

DOI: 10.16056/j.2096-7705.2024.03.018

全自动高锰酸盐指数分析仪在高浊度环境水样分析中的应用

帅俊松, 龚娴*

(江西省南昌生态环境监测中心, 南昌 330038)

摘要: 为了提高高浊度环境水样中高锰酸盐指数测定的效率, 并保证分析结果的准确度, 采用全自动高锰酸盐指数分析仪测定高浊度环境水样高锰酸盐指数。重点考察了该分析仪对高浊度环境水样高锰酸盐指数测定的适用性, 并与手工法进行了比较。结果表明: 根据高锰酸盐指数有证标准物质的测定结果, 使用全自动高锰酸盐指数分析仪进行分析, 测量偏差小, 准确度良好。根据不同浊度水样对于高锰酸盐指数测定结果, 测定值随着水样浊度的增加而明显变大, 但全自动法比手工法更接近于真值。当仪器应用于高浊度环境水样 (>100 NTU) 高锰酸盐指数测定时, 重复性测试相对标准偏差 (RSD) 在 3.31%~5.26% 之间; 采用手工法分析相同样品, RSD 在 10.02%~13.42% 之间。与手工法相比, 基于全自动高锰酸盐指数分析仪的分析技术对高浊度水样高锰酸盐指数分析具有更好的准确度与重复性。本方法兼具分析效率高、操作简单等诸多优点, 可以在环境监测高浊度水样高锰酸盐指数分析领域广泛应用。

关键词: 全自动高锰酸盐指数分析仪; 高浊度; 环境水样; 高锰酸盐指数

中图分类号: X832

文献标志码: B

文章编号: 2096-7705 (2024) 03-0117-05

Application of Permanganate Index Analyzer for the Environmental Water with High Turbidity

SHUAI Junsong, GONG Xian*

(Jiangxi Province Ecological Environmental Monitoring Centre of Nanchang, Nanchang 330038, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of measuring the permanganate index in high turbidity environmental water samples and ensure the accuracy of the analysis results, a fully automatic permanganate index analyzer is used to measure the permanganate index of high turbidity environmental water samples. The applicability of the analyzer for determining the permanganate index of water samples in high turbidity environments was emphasized, and compared with manual methods. The results indicate that, based on the measurement results of certified reference materials for potassium permanganate index, using a fully automatic potassium permanganate index analyzer for analysis results in small measurement deviation and good accuracy. According to the measurement results of permanganate index for different turbidity water samples, the measured value increases significantly with the increase of water turbidity, but the instrument measurement method is closer to the true value than the manual method. When the instrument is applied to the determination of permanganate index in high turbidity environmental water samples (>100 NTU), the relative standard deviation (RSD) of repeatability testing is between 3.31%

收稿日期: 2024-05-06

第一作者: 帅俊松 (1969—), 男, 高级工程师, 本科, 主要研究方向为环境监测。E-mail: 1106222613@qq.com

* 通信作者: 龚娴 (1982—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为环境监测和环境污染治理。E-mail: 6470105@qq.com

引用格式: 帅俊松, 龚娴. 全自动高锰酸盐指数分析仪在高浊度环境水样分析中的应用[J]. 能源研究与管理, 2024, 16(3): 117-121, 127.

and 5.26%. The same sample was analyzed manually, with RSD ranging from 10.02% to 13.42%. Compared with manual methods, the analysis technology based on fully automatic permanganate index analyzer has better accuracy and repeatability in analyzing permanganate index of high turbidity water samples. This method has many advantages such as high analysis efficiency and simple operation, and can be widely used in the field of permanganate index analysis of high turbidity water samples in environmental monitoring.

Keywords: permanganate index analyzer; high turbidity; environmental water samples; permanganate index

引言

高锰酸盐指数是反映水体中有机及无机可氧化物质污染的常用指标,也是与主要污染物总量减排约束性指标之一的化学需氧量相关联的环境质量指标^[1],分析高锰酸盐指数的时空变化规律,有助于判断总量减排对地表水环境质量的影响^[2]。在水质检测中,高锰酸盐指数的测定也被称为利用高锰酸钾法进行化学需氧量测定。水中部分有机物及无机还原性物质均可消耗高锰酸钾,当有机物排放到环境水体时,以毒性和使水中溶解氧减少的形式对生态系统及环境造成危害^[3]。高锰酸盐指数作为 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的基本项目^[4],是当前地表水国考断面的主要指标之一,也是 GB 5749—2022《生活饮用水卫生标准》水质常规指标之一^[5]。

目前高锰酸盐指数的主要测定方法包括手工滴定法(简称“手工法”)^[6]、连续流动分析法^[7]、分光光度法^[8]和全自动高锰酸盐指数分析仪法(简称“全自动法”)^[9]等。就标准方法而言,主要参考采用 GB 11892—89《水质 高锰酸盐指数的测定》中的分析方法^[10],但该方法在实际应用中存在以下问题:1) 现行方法为手工法,在进行分析时操作繁琐、耗时长、实验条件严苛、稳定性差、对人员操作要求高,采用滴定法滴定终点的判断为溶液由无色到浅粉色刚刚出现,并保持 30 s 不变。对于高浊度环境水样分析而言,浊度对于分析人员滴定终点的判断具有显著影响,很难保证分析结果的准确度与重复性^[11]。由于手工法存在的多个缺陷以及环境水样分析的自动化趋势,目前已有全自动高锰酸盐指数分析仪应用于环境水质高锰酸盐指数的相关报道^[12-13]。许秀艳等^[12]系统研究了全自动高锰酸盐指数分析仪的方法性能和测定影响因素,当水样体积为 100 mL 时,方法检出限为 0.2 mg/L,在大量典型标准样品和实际水样的监测分析中,全自动法与手工方法测定结果完全可比。王永强等^[13]获得了全自动高锰酸盐指数分析仪在测量环境水样中的高锰酸盐指数的性能指标,测定低、中、高 3 个浓度的有证标准物

质,相对误差为 1.4%~3.1%,准确度满足要求。也有应用全自动法和手工法测定水源水和生活饮用水中高锰酸盐指数的对比研究^[14-15]。黄威等^[14]比对了水源水和生活饮用水中实际样品,发现 2 种方法的标准样品测定值均在标准值允许范围内,均能满足水源水和生活饮用水中高锰酸盐指数的检测需要。王秋敏等^[15]比对了手工法和仪器法在高锰酸盐指数测定中方法检出限、方法精密度和方法准确度,表明仪器法和手工法测得的所有水样中高锰酸盐指数结果均无显著性差异。

但目前尚缺乏该分析仪应用于高浊度水样测试适用性的报道以及与手工法的比较。因此,本文首先判定了全自动高锰酸盐指数分析仪测定高锰酸盐指数的准确性,并着重分析高浊度环境水样的高锰酸盐指数,将该全自动法与国家标准的手工法做了相关比较,对比 2 种方法的准确度与重复性,以期全自动高锰酸盐指数分析仪在高浊度环境水样分析领域提供科学参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

1) 制备硫酸溶液(浓硫酸与蒸馏水的体积比为 1:3):将 100 mL 浓硫酸缓慢注入到 300 mL 蒸馏水中,并不断搅拌,至温度较高时加入数滴高锰酸钾溶液,使溶液呈现粉红色。

2) 制备 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 标准贮备液($c(1/2\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)=0.100\ 0\ \text{mol/L}$):采用分析天平称取 0.670 5 g 优级纯草酸钠,烘干 2 h 后室温冷却,溶解于水中,转移到 100 mL 容量瓶中,纯水定容至 100 mL,冷藏保存。

3) 制备 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 标准使用液($c(1/2\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4)=0.010\ 0\ \text{mol/L}$):移液管量取 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 标准贮备液 10.00 mL 于 100 mL 容量瓶中,用水定容至 100 mL,现配现用。

4) 制备 KMnO_4 贮备液($c(1/5\ \text{KMnO}_4)\approx 0.1\ \text{mol/L}$):采用分析天平称量高锰酸钾 3.2 g,溶解于纯水中,稀释至约 1.2 L,在 90~95 ℃水浴中

加热 2 h, 通过蒸发使体积浓缩至 1 L, 冷却, 在避光处静置过夜, 避光贮存于棕色试剂瓶中。

5) 制备 KMnO_4 标准使用液 ($c(1/5 \text{ KMnO}_4) \approx 0.01 \text{ mol/L}$): 使用量筒称 KMnO_4 贮备液 90 mL 于 100 mL 容量瓶中, 纯水稀释至标准刻度线, 避光贮存于棕色瓶中, 现配现用。

实验用水为二次离子交换水。实验样品为地表水采样, 选取浊度 $>100 \text{ NTU}$ 的样品。实验测定仪器选用 APA-500 高锰酸盐指数分析仪 (上海安杰智创科技股份有限公司), 仪器相关工作参数如表 1 所示。

表 1 全自动高锰酸盐指数分析仪工作参数

Table 1 Working parameters of fully automatic permanganate index analyzer

水浴 温度 / $^{\circ}\text{C}$	水浴 时间 /min	滴定 温度 / $^{\circ}\text{C}$	室内 温度 / $^{\circ}\text{C}$	室内 湿度 /%
100	30	65	22	30

1.2 仪器颜色传感器选择

人眼所见的所有颜色都是由 RGB 三原色组成, 通过 RGB 传感器对于色彩信息的采集可数字化地量化所有颜色。单通道的分辨率为 255, 整体颜色分辨种类为 65 535 种, 远远高于人眼识别颜色终点的能力。

1) 图像像素分辨法。通过摄像头采集的图像, 手工选取部分区域的像素进行数据读取, 判别颜色变化。该类技术由于常规的摄像头图像采集质量不高, 存在颜色失真、像素模糊等干扰, 造成最终滴定完成后的颜色有肉眼可查偏差, 不具备一致性和整体液体颜色代表性, 该类方法是颜色直读, 会造成浊度样品、浅色样品读数判定出错, 图像像素分辨示意图如图 1 所示。

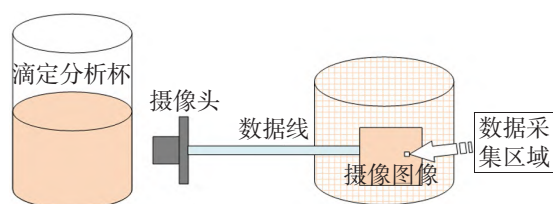


图 1 图像像素分辨法

Fig. 1 Image pixel resolution method

2) 光度法。通过 LED+ 滤光片 + 光电转换器件方案实施的, 采用绿色 LED 作为光源, 选择对应的滤光片, 去除其他波段干扰, 然后用光电转换器将光信号采集, 通过光信号的变化判定颜色变化。但系统的响应比较低, 滴定终点判别准确度不够, 而且是单波长测试, 无法消除气泡、浊度干扰, 由于

是靠突变量进行终点判定, 浅颜色样品读数不受影响, 光度法示意图如图 2 所示。

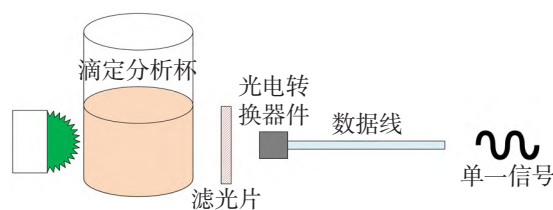


图 2 光度法

Fig. 2 Photometric method

3) RGB 传感器技术。在检测池一端提供白光, 另一端采用 RGB 传感器读取数据, 以三原色中的 G 值 (绿色信号) 作为主要判定依据, 结合 R 值与 B 值的变化, 通过专有的背景校正技术, 不仅能够稳定精确地判断出整个颜色的变化状态, 还能扣除气泡、浊度对于结果的干扰, 由于是靠突变量进行终点判定, 浅颜色样品读数不受影响。RGB 传感器技术示意图如图 3 所示。

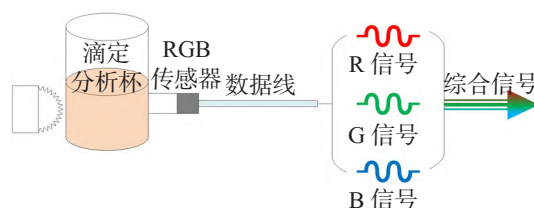


图 3 RGB 传感器技术

Fig. 3 RGB sensor technology

本仪器采用 RGB 传感器技术, 在通用原理基础上对仪器的浊度干扰进行高浊度实验研究。

1.3 样品测试

1.3.1 手工法测定步骤

1) 吸取 100 mL 经充分摇匀的样品 (或分取适量, 用水稀释至 100 mL), 置于 250 mL 锥形瓶中, 加入 $(5 \pm 0.5) \text{ mL}$ 硫酸溶液, 用移液管加入 10.00 mL 高锰酸钾溶液, 摇匀。将锥形瓶置于沸水浴内 $(30 \pm 2) \text{ min}$, 水浴沸腾, 开始计时。2) 取出后用移液管加入 10.00 mL 草酸钠溶液至溶液变为无色。趁热用高锰酸钾溶液滴定至刚出现粉红色, 并保持 30 s 不退色, 记录消耗的 KMnO_4 溶液体积。用 100 mL 纯水代替样品, 按上述步骤测定空白。

1.3.2 全自动法测定步骤

参考 1.3.1 测试方法, 但所有步骤由全自动高锰酸盐指数分析仪自动完成。具体为: 1) 接通全自动高锰酸盐指数分析仪电源, 按照规定的预热时间进行预热, 使显示记录单元和仪器各功能模块稳定运行, 测量前充分润洗管路。2) 量取水样 10 mL 放入样品杯中, 将样品进行编号测定。点击开始测定

按钮,仪器自动执行如下测量步骤:包括加热系统将水浴温度升高到 100 ℃,电动机械臂将样品移入加液系统,依次加入 5 mL 硫酸溶液和 10 mL 高锰酸钾使用液,随后样品移入加热系统水浴位,进行 30 min 水浴,水浴完成后,将样品移入滴定位,加 10 mL 草酸钠标准使用液,搅拌均匀。用高锰酸钾标准使用液进行滴定,利用检测系统判断滴定终点。测量完成后检查数据、颜色曲线无异常,即可进行数据保存。3) 取 10 mL 实验用水代替样品,按照上述步骤进行空白试验。空白试验与样品同批测定。

1.4 高浊度环境水样采样

对含沙量 ≤ 0.2 g/L 的水样,只测定浑水,应在现场对采集的浑水加浓硫酸调 pH 值 <2 ,低温(2~5 ℃)保存和运输,回实验室后取摇匀的浑水作为待测样;在含沙量 >0.2 g/L 时,除测定浑水外,必须加测沉淀澄清水,应同时采集 2 份浑水样,其中 1 份浑水样在现场沿样品瓶壁缓慢加入浓硫酸调 pH 值 <2 (详细记录加入的浓硫酸的体积),将水样慢

速摇匀后低温(2~5 ℃)保存和运输,回实验室取摇匀的浑水作为待测样,另一份浑水样置于密封容器内低温(2~5 ℃)保存和运输,到实验室重新摇匀,沉淀澄清 8~12 h 后,用虹吸法于液面下 5 cm 处向上吸取澄清水作为待测样。

2 结果与讨论

2.1 全自动高锰酸盐指数分析仪测定有证标准物质结果

为判定全自动高锰酸盐指数分析仪测定高锰酸盐指数的准确性,选择了 3 组不同质量浓度的高锰酸盐指数有证标准物质,编号和有证标准物质质量浓度分别为 2031107, (1.03 ± 0.14) mg/L; 2031113, (2.72 ± 0.30) mg/L; 2031106, (5.79 ± 0.42) mg/L。每个有证标准物质使用全自动高锰酸盐指数分析仪分别测定 3 次,计算测定结果平均值,相对标准偏差(RSD)和绝对误差,用以考察全自动高锰酸盐指数分析仪测定高锰酸盐指数的准确性,结果见表 2。

表 2 标准物质测定结果

Table 2 Measurement results of standard substances

编号	质量浓度/(mg·L ⁻¹)					RSD/%	绝对误差
	有证标准值	测定 1	测定 2	测定 3	平均值		
2031107	1.03 ± 0.14	1.11	1.08	1.01	1.07	4.81	0.04
2031113	2.72 ± 0.30	2.83	2.91	2.82	2.85	1.73	0.13
2031106	5.79 ± 0.42	5.86	5.91	5.88	5.88	0.43	0.09

由表 2 可知,使用全自动高锰酸盐指数分析仪测定编号 2031107 的有证标准物质,3 次测定的平均值为 1.07 mg/L, RSD 为 4.81%,绝对误差为 0.04;测定编号 2031107 的有证标准物质,3 次测定的平均值为 2.85 mg/L, RSD 为 1.73%,绝对误差为 0.13;测定编号 2031106 的有证标准物质,3 次测定的平均值为 5.88 mg/L, RSD 为 0.43%,绝对误差为 0.09。用全自动仪器测定 3 组不同浓度的高锰酸盐指数有证标准物质的测定结果均在有证标准物质浓度偏差范围内,准确度良好,利用全自动高锰酸盐指数分析仪可以完成环境监测水样分析。

2.2 不同浊度水样对于高锰酸盐指数测定结果的影响

比较不同浊度下的高锰酸盐指数测定值,以研究不同浊度对于测定结果的影响情况。选用高岭土作为浊度标准溶液,根据 1 mg/L 高岭土=1 CPTU=1 FTU=1 NTU,在浊度范围 0~600 NTU 内,分别配制含浊度标准溶液的 4.0 mg/L 高锰酸盐

指数标准溶液,用手工法和全自动法分别测定,测定结果见表 3。

由表 3 可知,浊度 ≤ 100 NTU 时,全自动法的绝对误差在 0.10~0.11 之间,手工法的绝对误差在 0.16~0.18 之间,全自动法的准确率优于手工法。随着浊度增大,2 种方法的绝对误差也在增大。浊度 200~400 NTU 时,全自动法的绝对误差在 0.15~0.27 之间,手工法的绝对误差在 0.29~0.44 之间;而浊度在 500~600 NTU 之间时,全自动法的绝对误差为 0.38,手工法的绝对误差在 0.59~0.62 之间。因此,无论手工法还是全自动法,高锰酸盐测定值随着水样浊度的增加而明显变大,水样检测的重复性也变差。但全自动法比手工法更接近于真值。

2.3 手工法与仪器法测定高浊度实际水样高锰酸盐指数

选取 NTU >100 的 3 个环境水质样品,参照手工法样品测试步骤及采用仪器法测定其高锰酸盐指数值,每个水质分析样品平行测定 6 次,通过计算

表 3 样品浊度对于水样测定的影响 (4.0 mg/L 高锰酸盐指数标准溶液)

Table 3 The influence of sample turbidity on water sample determination (4.0 mg/L potassium permanganate index standard solution)

浊度(NTU)	高锰酸盐测定值 /(mg·L ⁻¹)							
	手工法				全自动法			
	测定 1	测定 2	测定 3	平均值	测定 1	测定 2	测定 3	平均值
0	3.75	3.87	3.91	3.84	3.87	3.91	3.89	3.89
100	4.11	4.32	4.12	4.18	4.09	4.06	4.14	4.10
200	4.35	4.51	4.22	4.36	4.19	4.17	4.08	4.15
300	4.22	4.31	4.33	4.29	4.24	4.21	4.27	4.24
400	4.36	4.56	4.39	4.44	4.24	4.34	4.22	4.27
500	4.66	4.55	4.65	4.62	4.33	4.44	4.37	4.38
600	4.54	4.55	4.67	4.59	4.34	4.41	4.39	4.38

相对标准偏差考察该法的重复性,结果如表 4 所示。样品浊度为 386 NTU 的湖水,手工法 RSD 为 13.42%,全自动法 RSD 为 5.26%;样品浊度为 262 NTU 的河水,手工法 RSD 为 11.84%,全自动法 RSD 为 4.49%;样品浊度为 157 NTU 的地下水,手工法 RSD 为 10.02%,全自动法 RSD 为 3.31%。当样品浊度高于 100 NTU 时,手工法测定 RSD 均>10%,全自动法测定 RSD 均<6%。与手工法相比,

表 4 手工法与全自动法测定高浊度水样高锰酸盐指数重复性测试结果

Table 4 Repeatability test results of manual and automated method of permanganate index in high turbidity water samples

样品	样品浊度 / NTU	手工法测定值 / (mg·L ⁻¹)	手工法 RSD/%	全自动法测定值 / (mg·L ⁻¹)	全自动法 RSD/%
湖水	386	2.52	13.42	2.86	5.26
		2.11		2.73	
		2.88		2.54	
		2.19		2.56	
		2.07		2.49	
		2.21		2.61	
河水	262	1.74	11.84	2.37	4.49
		1.99		2.26	
		2.48		2.13	
		2.01		2.21	
		2.13		2.24	
		2.21		2.09	
地下水	157	2.85	10.02	2.37	3.31
		2.33		2.26	
		2.41		2.21	
		2.99		2.27	
		2.47		2.18	
		2.58		2.17	

全自动法具有良好的重复性。

2.4 手工法与全自动法分析高浊度水样中高锰酸盐指数对比

选取浊度>100 NTU 的 6 个环境水质样品,分别采用手工法和全自动法进行测试,比对结果见表 5。由表可知,手工法测定因滴定终点判断主观因素存在一定的偶然误差,故全自动法重复性更好。

表 5 手工法和全自动法比对测试结果

Table 5 Comparison test results between manual and fully automated methods

样品	手工法		全自动法	
	测定结果 / (m·L ⁻¹)	相对标准偏差(n=6)/ %	测定结果 / (m·L ⁻¹)	相对标准偏差(n=6)/ %
1	2.73	14.02	2.79	4.06
2	2.54	11.87	2.63	3.26
3	1.98	10.05	2.11	4.76
4	2.33	13.22	2.39	3.62
5	2.76	8.92	2.82	6.16
6	2.09	14.89	2.14	5.31

3 结论

1) 用全自动仪器测定 3 组不同质量浓度的高锰酸盐指数有证标准物质的测定结果均在有证标准物质浓度偏差范围内,准确度良好,利用全自动高锰酸盐指数分析仪可以完成环境监测水样分析。

2) 针对浊度标准溶液,样品浊度在 0~600 NTU 内,全自动法的准确率均优于手工法。虽然手工法和全自动法测定的绝对误差均随着水样浊度的增加而明显变大,但全自动法比手工法更接近于真值。

3) 针对 NTU>100 的高浊度实际水样,手工法

(下转第 127 页)

- [13] 杨瑞栋,庞雅庆,林锦荣.赣南菖蒲盆地地质特征及铀成矿条件分析[J].世界核地质科学,2014,31(3):503-508.
- [14] 孔兴功,陈培荣,章邦桐.赣南双峰式火山盆地铀成矿性的地球化学评价[J].铀矿地质,1999,15(4):204-208.
- [15] 林锦荣,李子颖,庞雅庆,等.赣南安远热点作用区地质特征[J].世界核地质科学,2013,30(3):125-129.
- [16] RYBACH L.Determination of heat production rate[M].Holland:Kluwer Academic Publishers,1988:125-142.
- [17] 赵平,汪集旻,汪缉安,等.中国东南地区岩石生热率分布特征[J].岩石学报,1995,11(3):292-305.
- [18] 张森琦,严维德,黎敦朋,等.青海省共和县恰卜恰干热岩体热地质特征[J].中国地质,2018,45(6):1087-1102.
- [19] 蔺文静,甘浩男,王贵玲,等.我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J].地质学报,2016,90(8):2043-2058.
- [20] ZHANG Eryong, WEN Dongguang, WANG Guiling, et al. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe basin, Qinghai province, China[J]. China Geology, 2022(5):372-382.

(上接第 121 页)

测定 RSD 均 $>10\%$, 重复性不佳;全自动法测定 RSD 均 $<6\%$, 与手工法相比, 具有良好的重复性。

4) 选取浊度 >100 NTU 的 6 个环境水质样品, 分别采用手工法和全自动法进行测试, 手工法测定因滴定终点判断主观因素存在一定的偶然误差, 故全自动法重复性更好。

综上所述, 与手工法相比, 全自动高锰酸盐指数分析仪的分析技术对高浊度水样高锰酸盐指数分析具有更好的准确度与重复性。同时, 加之本方法兼具分析效率高, 操作简单等诸多优点, 可在环境监测高浊度水样高锰酸盐指数分析领域有一定应用。

参考文献

- [1] 李兰芳,葛茂中,刘慧,等.准确测定高锰酸盐指数的条件因素分析[J].工业水处理,2020,40(3):107-110.
- [2] 刘红霞,朱雅兰,李琼.水体中高锰酸盐指数测定方法的现状与进展[J].黄石理工学院学报,2011,27(4):27-31.
- [3] 陆连忠.碱性法测定高锰酸盐指数的探讨[J].石化技术,2018,25(8):112.
- [4] 国家环境保护总局,国际质量监督检验检疫总局.地表水环境质量标准:GB 3838—2002[S].北京:中国环境科学出版社,2002.
- [5] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.生活饮用水卫生标准:GB 5749—2022[S].北京:中国标准出版社,2002.
- [6] 陈丽华.连续流动分析法在测定地表水水质中高锰酸盐指数的应用[J].皮革制作与环保科技,2021,2(3):70-73.
- [7] 蒋绍阶,石芙蓉,郑怀礼.紫外-可见光谱法测定高锰酸盐指数的研究[J].光谱学与光谱分析,2009,29(8):2227-2231.
- [8] 王延军,陈亚男,姚志鹏.基于机器视觉测试高锰酸盐指数的方法研究[J].环境科技,2022,35(6):51-54.
- [9] 郑婕.高锰酸盐指数分析仪在水质检测中的适用性研究[J].山东化工,2024,53(9):168-170.
- [10] 国家环境保护局.水质高锰酸盐指数的测定:GB/T 11892—1989[S].北京:中国标准出版社,1989.
- [11] 蒋晶晶,印军荣.准确测定高锰酸盐指数的条件因素探讨[J].污染防治技术,2009,22(3):103-104.
- [12] 许秀艳,胡建坤,李文攀,等.全自动高锰酸盐指数分析仪在水环境监测中的应用[J].中国测试,2021,47(4):55-61.
- [13] 王永强,蓝建为.仪器法在高锰酸盐指数测量中的应用[J].分析仪器,2021(4):78-81.
- [14] 黄威.仪器法和手工法测定水源水和生活饮用水中高锰酸盐指数的对比研究[J].当代化工研究,2024(5):67-69.
- [15] 王秋敏,张功能,冷喆.手工法和仪器法在高锰酸盐指数测定中的比较研究[J].绿色科技,2023,25(24):152-155.