

文章编号:1006-396X(2023)04-0013-07

投稿网址: <http://journal.lnpu.edu.cn>

基于抽提萃取-智能手机图片比色法的含油污泥 含油率测定

冯恩临, 吴 限, 邹尉婕, 李丽华

(辽宁石油化工大学 石油化工学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要: 对传统含油污泥含油率测定方法进行改进, 将图片比色法与热溶剂抽提的前处理方法相结合, 建立了抽提萃取-智能手机图片比色法, 并考察了 RGB 颜色通道、曝光时间、感光度、白平衡值等参数对含油率测定结果的影响。以碘钨灯为光源, 使用三星 A8s 手机前置摄像头拍摄, 确定了最佳测试条件: 曝光时间为 1/2 000 s, 感光度为 100, 白平衡值为 2 800 K。在最佳测试条件下该方法的线性相关系数大于 0.99, 线性范围与分光光度法相近, 检出限为 0.06%, 测定下限为 0.24%。8 组平行标准样品测试的加标回收率为 96%~103%, 相对标准偏差为 2.26%, 说明该方法准确度相对较高。该方法比传统含油污泥含油率测定方法更加简单快速, 准确度满足常规含油率测定需求, 有望实现工厂大规模含油污泥含油率的现场快速测定。

关键词: 含油污泥; 图片比色法; 数字图像; 定量测定

中图分类号: TQ09 **文献标志码:** A **doi:**10.12422/j.issn.1006-396X.2023.04.002

Determination of Oil Content in Oily Sludge Based on Extraction and Smartphone Image Colorimetry

Feng Enlin, Wu Xian, Zou Weijie, Li Lihua

(School of Petrochemical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China)

Abstract: The traditional method for determining the oil content of oily sludge was improved, and the extraction smartphone image colorimetry was established by combining the image colorimetry with the pretreatment method of hot solvent extraction. The effects of RGB value, different color channels, shutter time, sensitivity, white balance and other parameters on the determination of oil content were investigated. Under the premise that the light source was tungsten iodide lamp and the front camera of Samsung A8s mobile phone was used, the best test conditions were finally determined: white balance value was 2 800 K, sensitivity value was 100, shutter time was 1 / 2 000 s. The linear correlation coefficients of the method under the optimal test conditions were more than 0.99 under the optimal test conditions, and the linear range was similar to that of the spectrophotometric method, with the detection limit of 0.06% and the lower limit of 0.24%. The recoveries of 8 groups of parallel standard samples were 96%~103%, and the relative standard deviation was 2.26%, which indicated that the accuracy of this method was relatively high. Compared with the traditional method, this method is more simple and rapid, and its accuracy can meet the needs of conventional oil content measurement, which is expected to realise the rapid on-site determination of oil content of large-scale oil-containing sludge in plants.

Keywords: Oily sludge; Picture colorimetry; Digital image; Quantitative determination

含油污泥(Oily sludge)是指在原油开采或石油炼制、运输、储存、加工时,因多种原因导致原油及其产品泄漏至地面或水体中,进而沉积到海、河、湖

底部,最终形成油、水、泥土甚至掺杂其他污染物的混合物。在 20 世纪 80 年代前,我国没有相应的排放标准,大部分石化企业处理含油污泥的方法为就

收稿日期:2022-03-20 修回日期:2023-05-06

基金项目:辽宁省教育厅资助项目(2018CY015);辽宁省地方(盘锦)创新项目(2018010398)。

作者简介:冯恩临(1996-),男,硕士研究生,从事石油类污染物分析测试方面的研究;E-mail:915547021@qq.com。

通信联系人:李丽华(1964-),女,博士,教授,从事新型分析测试技术方面的研发;E-mail:llh72@163.com。

地填埋、焚烧等,因此造成了一系列环境污染问题。2001 年我国制定了一系列标准^[1-3],将含油污泥归类为一种危险固体废弃物,但这些标准没有将排放时允许的最高含油率(石油烃质量浓度)明确量化,仅在 GB 4284—1984《农用污泥中污染物控制标准》^[4]中规定农用污泥的矿物油质量浓度不得超过 3 000 mg/kg。为尽可能回收含油污泥中的石油资源,越来越多的科研人员对含油污泥的处理、清洗、回收进行了研究。

目前,我国含油污泥处理标准体系还不健全,且标准中提及的检测方法较为简略,难以对含油污泥的清洗程度进行检定^[5]。依据含油污泥的组成成分状态,一般在处理和分析时常将含油污泥分为水相、固相及油相。因组成复杂、黏度大等原因,油相中含油率比水相和固相更难以准确测定。现有含油污泥含油率测定方法主要分为两大类:分别测定含油污泥的水、固两相含油率后计算油相含油率的间接测定法和直接将油相与水相、固相分离出来,再对其进行含油率测定的直接测定法。测定含油率的方法主要有灼烧法^[6]、抽提重量法^[7]、热解法、气相色谱法等。这些方法大多用时过长、成本较高,不适用于现场快速测定,但适用于测定含油率在 20%~40% 的未经清洗处理的含油污泥,当应用于清洗处理后的含油率不超过 10% 的含油污泥时,往往出现检测值低于检出限的问题。另外,含油污泥中水的质量浓度难以准确测定,影响含油率测定的准确度。分光光度法作为一种直接测定含油率的方法,一定程度上可避免水质量浓度测定精度低的问题。但是,在现场测定含油率时,分光光度计这一精密光学仪器很难直接应用。

图片比色法作为近年来的一种新型测定方法,解决了现场测定中难以应用精密仪器的问题。智能手机在国内已基本普及,在一定程度上降低了应用图片比色法测定的技术门槛,为现场测定提供了可能。目前,图片比色法因其快速、低成本的特点已广泛应用于金属/重金属^[8-10]、除草剂^[11-12]、农药^[13-14]、抗生素^[15-17]、生化指标^[18-19]、天然化合物和细菌/病毒的截断、半定量和定量分析。但是,该方法在石油类物质及其衍生物的测定方面仍鲜有报道。王嘉辉等^[20]将图片比色法应用于溶解有机溶剂的石油类物质质量浓度的测定,采用 RGB 数值衍生的欧氏距离数学模型来计算石油类物质的质量浓度。该方法准确度高,成本低,操作方便,容易维护。常用的基础灰度化方法有 RGB 三通道平均法、最大通道分量法、加权结合或单通道选取法以及以亮度信

息为提取目标的 CIEL 通道法。陈红等^[21]基于泥沙颗粒图像 RGB 分布特征,以直方图峰值灰度作为阈值进行图像分割,用于测定泥沙颗粒粒径;张云丽等^[22]采用图像灰度化对玉米籽粒尖端的深度图像进行处理,对玉米品种进行了比较。目前,最广泛应用的色彩信息模型为 RGB 模型,其应用方式是对其中一个颜色通道的灰度值或多个颜色通道的复合灰度值与待测值建立线性关系。本文的主要研究目的是检验企业处理后的含油污泥是否达到国家标准和地方标准,因此将尝试寻找 R、G、B 单颜色通道的灰度值及 RGB 平均通道的灰度值与油溶液质量浓度在低浓度区间呈线性关系的颜色通道,重点研究工厂处理含油污泥实际样品的现场快速测定方法。

首先采用有机溶剂热抽提的方法将石油烃从含油污泥中分离,再采用图片比色法对石油烃物质的质量浓度进行测定,最终找到一种适合含油污泥含油率测定的方法,并结合试样在图片中的灰度值对样品含油率进行准确的测定。测定对象主要为清洗处理后含油率较低的含油污泥。与传统含油率测定方法相比,本方法测定效率高,测定技术门槛和成本低,同时可降低测定时产生的污染,为含油污泥在现场快速、绿色测定提供了可能。

1 实验部分

1.1 仪器与试剂

AUY220 型电子天平,日本岛津公司;DF-101S 型集热式恒温加热磁力搅拌器,巩义市于华仪器有限公司;766-3 型远红外辐射干燥箱,上海阳光实验仪器有限公司;三星 A8s 智能手机(CMOS 图像传感器),天津三星手机有限公司;300 W 碘钨灯(色温 2 800 K),东海县驼峰巨龙灯具厂;UVmini-1240 型紫外可见分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司。

石油醚(60~90 °C 馏分),分析纯,天津市大茂化学试剂厂;盐酸(质量分数 36%),化学纯,哈尔滨市化工化学试剂厂;无水氯化钙、无水硫酸钠,化学纯,天津市大茂化学试剂厂。

1.2 实验步骤

1.2.1 抽提重量法 将 20.0~50.0 g 含油污泥置于 50 °C 水浴中,在加热条件下搅拌 10.0 min;取搅拌后的含油污泥样品 1.0 g,用滤纸将其包裹后放入抽提试管底部;将抽提试管放入平底蒸馏烧瓶中,向平底蒸馏烧瓶中加入 100 mL 石油醚,加热抽提 4.0 h;当抽提试管内溶剂的颜色为无色透明时停止加热,否则适当延长抽提时间;待溶剂冷却至室温后将包裹样品的滤纸取出,将溶剂置于 80 °C 烘箱中干

燥1.0 h,将滤纸放入干燥器中,待恒重后称取质量;将抽提试管中剩余的抽提液与蒸馏烧瓶中的抽提液混合后装瓶待用。

1.2.2 抽提分光光度法 将30.0~50.0 g含油污泥置于分液漏斗中,加入一定量的石油醚和5 mL盐酸(质量分数18%),在酸性条件下油品提取液经过无水氯化钙或无水硫酸钠(500℃煅烧1.0 h)脱水后过滤至烧瓶,在90℃水浴条件下加热烧瓶至恒重,即得标准油样。

称取0.5 g标准油样,用石油醚将其溶解于500 mL容量瓶中并稀释定容至容量瓶刻度线,此溶液油质量浓度为1 g/L;用移液管分别吸取0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00、3.50、4.00、4.50 mL标准油样,并置于9个50 mL容量瓶中,用石油醚稀释定容至容量瓶刻度线并摇匀,得到质量浓度分别为0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90 g/L的标准油溶液。以石油醚为空白,在分光光度计上对其进行测量,测量波长为410 nm,根据测得的光度值和对应的标准油质量浓度绘制标准曲线。

量取1.2.1中一定体积的混合抽提液,使用分光光度计测定其在410 nm处的吸光度,并结合标准曲线计算抽提液的油质量浓度和含油污泥样品中的油质量浓度,最后通过计算得到样品的含油率。

1.2.3 抽提萃取-智能手机图片比色法 按1.2.2中方法配制质量浓度分别为0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90 g/L的标准油的石油醚溶液,分别放入容量为10 mL的有盖透明圆柱形玻璃瓶($\phi 22\text{ mm} \times 50\text{ mm}$)中,将玻璃瓶按顺序排列并将待测液置于其中。创造黑暗环境并架设碘钨灯补充照明,使光源距离样品30 cm,用A4打印纸作为背景,使用智能手机同时对标准油样和待测液进行拍摄。使用MATLAB软件编制的程序读取照片中每个玻璃瓶中央的一个矩阵部分像素,得出其R、G、B通道的单通道灰度值,根据测得的灰度值和对应的标准油质量浓度绘制标准曲线。

将1.2.1中混合抽提液静置0.5 h后灌装至容量为10 mL的有盖透明圆柱形玻璃瓶($\phi 22 \times 50\text{ mm}$)中,在相同的光源、距离及背景条件下,使用智能手机对混合抽提液进行拍摄,使用MATLAB软件编制的程序读取照片中玻璃瓶中央的一个矩阵部分像素,得出其R、G、B通道的单通道灰度值,由标准曲线计算得到含油污泥样品中的含油率,计算公式见式(1)。

$$O=c \times 0.1 \times 100\% = m/M \times 100\% \quad (1)$$

式中, O 为样品含油率,%; c 为溶液中油质量浓度,

g/L; m 为含油污泥样品中油的质量,g; M 为含油污泥样品的总质量,g。

2 结果与讨论

2.1 拍摄条件考察

2.1.1 颜色通道对应灰度值与含油率的关系 以300 W碘钨灯为光源,在光圈为1.7、曝光时间为1/2 000 s、感光度为100、白平衡值为2 800 K的条件下,测定了含油率为1.00%~9.00%的标准样品的各颜色通道灰度值,得到各颜色通道灰度值与样品含油率的关系,结果如图1所示。

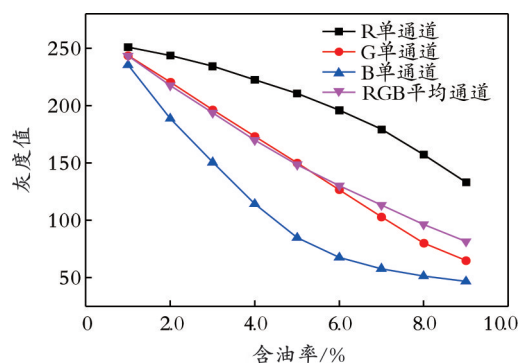


图1 颜色通道灰度值与样品含油率的关系

Fig.1 Relationship between gray value of color channel and oil content

由图1可知,当样品含油率在1.00%~4.00%时,R通道灰度值与样品含油率的关系呈线性;当样品含油率在1.00%~7.00%时,G通道灰度值与样品含油率的关系呈线性;当样品含油率在7.00%~9.00%时,B通道灰度值与样品含油率的关系呈线性且灵敏度较高,RGB平均通道灰度值与样品含油率的关系也呈线性,但略逊于G通道灰度值的线性,且灵敏度略低于G通道灰度值的灵敏度。G通道灰度值与样品含油率在实验范围内线性较好,因此可以通过测定G通道灰度值得到处理后含油污泥的含油率。

2.1.2 曝光时间的选择 曝光时间是指快门从开启到关闭的时间。通常情况下,快门维持开启状态的时间越长,图像传感器接收到的光量越多,画面越明亮,但同时因被拍摄物体运动或拍摄者本身振动所产生的图像虚化现象也更明显;反之,快门维持开启时间越短,图像传感器接收到的光量就减少,画面更暗,但同时图像虚化现象不明显。本实验所用光源为300 W碘钨灯,亮度高达30 000 Lux,因此选择较短的曝光时间(1/4 000、1/2 000、1/1 000 s)进行考察。以300 W碘钨灯为光源,在光圈为1.7、感光度为100、白平衡值为2 800 K的条件下,测定了含油率为1.00%~9.00%的标准样品

的各单颜色通道灰度值,结果如图 2 所示。

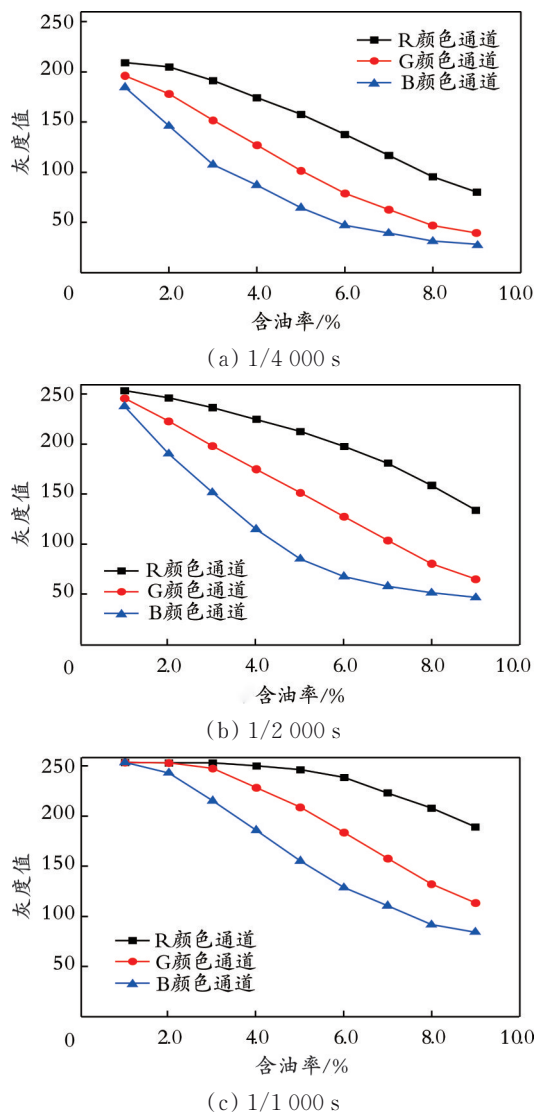


图 2 曝光时间为 1/4 000、1/2 000、1/1 000 s 时 R、G、B 通道灰度值与含油率的关系

Fig.2 Relationship between R, G, B channel gray value and oil content when shutter time is 1/4 000, 1/2 000 and 1/1 000 s

由图 2 可知,当样品含油率相同时,各单颜色通道的灰度值随着曝光时间的增大而增大;当曝光时间为 1/1 000 s 时,样品含油率较低时灰度值接近极限值 256,灵敏度大大降低;当曝光时间为 1/4 000 s 时,因进光量较低而导致整体灵敏度较低,曲线弯曲程度较曝光时间为 1/2 000 s 时大。因此,确定较适合测定处理后含油污泥含油率的曝光时间为 1/2 000 s。

2.1.3 感光度的选择 感光度是相机感光元件对光线的感应能力,在环境光线较暗的情况下感光度增大时照片会更加清晰、明亮,但过大的感光度会使感知的信号被放大,导致信号失真,从而在照片上形成细小的杂色块,最终形成“噪点”,因此感光度也是影响测定准确性的重要因素。为探究感

光度的选择对样品含油率测定的影响,以 300 W 碘钨灯为光源,在光圈为 1.7、白平衡值为 2 800 K、曝光时间为 1/2 000 s 的条件下,测定了感光度为 50、100、200,含油率为 1.00%~9.00% 时标准样品的各单颜色通道灰度值,结果如图 3 所示。

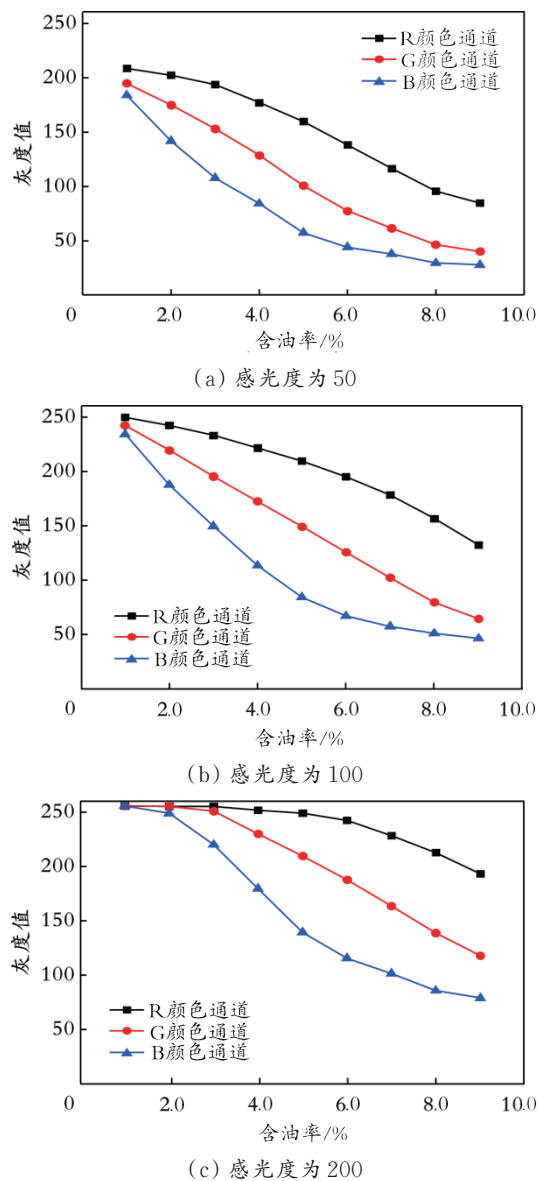


图 3 感光度为 50、100、200 时 R、G、B 通道灰度值与含油率的关系

Fig.3 Relationship between R, G, B channel gray value and oil content of samples with sensitivity of 50, 100 and 200

由图 3 可知,当感光度为 50 时,由于感光能力弱,导致被捕捉到的光线较少,因此整体灵敏度较差;当感光度为 200、样品含油率较低时,由于过度曝光导致灵敏度严重下降。通过对取色区域内所有像素的 R、G、B 值偏差计算得,当感光度为 50、100、200 时,取样矩阵内的偏差分别为 5.25、5.70、7.96,说明随着感光度增大,照片受“噪点”影响较为严重,各像素点的 R、G、B 值偏差较大,影响灰度值

测定准确度。因此,本实验选择感光度100作为最佳感光度。

2.1.4 白平衡值的选择 白平衡值是用于在拍摄时调整色彩以适应光源色彩的一个参数。不同光源发出的光线具有不同的色温,这些不同色温的光线通过光传感器再现,导致拍摄的照片色彩不真实,因此需要用白平衡值将照片中物体颜色还原为物体的真实颜色。这个过程实际上就是将不同R、G、B比例的光线通过一个参数的调整来弥补缺失的R、G、B通道灰度值,使其达到R、G、B三色光等比平衡的状态。以300 W碘钨灯为光源,在光圈为1.7、曝光时间为1/2 000 s、感光度为100的条件下,

分别在白平衡值为2 800、4 000、5 000、6 500 K时测定了含油率为1.00%~9.00%的标准样品的各单颜色通道灰度值,结果如图4所示。由图4可知,白平衡值对R与B通道灰度值影响较大;随着白平衡值增大,R通道灰度值均增大,当样品的含油率较低时,R通道灰度值基本保持不变,灵敏度较低,因此不适合定量测定;随着白平衡值增大,B通道灰度值均减小,当样品的含油率较高时,B通道灰度值基本保持不变,同时也因灵敏度较低不适合定量测定;G通道灰度值受白平衡值影响不大,且在含油率为2.00%~6.00%时线性良好。因此,本实验选择较佳的白平衡值为2 800 K。

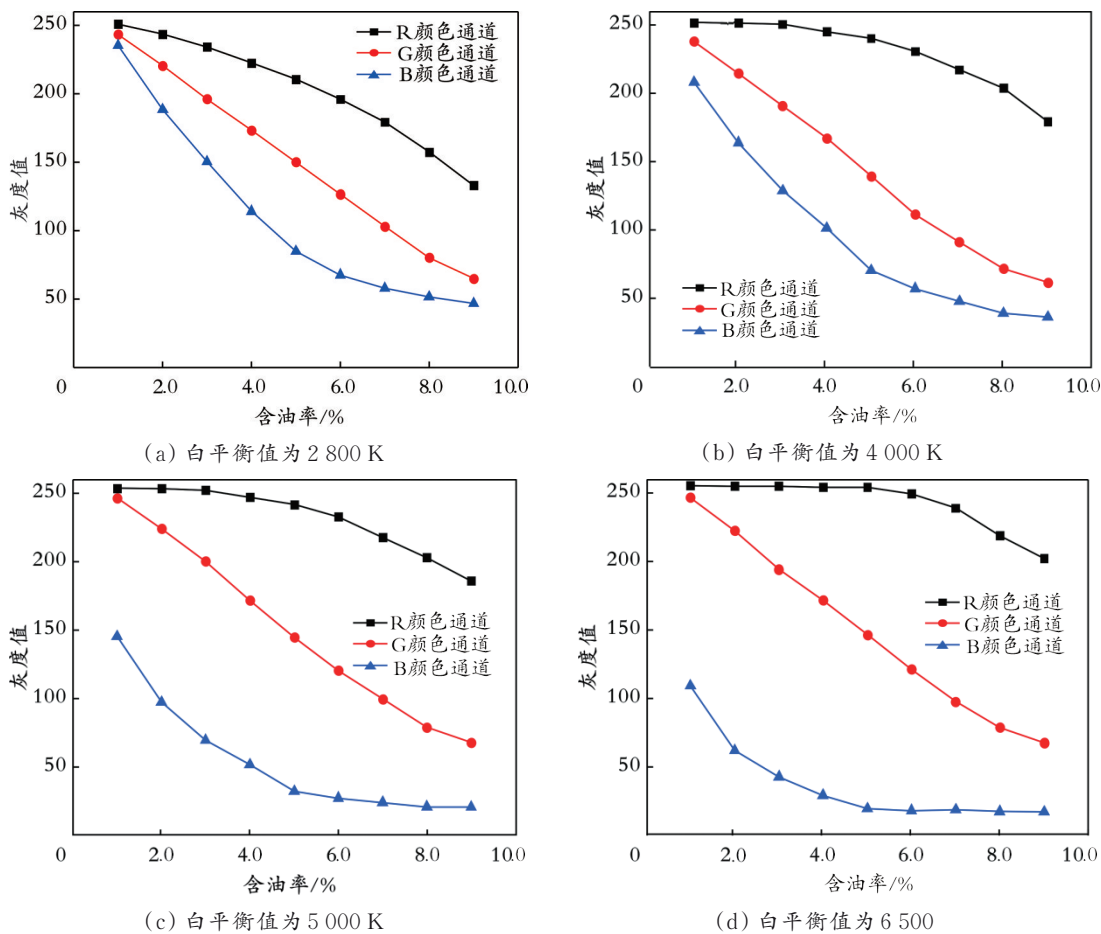


图4 白平衡值为2 800、4 000、5 000、6 500 K时R、G、B通道灰度值与含油率的关系

Fig.4 Relationship between gray value and oil content of R, G, B channel under 2 800, 4 000, 5 000 and 6 500 K white balance values

2.2 标准曲线及检出限

取石油醚萃取后的含油污泥中泥土与含油污泥中提取出的油,配置含油率分别为0、1.00%、2.00%、3.00%、4.00%、5.00%、6.00%、7.00%的含油污泥的标准样品各1.0 g,使用100 mL石油醚萃取,得到标准样品的油溶液,以石油醚为参比,在波长为410 nm处使用分光光度计测定吸光度,得到分光光度法标准曲线。在最优条件下(光源为300 W

碘钨灯,光圈为1.7,曝光时间为1/2 000 s,感光度为100,白平衡值为2 800 K),测定上述标准样品萃取后油溶液的图片比色法标准曲线。以石油醚作为空白样本,进行21次空白实验,按式(2)计算检出限(MDL)。

$$MDL = t(N-1, 0.99) \times S \quad (2)$$

式中, N 为样本平行测试次数, $N=21$; t 为自由度取 $N-1$ 、置信度取99%时的分布系数,其值为2.528;

S 为 N 次平行测试的标准偏差。经计算得检出限为 0.06%, 测定下限为 0.24%。

2.3 回收实验

从含油率约为 2.00% 且含油率均匀的样品中取 8 组 2.0 g 的含油污泥样品, 将每组样品均分为 2 份, 其中一份样品加入 16.25 mL 质量浓度为 4 g/L 的标准油石油醚溶液, 搅拌均匀后室温挥发至恒重, 另一份不做处理。使用图片比色法对预处理后的样品回收率进行平行测定, 结果如表 1 所示。

表 1 含油样品的回收率实验结果

Table 1 Experimental data of recovery rate of oil samples

样品 编号	G 通道灰度值		含油率/%		加标回 收率/%
	加标前	加标后	加标前	加标后	
1	217.34	73.17	1.63	7.85	103
2	214.89	77.51	1.73	7.66	98
3	215.15	79.51	1.72	7.58	97
4	215.75	81.34	1.70	7.50	96
5	214.89	75.68	1.73	7.74	99
6	215.43	74.94	1.71	7.77	100
7	216.43	74.99	1.67	7.85	101
8	216.53	75.40	1.66	7.75	101

由表 1 可知, 8 组实验的加标回收率(加标回收率 = (加标后测定值 - 加标前测定值) ÷ 加标量 × 100%) 为 96%~103%。由加标前后样品的 8 组数据计算可得, 8 次平行测定的加标回收率相对标准偏差为 2.26%, 说明本方法准确度较高。

2.4 不同方法测试实际样品含油率结果对比

为对比抽提萃取-智能手机图片比色法与其他方法的准确度, 采用抽提重量法、抽提萃取-智能手机图片比色法和抽提分光光度法同时测定了 10 份不同的实际处理后含油污泥样品, 测定结果见表 2。由表 2 可知, 抽提分光光度法和抽提萃取-智能手机图片比色法测定的含油率数据较为接近, 这是由于二者的测定原理相似, 皆为光学领域范畴, 并且二者在萃取、稀释时容易产生误差; 抽提重量法测定的含油率比抽提分光光度法和抽提萃取-智能手机图片比色法高, 且数据波动较大, 这可能是由于抽提重量法主要适用于较高含油率的未处理含油污

泥样品的含油率测定, 而处理后的含油污泥样品含油率较低, 接近抽提重量法检测下限, 因此测定结果波动较大。相对于抽提重量法, 抽提萃取-智能手机图片比色法测定时数据波动较小, 测试结果更接近抽提分光光度法的测定值, 在测定低含油率样品时更具有优势, 且所需设备比抽提分光光度法更为简单, 不需要使用分光光度计、高精度天平等昂贵仪器, 也不需要提供干燥、恒温、稳定的环境, 因此更适合现场实时监测, 在自动化生产中更具有实际意义。

表 2 不同方法测试实际样品含油率结果对比

Table 2 Comparison of oil content results of actual samples tested by different methods

样品 编号	含油率/%		
	抽提重量法	抽提分光 光度法	抽提萃取-智能 手机图片比色法
1	9.17	3.56	3.23
2	8.72	2.33	3.65
3	9.34	3.03	3.62
4	7.34	2.13	2.40
5	6.73	2.51	2.55
6	6.51	2.56	2.41
7	5.35	1.19	1.29
8	5.32	1.64	1.42
9	4.10	1.84	1.53
10	3.20	1.79	0.41

3 结 论

在传统含油污泥含油率测定方法的基础上进行了改进, 设计了一套适用于工厂处理后含油污泥含油率快速测定的方法。该方法针对 RGB 颜色体系中的 G 通道灰度值与样品含油率建立了关系。以 300 W 碘钨灯为光源, 在取样量为 1.0 g、溶剂用量为 100 mL、曝光时间为 1/2 000 s、感光度为 100、白平衡值为 2 800 K 时, 灰度值与含油率关系曲线线性良好。该方法用时短、测定准确, 且具有较高的相关性; 同时, 对测定环境及设备要求较低, 具有较高的性价比, 具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 国家环境保护总局. GB 18598—2001 危险废物填埋污染控制标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2001.
- [2] 国家环境保护总局. GB 18484—2001 危险废物焚烧污染控制标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2001.
- [3] 国家环境保护总局. GB 18597—2001 危险废物贮存污染控制标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2001.
- [4] 中华人民共和国城乡建设环境保护部. GB 4284—1984 农用污泥中污染物控制标准[S]. 北京: 国家市场监督管理总局, 1984.

- [5] 薛广海,李强,刘庆,等.当前国内外含油污泥处理标准及石油烃检测方法的深度剖析和对比[J].石油化工应用,2019,38(1):1-6.
Xue G H, Li Q, Liu Q, et al. In-depth analysis and comparison on the standards and testing methods for oil contaminated soil of domestic and international[J]. Petrochemical Applications, 2019, 38(1):1-6.
- [6] 张雷,梁玉艳,王志勇,等.油田含油污泥物性分析[J].环境科学与管理,2011,36(12):124-127.
Zhang L, Liang Y Y, Wang Z Y, et al. Properties of oily sludge in oilfield[J]. Environmental Science and Management, 2011, 36 (12): 124-127.
- [7] 中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司.Q/SY LH 0533—2016 油田油泥含油、含水、及杂质测定方法[S]. 盘锦:中国石油天然气股份有限公司辽河油田分公司,2016.
- [8] Kaoutit H E, Estévez P, García F C, et al. Sub-ppm quantification of Hg(II) in aqueous media using both the naked eye and digital information from pictures of a colorimetric sensory polymer membrane taken with the digital camera of a conventional mobile phone[J]. Analytical Methods, 2012, 5(1):54-58.
- [9] Firdaus M L, Aprian A, Meileza N, et al. Smartphone coupled with a paper-based colorimetric device for sensitive and portable mercury ion sensing[J].Chemosensors,2019,7(2):3-5.
- [10] Wongthanyakram J, Masawat P. Rapid low-cost determination of lead(II) in cassava by an ipod-based digital imaging colorimeter[J]. Analytical Letters, 2019,52(3):550-561.
- [11] Pohanka M, Zakova J, Sedlacek I. Digital camera-based lipase biosensor for the determination of paraoxon[J]. Sensors and Actuators, 2018, 273(11):610-615.
- [12] Wang Y, Zeinhom M, Yang M, et al. A 3D-printed, portable, optical-sensing platform for smartphones capable of detecting the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid[J]. Analytical Chemistry, 2017, 89(17): 9339-9346.
- [13] Sicard C, Glen C, Aubie B, et al. Tools for water quality monitoring and mapping using paper-based sensors and cell phones[J]. Water Research, 2015, 70(3):360-369.
- [14] Guo J, Wong J, Cui C, et al. A smartphone-readable barcode assay for the detection and quantitation of pesticide residues [J]. Analyst, 2015, 14(3):15-18.
- [15] Masawat P, Harfield A, Namwong A. An iPhone-based digital image colorimeter for detecting tetracycline in milk[J]. Food Chemistry, 2015, 184(8):23-29.
- [16] Urapen R, Masawat P. Novel method for the determination of tetracycline antibiotics in bovine milk based on digital-image-based colorimetry[J]. International Dairy Journal, 2015, 44(1):1-5.
- [17] Lin B, Yu Y, Cao Y, et al. Point-of-care testing for streptomycin based on aptamer recognizing and digital image colorimetry by smartphone[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2017, 100(1):482-489.
- [18] Porto I, Neto J, Santos L, et al. Determination of ascorbic acid in natural fruit juices using digital image colorimetry[J]. Microchemical Journal, 2019, 149(10):3-4.
- [19] Franco M, Suarez W T, Santos V. Digital image method smartphone-based for furfural determination in sugarcane spirits [J]. Food Analytical Methods, 2016,33(3):1-8.
- [20] 王嘉辉,吴限,李丽华,等.图像RGB数值衍生的欧氏距离用于手机比色法检测石油类物质[J].分析测试学报,2020,39(7):881-886.
Wang J H, Wu X, Li L H, et al. Determination of petroleum substances by mobile phone colorimetry based on euclidean distance from image RGB value[J]. Journal of Analytical and Testing, 2020,39 (7): 881-886.
- [21] 陈红,唐立模,陈珺,等.基于RGB图像的泥沙颗粒粒径测试技术研究[J].泥沙研究,2015(1):25-29.
Chen H, Tang L M, Chen J, et al. Study on measurement technique of sediment particle size base on RGB image[J]. Sediment research, 2015(1): 25-29.
- [22] 张云丽,韩宪忠,王克俭.基于深度颜色特征的灰度直方图玉米品种识别研究[J].作物杂志,2015(1):156-159.
Zhang Y L, Han X Z, Wang K J. Study on corn variety identification based on depth and color features of gray histogram [J]. Journal of Crop, 2015(1): 156-159.

(编辑 喻育红)