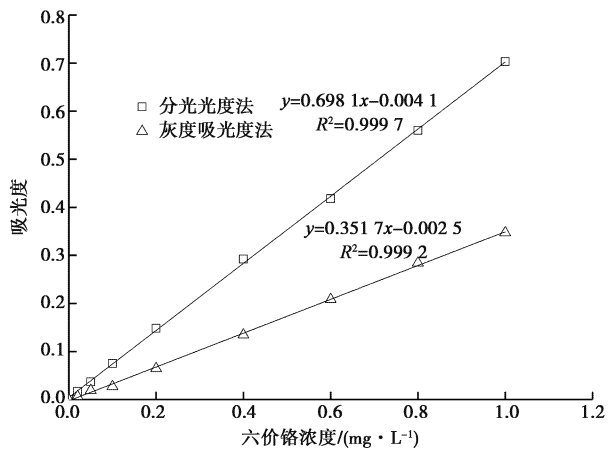


图 3 灰度吸光度法和分光光度法的标准曲线图
Figure 3 Standard curve of gray absorbance method and spectrophotometry.

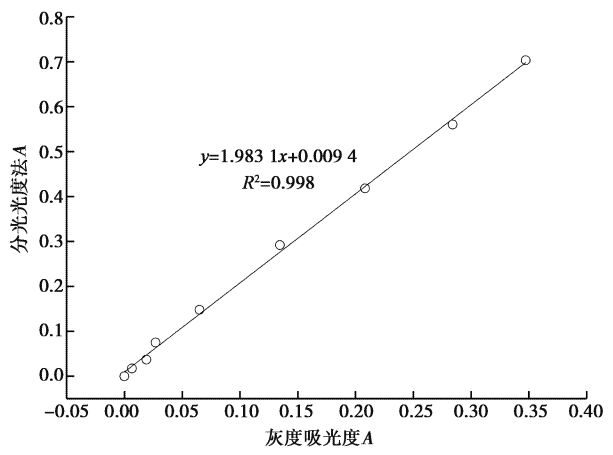


图 4 两种检测方法的拟合曲线
Figure 4 Fit curve of two detection methods.

2.4 精密度和准确度实验

用本方法对浓度为 0.40 mg/L 的六价铬标准样品进行平行测定 20 次,测定平均值为 0.392 mg/L,相对标准偏差为 2.5%,小于国家标准对水质检测的精密度 10%的要求,表明本方法的精密度良好。取含六价铬浓度不同的样品,用本方法和分光光度法对水样 1# 和 2# 进行检测并做加标回收实验,结果见表 2 和表 3。分光光度法和本方法测出的样品溶液中六价铬含量没有显著的差异,进一步从加标回收实验的结果看出,本方法对水样中六价铬检测的准确度高,具有较好的可行性。

表 2 数字图像比色法检测结果					
Table 2 Test results of gray absorbance method					
样品	样品体积/mL	测定值/(mg·L ⁻¹)	加标量/(mg·L ⁻¹)	加标测定值/(mg·L ⁻¹)	回收率/%
1#	50	0.169	0.20	0.362	96.5
2#	50	0.352	0.40	0.780	107

表 3 分光光度法检测结果					
Table 3 Test results of spectrophotometric					
样品	样品体积/mL	测定值/(mg·L ⁻¹)	加标量/(mg·L ⁻¹)	加标测定值/(mg·L ⁻¹)	回收率/%
1#	50	0.185	0.20	0.402	109
2#	50	0.355	0.40	0.768	103

3 结论

使用木箱搭建了数字图像比色法的简易图像采集装置,并以 LED 面光源(LED 摄影灯)作为图像采集的照明光源,很好地解决了以单个 LED 点光源进行图像采集使图像失真的问题。并比较了检测信号 R、G、B 颜色强度值转化为不同数学模型所得出的标准曲线的线性相关性,其中灰度吸光度模型得

出的标准曲线线性相关系数 $R^2=0.999\ 2$,可以比拟分光光度法线性相关系数。本方法和分光光度法的标准曲线具有较强的线性拟合关系。本方法精密度和准确度良好,测定结果与分光光度法没有显著差异,说明本方法具有较好的准确性和可行性。同时本方法能够在室外进行检测,操作简单,方便携带,在环境应急事故等需要快速精确地进行现场检测的场合有很广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 陈连明, 马放均, 李东明. 应用便携式快速水质检测仪测定废水中的六价铬[J]. 现代仪器, 2008, 14(6): 36-38.
CHEN Lianming, MA Fangjun, LI Dongming, et al. Determination of sexavalent chrome in the waste water by portable fast instrument for water quality[J]. Modern Instruments, 2008, 14(6): 36-38.
- [2] 徐国津, 樊颖果, 赵倩. 原子吸收光谱和原子发射光谱法测定工业废水中的总铬[J]. 中国. 无机分析化学, 2014, 4(2): 1-4.
XU Guojin, FAN Yingguo, ZHAO Qian. Determination of total chromium in industrial waste water by atomic absorption spectrometry and atomic emission spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2014, 4(2): 1-4.
- [3] 黄莺, 郭建. 硫酸亚铁铵滴定法测定总铬的改进[J]. 环境监测管理与技术, 2002, 14(3): 36.
HUANG Ying, GUO Jian. Improvement of determination of total chromium by ammonium ferrous sulfate titration[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2002, 14(3): 36.
- [4] 韩超, 孙国娟. 二苯碳酰二肼分光光度法测定 PCB 废水中六价铬[J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(4): 16-18.
HAN Chao, SUN Guojuan. Determination of hexavalent chromium in PCB waste water by 1, 5-diphenylcarbonyldrazide[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(4): 16-18.
- [5] 罗道成, 刘俊峰. 玫瑰桃红 R 褪色光度法测定电镀废水中的铬(VI)[J]. 工业水处理, 2008, 28(12): 80-82.
LUO Daocheng, LIU Junfeng. Determination of chromium(VI) in electroplating wastewater by bordeaux-R fading spectrophotometry [J]. Industrial Water Treatment, 2008, 28(12): 80-82.
- [6] 毛志瑛. 石墨炉原子吸收光谱法测定水生动物中的铬[J]. 中国无机分析化学, 2011, 1(2): 47-49.
MAO Zhiying. Determination of Cr in aquatic animals by graphite furnace atomic absorption spectrometry [J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2011, 1(2): 47-49.
- [7] 季蕴佳, 周勤, 方爱红, 等. 碱消解-火焰原子吸收分光光度法测定固体废物中的六价铬[J]. 环境监测管理与技术, 2012, 24(6): 57-59.
JI Yunjia, ZHOU Qin, FANG Aihong, et al. Determination of hexavalent chromium in the solid waste by alkaline digestion-flame atomic absorption spectrophotometry [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2012, 24(6): 57-59.
- [8] 胡忠阳, 汪琼, 叶明立, 等. 离子色谱法测定饮用水中的六价铬[J]. 中国无机分析化学, 2012, 2(增刊 1): 1-2.
HU Zhongyang, WANG Qiang, YE Mingli, et al. Determination of hexavalent chromium in drinking water by ion chromatography[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2012, 2(S1): 1-2.
- [9] 谢永洪, 王华清, 姚欢, 等. 离子色谱-柱后衍生可见光检测环境空气中六价铬和废气中铬酸雾[J]. 中国环境监测, 2013, 29(6): 128-133.
XIE Yonghong, WANG Huaqing, YAO Huan, et al. Determination of chromium (VI) in ambient air and chromium acid in exhaust by ion chromatography with postcolumn derivation spectrophotometric detection[J]. Environmental Monitoring in China, 2013, 29(6): 128-133.
- [10] 吕光, 马永民, 王敏荣, 等. 水中三价铬和六价铬的柱前衍生-液相色谱同时测定法[J]. 环境与健康杂志, 2014, 31(9): 799-801.
LYU Guang, MA Yongmin, WANG Minrong, et al. Simultaneous determination of Cr(III) and Cr(VI) in water with pre-column derivation-HPLC[J]. Journal of Environment and Health, 2014, 31(9): 799-801.
- [11] 王玉功, 刘婧晶, 余志峰. 电感耦合等离子体发射光谱法测定固体废物浸出液与消解液中六价铬[J]. 中国无机分析化学, 2019, 9(5): 1-4.
WANG Yugong, LIU Jingjing, YU Zhifeng. Determination of chromium Cr(VI) in solid waste leachate and digester by inductively coupled plasma emission spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2019, 9(5): 1-4.
- [12] 董薇. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定植物样品中的六价铬[J]. 广州化工, 2018, 46(17): 86-87.
DONG Wei. Determination of hexavalent chromium in biological samples by inductively coupled plasma mass spectrometry with microwave digestion[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(17): 86-87.
- [13] 李海琴, 张校亮, 谭慷, 等. 基于智能手机数字图像比色法的生化检测技术研究进展[J]. 生命科学仪器, 2019, 17(1): 3-10.
LI Haiqin, ZHANG Xiaoliang, TAN Kang, et al. Smartphone-based digital image colorimetric detection and quantitation[J]. Life Science Instruments, 2019, 17(1): 3-10.
- [14] 申贵隼, 魏婷, 赵婷. 手机数码比色法测定土壤中总磷含量[J]. 中国无机分析化学, 2014, 4(3): 26-30.
SHEN Guijun, WEI Ting, ZHAO Ting. A mobile digital colorimetric method for determination of total

- phosphorus in soil[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2014, 4(3): 26-30.
- [15] JOÃO A F, SQUISSATO A L, FERNANDES G M, et al. Iron (III) determination in bioethanol fuel using a smartphone-based device[J]. Microchemical Journal, 2019, 146: 1134-1139.
- [16] MARINHO O R. A greener, fast, and cost-effective smartphone image-based procedure for quantification of ethanol in distilled beverages[J]. Microchemical Journal, 2019, 147: 437-443.
- [17] MOHAMED A A, SHALABY A A. Digital imaging devices as sensors for iron determination[J]. Food Chemistry, 2019, 274: 360-367.
- [18] PENG B, CHEN G R, 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 Chemistry, 2017, 230: 667-672.
- [19] SANTOS NETO J H, PORTO I S A, SCHNEIDER M P, et al. Speciation analysis based on digital image colorimetry: Iron (II/III) in white wine[J]. Talanta, 2018, 194: 86-89.
- [20] 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 Bin, PENG Lin, LUO Jiquan, et al. Research on quantitative detection of protein using smart phone[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2018, 37(12): 1463-1468.
- [21] LUIS FERMÍN C V, NURIA L R, ANTONIO M O, et al. Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: A tutorial review[J]. Analytica Chimica Acta, 2015, 899: 23-56.
- [22] KOJI A, KOJI S, DANIEL C. Inkjet-printed microfluidic multianalyte chemical sensing paper[J]. Analytical Chemistry, 2008, 80(18): 6928-6934.
- [23] FILHO J P, DA SILVEIRA PETRUCI J F, CARDOSO A A. Development of a simple method for determination of NO₂ in air using digital scanner images[J]. Talanta, 2015, 140: 73-80.