

文章编号: 1000-7032(2025)11-2164-16

荧光碳点在毒品检测中的应用研究进展

张爱梅¹, 曹逸莹¹, 魏铄蕴^{1,2*}, 方 圆¹, 马维玲¹, 文 茜¹

(1. 甘肃政法大学 司法警察学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃政法大学 甘肃省证据科学技术研究与应用重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 全球毒品滥用形势日益严峻, 新型毒品层出不穷, 运毒方式愈发隐蔽, 这给毒品查缉工作带来了新的挑战。传统的毒品检测分析方法在样品预处理环节较为繁琐, 且相关检测仪器价格高昂、不便携带, 难以适应现场快速检测的要求。荧光碳点纳米材料因其生物相容性好、抗干扰能力强、前驱体来源广泛和优异的荧光性能等独特的物理化学性质, 成为毒品检测的理想材料。本文简要介绍了碳点的分类与检测毒品的基本原理, 从碳点合成方法、毒品检测机制和检测结果三方面重点阐述了荧光碳点在毒品检测中的应用, 最后对荧光碳点检测毒品技术目前存在的问题进行了探讨, 并展望了其未来发展趋势。

关键词: 荧光碳点; 毒品; 毒品检测; 检测机制

中图分类号: O657.3 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250147 CSTR: 32170.14.CJL.20250147

Research Progress on Application of Fluorescent Carbon Dots in Drug Detection

ZHANG Aimei¹, CAO Yiyi¹, WEI Shuoyun^{1,2*}, FANG Yuan¹, MA Weiling¹, WEN Xi¹

(1. Judicial Police Academy, Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, China.

2. Gansu Province Key Laboratory of Evidence Science and Technology Research and Application,

Gansu University of Political Science and Law, Lanzhou 730070, China)

* Corresponding Author, E-mail: weisy@163.com

Abstract: The global proliferation of illicit drug abuse has reached alarming levels, with emerging synthetic drugs and increasingly sophisticated trafficking methods posing unprecedented challenges to drug interdiction efforts. Conventional drug detection methods can suffer from laborious sample pretreatment protocols and dependence on expensive, non-portable instrumentation, rendering them unsuitable for on-site rapid screening. Fluorescent carbon dots (CDs) have emerged as promising nanomaterials for narcotics detection due to their unique physicochemical properties, including excellent biocompatibility, strong anti-interference capability, diverse precursor availability, and tunable fluorescence characteristics. This review briefly examines the classification of CDs and their fundamental mechanisms in drug sensing. Through comprehensive analysis of CDs synthesis methodologies, molecular recognition mechanisms, and analytical performance metrics, it mainly focused on the progresses of fluorescent carbon dots in drug detection. Furthermore, it addresses current challenges in drug detection technologies based on fluorescent carbon dots and outlines future developmental prospects.

Key words: fluorescent carbon dots; drug; drug testing; detection mechanism

收稿日期: 2025-05-12; 修订日期: 2025-05-26

基金项目: 国家青年科学基金项目(51501042); 甘肃省青年博士支持项目(2025QB-074)

Supported by National Natural Science Foundation of China(51501042); Young Doctor Fund Project of Gansu Province Education Department(2025QB-074)

1 引 言

我国《刑法》第 357 条对毒品的明文规定为“本法所称毒品,是指鸦片、海洛因、甲基苯丙胺(冰毒)、吗啡、大麻、可卡因以及国家规定管制的其他能够使人形成瘾癖的麻醉药品和精神药品”。一些麻醉药品和精神药品在医疗领域是重要用药,一旦流入非法渠道被不法分子利用,就会变成危害公共健康的毒品。根据联合国毒品和犯罪问题办公室(United Nations Office On Drugs and Crime)发布的 2024 年《世界毒品问题报告》,全球毒品问题受到新型毒品的出现、部分国家大麻合法化以及可卡因产量激增等因素影响而呈现持续恶化趋势,制毒、贩毒网络愈发灵活,由此引发的社会问题也日益凸显。2024 年 6 月 19 日,中国国家禁毒委员会办公室发布的《2023 年中国毒情形势报告》显示,截至 2023 年底,全国共破获毒品犯罪案件 4.2 万起,抓获犯罪嫌疑人 6.5 万名,缴获毒品 25.9 吨,同比分别上升 12.6%、21% 和 18%,这表明毒品犯罪形势依然严峻,因此毒品检测查缉成为禁毒工作的重要环节。传统的毒品检测技术,如液-质联用法^[1-2]、气-质联用法^[3-5]、离子迁移率光谱^[6]、拉曼光谱^[7]以及 X 射线衍射法等技术对大多数毒品可以准确识别,但同时也存在一定缺点,如检测时间长、检测成本高、需要专业的操作人员等。纳米材料因其独特的物理化学性质(如高比表面积、表面可修饰性、光学/电学特性等)可以对毒品分子进行准确识别,尤其在灵敏度和选择性方面表现突出,故而纳米技术的迅速发展有望弥补这些缺点。

目前,检测毒品的纳米材料主要有金属纳米材料(如金纳米粒子(Gold nanoparticles, AuNPs)^[8-9]、银纳米粒子(Silver nanoparticles, AgNPs)^[10]、磁性纳米颗粒(Magnetic nanoparticles, MNPs)^[11]、碳纳米材料等)。但是, AuNPs、AgNPs 等纳米粒子存在制备成本高、具有细胞毒性等缺点,而碳点(Carbon

dots, CDs)是公认的无毒新型荧光碳纳米材料^[12],并且具有合成原料广泛、生物相容性好、光致发光可调(Photoluminescence, PL)、量子产率高(Quantum yield, QY)等优异性能,故而在检测毒品领域展现出巨大潜力,逐渐成为国内外专家学者的研究热点。利用 CDs 优异的荧光性能检测毒品分子,可以满足现场快速检测需求、缩短检测时间、降低检测成本等,而其荧光变化取决于各种参数,包括合成方法、碳源前驱体材料、表面状态和杂原子掺杂等。CDs 的合成方法主要包括自上而下和自下而上两种^[13]。自上而下的合成方法主要是破坏宏观尺寸碳骨架结构以得到 CDs 材料,其实验条件苛刻、成本较高;自下而上的合成方法则是对较小的碳颗粒进行修饰和钝化处理,其合成步骤简单、快捷,具有成本低、可规模化生产、可重复性强、环境友好等优点。不同的合成方法可以设计产生具有特定带隙、化学官能团等预期化学结构的 CDs 以满足检测需求。

本文阐述了荧光碳点检测毒品的基本原理,系统总结了荧光碳点在毒品检测中的应用研究进展,对目前存在的问题进行了讨论并展望了荧光碳点材料在毒品检测中的未来发展方向。

2 荧光碳点分类

广义来说,所有主要含碳元素并且具有纳米尺寸的颗粒均可以称之为碳点。狭义上来说, CDs 是指尺寸小于 10 nm 的新型纳米颗粒,其化学结构以 sp²/sp³杂化为主^[14]。自 2004 年 CDs 被首次发现以来,研究人员不断从合成方法、碳源前驱体选择、反应条件优化等方面寻求创新与改进,以制备出质量更好、性能更优的碳点材料。碳点根据不同的形成机理、微观结构和性能可大致分为石墨烯量子点(Graphene quantum dots, GQDs)、碳量子点(Carbon quantum dots, CQDs)、碳纳米点(Carbon nanodots, CNDs)、碳化聚合物点(Carbonized ployer dots, CPDs)四类,如表 1 和图 1 所示。

表 1 荧光碳点的分类及性能特点

Tab. 1 Classification and performance characteristics of fluorescent carbon dots

碳点	结构特点	性能特点	参考文献
零维(0D)碳点,横向尺寸小于 20 nm,高度小于 5 层石墨烯(≈2.5 nm)的小石墨烯碎片,边缘连接着化学基团,具有保留的石墨结构域(sp ² 结构域),这些特性赋予其量子约束和边缘效应		优异的生物相容性、荧光性能和无毒性,可以单独用作纳米酶或电催化剂等	[15]
准球形碳纳米粒子,其表面具有明显的晶格和化学基团,具有基于 sp ² 和 sp ³ 结构域混合物的晶核,通常在横向尺寸上明显大于纵向尺寸,这些特性赋予其本征态发光和量子限制效应		高结晶性、良好的分散性、光致发光性能、优异的电子性能	[16-17]

表 1 (续)

碳点	结构特点	性能特点	参考文献
CNDs	碳化程度高,通常呈准球形或球形,表面有一些化学基团,不同类型的 CNDs 荧光发射中心位置不同,从而具备丰富的荧光特性,但通常没有明显的晶格结构和聚合物特征	毒性低、生物相容性高、化学惰性和溶解性好	[18-19]
CPDs	通过线状聚合物或单体的聚集、交联而具有聚合物/碳杂化结构,其表面由丰富的官能团、聚合物链和碳核组成,CPDs 不仅具有传统碳化 CDs 优异的光学性能,而且继承了聚合物的性能	在弱酸性、碱性和金属离子环境中具有稳定的荧光特性、体外无毒性	[20-21]

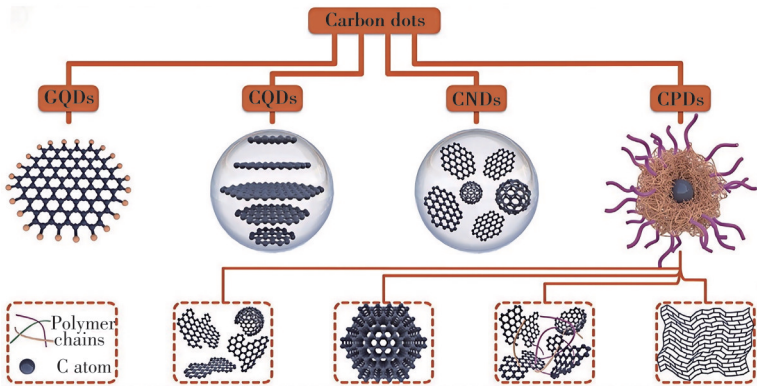


图 1 碳点的分类及结构示意图^[22]

Fig.1 Classification and schematic structure of carbon points

2.1 无机碳点与有机碳点

碳前体的选择对 CDs 的结构和荧光性能起着决定性作用,按前驱体不同可以将其分为无机 CDs 和有机 CDs。无机碳源主要包括石墨、活性炭和蜡烛灰等,通过对其进行剥离、纳米切割、分解、融合或碳化等方法生成无机碳点纳米材料。然而,这些实验条件苛刻,操作复杂且设备昂贵,制备的 CDs 在形貌和尺寸上难以精确控制,从而限制了其实际应用^[23]。Zhang 等^[24]通过电化学刻蚀石墨电极得到碳点溶液,并将浓度为 1.2 mg/mL 的 CDs 滴在玻璃片上干燥成膜。该膜表面的含氧基团对湿度具有敏感性,且凭借其高比表面积和优异的稳定性,成为气体传感器的理想选择。Lin 等^[25]则采用剥离多壁碳纳米管或石墨片制备了平均尺寸约为 18.5 nm 的水溶性单层 GQDs 并探讨了其发光机理,但 QY 只有 6.53%。

与无机碳源相比,有机碳源来源广泛,主要包括有机小分子材料、芳香有机分子材料、聚合物和生物质材料。有机小分子材料来源主要是柠檬酸。Majid 等^[26]通过热解柠檬酸制备 GQDs,首先采用 NaBH₄ 对其进行还原制得 rGQDs、在此基础上通过乙烯基硅烷化处理得到 vGQDs,再将其与甲基苯丙胺模板聚合,使用甲醇和乙酸(9:1)索氏萃取除去模板后得到尺寸约为 5 nm 的 GQDs@MIP 材料。通过紫外可见吸收光谱和荧光光谱验证 GQDs@

MIP 在 365 nm 激发波长下,在 420 nm 处有一个荧光发射峰,当加入甲基苯丙胺时荧光强度被猝灭。该纳米传感器可检测水溶液中的甲基苯丙胺,检出限为 1.7×10⁻³ mg/L,如图 2 所示。芳香有机分子材料主要是苯二胺,因氨基的取代位置不同,故可以合成不同的 CDs 异构体,所以它们也被认为是探讨 CDs 荧光机理的理想前体^[27]。柠檬酸、芳香有机分子材料均为化学前驱体,用其合成碳点不够绿色环保。相比之下,生物质通常是指生物废弃物材料,如蔬菜残渣^[28]、农作物废弃根茎叶、家禽皮毛、渔业残渣等,主要由纤维素、半纤维素、木质素、灰分、蛋白质等成分组成^[29]。将农业、工业固态废弃物^[30]转变为具有高性能、高附加值的新型碳点材料,符合绿色可持续发展理念,且表现出极佳的生态友好性及生物相容性,在物理、化学、材料和生物医药^[31]等诸多领域有着广泛的应用^[32]。本课题组运用溶剂热法,先后以天然花粉和植物麦冬叶为原料,成功制备出荧光碳量子点和固态荧光碳点粉末。经实验验证,该荧光碳点纳米材料粉末可对各类客体表面的潜指纹进行有效刷显,完全满足指纹鉴定的技术要求。该纳米材料制备工艺简便、成本低廉且环保无毒,适合应用于常规指纹显现工作,展现出巨大的实际应用价值^[33-34]。

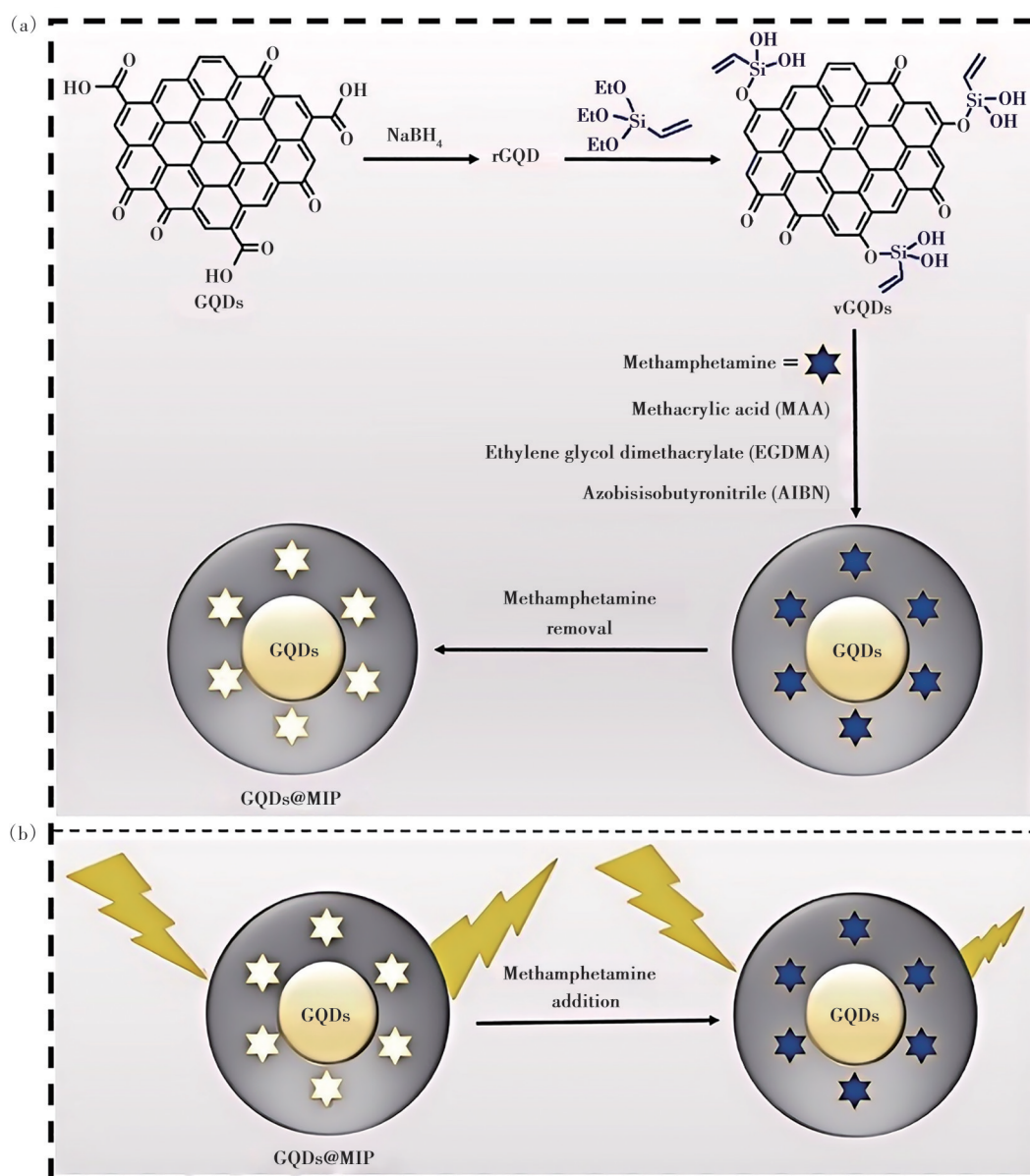


图2 GQDs@MIP检测甲基苯丙胺示意图^[26]((a)为GQDs@MIP合成过程;(b)为GQDs@MIP检测甲基苯丙胺过程示意图)

Fig.2 Schematic diagram of methamphetamine detection by GQDs@MIP^[26]((a) is the synthesis process of GQDs@MIP; (b) is the schematic diagram of methamphetamine detection process by GQDs@MIP)

2.2 掺杂碳点

元素掺杂也会显著影响碳材料的特性。为改善CDs的表面缺陷并提升性能,可以进行杂原子掺杂。杂原子掺杂种类丰富,可以是单一杂原子掺杂、多种杂原子共掺杂,也可以通过控制其杂原子配比制备出不同荧光性质的碳点材料,不同的杂原子掺杂会提高碳材料的量子产率、荧光性能以及改进表面缺陷等。具体而言,如果向 sp^2 杂化的碳框架中引入杂原子,由于碳原子和杂原子之间的电负性不同,从而造成电子离域,邻位碳原子将可能带上正电荷或负电荷,形成表面活性位点;并且还能够调整纳米粒子的晶面间距、促进原子

核增大,使碳点拥有更多活性位点进而提升其亲水性,亲水性的增强又有助于改善分散性,而分散性提升则进一步提高了发光强度^[35-36]。在不同的杂原子中,氮掺杂的CDs表现出较高的QY并且可以改变其光学性质,与此同时有利于稳定CDs表面缺陷从而提高荧光发射^[37-38]。磷元素的掺杂可以产生大量缺陷,形成的磷酸基团能够有效地改变碳材料的化学反应活性和电子特性^[39]。当氮、磷、硫等元素同时掺杂到碳骨架中时,通常会产生不同杂原子之间的协同效应导致电子再分配,从而改善电子活性,并进一步提升CDs材料的光学性能^[40]。Razlansari等^[41]以硫脲和抗坏血酸为原料,

采用微波辅助法一步合成 QY 为 28% 的硫氮共掺杂碳点(S,N-CDs)。通过荧光猝灭检测乙氧嘧啶、氯丙嗪和异丙嗪,检出限分别为 1.53, 1.66, 2.47 $\mu\text{mol/L}$ 。金属元素 Fe、Cu、Zn 等的掺杂不仅可以提高 CDs 的光学特性,还可以为 CDs 带来新颖、独特的功能^[42],如通过预防感染、促进成纤维细胞增殖等^[43]。金属和非金属共掺杂 CDs 则可以通过调整其组成结构或者诱导多环芳烃结构形成新的表面态来增强荧光,具有响应时间快、检测限低、高灵敏度和选择性等特性^[44]。

3 荧光碳点检测毒品基本原理

荧光碳点材料检测毒品是通过与毒品分子特异性结合(如共价键、静电吸附作用、抗原抗体特异性结合作用等),引发荧光信号变化,从而实现对其的灵敏检测^[45-46]。当碳点或碳点复合材料与目标物结合时,通常表现为荧光猝灭(turn-off)、增强(turn-on)或者先猝灭后恢复(on-off-on),而究其本质,则主要为以下四种机制:内滤效应(Internal filter effect, IFE)、荧光共振能量转移(Forster resonant energy transfer, FRET)、光致电荷转移(Photo-induced electron transfer, PET)、聚集诱导猝灭效应(Aggregation-caused quenching, ACQ)。

3.1 内滤效应

IFE 是一种荧光自猝灭现象,当荧光体浓度较高或与其他吸光物质共存时,荧光体或其他吸光物质会吸收激发光或发射光,从而导致荧光强度减弱^[47-49]。该效应源于辐射跃迁过程,且与荧光团和吸收剂之间的光谱重叠程度密切相关。在 IFE 中尽管碳点的荧光可能会被猝灭,但其荧光寿命保持不变。影响荧光强度变化的因素包括荧光团的浓度、粒径及是否存在杂质。当荧光团浓度过高或粒径过大时,部分分子可能会被遮挡无法吸收激发光,或被遮挡的分子会吸收已激发分子的发射光,导致荧光强度变化。Hashimi 等^[50]以牛奶为前驱体,通过溶剂热法制备了 N 掺杂的 CDs,又因 N-CDs 作为荧光团,其激发光谱与吸收剂四环素的吸收光谱重叠,因此可以利用 IFE 检测药物制剂中的四环素。同样,罗林团队^[51]采用水热法以邻苯二酚为碳源、乙二胺为氮源制备了氮掺杂绿色荧光 N-CDs,利用碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, ALP)能催化水解对硝基苯磷酸二钠(PNPP)生成对硝基苯酚(PNP),且 PNP 的吸收光谱与 N-CDs 的激发光谱重合,故将 PNP 作为光吸收剂,通过 IFE 竞争性与 N-CDs 吸收激发光,从而导致 N-CDs 荧光猝灭,建立了一种可快速、高灵敏检测鲜牛奶中 ALP 活性的荧光分析方法,检测机理如图 3 所示。

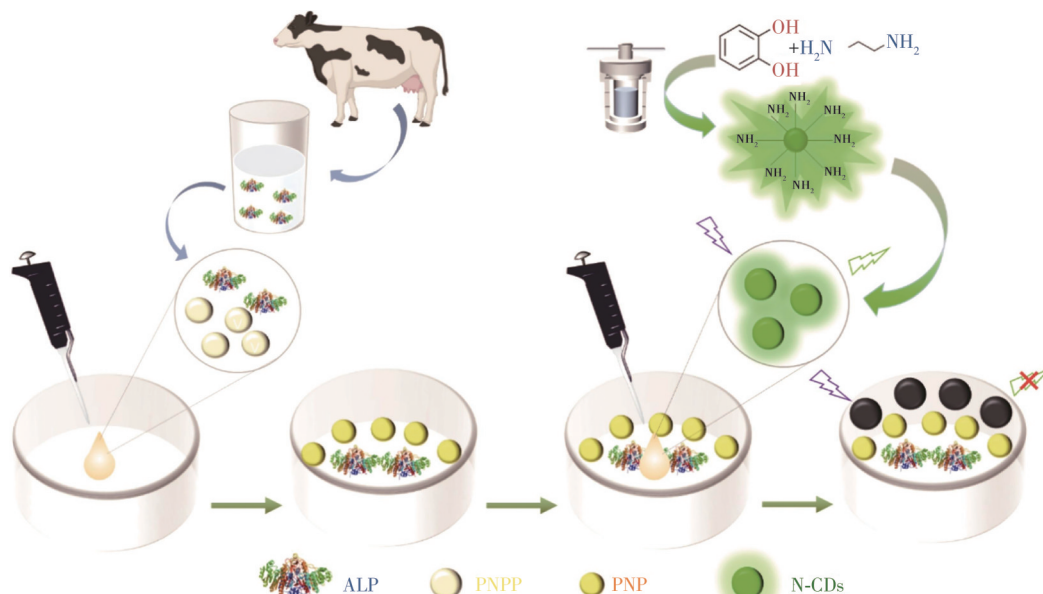


图 3 基于 IFE 碱性磷酸酶荧光分析方法原理图^[51]

Fig.3 Schematic diagram of IFE-based alkaline phosphatase fluorescence analysis method^[51]

3.2 聚集诱导猝灭效应

ACQ 是指荧光材料在稀溶液中显示出较强的荧光强度,但在浓溶液或固态时,荧光强度会降

低甚至消失^[52-53]。其原因有二,一是荧光粒子在浓度增高时相互碰撞,导致自猝灭;二是荧光分子与其他分子碰撞引起非辐射能量转移,进而导致

荧光猝灭。除此之外,氢键作用、 π - π 堆叠、静电作用都会对这个过程产生一定影响,其检测机理示意图如图 4(a)所示。利用该原理检测毒品目标物时,毒品分子与 CDs 可通过化学键、静电作用等方式促进 ACQ 发生,从而利用 CDs 荧光 turn-off

来检测是否存在毒品目标物;也可以通过毒品目标物的加入调控 CDs 表面态(如官能团的变化)、抑制非辐射能量转移、改变表面能级等方式阻断其 ACQ 的发生,从而实现 CDs 荧光 on-off-on 的变化,以此达到检测目的。

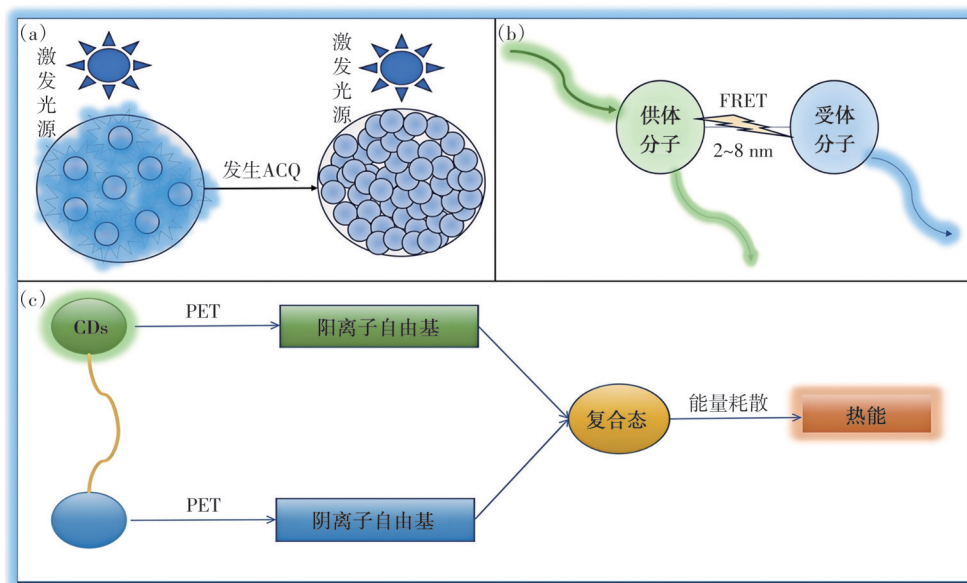


图 4 (a)ACQ 原理示意图;(b)FRET 原理示意图;(c)PET 原理示意图

Fig.4 (a)Schematic diagram of ACQ principle. (b)Schematic diagram of FRET principle. (c)Schematic diagram of PET principle

3.3 荧光共振能量转移

FRET 是指当一个荧光分子(供体)的发射光谱与另一个荧光分子(受体)的吸收光谱存在一定重叠,且两个分子之间的距离合适时(一般为 2~8 nm),供体的激发能量会促使受体发出荧光,同时供体的荧光强度减弱^[54],如图 4(b)所示。FRET 是一种非辐射能量转移过程,通过供体和受体之间的偶极-偶极相互作用实现。检测毒品时,一般 CDs 为供体分子,受体分子则可以是毒品分子,也可以是金/银纳米粒子、金属化合物纳米片等;当毒品分子直接作为受体分子时,CDs 与毒品分子发生 FRET 导致 CDs 荧光 turn-off;当金/银纳米粒子、金属化合物纳米片等作为受体分子时,毒品分子则与 CDs 通过官能团、氢键作用等特异性结合从而阻断 CDs 与受体分子之间的 FRET,从而实现荧光的 on-off-on 变化来检测毒品分子。

3.4 光致电荷转移

PET 是指在光照条件下,电子在分子内部或分子之间的转移过程,这是一种失活现象^[55-56]。给出电子的分子称为电子供体,接受电子的分子称为电子受体,若供体与受体分别为两个分子,则为

分子间 PET;若供体与受体通过某种方式连接,则为分子内 PET。当 CDs(电子供体或受体)和目标毒品分子(电子受体或供体)之间发生 PET,形成阴阳离子自由基,发生氧化还原反应从而将光能转化为化学能,导致 CDs 不发射或仅发出微弱的荧光^[57-58],如图 4(c)所示。因此,可以利用 CDs 与目标毒品结合或反应导致荧光猝灭,或者 PET 被阻断,CDs 的荧光发射得以恢复来设计 PET 荧光分子探针,达到检测目的。

碳点荧光变化过程中通过目标毒品的加入阻断或者是促成这些机制,实现荧光 turn-off、turn-on 或者 on-off-on 而达到毒品检测目的。除上述四种检测机制外,CDs 表面官能团和药物部分之间的氢键作用^[59-60]、表面态发光^[61]、扶手椅或锯齿形的边缘结构、共轭结构^[62]、分子状态、环境效应^[63]及量子尺寸效应^[64]、聚集诱导发射^[65]等,这些因素均会使碳点的光学性质对表面缺陷、官能团和外部环境改变更为敏感,从而促进碳点的荧光变化。荧光碳点检测毒品机制示意图如图 5 所示(其中 a 为 IFE^[51], b 为 ACQ, c 为 FRET, d 为 PET 的原理示意图)。

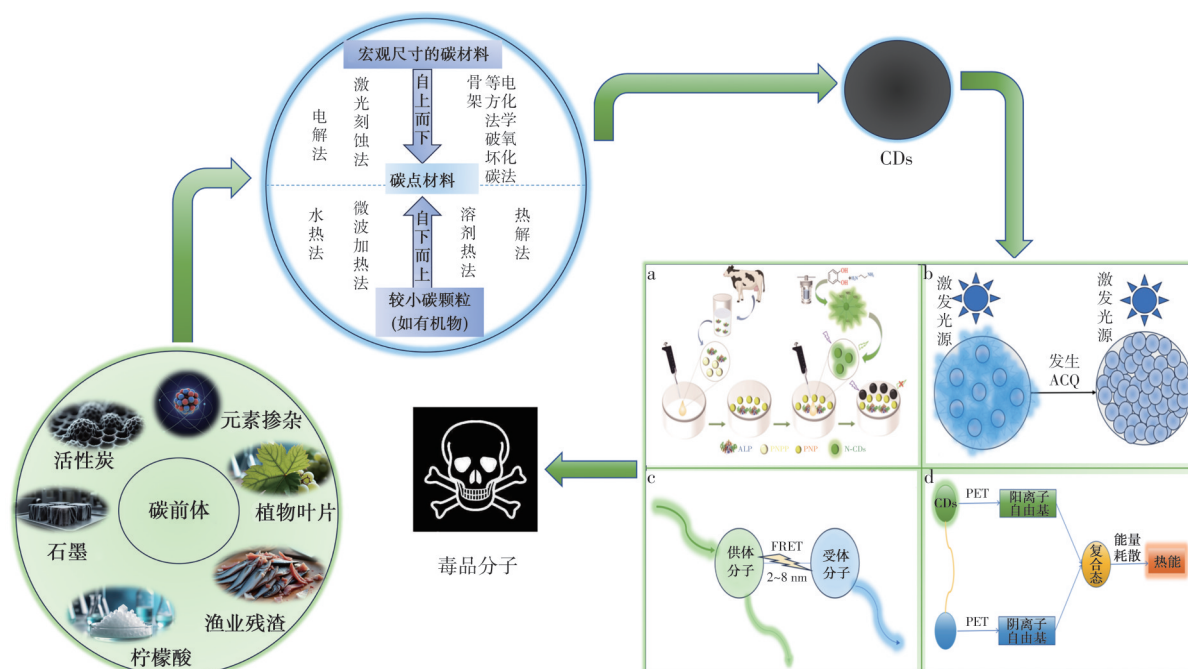


图5 CDs检测毒品过程示意图(其中a为IFE^[51],b为ACQ,c为FRET,d为PET的原理示意图)

Fig.5 Schematic diagram of the process of detecting drugs by CDs(a is IFE^[51], b is ACQ, c is FRET, d is PET)

4 荧光碳点在毒品检测中的应用研究进展

毒品检测主要是指对毒品前体、毒品原体及其代谢物的分析。根据人体对毒品的依赖性,毒品可以分为麻醉药品(以生理依赖为主)和精神药品(以心理依赖为主)。荧光碳点作为一种新型纳米材料,在毒品快速检测领域展现出良好前景。目前,研究人员将荧光碳点技术与其他检测方法结合,已成功应用于海洛因、可卡因、甲基苯丙胺等多种常见毒品的检测^[66]。这些应用显著提升了检测的灵敏度和准确性,同时降低了检测成本和时间,便于在各种样本中识别毒品,包括人尿、唾液、血浆甚至废水等。

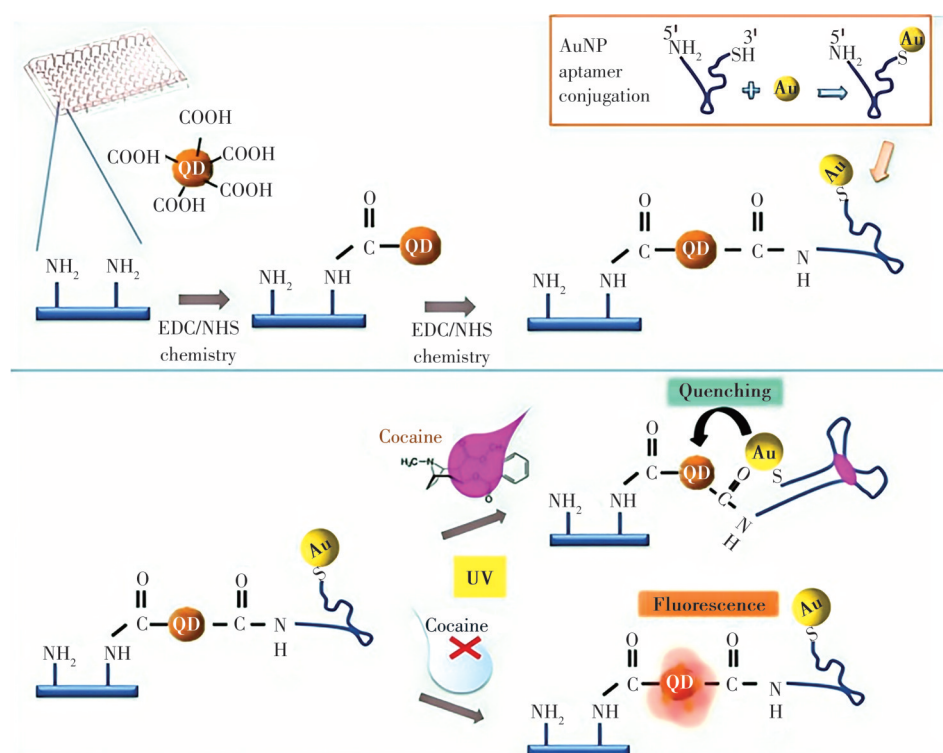
4.1 麻醉药品检测

麻醉药品是指对中枢神经系统具有麻醉作用的药物,在医疗领域这类药物主要用于手术麻醉和缓解剧烈疼痛。然而,一旦这些药物流入非法渠道或被滥用,不仅会严重损害滥用者的身体健康,威胁生命安全,还会引发许多社会问题,因此国家对其实施严格监管。传统的麻醉药物通常来源于天然植物,主要可以分为以下几类:可卡因类(如可卡因和古柯碱)、阿片类(包括天然阿片及其提取的有效成分)和大麻类(包括各种大麻制剂)。

4.1.1 可卡因类

可卡因(Cocaine)也称为古柯碱,是一种天然强效的中枢神经兴奋剂。市售的可卡因通常含有苯甲酰甲基芽子碱、芽子碱(Ecgonine)、苯甲酰芽子碱(Benzoylecgonine, BZE)以及肉桂酰可卡因等成分。Guler等^[67]构建了CQDs适配体折叠传感器(AFSD),在市售多聚赖氨酸包被的96孔板表面修饰CQDs,再通过共价键将其与适配体功能化的AuNPs纳米粒子连接,如图6所示。AuNPs作为猝灭剂,当可卡因或BZE存在时适配体结构改变,致使AuNPs与CQDs相互作用引发荧光猝灭。可卡因和BZE的线性范围分别为1.0~10 nmol/L和1.0~25 $\mu\text{mol/L}$,荧光猝灭程度与分析物浓度相关,其检测限分别为 $4.19 \times 10^{-4} \text{ mg/L}$ 和0.600 mg/L。并进行了对照实验和干扰实验,将已知浓度的BZE/可卡因添加到合成尿液样本中,并使用高效液相色谱法(HPLC)将所得计算结果与已知浓度和结果进行比较。合成尿液中BZE(2.5 $\mu\text{mol/L}$)和可卡因(5.0 nmol/L)的回收率分别为94.93%和96%。

简而言之,适配体是具有高亲和力的单链核苷酸,能够通过空间构象互补的方式特异性结合靶标分子^[68]。AuNPs因其较大的表面积、良好的生物相容性以及独特的电子和光学特性,能够有效地与特异性识别分子(如抗体、适配体或小分子探针)结合。因此,采用AuNPs作为猝灭剂,可以提

图 6 基于适体折叠的传感装置结构和检测机制示意图^[67]Fig.6 Schematic diagram of the structure and detection mechanism of the aptamer-folding based sensing device^[67]

高适配体传感器检测毒品的选择性和灵敏性。与使用抗体和酶的碳纳米材料相比,基于适配体的碳点纳米材料在结构上更为灵活,设计过程简便且化学性质稳定,理论上能够在体外针对任意靶物质开展特异性检测^[69-70]。

4.1.2 阿片类

吗啡是一种从罂粟植物乳汁中提取得到的天然阿片类生物碱,主要用于医学止痛和镇静。根据纯度不同,可将其分为:粗制吗啡即一号海洛因、二乙酰吗啡碱(二号海洛因)以及通过添加稀释剂修饰得到三号海洛因,四号海洛因则是在二号海洛因的基础上经过提纯、沉淀和干燥后得到的白色细腻透明粉末。Masteri-Farahani等^[71]采用热解法从柠檬酸中合成了GQDs,并通过交联剂形成酰胺键将其与抗吗啡抗体偶联。在300~400 nm不同波长的激发下,在360 nm处出现最大发射峰。被抗吗啡功能化后,GQDs由于发生FRET而出现荧光猝灭。当加入吗啡后,吗啡与抗吗啡抗体特异性结合阻断了FRET机制,从而使GQDs的荧光恢复,实现了对吗啡的特异性检测。除了毒品犯罪外,一些非法商家和餐馆为了追逐利润,可能在火锅和其他食材中添加罂粟壳及其提取物,因此检测食品中是否含有吗啡对于

食品安全监管至关重要。Zhang等^[72]开发了以CdSe/ZnS量子点作为荧光标记物检测吗啡的荧光免疫测定法(FLISA)。但由于CdSe/ZnS量子点具有毒性,故该研究团队^[73]又以柠檬酸为碳源、乙二胺为氮源,通过一步水热法合成了新型水溶性蓝色荧光CDs(激发波长350 nm、发射波长440 nm),并利用戊二醛作为偶联剂将CDs与抗吗啡抗体结合,采用免疫吸附荧光法测定火锅汤底中的吗啡含量。在最佳条件下,线性范围为 $3.2 \times 10^{-4} \sim 10$ mg/L ($R^2=0.992$),检测限为0.3 mg/mL,并用HPLC验证了其检测的准确性。

与Masteri-Farahani的研究相比,Zhang合成的CDs在复杂样品中对吗啡的检测表现出更强的抗干扰性和更高的灵敏度。两者都利用抗原与抗体的特异性结合来实现对毒品分子的精准识别。这表明抗体偶联的CDs不仅保留了其独特的荧光特性和抗原抗体结合的特异性,还可以通过更换不同的抗体,扩展对多种毒品的检测能力,有望拓宽CDs在毒品检测中的应用范围。目前,利用荧光碳点进行麻醉药品检测的研究相对较少,这为荧光碳点材料的检测应用开辟了一个值得关注的新方向。表2是利用荧光碳点检测不同样品中麻醉药品的代表性研究。

表 2 荧光碳点检测麻醉药品的代表性研究

Tab. 2 The representative study of fluorescent carbon spot detection of narcotic drugs

碳源前驱体	制备方法	检测样本	目标物	荧光变化	检出限/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	参考文献
羧基功能化的 CdSe/ZnS 量子点	成品量子点	尿液	可卡因 BZE	turn-off	可卡因: 4.19×10^{-4} BZE: 0.600	[67]
柠檬酸	热解法	吗啡水溶液	吗啡	turn-on	17	[71]
羧基功能化的 CdSe/ZnS 量子点	成品量子点	火锅汤底	吗啡	turn-on	2.7×10^{-4}	[72]
柠檬酸、乙二醇	水热法	火锅汤底	吗啡	turn-on	3×10^{-4}	[73]

4.2 精神药品检测

精神药品是能直接使中枢神经系统兴奋或抑制的药物,根据人体对其产生的依赖性和对人体健康危害程度不同,可将其分为一类和二类精神药品。国家药品监督管理局、国家卫生健康委员会和公安部会根据这些药物的危害性和滥用情况进行动态调整。

4.2.1 新精神活性物质

新精神活性物质(New psychoactive substance, NPS),也被称为“策划药”或“实验室毒品”,包括卡西酮、氯胺酮和苯二氮草类等常见药物。这类物质能让人产生强烈的兴奋、致幻,也可能导致偏执、焦虑、恐慌和被害妄想等反应并引发恶性暴力犯罪。此外,NPS常被伪装成糖果、饮料或贴纸等形式,对青少年也造成了极为恶劣的影响。

氯胺酮(Ketamine, KET)其物理形态通常为白色粉末,因其英文名称首字母为“K”而俗称“K粉”,滥用后可能导致神经中毒反应和精神分裂症状,表现为幻觉和运动功能障碍等。2001年,KET被国家食品药品监督管理局列入国家第二类精神药品进行管理,2003年公安部将其纳入毒品范畴,随后在2004年又将其升级为第一类精神药品进行管理^[74]。Li等^[75]以葡萄糖为碳源、聚酰胺(PAMAM)为钝化剂,通过一步水热法合成水溶性的PAMAM-CDs纳米颗粒,再将其滴在电沉积金纳米颗粒薄膜(GNP)表面干燥得到富胺PAMAM-CDs/GNP膜电极,抗氯胺酮抗体则通过戊二醛结合于PAMAM-CDs/GNP上。由于PAMAM-CDs与金纳米粒子的协同作用,纳米复合膜的发光显著增强。当体系中存在KET时抗原抗体特异性结合,导致荧光猝灭,从而实现血液样品中KET的检测。在血浆样品中其加标回收率为93.9%~102.6%,相对标准偏差(RSD)为4.6%。Yehia等^[76]则开发了一种基于纸基微流控装置的三模态传感器,结合电位、荧光和比色检测,用于现场检测饮料中的

KET。该装置使用聚苯胺纳米分散体作为导电聚合物,结合USB插头连接器制成离子感应纸电极,碳点-金纳米颗粒和硫氰酸钴分别用于荧光和比色检测,从而提高检测效率和特异性。在荧光传感器设计中,采用柠檬酸和尿素制备CDs,当加入AuNPs后,CDs的羧基与带负电荷的AuNPs之间存在静电斥力且二者光谱存在重叠,故发生IFE机制从而使荧光猝灭。当在CDs-AuNPs体系中加入KET后,KET的氨基与AuNPs表面强烈结合降低了单个AuNPs之间的静电斥力,AuNPs发生聚集导致IFE被破坏,碳点荧光恢复,KET检出限为 $2.0 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 。电位和比色检测的结果则可以进一步证实样品中KET的存在,防止出现假阳性结果。

苯二氮草类药物(Benzodiazepines, BZDs)是一类具有镇静催眠作用的中枢抑制剂,其核心化学结构为苯环与二氮杂草环的融合。Yen等^[77]以D-苯丙氨酸为碳源制备了在甲苯中分散良好且稳定的疏水碳点(h-CDs),结合液液萃取(LLE)技术检测饮料中的BZDs。当药物与碳点相互作用时会发生电子转移,导致荧光turn-off,在溶液浓度为33.9~296.3 $\mu\text{mol/L}$ 范围内,实现了对红酒($R^2 = 0.99$)、威士忌($R^2 = 0.99$)、橙汁等饮料中BZDs的精准检测;且在不同样品中其PL猝灭率不同,红酒(22.5 $\pm$ 1.1)%,橙汁(23.3 $\pm$ 1.0)%,威士忌(23.5 $\pm$ 1.4)%。这提升了药物性犯罪现场饮料检测分析的时效性与取证可靠性。

卡西酮(Cathinone)是一种在阿拉伯茶中发现的一元胺生物碱,主要作用于中枢神经系统,能够通过影响神经递质的释放产生麻醉、缓解疼痛和调节心情等效果。在卡西酮的基础上,通过特定化学反应可以合成甲卡西酮(俗称丧尸药)、4-氯乙卡西酮等毒品。Yen等^[78]将CDs沉积在固体油墨印刷制作的圆孔图案色谱纸上制备了碳点功能化纸(CDFPs)。利用碳点与酮基的相互作用,CDs将其从酮型还原为羟基型并发生电子转移,

通过荧光显著猝灭实现了对 4-氯乙卡西酮的筛选。采用紫外灯在 254 nm 处激发时,随着 4-氯乙卡西酮浓度的增加,CDs 上 CDs 的 PL 强度降低,在 0.5~10.0 mmol/L 范围内呈线性关系($R^2=0.95$)。相比之下,Ling 等^[79]以 Fe_3O_4 为载体,L-组氨酸、乙烯亚胺聚合物为碳源,通过一步水热法制得 CDs 并结合分子印迹技术(MIPs)制得了磁性金属离子印迹聚合物($\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MIPs@CDs}$),利用 CDs 表面的羟基与甲卡西酮的氨基之间发生 PET,成功用于岳麓

区岳北苑、阳湖和徐家湖污水泵站污水样品中甲卡西酮的检测,其浓度分别为 4.80,15.33,8.59 nmol/L,与液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)测试的数据一致,并且对实际污水样品中甲卡西酮的净化吸附量约为 0.27 mg/g。该聚合物不仅能够通过其表面识别腔与甲卡西酮特异性结合导致荧光猝灭以实现检测,还能利用其空腔的吸附能力净化污水,并可在外加磁场作用下实现回收再利用,检测机理如图 7 所示。

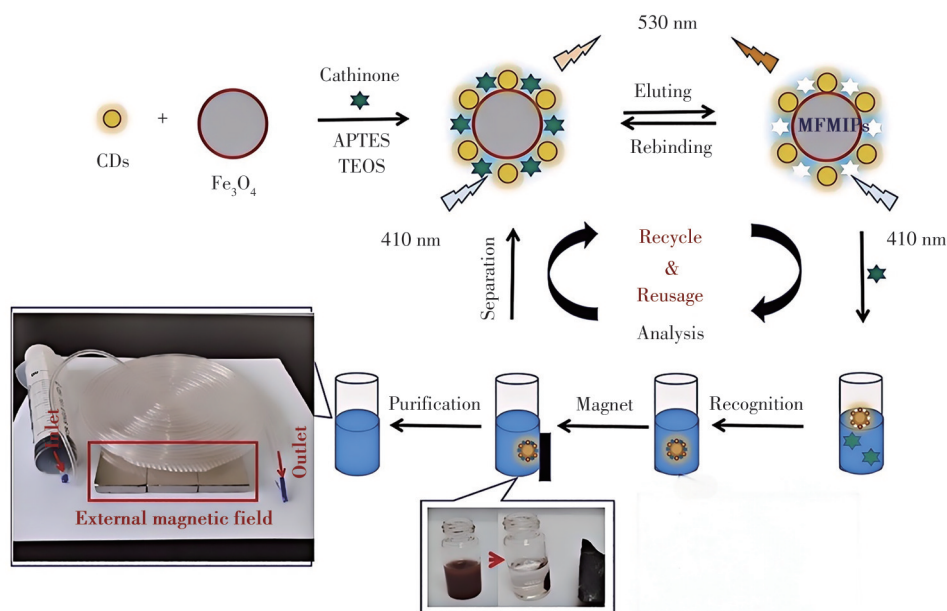


图 7 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MIPs@CDs}$ 基于 PET 检测污水中甲卡西酮传感机理示意图^[79]

Fig.7 Schematic diagram of the sensing mechanism of $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-MIPs@CDs}$ for PET-based detection of methcathinone in wastewater^[79]

综上所述,碳点表面分布着大量诸如羟基、氨基、羧基、羰基等作为表面活性位点,这一结构使得 CDs 易于表面修饰,从而表现出优异的光学传感功能。同时,这些官能团可与毒品分子上的特异性基团产生相互作用,因此可以通过荧光信号的变化实现对复杂样本中毒品的高效分析与筛选^[80-81]。

4.2.2 以甲基苯丙胺为代表的合成毒品

合成毒品是以化学合成为主的一类精神药品,它可以直接影响中枢神经系统使之兴奋、致幻和抑制等。由于这些毒品常在娱乐场所出现,因此也被称为“俱乐部毒品”或“假日毒品”。常见的合成毒品包括甲基苯丙胺、麻古以及摇头丸等,因此对其检测和管控显得尤为重要。

甲基苯丙胺(Methamphetamine, METH)是一种无味或微有苦味的透明结晶体,纯品形似冰,

故俗称冰毒。一般可通过鼻吸、烫吸、注射等方式滥用,主要作用于中枢神经系统和大脑皮层,是仅次于大麻的第二大滥用药物。Kim 等^[82]以尿素和柠檬酸为碳源采用一步水热法合成 QY 为 30% 的氨基功能化碳点(A-CDs)。A-CDs 表面富含胺基和羧基,与甲基苯丙胺前体即苯丙-1,2-二醇(pac-二醇)和苯丙酮(P2P)的羟基、酮基通过氢键结合,导致电荷转移引起荧光猝灭,且猝灭程度与前体浓度相关,pac-二醇和 P2P 检出限分别为 2 $\mu\text{g/mL}$ 和 3 $\mu\text{g/mL}$ 。为进一步提高检测准确性,Zargar 等^[83]以柠檬酸、乙二胺为原料采用水热法合成 CDs,利用该材料表面的羧基可将其连接在氨基功能化的纤维素纸表面,再将 METH 适配体通过共价键修饰在碳纳米材料表面,制成适配体-碳纳米材料修饰的纤维素纸,实现了对唾液和血液中 METH 的有效分析。Saber 等^[84]基于

FRET原理构建了一种快速检测 METH 的生物质荧光碳点纳米传感器。该传感器先以葡萄叶为前驱体通过水热法合成生物质蓝色荧光 CDs,并在其表面通过化学偶联修饰适配体。利用 CoOOH 纳米片作为荧光猝灭剂, CDs 标记的 METH 适配体作为荧光团。在体系中无 METH 时, 适配体上的 CDs 通过范德华力吸附在 CoOOH 纳米片表面发生 FRET 导致荧光猝灭; 加入 METH 后, 标记的 CDs-适配体与 CoOOH 纳米片分离, 荧光恢复, 且荧光强度与其浓度相关。在最优条件下, 检测限为 1 nmol/L, 动态检测范围为 5~156 nmol/L, 以此实现对血浆样品中 METH 的检测。Masteri-Farahani 等^[85]继续改进其工艺, 采用柠檬酸热解的简单绿色工艺制备 GQDs, 当体系中存在 METH 时, 会改变 GQDs 表面的电荷分布、能级结构或分子间作用力等, 使得处于激发态的 GQDs 更容易通过非辐射跃迁回到基态, 从而导致荧光强度降低发生荧光猝灭。而加入吗啡后会影 GQDs 的表面态, 使得激发态的 GQDs

更倾向于通过辐射跃迁回到基态, 进而激发出更多荧光, 使得荧光强度得以增强。通过这种方式来区别甲基苯丙胺和吗啡。Behzad^[86]使用水溶性多糖物质(天然口香糖)作为碳源合成 CQDs, 以介孔二氧化硅纳米颗粒作为载体并结合 MIPs, 生成简单、易回收、生物相容性强的敏感光学探针(SiO₂@CQDs@ms-MIPs); 当 METH 存在时, CQDs 表面活性团簇会发生钝化与调谐现象, 使得 MIPs 的荧光响应显著增强, 进而实现了对血浆和尿液样本中 METH 的灵敏检测。

碳点材料检测毒品除了利用与抗体或者适配体结合以外, 还可以与 MIPs 联合使用, 以模拟酶-底物或抗体-抗原相互作用特异性识别模板分子, 将 CDs 与 MIPs 相结合, 形成灵敏度高、特异性强的 CDs@MIPs 材料。相比于纯 CDs 材料和抗体偶联的 CDs, CDs@MIPs 材料可以大幅增强检测精度, 并有效提高其抗干扰能力^[87-88]。表 3 主要介绍了荧光碳点检测几种常见的精神药品的代表性研究。

表 3 荧光碳点检测常见精神药品的代表性研究

Tab. 3 The representative study of fluorescent carbon spot detection of common psychotropic drugs

碳源前驱体	制备方法	检测样本	目标物	荧光变化	检出限/(mg·L ⁻¹)	参考文献
葡萄糖	水热法	磷酸盐溶液、血浆	KET	turn-off	6.7×10 ⁻⁵	[75]
柠檬酸、尿素	微波辅助法	饮料	KET	on-off-on	48	[76]
d-苯丙氨酸	水热法	饮料(啤酒、红酒等)	BZDs	turn-off	2.14	[77]
L-精氨酸	水热法	混合水溶液尿液	4-氯乙卡西酮	turn-off	水溶液: 342 CDFPs: 28	[78]
L-组氨酸、 乙烯亚胺聚合物	水热法	污水	甲卡西酮	turn-off	3.3×10 ⁻⁵	[79]
尿素、柠檬酸	水热法	甲基苯丙胺 前体水溶液	pac-二醇和 P2P	turn-off	Pac-二醇: 2 P2P: 3	[82]
柠檬酸、乙二醇	水热法	血浆 唾液	METH	离子迁移谱检测	唾液: 1.5×10 ⁻³ 血浆: 9×10 ⁻⁴	[83]
葡萄叶	水热法	血浆	METH	on-off-on	4.8×10 ⁻⁴	[84]
柠檬酸	热解法	甲基苯丙胺和 吗啡水溶液	吗啡与 METH 的 区分测定	加入 METH turn-off; 加入吗啡 turn-on	METH: 1.48 吗啡: 0.5	[85]
天然口香糖	水热法	血浆 尿液	METH	turn-on	尿液: 5.5 血浆: 6.3	[86]
L-半胱氨酸	水热法	尿液	METH	turn-off	荧光法: 1.8×10 ⁻³ 化学发光法: 8.6×10 ⁻⁵	[81]

5 总结与展望

荧光碳点材料与分子印迹、核酸适配体等技术结合, 能够提高检测毒品的灵敏性和选择性, 推动了传统毒品检测手段的创新, 并为毒品检测提

供了新的技术支持。但就目前来看, 荧光碳点技术在检测毒品时还存在着一些问题: (1) 基于荧光碳点检测毒品技术还处于探索与尝试阶段, 现实中毒品类型复杂多样, 而目前的碳点材料多为针对单一毒品的分析与筛选, 难以满足全面检测需

求,并且不同毒品分子(如苯丙胺类、阿片类)的化学结构差异显著,导致碳点材料针对混合毒品分子的特异性识别设计困难。(2)药物滥用方式的不断增加、复杂底物的干扰(如生物样本中的蛋白质、脂质等成分可能引起非特异性吸附,导致假阳性/阴性结果)等已成为阻碍识别药物准确性的重要指标,故如何提高荧光碳点纳米材料检测毒品的灵敏性、特异性仍有待验证。(3)碳点纳米材料在不同环境条件下的稳定性可能会影响其检测性能。例如,pH值可能导致碳点表面官能团质子化/去质子化,改变荧光量子产率;溶剂极性的变化可能会影响碳点纳米材料的荧光特性,从而影响检测结果的可靠性,出现假阳性结果。

总之,在公共安全和法庭科学领域,未来对于荧光碳点材料检测毒品可基于以下几方面展开深入研究:(1)荧光碳点纳米材料可以通过与多学科交叉、优化合成方法和表面修饰等,引入特异性识别基团或者酶提升其靶向性、增强信号放大与抗

干扰能力,避免出现假阳性结果。(2)利用毒物毒理的体内作用,如人体活性酶变化、蛋白质的变性以及金属离子化合价的改变等特征,以此为切入点来设计新型碳点材料,例如利用阿片类药物对体内某些酶影响的特性,构建酶-碳点联合传感器。(3)随着人工智能、大数据的发展,如果能将碳点检测毒品技术与人工智能联用,快速精准分析检测数据、建立毒品识别模型(如构建深度学习模型,解析碳点荧光光谱的细微差异以区分结构相似毒品;构建多模态检测平台,集成碳点荧光传感与微流控芯片技术以实现多目标物同步分析),则会极大地提升毒品检测效率与准确性以满足现场全面检测需求,不失为极具潜力的研究方向。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjil.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250147>

参 考 文 献:

- [1] SEIBERT E, HUBNER E M, SCHMID M G. Chiral separation and determination of enantiomer elution order of novel ketamine derivatives using CE-UV and HPLC-UV-ORD [J]. *Separations*, 2025, 12(2): 44.
- [2] AKIMOVA V D, BARSEGYAN S S, PLETENEVA T V. Personalized character of toxic effects through mass nonlethal poisoning by phenazepam and other psychoactive substances [J]. *Foren. Med. Expert.*, 2024, 67(1): 47-55.
- [3] DUBOIS-CHABERT D, FLAMENT E, HOIZEY G, *et al.* Development of a dried blood spot screening test using gas chromatography coupled to high-resolution mass spectrometry: application in authentic postmortem samples [J]. *J. Anal. Toxicol.*, 2025, 49(5): 340-350.
- [4] SCHIRMER W, SCHURCH S, WEINMANN W. Identification of hexahydrocannabinophorol metabolites in human urine [J]. *Drug Test. Anal.*, 2025, 17(9): 1681-1693.
- [5] AKBABA M, ISIR A B. Concordance of biochip-based and LC-MS/MS methods in urine and blood samples in screening for amphetamine and methamphetamine [J]. *Diagnostics*, 2025, 15(3): 269.
- [6] KASHYAP M, BAJAJ N, BANDYOPADHYAY A, *et al.* Terahertz and ultra low-frequency Raman for detection of stimulants and other substances [C]. 2024 49th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Perth, 2024: 1-2.
- [7] MUNEER S, SMITH M, BAZLEY M M, *et al.* Detection of low-level fentanyl concentrations in mixtures of cocaine, MDMA, methamphetamine, and caffeine via surface-enhanced Raman spectroscopy [J]. *J. Forensic Sci.*, 2025, 70(1): 73-83.
- [8] TAWFIK H S, AHMED R A, GHANI N T A, *et al.* Application of recycled battery-graphite electrode decorated with polyglutamic acid/Au nanoparticles for detection of nalbuphine drug abuse [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2024, 171(11): 117503.
- [9] 马忱, 张一达. 基于金纳米材料的甲基苯丙胺传感器研究进展 [J]. *分析测试学报*, 2025, 44(7): 1460-1468.
MA C, ZHANG Y D. Research progress on methamphetamine sensors based on gold nanomaterials [J]. *J. Instrumental Anal.*, 2025, 44(7): 1460-1468. (in Chinese)
- [10] TEYMOURINIA H, AKRAM Z, RAMAZANI A, *et al.* Electrochemical measurement of morphine using a sensor fabricated from the CuS/g-C₃N₅/Ag nanocomposite [J]. *Sci. Rep.*, 2024, 14(1): 27361.
- [11] RIAHIFAR V, HAGHNAZARI N, KESHAVARZI F, *et al.* A sensitive voltammetric sensor for methamphetamine

- determination based on modified glassy carbon electrode using Fe_3O_4 @poly pyrrole core-shell and graphene oxide [J]. *Micromol. J.*, 2021, 170: 106748.
- [12] KAR D K, V P, S I S, *et al.* Carbon dots and their polymeric nanocomposites: insight into their synthesis, photoluminescence mechanisms, and recent trends in sensing applications [J]. *ACS Omega*, 2024, 9(10): 11050-11080.
- [13] 张震, 曲丹, 安丽, 等. 荧光碳点的制备、发光机理及应用 [J]. 发光学报, 2021, 42(8): 1125-1140.
ZHANG Z, QU D, AN L, *et al.* Preparation, luminescence mechanism and application of fluorescent carbon dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(8): 1125-1140. (in Chinese)
- [14] 王士鹏, 董娅慧, 赵浩然, 等. 生物质基碳点制备及应用研究进展 [J]. 发光学报, 2022, 43(6): 833-850.
WANG S P, DONG Y H, ZHAO H R, *et al.* Progress in preparation and application of biomass-based carbon quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(6): 833-850. (in Chinese)
- [15] WU D H, ZHU J W, FU L. Quantum leap for electroanalysis: graphene dots take electrochemical sensing to the next level [J]. *Int. J. Environ. Anal. Chem.*, 2025, 105(5): 1001-1019.
- [16] RANI G, SIDDHARTH, AHLAWAT R, *et al.* A comprehensive review on the synthesis, doping, and characterization techniques of carbon quantum dots for their multifaceted applications [J]. *Comments Inorg. Chem.*, 2025, 45(3): 172-209.
- [17] UNNIKRIISHNAN E, KRISHNAMOORTHY A, SHAJI S P, *et al.* Electrocatalytic behavior of carbon quantum dots in sustainable applications: a review [J]. *Curr. Opin. Electrochem.*, 2024, 43: 101436.
- [18] HASSANVAND Z, JALALI F, NAZARI M, *et al.* Carbon nanodots in electrochemical sensors and biosensors: a review [J]. *ChemElectroChem*, 2021, 8(1): 15-35.
- [19] LAMBA R, YUKTA Y, MONDAL J, *et al.* Carbon dots: synthesis, characterizations, and recent advancements in biomedical, optoelectronics, sensing, and catalysis applications [J]. *ACS Appl. Bio Mater.*, 2024, 7(4): 2086-2127.
- [20] WANG B Y, WATERHOUSE G I N, YANG B, *et al.* Advances in shell and core engineering of carbonized polymer dots for enhanced applications [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2024, 57(19): 2928-2939.
- [21] ZHENG C Y, TAO S Y, YANG B. The current progress and challenges of carbonized polymer dot-based room-temperature phosphorescent materials [J]. *CCS Chem.*, 2024, 6(3): 604-622.
- [22] AI L, SHI R, YANG J, *et al.* Efficient combination of G-C₃N₄ and CDs for enhanced photocatalytic performance: a review of synthesis, strategies, and applications [J]. *Small*, 2021, 17(48): 2007523.
- [23] HAO Y L, GAN Z X, ZHU X B, *et al.* Emission from triions in carbon quantum dots [J]. *J. Phys. Chem. C*, 2015, 119(6): 2956-2962.
- [24] ZHANG X, MING H, LIU R H, *et al.* Highly sensitive humidity sensing properties of carbon quantum dots films [J]. *Mater. Res. Bull.*, 2013, 48(2): 790-794.
- [25] LIN L X, ZHANG S W. Creating high yield water soluble luminescent graphene quantum dots *via* exfoliating and disintegrating carbon nanotubes and graphite flakes [J]. *Chem. Commun.*, 2012, 48(82): 10177-10179.
- [26] MASTERI-FARAHANI M, MASHHADI-RAMEZANI S, MOSLEH N. Molecularly imprinted polymer containing fluorescent graphene quantum dots as a new fluorescent nanosensor for detection of methamphetamine [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectros.*, 2020, 229: 118021.
- [27] ZHANG Q, WANG R Y, FENG B W, *et al.* Photoluminescence mechanism of carbon dots: triggering high-color-purity red fluorescence emission through edge amino protonation [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 6856.
- [28] 李胜慧, 何雨莹, 杜友全, 等. 菠菜基多色发光碳点及手性荧光膜的制备与性能 [J]. 发光学报, 2024, 45(9): 1478-1487.
LI S H, HE Y X, DU Y Q, *et al.* Preparation and properties of spinach-based multicolor luminescent carbon dots and chiral fluorescent films [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(9): 1478-1487. (in Chinese)
- [29] KANG C, HUANG Y, YANG H, *et al.* A review of carbon dots produced from biomass wastes [J]. *Nanomaterials*, 2020, 10(11): 2316.
- [30] JING H H, BARDAKCI F, AKGÖL S, *et al.* Green carbon dots: synthesis, characterization, properties and biomedical applications [J]. *J. Funct. Biomater.*, 2023, 14(1): 27.
- [31] 李乃辉, 张清梅, 杨国庆, 等. 碳点药物载体在肿瘤治疗中的应用进展 [J]. 发光学报, 2024, 45(12): 2054-2065.
LI N H, ZHANG Q M, YANG G Q, *et al.* Advances in carbon dot-based drug carriers for tumor therapeutic applications [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(12): 2054-2065. (in Chinese)
- [32] JACINTH GRACIA K D, THAVAMANI S S, AMALADHAS T P, *et al.* Valorisation of bio-derived fluorescent carbon

- dots for metal sensing, DNA binding and bioimaging [J]. *Chemosphere*, 2022, 298: 134128.
- [33] 魏铄蕴, 方圆, 王瑶, 等. 一种生物质荧光碳点纳米材料的制备及其在潜指纹显现中的应用: 中国, 118109194A [P]. 2024-05-31.
- WEI S Y, FANG Y, WANG Y, *et al.* Preparation of biomass fluorescent carbon dot nano material and application of biomass fluorescent carbon dot nano material in latent fingerprint development: CN, 118109194A [P]. 2024-05-31. (in Chinese)
- [34] 魏铄蕴, 汪予佳, 崔媚媚, 等. 一种荧光碳点纳米复合材料的制备及在潜指纹显现中应用: 中国, 114854394A [P]. 2022-08-05.
- WEI S Y, WANG Y J, CUI M M, *et al.* Preparation of fluorescent carbon dot nano composite material and application of fluorescent carbon dot nano composite material in latent fingerprint development: CN, 114854394A [P]. 2022-08-05. (in Chinese)
- [35] 张路鹏, 张清梅, 何松杰, 等. 碳点的功能化研究进展 [J]. *发光学报*, 2022, 43(7): 1147-1164.
- ZHANG L P, ZHANG Q M, HE S J, *et al.* Progress on functionalization of carbon dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(7): 1147-1164. (in Chinese)
- [36] 谭超, 汪克威, 胡永俊. 原子掺杂对不同配体中碳点光致发光性能的影响研究 [J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(2): 350-356.
- TAN C, WANG K W, HU Y J. Study on photoluminescence characteristics of carbon dots in different ligands [J]. *Mater. Res. Appl.*, 2024, 18(2): 350-356. (in Chinese)
- [37] JI Y Y, ZOU X, WANG W J, *et al.* Co-doped S, N-carbon dots and its fluorescent film sensors for rapid detection of Cr (VI) and Ascorbic acid [J]. *Microchem. J.*, 2021, 167: 106284.
- [38] WU X Y, XU M S, WANG S N, *et al.* F,N-doped carbon dots as efficient type I photosensitizers for photodynamic therapy [J]. *Dalton Trans.*, 2022, 51(6): 2296-2303.
- [39] RANGRAZ Y, HERAVI M M. Recent advances in metal-free heteroatom-doped carbon heterogonous catalysts [J]. *RSC Adv.*, 2021, 11(38): 23725-23778.
- [40] 杨明杰, 黄子芮, 赵会, 等. 基于金属或杂原子掺杂碳量子点的合成及应用 [J]. *复合材料学报*, 2025, 42(3): 1225-1245.
- YANG M J, HUANG Z R, ZHAO H, *et al.* Synthesis and application of carbon quantum dots doped with metal or heteroatom [J]. *Acta Mater. Compositae Sinica*, 2025, 42(3): 1225-1245. (in Chinese)
- [41] RAZLANSARI M, ULUCAN-KARNAK F, KAHRIZI M, *et al.* Nanobiosensors for detection of opioids: a review of latest advancements [J]. *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, 2022, 179: 79-94.
- [42] XUE S, ZHANG T W, WANG X K, *et al.* Cu,Zn dopants boost electron transfer of carbon dots for antioxidation [J]. *Small*, 2021, 17(31): 2102178.
- [43] LIU Y H, XU B L, LU M Z, *et al.* Ultrasmall Fe-doped carbon dots nanozymes for photoenhanced antibacterial therapy and wound healing [J]. *Bioact. Mater.*, 2022, 12: 246-256.
- [44] TAMMINA S K, WAN Y, LI Y Y, *et al.* Synthesis of N, Zn-doped carbon dots for the detection of Fe³⁺ ions and bactericidal activity against *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus* [J]. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 2020, 202: 111734.
- [45] AHMED S R, CHAND R, KUMAR S, *et al.* Recent biosensing advances in the rapid detection of illicit drugs [J]. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 2020, 131: 116006.
- [46] 殷勤红, 杨黎华, 王建伟. 纳米材料在毒品检测中的应用进展 [J]. *中国法医学杂志*, 2020, 35(4): 430-433.
- YIN Q H, YANG L H, WANG J W. Progress on application of nanomaterials in determination of drugs [J]. *Chin. J. Forensic Med.*, 2020, 35(4): 430-433. (in Chinese)
- [47] LI X C, ZHAO S J, LI B L, *et al.* Advances and perspectives in carbon dot-based fluorescent probes: mechanism, and application [J]. *Coord. Chem. Rev.*, 2021, 431: 213686.
- [48] ZHENG M, XIE Z G, QU D, *et al.* On-off-on fluorescent carbon dot nanosensor for recognition of chromium (VI) and ascorbic acid based on the inner filter effect [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2013, 5(24): 13242-13247.
- [49] XIE J R, WU Z F, SUN J, *et al.* Green synthesis of carbon quantum dots derived from lycium barbarum for effective fluorescence detection of Cr (VI) sensing [J]. *J. Fluoresc.*, 2024, 34(2): 571-578.
- [50] AL-HASHIMI B, OMER K M, RAHMAN H S. Inner filter effect (IFE) as a simple and selective sensing platform for detection of tetracycline using milk-based nitrogen-doped carbon nanodots as fluorescence probe [J]. *Arab. J. Chem.*,

- 2020, 13(4): 5151-5159.
- [51] 贾宝珠, 何镇熹, 黄心迦, 等. 基于碳点内滤效应快速检测鲜牛奶中碱性磷酸酶活性的荧光分析方法的构建[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 334-341.
- JIA B Z, HE Z X, HUANG X R, *et al.* Development of a fluorescence assay for rapid detection of alkaline phosphatase activity in fresh milk based on inner filter effect of carbon dots [J]. *Sci. Technol. Food Ind.*, 2023, 44(17): 334-341. (in Chinese)
- [52] CHEN Y, CUI H J, WANG M, *et al.* N and S doped carbon dots as novel probes with fluorescence enhancement for fast and sensitive detection of Cr(VI) [J]. *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Asp.*, 2022, 638: 128164.
- [53] LUO W H, WANG G J. Photo-responsive fluorescent materials with aggregation-induced emission characteristics [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(24): 2001362.
- [54] HE J H, CHENG Y Y, ZHANG Q Q, *et al.* Carbon dots-based fluorescence resonance energy transfer for the prostate specific antigen (PSA) with high sensitivity [J]. *Talanta*, 2020, 219: 121276.
- [55] SANTOS M C D, NASCIMENTO Y M, MONTEIRO J D, *et al.* ATR-FTIR spectroscopy with chemometric algorithms of multivariate classification in the discrimination between healthy *vs.* dengue *vs.* chikungunya *vs.* zika clinical samples [J]. *Anal. Methods*, 2018, 10(10): 1280-1285.
- [56] KOU X Y, WANG Y C, MEI Q, *et al.* Construction of carbon dots having aggregation-induced emission and intramolecular charge transfer properties [J]. *Dyes Pigments*, 2023, 212: 111092.
- [57] 张蕾, 王婷, 张正伟. 荧光碳点在分析传感中的应用进展[J]. 分析实验室, 2023, 42(11): 1540-1551.
- ZHANG L, WANG T, ZHANG Z W. Recent progress of fluorescent carbon dots in analytical applications [J]. *Chin. J. Anal. Lab.*, 2023, 42(11): 1540-1551. (in Chinese)
- [58] YANG L, ZHAO H T, LIU N, *et al.* A target analyte induced fluorescence band shift of piperazine modified carbon quantum dots: a specific visual detection method for oxytetracycline [J]. *Chem. Commun.*, 2019, 55(82): 12364-12367.
- [59] YI H, LIU J, YAO J, *et al.* Photoluminescence mechanism of carbon dots: triggering multiple color emissions through controlling the degree of protonation [J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6517.
- [60] KOREPANOVA A, LAPINSKIY K, DOLENKO T. Manifestation of donor-acceptor properties of N-doped polymer carbon dots during hydrogen bonds formation in different solvents [J]. *Polymers*, 2024, 16(24): 3585.
- [61] TAO S Y, FENG T L, ZHENG C Y, *et al.* Carbonized polymer dots: a brand new perspective to recognize luminescent carbon-based nanomaterials [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2019, 10(17): 5182-5188.
- [62] LI Y, LIU C, SUN H, *et al.* Formation and band gap tuning mechanism of multicolor emissive carbon dots from *m*-hydroxybenzaldehyde [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(18): 2300543.
- [63] AI L, YANG Y S, WANG B Y, *et al.* Insights into photoluminescence mechanisms of carbon dots: advances and perspectives [J]. *Sci. Bull.*, 2021, 66(8): 839-856.
- [64] 陈良锋, 李永强, 王杭, 等. 石墨烯量子点光致发光性能及调控机制研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(7): 1821-1829.
- CHEN L F, LI Y Q, WANG H, *et al.* Recent development on photoluminescence performance modulation and mechanism study for graphene quantum dots [J]. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 2022, 50(7): 1821-1829. (in Chinese)
- [65] KANG S W, FAN G Q, DING L, *et al.* Preparation of medium-long wavelength aggregation aggregation-induced emission carbon dots induced by nitrogen and sulfur doping [J]. *Opt. Mater.*, 2025, 162: 116896.
- [66] USMAN M, BAIG Y, NARDIELLO D, *et al.* How new nanotechnologies are changing the opioid analysis scenery? A comparison with classical analytical methods [J]. *Forensic Sci. Res.*, 2024, 9(1): owae001.
- [67] GULER E, BOZOKALFA G, DEMIR B, *et al.* An aptamer folding-based sensory platform decorated with nanoparticles for simple cocaine testing [J]. *Drug Test. Anal.*, 2017, 9(4): 578-587.
- [68] WANG L J, JI Y, CHEN Y X, *et al.* Recent research progress of fluorescence biosensors based on carbon dots in early diagnosis of diseases [J]. *TrAC Trends Anal. Chem.*, 2024, 180: 117962.
- [69] 朱志承, 杨柏. 基于碳点与适配体的荧光生物传感器制备与应用[J]. 发光学报, 2021, 42(8): 1196-1214.
- ZHU Z C, YANG B. Fabrication and application of fluorescence biosensors based on carbon dots and aptamer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2021, 42(8): 1196-1214. (in Chinese)
- [70] DING C Q, ZHU A W, TIAN Y. Functional surface engineering of C-dots for fluorescent biosensing and *in vivo* bioimaging [J]. *Acc. Chem. Res.*, 2014, 47(1): 20-30.
- [71] MASTERI-FARAHANI M, MOSLEH N. Functionalization of graphene quantum dots with antimorphine: design of

- selective nanosensor for detection of morphine [J]. *Mater. Lett.*, 2019, 241: 206-209.
- [72] ZHANG C, HAN Y F, LIN L, *et al.* Development of quantum dots-labeled antibody fluorescence immunoassays for the detection of morphine [J]. *J. Agric. Food Chem.*, 2017, 65(6): 1290-1295.
- [73] ZHANG C, YU X X, SHI X M, *et al.* Development of carbon quantum dot-labeled antibody fluorescence immunoassays for the detection of morphine in hot pot soup base [J]. *Food Anal. Methods*, 2020, 13(5): 1042-1049.
- [74] 彭金芝, 李晓东, 王乾兴. 氯胺酮滥用致认知障碍的研究进展 [J]. 中国药物依赖性杂志, 2023, 32(2): 109-114. PENG J Z, LI X D, WANG Q X. Research progress on cognitive impairment caused by ketamine abuse [J]. *Chin. J. Drug Depend.*, 2023, 32(2): 109-114. (in Chinese)
- [75] LI Q H, TANG W J, WANG Y, *et al.* Electrochemiluminescence immunosensor for ketamine detection based on polyamidoamine-coated carbon dot film [J]. *J. Solid State Electrochem.*, 2015, 19(10): 2973-2980.
- [76] YEHA A M, FARAG M A, TANTAWY M A. A novel trimodal system on a paper-based microfluidic device for on-site detection of the date rape drug "ketamine" [J]. *Anal. Chim. Acta*, 2020, 1104: 95-104.
- [77] YEN Y T, LIN Y S, CHEN T H, *et al.* A carbon-dot sensing probe for screening of date rape drugs: nitro-containing benzodiazepines [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2020, 305: 127441.
- [78] YEN Y T, LIN Y S, CHEN T Y, *et al.* Carbon dots functionalized papers for high-throughput sensing of 4-chloroethcathinone and its analogues in crime sites [J]. *Roy. Soc. Open Sci.*, 2019, 6(9): 191017.
- [79] LING J, ZHANG W Q, CHENG Z J, *et al.* Recyclable magnetic fluorescence sensor based on Fe₃O₄ and carbon dots for detection and purification of methcathinone in sewage [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(3): 3752-3761.
- [80] WEI S, LI Y J, LIANG H, *et al.* Photoluminescent carbon nanomaterials for sensing of illicit drugs: focus [J]. *Anal. Sci.*, 2022, 38(2): 247-260.
- [81] HASSANZADEH J, KHATAEE A, LOTFI R. Sensitive fluorescence and chemiluminescence procedures for methamphetamine detection based on CdS quantum dots [J]. *Microchem. J.*, 2017, 132: 371-377.
- [82] KIM T H, HO H W, BROWN C L, *et al.* Amine-rich carbon nanodots as a fluorescence probe for methamphetamine precursors [J]. *Anal. Methods*, 2015, 7(16): 6869-6876.
- [83] ZARGAR T, KHAYAMIAN T, JAFARI M T. Aptamer-modified carbon nanomaterial based sorption coupled to paper spray ion mobility spectrometry for highly sensitive and selective determination of methamphetamine [J]. *Microchim. Acta*, 2018, 185(2): 103.
- [84] SABERI Z, REZAEI B, FAROUKHPOUR H, *et al.* A fluorometric aptasensor for methamphetamine based on fluorescence resonance energy transfer using cobalt oxyhydroxide nanosheets and carbon dots [J]. *Microchim. Acta*, 2018, 185(6): 303.
- [85] MASTERI-FARAHANI M, ASKARI F. Design and photophysical insights on graphene quantum dots for use as nanosensor in differentiating methamphetamine and morphine in solution [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2019, 206: 448-453.
- [86] MANDANI S, REZAEI B, ENSAFI A A. Sensitive imprinted optical sensor based on mesoporous structure and green nanoparticles for the detection of methamphetamine in plasma and urine [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2020, 231: 118077.
- [87] LI Z, LI S Y, JIANG L S, *et al.* High enrichment and sensitive measurement of oxytetracycline in tea drinks by thermosensitive magnetic molecular imprinting based magnetic solid phase extraction coupled with boron doped carbon dots [J]. *Food Chem.*, 2024, 447: 138998.
- [88] WANG H P, XU Y, BAI Q Y, *et al.* Detection and adsorption of 2-methyl-4-chlorophenoxyacetic acid in vegetables via dual-functional molecularly imprinted polymer doping with carbon dot [J]. *Talanta*, 2024, 273: 125874.



张爱梅(2001-),女,甘肃武威人,硕士研究生,2024年于甘肃政法大学获得学士学位,主要从事司法鉴定微量物证方面的研究。

E-mail: zhangamei0820@163.com



魏练蕴(1983-),女,甘肃庆阳人,博士,副教授,硕士生导师,2013年于兰州大学获得博士学位,主要从事新型荧光纳米材料的制备及其应用等方面的研究。

E-mail: weisy@163.com