

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240823001

引用格式: 赵甜甜, 牟冬, 姜薇, 等. 基于纸基微流控芯片快速检测饮用水中铬(VI)含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 308-313.

ZHAO TT, MU D, JIANG W, *et al.* Quick detection of chromium (VI) content in drinking water based on paper-based microfluidic chip [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(1): 308-313. (in Chinese with English abstract).

基于纸基微流控芯片快速检测饮用水中 铬(VI)含量

赵甜甜*, 牟冬, 姜薇, 孙玉华, 闫福青

(潍坊市产品质量检验研究院, 潍坊 261035)

摘要: **目的** 建立一种可以在纸基微流控芯片上快速检测饮用水中铬(VI)的方法。**方法** 将普通中性笔进行改装, 在笔芯中灌注烷基烯酮二聚体溶液, 然后利用在滤纸上直接绘制的方法制作纸芯片, 干燥后在此纸芯片上检测铬(VI)。实验优化了硫酸溶液浓度、二苯碳酰二肼浓度、反应温度、反应时间等参数。**结果** 本研究检测铬的线性范围为 0~0.20 mg/L, 检出限为 0.0036 mg/L, 加标回收率为 97.7%~109.0%。其线性范围宽, 灵敏度高, 重复性好。**结论** 该方法操作简单、结果准确, 不需要昂贵复杂的大型仪器, 对于多样品的同时检测及现场即时检测具有适应性。

关键词: 纸芯片; 铬(VI); 饮用水

Quick detection of chromium (VI) content in drinking water based on paper-based microfluidic chip

ZHAO Tian-Tian*, MU Dong, JIANG Wei, SUN Yu-Hua, YAN Fu-Qing

(Weifang Product Quality Inspection Research Institute, Weifang 261035, China)

ABSTRACT: Objective To construct a method for rapid detection of chromium (VI) in drinking water on a paper-based microfluidic chip. **Methods** The paper chips were manufactured by directly drawing on filter paper with a modified gel pen filled with alkylketene dimer solution and then dried. The chromium (VI) was detected on the paper chips. Parameters influencing the chromium (VI) determination were investigated, including concentration of sulfuric acid solution and diphenyl carbamide solution, reaction time, and temperature. **Results** In this study, the linear range of chromium detection was 0~0.20 mg/L, the detection limit was 0.0036 mg/L, and the recovery rate was 97.7%~109.0%. It had wide linear range, high sensitivity and good repeatability. **Conclusion** The method has the advantages of simple operation and the accurate detection result, does not require expensive and complex large instruments, and has adaptability to simultaneous detection of multiple samples and on-site real-time detection.

KEY WORDS: paper-based microfluidic chips; chromium (VI); drinking water

收稿日期: 2024-08-23

第一作者/*通信作者: 赵甜甜(1990—), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为食品和食品包装材料的安全检测。E-mail: 1142346680@qq.com

0 引言

饮用水是人类生存不可或缺的资源,但是随着工业化的发展,水质的安全面临着巨大挑战,其中重金属铬污染的现象愈发严峻,在 2017 年世界卫生组织国际癌症研究机构公布的致癌物清单中,六价铬是一类致癌物。传统的铬(VI)检测方法包括质谱法^[1-5]、光谱法^[6-8]、分光光度法^[9-11]、离子色谱法^[12-14]等,在这些方法中,质谱法、光谱法和离子色谱法均需要大型昂贵的仪器,且操作过程复杂,耗时较长,限制了这些方法的应用。而分光光度法受限于分光光度计的样品室,不能实现多样品的同时检测,在检测大量样品时,长时间的放置会导致反应后的结果不稳定,使数据失真。

纸芯片是微流控芯片的一种,其以纸为基底,具有制作成本低廉,结构简单,方便操作,以及与其他化学或生物检测物具有很好的兼容性等优点,目前在医学诊断^[15-21]环境检测^[22-25]以及食品质量控制^[26-30]等领域得到了广泛应用。本研究以改装的普通中性笔为基础,在笔芯中灌注疏水溶液,然后在滤纸上直接绘制纸芯片,以此纸芯片作为检测平台,基于在酸性条件下,样品中的铬(VI)会和二苯碳酰二肼反应生成紫红色络合物,颜色深浅与铬(VI)浓度成正比的原理,建立以绘图法制作的纸芯片为平台的饮用水中铬(VI)的检测方法。通过本研究以期能有效解决大型仪器对实验环境的要求和样品放置时间过长导致结果失真的问题。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

硫酸、正庚烷、丙酮(分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司);重铬酸钾(分析纯,天津博迪化工股份有限公司);凡士林(天津博迪化工股份有限公司);二苯碳酰二肼(分析纯,成都艾科达化学试剂有限公司);烷基烯酮二聚体(山东旺升新材料科技有限公司);超纯水(18 MΩ·cm),所有的试剂均为现用现配。

FBZ6001-UP 标准试剂型纯水机(青岛富勒姆科技有限公司);GZX-GF101-2-BS-II 烘箱(上海贺德实验设备有限公司);HD-E702-100B 恒温恒湿试验箱(广东海达仪器有限公司);723PC 型可见分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器有限公司);KQ-500DE 型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司);9XPRO 华为手机(华为技术有限公司);绘图模板(济阳市宇一文具店);Whatman1#定性滤纸(英国沃特曼公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 纸芯片的制作

取一支普通的中性笔,取下笔头后移除里面的墨水,然后再装上笔头,最后将笔芯截断保留笔尖以上 2 cm 部分,

以便在其中灌注疏水性溶液。将 0.1 g 凡士林和 1.0 g 烷基烯酮二聚体加入到 12.5 mL 正庚烷中,经超声溶解后,将此混合液作为疏水性溶液。用注射器吸取 0.1 mL 疏水性溶液灌注到改装的笔中,以直径 10 mm 的孔板为模具,在 Whatman#1 滤纸上直接绘制圆形图案,于 100 °C 下烘干 2 min。

1.2.2 二苯碳酰二肼丙酮溶液的配制

称取 0.2423 g 二苯碳酰二肼于棕色容量瓶中,用丙酮定容至 100 mL 刻度线处,得到 0.01 mol/L 的二苯碳酰二肼丙酮溶液。使用时,用丙酮将其稀释成 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0 mmol/L 的二苯碳酰二肼丙酮溶液。

1.2.3 铬(VI)标准溶液的配制

称取 0.1414 g 经 105 °C 烘至恒量的重铬酸钾,溶于纯水中,并于容量瓶中用纯水定容至 500 mL。吸取此溶液 10.0 mL 于容量瓶中,用纯水定容至 1000 mL,得到 1.0 mg/L 的铬(VI)储备液。使用时,分别用超纯水将其稀释成 0、0.004、0.010、0.020、0.040、0.080、0.160、0.200 mg/L 的铬(VI)标准溶液。

1.2.4 硫酸溶液的配制

将 5.4 mL 硫酸($\rho=1.84$ g/mL)缓慢加入到 100 mL 纯水中,得到 1.0 mol/L 的硫酸溶液。使用时,用超纯水将其稀释成 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 mol/L 的硫酸溶液。

1.2.5 铬(VI)的检测方法

(1) 铬(VI)检测原理

在酸性溶液中,铬(VI)可与二苯碳酰二肼作用,生成紫红色络合物,反应过程中颜色变化程度与铬(VI)含量成正比^[31]。

(2) 铬(VI)的检测方法

先用移液器分别吸取 2 μ L 二苯碳酰二肼硫酸溶液和硫酸溶液于纸芯片上,然后分别吸取 2 μ L 不同浓度的铬(VI)标准溶液,滴加在纸芯片上,检测区域迅速变为紫红色并趋于稳定,然后用手机拍照,照片用 ImageJ (x64)软件处理,得到灰度值(颜色越深,灰度值越小)。以铬(VI)溶液浓度为横坐标,以灰度值为纵坐标,绘制标准曲线。

1.3 数据处理

反应结束后将检测区域用手机拍照,照片用 Image J (x64)软件提取灰度值,用 Origin 8.5 软件处理数据和绘制相关表格,所有的实验结果均重复 3 次,相对标准偏差均小于 10%。

2 结果与分析

2.1 疏水溶液对纸芯片制作的影响

纸芯片的疏水边界是由疏水溶质渗透整张纸后固化形成的,实验选用造纸工业常用的施胶剂烷基烯酮二聚体作为疏水溶质,取 0.5 g 溶解在 10 mL 正庚烷中,超声

2 min 使烷基烯酮二聚体全部溶解, 得到疏水溶液。由于正庚烷黏度较小, 在纸上的扩散速率较快, 导致疏水溶质不能完全渗透整张纸, 使疏水边界不能很好的将实验限制在反应区域内。因此在疏水溶液中加入凡士林(0.1 g/10 mL)以增加溶液黏度, 降低了疏水溶液在纸上的扩散, 使疏水溶质能完全渗透整张纸, 保证实验完全在反应区域内进行。

2.2 二苯碳酰二肼溶液浓度对实验的影响

分别将 2 μL 不同浓度的二苯碳酰二肼溶液和 0.2 mol/L 的硫酸溶液滴加在纸芯片上, 然后吸取 2 μL 质量浓度为 0.08 mg/L 的铬(VI)标准溶液, 显色稳定后拍照处理, 结果如图 1 所示。二苯碳酰二肼溶液浓度为 0.1 mmol/L 至 1.0 mmol/L 时, 随着二苯碳酰二肼溶液浓度增大, 纸芯片反应区域紫红色明显逐渐加深, 灰度值逐渐减小; 当二苯碳酰二肼溶液浓度超过 1.0 mmol/L 时, 反应区域颜色不再加深, 灰度值不再发生变化, 同时颜色达到稳定的时间也并未随二苯碳酰二肼溶液浓度的增大而缩短, 因此确定实验中二苯碳酰二肼溶液浓度为 1.0 mmol/L。

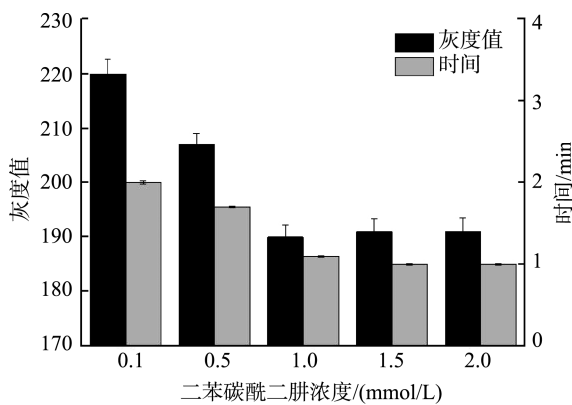


图 1 二苯碳酰二肼浓度对铬(VI)检测的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of concentration of diphenyl carbamide solution on detection of chromium (VI) ($n=3$)

2.3 硫酸溶液浓度对实验的影响

分别将 2 μL 不同浓度的硫酸溶液和 1.0 mmol/L 的二苯碳酰二肼溶液滴加在纸芯片上, 然后吸取 2 μL 质量浓度为 0.08 mg/L 的铬(VI)标准溶液, 显色稳定后拍照处理, 结果如图 2 所示。硫酸溶液浓度为 0.05 mol/L 至 0.20 mol/L 时, 随着硫酸溶液浓度增大, 纸芯片反应区域紫红色明显逐渐加深, 灰度值逐渐减小; 当硫酸溶液浓度超过 0.20 mol/L 时, 反应区域颜色不再加深, 灰度值不再发生变化, 同时颜色达到稳定的时间也并未随硫酸溶液浓度的增大而缩短。实验发现, 当硫酸浓度过高时, 实验结束后, 纸芯片反应区域基底有碳化现象, 导致纸芯片容易破损, 因此确定实验中硫酸溶液浓度为 0.20 mol/L。

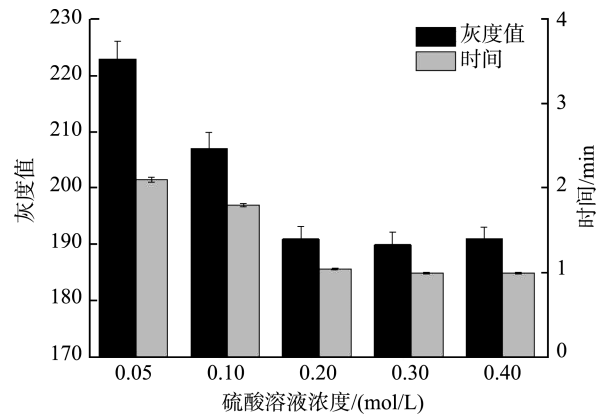


图 2 硫酸溶液浓度对铬(VI)检测的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of concentration of sulfuric acid solution on detection of chromium (VI) ($n=3$)

2.4 反应时间对实验的影响

分别将 2 μL 0.2 mol/L 的硫酸溶液和 1.0 mmol/L 的二苯碳酰二肼溶液滴加在纸芯片上, 然后分别吸取 2 μL 不同浓度的铬(VI)标准溶液, 每隔 20 s 拍照处理, 检测区域的灰度值和反应时间的关系如图 3 所示。检测区域的颜色随着反应时间的增加而逐渐加深, 灰度值逐渐变小, 同时发现铬(VI)溶液的浓度对反应所需的时间影响不大, 检测区域均在 1.0 min 后颜色达到稳定的紫红色, 并且可保持在 1 h 内不发生变化, 因此拍照时间可为加入铬(VI)溶液 1 min 至 1 h 内。

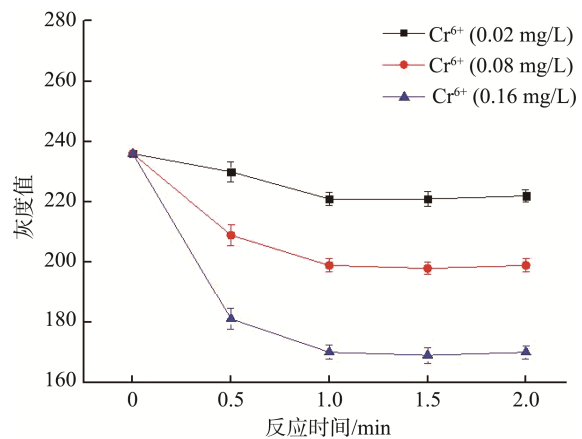


图 3 反应时间对铬(VI)检测的影响($n=3$)

Fig.3 Effects of reaction time on detection of chromium (VI) ($n=3$)

2.5 反应温度对实验的影响

分别将 2 μL 硫酸溶液、二苯碳酰二肼溶液和铬(VI)溶液滴加在纸芯片上后, 在 10、20、30、40、50 $^{\circ}\text{C}$ 下反应 1 min, 结果如图 4 所示, 当反应温度在 10~40 $^{\circ}\text{C}$ 时, 纸芯片检测区域的紫红色深度基本一致, 而在 50 $^{\circ}\text{C}$ 时, 检测区域紫红色较浅, 灰度值偏高。这是由于温度较高, 纸芯片

中的溶液蒸发较快, 未使反应完全进行, 所以本研究不需额外的控温设备, 适合在室温下进行。

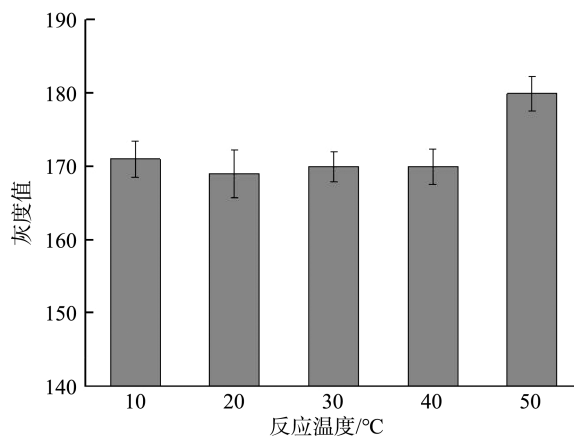


图 4 反应温度对铬(VI)检测的影响($n=3$)

Fig.4 Effects of reaction temperature on detection of chromium (VI) ($n=3$)

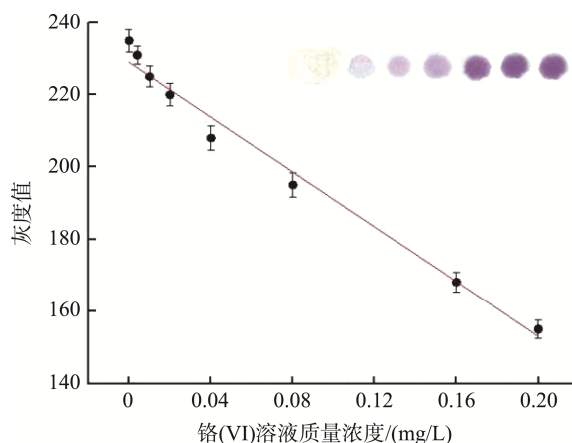
2.6 实际样品的测定

采用建立的纸芯片检测平台对 2 个饮用水中的铬(VI)进行了测定, 测定结果列于表 1, 标准曲线和检测结果实物图如图 5 所示。可以看出, 检测区域的颜色随着铬(VI)标准溶液浓度的增大而逐渐加深, 灰度值逐渐减

表 1 实际样品在纸芯片和分光光度计的检测结果(mg/L, $n=3$)

Table 1 Test results of actual samples on paper chip and spectrophotometer (mg/L, $n=3$)

样品	纸芯片测定结果	分光光度法测定结果
1#	<0.0036	<0.004
2#	<0.0036	<0.004



注: 实物图中, 相同浓度的检测结果在纸芯片上呈现出的颜色均一致, 所以灰度值是一样的。

图 5 铬(VI)在纸芯片上的检测结果及标准曲线($n=3$)

Fig.5 Results of colorimetric assay of chromium (VI) on paper-based microfluidic chips and the calibration curve ($n=3$)

小。当铬(VI)质量浓度在 0~0.20 mg/L 时, 检测区域的灰度值与铬(VI)质量浓度呈良好的线性关系, 线性方程为 $Y=-379.9767X+228.9609$, $r=0.9807$, 该方法的检出限为 0.0036 mg/L ($3\sigma/\text{slope}$), 小于紫外分光光度法的检出限 (0.004 mg/L)。所测的 2 个样品中均未检出铬(VI) (<0.0036 mg/L), 所测结果和紫外分光光度法结果一致, 表明该方法应用于饮用水中铬(VI)的检测。

2.7 方法的回收率

为考察以纸芯片为检测平台方法的准确度, 实验中取浓度为 0.08 mg/L 的铬(VI)标准溶液作为待测样品, 添加铬(VI)标准溶液使其理论质量浓度为 0.10、0.12 和 0.14 mg/L, 然后测定加标后的浓度, 计算加标回收率。结果如表 2, 可知方法的回收率为 97.7%~109.0%, 表明该方法准确可靠。

表 2 添加不同浓度的铬(VI)标准溶液的回收率($n=3$)

Table 2 Recovery with different concentration of chromium (VI) standard solution ($n=3$)

样品/(mg/L)	添加量/(mg/L)	测定结果/(mg/L)	回收率/%	RSD/%
0.08	0.02	0.109	109.0	1.0
0.08	0.04	0.116	97.7	1.2
0.08	0.06	0.146	104.3	1.1

3 结论

本研究通过在改装的普通中性笔中灌注疏水溶液然后在滤纸上直接绘制的方法制作纸芯片, 并利用在酸性条件下, 水中铬(VI)会和二苯碳酰二肼反应生成紫红色络合物, 颜色深浅与铬(VI)浓度成正比原理, 建立了饮用水中铬(VI)的检测方法。相较于其他检测铬(VI)的方法, 该方法操作简单、不需要昂贵的仪器, 同时可实现多样品的同时检测。

参考文献

- [1] 樊祥, 程甲, 张润何, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法测定食品中的六价铬含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(21): 5704-5708.
FAN X, CHENG J, ZHANG RH, *et al.* Determination of hexavalent chromium content in foods by high performance liquid chromatography with inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(21): 5704-5708.
- [2] 杏朝刚, 王娇娇, 黄锦春, 等. 离子色谱-电感耦合等离子体质谱同步分离测定环境水中砷、铬、溴、碘的 10 种形态[J]. 分析科学学报, 2023, 39(2): 207-212.
XING CQ, WANG JJ, HUANG JC, *et al.* Simultaneous determination of ten ionic species of arsenic, chromium, bromine, and iodide in

- environmental water by ion chromatography inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Journal of Analytical Science*, 2023, 39(2): 207–212.
- [3] 林莉, 郑翊, 卫碧文, 等. IC-ICP-MS 联用法测定玩具材料中可迁移的六价铬与三价铬[J]. *分析实验室*, 2013, 32(8): 82–85.
LIN L, ZHENG X, WEI BW, *et al.* Simultaneous determination of migratory chromium species in toy materials by ion chromatography and ICP-MS [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2013, 32(8): 82–85.
- [4] 黄键, 张文国, 施锦辉, 等. 高效液相色谱-电感耦合等离子体质谱法同步测定海水中的无机砷与六价铬[J]. *化学分析计量*, 2020, 29(5): 72–75.
HUANG J, ZHANG WG, SHI JH, *et al.* Simultaneous analysis of inorganic arsenics and chromium (VI) in sea water by high performance liquid chromatography-inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2020, 29(5): 72–75.
- [5] 孙玲玲, 宋金明, 李宇, 等. 海水中三价与六价铬高效液相色谱-三重四级杆电感耦合等离子体质谱法(HPLC-TQ-ICP-MS)的联用测定[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(2): 436–443.
SUN LL, SONG JM, LI N, *et al.* Joint determination of trivalent chromium and hexavalent chromium in sea water by HPLC-TQ-ICP-MS [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(2): 436–443.
- [6] 张伟琦, 谢涛, 孙稚菁, 等. 微波消解火焰原子吸收光谱法测定土壤中六价铬[J]. *环境科学研究*, 2023, 36(1): 44–53.
ZHANG WQ, XIE T, SUN ZJ, *et al.* Developments of the method of microwave digestion and flame atomic absorption spectrometry for determination of hexavalent chromium in soils [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, 36(1): 44–53.
- [7] 荣杰峰, 许美珠, 吴洪成, 等. 基于石墨烯量子点的检测地表水中六价铬的荧光传感器[J]. *分析实验室*, 2017, 36(1): 51–55.
RONG JF, XU MZ, WU HC, *et al.* Fluorescent sensor for chromium (VI) in surface water based on graphene quantum dots [J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2017, 36(1): 51–55.
- [8] 张鑫鑫, 杨燕强, 武曦, 等. 基于低共熔溶剂的微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定粮谷中铅、镉、铬的含量[J]. *理化检验: 化学分册*, 2022, 58(12): 1425–1430.
ZHANG XX, YANG YQ, WU X, *et al.* Determination of lead, cadmium and chromium in grain by graphite furnace atomic absorption spectrometry with microwave digestion based on deep eutectic solvent [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2022, 58(12): 1425–1430.
- [9] 张榕, 段宇, 降林华, 等. 紫外可见分光光度法直接测定高浓度六价铬溶液的光程优化研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2023, 43(6): 1829–1837.
ZHANG R, DUAN N, JIANG LH, *et al.* Study on optical path optimization for direct determination of spectrophotometry of high concentration hexavalent chromium solution by ultraviolet visible spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(6): 1829–1837.
- [10] 韩永辉, 侯博, 童双祖, 等. 流动注射分光光度法测定水中六价铬[J]. *化学分析计量*, 2023, 32(8): 56–59.
HAN YH, HOU B, TONG SZ, *et al.* Determination of hexavalent chromium in water by flow injection spectrophotometry [J]. *Chemical Analysis and Meterage*, 2023, 32(8): 56–59.
- [11] 程海燕, 杨鹏, 韦宇颖. 二苯碳酰二肼分光光度法测定饮水机热罐中六价铬含量[J]. *净水技术*, 2022(1): 162–165
CHENG HY, YANG P, WEI YY. Determination of Cr⁶⁺ in water of water drinker hot pot by diphenylcarbazide spectrophotometry [J]. *Water Purification Technology*, 2022(1): 162–165.
- [12] 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(A01): 1–2.
HU ZY, WANG Q, YE ML, *et al.* Determination of hexavalent chromium in drinking water by ion chromatography [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2012, 2(A01): 1–2.
- [13] 吴小龙, 陈琴放, 符式锦, 等. 柱后衍生-离子色谱法测定土壤和沉积物中的六价铬[J]. *中国无机分析化学*, 2022(5): 13–19.
WU XL, CHEN QF, FU SJ, *et al.* Determination of hexavalent chromium in soil and sediment by ion chromatography with post-column derivatization [J]. *Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*, 2022(5): 13–19.
- [14] 邓宇杰. 基于柱后衍生-离子色谱法分析地表水和地下水中六价铬的方法研究[J]. *化学与粘合*, 2022(5): 454–457.
DENG YJ. Analysis of hexavalent chromium in surface water and groundwater by post column derivatization ion chromatography [J]. *Chemistry and Adhesion*, 2022(5): 454–457.
- [15] CAO LL, HAN GC, XIAO HL, *et al.* A novel 3D paper-based microfluidic electrochemical glucose biosensor based on rGO-TEPA/PB sensitive film [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2020, 10961: 34–43.
- [16] MOHANRAJ J, DURGALAKSHMI D, RAKKESH RA. Facile synthesis of paper based graphene electrodes for point of care devices: A double stranded DNA (dsDNA) biosensor [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 566: 463–472.
- [17] 赵甜甜, 陈雨晴, 张敏, 等. 基于纳米金催化的血清尿酸纸芯片的构建及应用[J]. *高等学校化学学报*, 2016, 37(5): 829–834.
ZHAO TT, CHEN YQ, ZHANG M, *et al.* Fabrication of paper-based microfluidic chips and the application on the determination of uric acid in serum based on gold nanoparticle-assisted catalysis [J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2016, 37(5): 829–834.
- [18] HIRAOKA R, KUWAHARA K, WEN YC, *et al.* Paper-based device for naked eye urinary albumin/creatinine ratio evaluation [J]. *ACS Sensors* 2020, 5(4): 1110–1118.
- [19] 张剑, 仵静雯, 郑伟, 等. 基于微流控纸芯片-显色法快速测定全血中尿酸的含量[J]. *理化检验-化学分册*, 2023(10): 1192–1195.
ZHANG J, WU JW, ZHENG W, *et al.* Rapid determination of uric acid in whole blood by colorimetric method based on microfluidic paper chip [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*,

- 2023(10): 1192–1195.
- [20] BERRY SB, FERNANDES SC, RAJARATNAM A, *et al.* Measurement of the hematocrit using paper-based microfluidic devices [J]. *Lab on a Chip*, 2016, 16(19): 3689–3694.
- [21] CAO L, FANG C, ZENG R, *et al.* Paper-based microfluidic devices for electrochemical immunofiltration analysis of human chorionic gonadotropin [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2017, 92: 87–94.
- [22] 郭晓利, 王高红, 王伟峰, 等. 纸基微流控芯片同时检测土壤中铬和铁[J]. *化学工程师*, 2023, 37(4): 25–28.
- GUO XL, WANG GH, WANG WF, *et al.* Simultaneous determination of chromium and iron in soil by paper based microfluidic chip [J]. *Chemical Engineer*, 2023, 37(4): 25–28.
- [23] 秦潇潇, 张忠, 孙晓琳, 等. 微流控纸芯片在食品安全快速检测中的应用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(23): 7715–7724.
- QIN XX, ZHANG Z, SUN XL, *et al.* Application of microfluidic paper chip in rapid detection of food safety [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2022, 13(23): 7715–7724.
- [24] CHOLEVA TG, KAPPI FA, GIOKAS DL, *et al.* Paper-based assay of antioxidant activity using analyte-mediated on-paper nucleation of gold nanoparticles as colorimetric probes [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015(860): 61–69.
- [25] OGAWA M, KATOH A, MATSUBARA R. Semi-quantitative microfluidic paper-based analytical device for ionic silica detection [J]. *Analytical Sciences*, 2023, 39(8): 1361–1370.
- [26] 杨文韬, 刘宏, 顾忠泽. 基于智能手机的纸微流控电化学农药检测芯片的研究[J]. *分析化学*, 2016, 44(4): 586–590.
- YANG WT, LIU H, GU ZZ. Research on paper microfluidic electrochemical pesticide detection chip based on smart phone [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2016, 44(4): 586–590.
- [27] 罗小玲, 王小燕, 吕奕菊, 等. 分子印迹荧光纸基传感器食品安全可视化快速检测技术研究现状[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(20): 160–170.
- LUO XL, WANG XY, LV YJ, *et al.* Research status of visualized and rapid detection technology of food safety with molecularly imprinted fluorescent paper-based sensors [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(20): 160–170.
- [28] 王婉, 张庆, 李海玉, 等. 纸基微流控芯片同时测定消费品中的总铬和双酚 A[J]. *质量安全与检验检测*, 2020(5): 1–5.
- WANG W, ZHANG Q, LI HY, *et al.* Simultaneous determination of total chromium and bisphenol a in consumer products using paper-based microfluidic chip [J]. *Quality Safety Inspection and Testing*, 2020(5): 1–5.
- [29] WU KH, HUANG WC, WANG SH. Paper-based colorimetric sensor using Photoshop and a smartphone app for the quantitative detection of carbofuran [J]. *Analytical Methods*, 2024, 16(7): 1043–1049.
- [30] YANG M, CAO M, ZHANG Z. PCB-C~4D coupled with paper-based microfluidic sampling for the rapid detection of liquid conductivity [J]. *Analytical Methods*, 2024, 16(16): 2543–2555.
- [31] 谢华林. 二苯碳酰二肼吸光度法测定水中铬(VI)[J]. *理化检验-化学分册*, 2003, 39(6): 362–364.
- XIE HL. Photometric determination of chromium (VI) in water with diphenylcarbazine [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis)*, 2003, 39(6): 362–364.

(责任编辑: 蔡世佳 于梦娇)