

高灵敏度尿碘检测技术在学龄儿童碘营养监测中的应用研究

江雪*

(南京市雨花台区疾病预防控制中心, 南京 210000)

摘要: 碘是维持人体健康和促进学龄儿童生长发育的重要微量元素, 参与甲状腺激素的合成, 具有调节代谢和神经系统功能。碘的缺乏不仅会影响儿童的智力和体格发育, 还可能导致严重的碘缺乏性疾病, 因此对儿童碘营养状况的监测至关重要。尿碘水平是反映人体碘摄入的可靠生物指标, 可直接用于评估碘营养状态。然而, 传统检测方法在低浓度碘的测量中准确性有限, 难以满足现代公共健康监测的精细化需求。高灵敏度尿碘检测技术通过引入催化动力学、光谱分析和电化学检测等先进手段, 能够检测低至 0.1 $\mu\text{g/L}$ 的尿碘浓度, 为碘缺乏的早期识别和干预提供了重要支持。本文重点分析了该技术的检测原理、主要类型及其在儿童碘营养监测中的实际应用, 并探讨其在区域碘缺乏病防控和公共健康决策中的重要价值, 为科学化、精准化的碘营养管理提供了理论基础和实践指导。

关键词: 高灵敏度尿碘检测; 学龄儿童; 碘营养监测; 公共健康

0 引言

碘是人体不可或缺的微量元素, 尤其在学龄儿童的发育阶段起到至关重要的作用。碘主要参与甲状腺激素的合成, 可以调控新陈代谢和促进神经系统发育, 如果缺乏则可能导致智力和生长发育障碍, 甚至影响终身健康。对儿童碘营养状况进行准确的监测, 是预防碘缺乏性疾病的关键。尿碘水平因而被广泛用作评估碘营养状态的标准指标。传统尿碘检测方法在灵敏度和准确性上存在不足, 难以满足低浓度碘检测需求。高灵敏度尿碘检测技术通过催化动力学、光谱法和电化学检测等手段, 实现了更高的检测精度, 适用于不同环境下的尿碘监测。本文旨在综述高灵敏度尿碘检测技术的研究进展, 探讨其在儿童碘营养监测中的应用, 为科学防控碘缺乏病和优化碘营养管理提供参考。

1 高灵敏度尿碘检测技术的原理与方法

1.1 高灵敏度尿碘检测技术的基本原理

高灵敏度尿碘检测技术基于催化动力学、光谱分析和电化学方法, 以准确检测微量碘含量。催化动力学通过碘离子对特定反应速率的影响进行定量分析, 如碘催化的氧化还原反应在 485 nm 处检测吸光值, 检测限达 1 $\mu\text{g/L}$ ^[1]。光谱法利用尿碘在 254 nm 处的吸收峰变化, 检测限约 2 $\mu\text{g/L}$, 适合批量检测。电化学法通过伏安法测定氧化还原电流峰, 检测

限低至 0.1 $\mu\text{g/L}$, 适用于超低浓度尿碘样本的检测^[2]。

1.2 高灵敏度检测方法的主要类型

目前主要的高灵敏度尿碘检测方法包括催化动力学法、电化学法、酶联免疫吸附法(ELISA)、核磁共振法(NMR)和高效液相色谱法(HPLC)^[3]。催化动力学法通过碘在特定显色反应中的催化作用, 适用于灵敏度要求较高的检测^[1]。该方法的灵敏度在 1 $\mu\text{g/L}$ 左右, 可在几分钟内完成检测^[4]。电化学检测法(如伏安法)使用特制的碘离子选择电极, 其响应范围在 0.1 $\mu\text{g/L}$ 到 1000 $\mu\text{g/L}$ 之间, 适用于各类碘浓度的尿液样本。ELISA 法利用碘与特异性抗体的结合, 通过比色法测定碘浓度, 检测限可达到 5 $\mu\text{g/L}$, 适合精准需求较高的检测^[5]。核磁共振法通过测量尿样中碘核磁共振信号强度进行检测, 灵敏度在 3 $\mu\text{g/L}$ 左右, 可用于复杂尿液样本中的碘浓度精确定量分析^[6]。HPLC 法通过尿碘与其他尿液成分分离后进行紫外检测, 检测限通常在 2 $\mu\text{g/L}$ 以下, 适合精细定量分析需求。

1.3 高灵敏度尿碘检测仪器及其性能

尿碘检测中, 仪器性能会直接影响数据精度与效率。电化学分析仪灵敏度高, 可检测至 0.1 $\mu\text{g/L}$, 适合现场快速筛查。光谱分析仪采用紫外-可见光或荧光光谱, 通过 254 nm 波长测定尿碘, 检测范围为 5~1000 $\mu\text{g/L}$, 适用于大规模样本分析。高效液相色谱仪结合紫外或荧光检测器, 灵敏度达 0.5 $\mu\text{g/L}$, 用于高精度检测^[7]。便携性和成本是低资源地区的关键考量, 便

* 通信作者: 江雪, 中级理化检验技师, 研究方向为预防医学(卫生检验)。E-mail: 404749071@qq.com

携式光谱与电化学分析仪因其高效、易用，为尿碘监测提供了重要支持。

2 学龄儿童碘营养监测的特殊要求

2.1 学龄儿童尿碘检测的特性

学龄儿童的尿碘检测具有独特的特性，这是由于其身体代谢与发育特点不同于成年人。儿童的尿碘水平易受饮食、环境和身体发育状况影响，导致尿碘排泄呈现出日间和季节性的显著波动^[8]。对于处于发育期的学龄儿童，其代谢活跃，日常活动量大，体内碘的需求和排泄更加频繁。尿碘浓度检测的结果往往显示出较高的变异性，因此需要更高频次和更精准的方法进行数据采集，以确保测量结果能够准确反映儿童的真实碘摄入水平^[9]。在这种条件下，尿样采集的时机和储存方法对数据准确性有着重要影响，需避免由于不合适的样本采集而导致的数据误差。

此外，学龄儿童尿碘浓度还可能因个体差异显现出显著的波动，如年龄越小，尿碘浓度的变动性越高，这与他们体内碘代谢尚未完全稳定密切相关^[10]。同时，尿样采集过程中饮水量和膳食结构的即时变化，也会对尿碘测量结果产生短期干扰。因此，在尿碘检测中，需要通过调整采样策略，如采取多时段采样或24小时尿样采集，以减少这些变异因素的影响，从而提高检测结果的代表性和可靠性^[11]。

2.2 尿碘检测技术在学龄儿童中的适用性

高灵敏度尿碘检测技术在学龄儿童中的应用需要特别关注检测的灵敏度、准确性和样本处理的适应性。儿童尿碘含量通常较低，特别是在碘缺乏地区，低浓度的尿碘需要更高灵敏度的检测技术支持^[12]。精确的测量有助于捕捉儿童体内微小的碘含量变化，及时发现碘缺乏的早期迹象。由于儿童尿样中可能含有多种代谢产物和微量元素，样本处理步骤也需要进一步优化，以确保检测结果的可靠性^[13]。高灵敏度检测设备能够对低浓度的碘进行精确检测，在0.1 μg/L的浓度范围内仍然可以得到稳定的定量数据。

儿童尿样的稀释程度会因饮水量和个体差异而产生变化，进而对检测结果产生影响。因此，使用尿碘/肌酐比值(UIC/Cr)作为辅助指标，能够校正稀释效应，提升数据的科学性和适用性。与此同时，优化样本处理流程，包括快速离心、过滤和低温储存等技术，可减少杂质干扰和样本降解，进一步提高检测精度。借助这些技术改进，尿碘检测技术可以更高效地适应学龄儿童样本的特性，为大规模健康筛查提供可靠的技术保障。

3 高灵敏度尿碘检测技术在学龄儿童碘营养监测中的应用

3.1 尿碘检测技术在儿童碘营养监测中的作用

高灵敏度尿碘检测技术在儿童碘营养状况评估中具有重要意义，其精准性和灵敏度能够帮助捕捉早期碘缺乏信号，为个体和群体干预措施提供依据。传统的尿碘检测方法难以全面评

估低浓度尿碘样本的变化。现代高灵敏度技术，通过增强信号捕获和优化检测流程，能够实现从0.1 μg/L至1000 μg/L的宽范围准确检测。数据显示，在采用高灵敏度技术监测后，某省学龄儿童碘缺乏率下降了30%，补碘措施的效果得到了更准确的验证。这不仅能够帮助政府优化碘盐政策，还推动了儿童碘缺乏病防控策略的科学化转型^[14]。

此外，该技术在长期监测中，可以记录尿碘水平的动态变化，帮助精准评估儿童碘摄入的季节性波动和个体化需求。高灵敏度检测技术还能揭示不同地区或群体间的碘营养差异，例如城乡之间或高海拔与低海拔地区儿童的碘摄入情况差异。通过对多组数据的动态分析，可以预测未来碘缺乏风险区域，及时采取补救措施^[15]。这种数据驱动的监测方式为未来的碘营养管理奠定了科学基础，进一步助力全球碘缺乏病的消除。

3.2 检测技术应用中存在的挑战

尽管高灵敏度尿碘检测技术显示出巨大潜力，但实际应用中依然面临诸多挑战。在经济欠发达地区，采购成本和运行费用影响了检测仪器的推广。例如，高效液相色谱仪虽然检测精度高，但设备价格昂贵，使用寿命和维护费用较高，对技术人员的要求也较高^[16]。

在偏远地区，尿液样本的储存和运输条件不足会显著影响检测结果的准确性。研究显示，高温和运输时间过长会导致尿液中碘浓度的偏差达10%~20%，直接影响数据的可靠性。同时，不同检测方法间存在技术差异和标准不统一的问题，导致检测结果间的可比性不足。例如，光谱法和电化学方法在检测极限和灵敏度上的表现存在差异，增加了分析的复杂性，限制了数据的跨区域共享和政策的统一制定。此外，现有技术在基层医疗体系中的适配性不足，如操作复杂的设备在简化操作流程方面仍有较大改进空间。这些问题表明，现有的检测技术在推广普及、成本控制和结果一致性上仍需进一步优化，以满足广泛实际应用的需求^[17]。

3.3 解决方案与技术优化方向

针对当前面临的挑战，需要采取多方面的技术改进和应用策略。一方面，可通过推广经济实用的便携式高灵敏度检测设备，如集成微流控芯片技术的电化学分析仪，降低成本并提升操作便捷性。这些设备不仅适用于低资源环境，还能快速获取高精度结果，为现场筛查提供支持。另一方面，改进样本保存和运输技术，如开发长效防腐剂和小型冷链设备，显著减少样本降解风险，提升检测准确性^[18]。此外，加强检测流程的数字化与自动化，通过引入人工智能算法，可实现数据的实时分析和质量控制，提高整体检测效率。同时，制定国际统一的尿碘检测技术规范，明确不同检测方法的标准操作程序和质量控制要求，可以确保数据在全球范围内的可比性。

在技术研发方面，建议加强对新兴技术的投入，如基于纳米材料的传感器和光纤技术的应用。这些技术具备更高的灵敏度和稳定性，可以显著提升检测性能。在检测设备上，通过跨

学科协作,引入便携式智能终端与无线传输功能,能够实现数据的实时远程共享,为监测系统的智能化提供可能。此外,可考虑开展区域化尿碘监测平台的建设,通过整合检测数据和环境信息,构建动态模型,提供精准的区域干预策略^[19]。未来,可进一步将这些平台与气候、地理和饮食习惯等多因素结合,形成全方位的监测网络,确保碘营养监测的全面性和长效性,为公共卫生干预和政策制定提供可靠支持,同时推动健康差距较大区域的精准补碘项目高效实施。

结合以上分析,高灵敏度尿碘检测技术的未来发展应注重技术创新与实际应用的平衡,推动其在更多领域的普及和深化。建议政府加大资金投入,特别是在经济落后地区,通过补贴仪器费用、培训技术人员等方式,提升尿碘检测能力。社会组织和科研机构可以加强对低成本检测设备的研发与推广,为边远地区的儿童健康监测提供更多选择。同时,鼓励建立区域协作机制,通过共享设备、整合数据资源,提高检测工作的整体效率和覆盖范围。在实践中,可以探索结合多学科方法,如利用流行病学与环境科学联合分析尿碘水平,揭示儿童碘营养状态的复杂影响因素,为制定精细化的补碘策略提供科学支持。此外,应注重宣传教育,通过提高公众对尿碘检测重要性的认识,鼓励家庭参与碘营养监测,形成群体性健康意识^[20]。通过政策、技术和社会层面的共同努力,高灵敏度尿碘检测技术将在保障学龄儿童健康和推动公共卫生目标达成中发挥更大作用。

4 总 结

高灵敏度尿碘检测技术显著提升了儿童碘营养监测的精度与效率。这一技术的进一步发展将在公共健康领域发挥更大作用。随着传感器技术、人工智能和微流控技术的持续突破,尿碘检测有望实现更高灵敏度、更低成本和更广泛的应用普及。特别是在资源匮乏的地区,通过结合便携设备与数据共享平台,检测效率将得到进一步提升。同时,区域监测系统与全球公共卫生网络的构建,将为碘缺乏病的综合防控提供更全面的支持。未来,推动标准化与规范化的检测方法,能够促进不同技术间的互联互通,可进一步优化尿碘检测在学龄儿童健康管理中的应用。此外,更多跨学科合作和大数据分析的引入,将揭示环境、饮食和健康的复杂关系,为碘营养的精准化干预提供重要依据。这些努力将有助于实现全球碘缺乏病的全面消除,保障儿童健康成长和社会的可持续发展。

参考文献

- [1] 彭建勇. 芦溪县学龄期儿童尿碘含量检测及其相关影响因素分析[J]. 现代诊断与治疗, 2024, 35(10): 1427-1430.
- [2] 苟钊, 杨培基, 李劲松, 等. 2018—2022年泸州市8—10岁儿童碘营养状况监测结果[J]. 中华疾病控制杂志, 2024, 28(05): 530-534, 612.
- [3] 苟长春, 袁晓娟, 杨秋香, 等. 2022年云南省德宏州孕妇和儿童碘缺乏病监测结果分析[J]. 中国初级卫生保健, 2024, 38(05): 36-39.
- [4] 吞志辉, 史莹, 武姣姣, 等. 2019—2023年甘肃省灵台县重点人群尿碘检测结果分析[J]. 中国地方病防治, 2024, 39(02): 135-138.
- [5] 陈昔梅, 黄静, 施勇, 等. 2017—2020年南昌市青山湖区重点人群尿碘检测结果分析[J]. 实验与检验医学, 2024, 42(01): 125-127.
- [6] 任艳玲, 翟文杰, 杨芳, 等. 2019—2021年山西省晋中市县区尿碘实验室外质控考核结果分析[J]. 中国地方病防治, 2023, 38(04): 299-301.
- [7] 蔡生花, 胡兰盛, 甘培春, 等. 2017—2022年青海省海南州碘缺乏病实验室外质控网络考核结果分析[J]. 中国地方病防治, 2023, 38(04): 307-308, 357.
- [8] 彭文芳, 周鸿, 胡荷, 等. 2017年—2022年江西省县级尿碘质控考核结果分析[J]. 中国卫生检验杂志, 2023, 33(14): 1767-1770.
- [9] 余志颖, 都海燕, 胡池, 等. 2021年宜昌市碘缺乏病监测结果分析[J]. 巴楚医学, 2023, 6(02): 83-87.
- [10] 陈庆平, 周志鹏, 陈益林, 等. 龙岩市2017—2021年重点人群碘营养状况调查分析[J]. 海峡预防医学杂志, 2023, 29(02): 100-103.
- [11] 王璐, 周讯, 王小琴, 等. 碘元素全自动检测仪器法与行标法测定尿碘对比实验结果分析[J]. 中国地方病防治, 2023, 38(02): 141-143.
- [12] 代涛娟, 宋康. 全自动碘分析仪测定尿碘方法的验证[J]. 疾病预防控制通报, 2023, 38(01): 83-84.
- [13] 何毅霖. 一种全自动尿碘分析仪的研究与开发[J]. 中国机械, 2023, (01): 13-16.
- [14] 蔡生花, 胡兰盛, 孟献亚, 等. 碘元素自动检测仪检测尿碘结果分析[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(06): 502-504.
- [15] 李爽, 李亚楠, 杨佩珍, 等. 特定地区藏族育龄妇女碘营养及甲状腺功能对比研究[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(06): 451-454.
- [16] 史明, 赵锦娜. 青岛市市南区2016—2020年儿童碘缺乏病监测结果分析[J]. 预防医学论坛, 2022, 28(10): 790-793.
- [17] 彭莎莎, 孙宁, 李锐锋, 等. 2016—2021年灵宝市儿童和孕妇碘营养水平分析[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(04): 315-317.
- [18] 阙香宝, 刘玉红, 娄昆雷. 全自动碘分析仪在尿碘考核中的应用分析[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(04): 320-322.
- [19] 徐署东, 李卫东, 丁刚, 等. 人体生物材料中碘含量的检测方法研究进展[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(03): 194-197, 204.
- [20] 吴晓燕, 吴佳妮, 兰莺, 等. 2020—2021年福建省碘缺乏病实验室检测质量分析[J]. 中国地方病防治, 2022, 37(03): 210-211, 214.