

生物质碳量子点的制备及食品检测应用的研究进展

张淼 唐川

大连大学, 辽宁大连, 116000;

摘要: 碳量子点 (CDs) 作为一种新兴的碳基纳米材料, 因其优异的光学特性、低毒性和生物相容性, 近年来在生物医学、光电传感、能源及食品检测等领域得到了广泛应用。本文综述了碳量子点的物理化学性质、制备方法以及原料选择, 以及非金属原子掺杂和表面修饰对碳点性能的优化作用。重点探讨了以生物质为原料碳点的制备, 以及碳量子点在食品安全领域的应用。最后展望了碳点在食品安全领域的未来发展方向, 为其大规模应用提供了科学依据和技术参考。

关键词: 生物质碳点; 非金属掺杂; 食品检测

DOI: 10.69979/3041-0673.24.11.039

1 碳量子点的概述

碳量子点 (CDs) 也称碳点, 是一类新兴的碳基纳米材料。在 2004 年, 美国佐治亚理工学院的 Xu 等人^[1]首次在研究碳纳米管的过程中意外发现了具有强荧光的碳纳米颗粒, 并将其称为“碳纳米颗粒”。在 2006 年, Sun 等人^[2]通过激光烧蚀法制备出一种新型碳基荧光纳米颗粒, 并首次将其命名为碳点。碳点由于其独特的光学特性近些年被广泛研究并应用于生物医学、荧光探针与传感器、光电与能源等领域^[3,4]。

2 碳量子点的物理化学性质

碳点的核心由 sp^2 杂化碳和 sp^3 杂化碳组成, 呈现类石墨烯的准晶态或非晶态结构。类石墨结构为核心部分含有微晶石墨烯片层结构, 碳原子以 sp^2 杂化的方式排列, 形成六元环。非晶态碳结构则含有大量 sp^3 杂化的碳原子, 呈现无序分布。由于碳点的尺寸大都小于 20 nm, 这使得碳点内部表现出量子限域效应, 即当碳点的尺寸减小到纳米尺度时, 电子和空穴的运动受到限制, 能级变得离散, 导致其具有尺寸依赖的荧光发射特性。此外碳点的表面通常含有丰富的官能团 (如羧基、羟基、氨基等) 和缺陷态, 这些表面态能够产生新的电子能级。当光激发碳点时, 电子从价带跃迁到导带, 而表面缺陷或官能团提供了新的中间态, 使电子和空穴复合时释放光子, 产生光致发光。这使得碳点具有独特的光致发光特性。当以最佳激发波长照射碳点时, 碳点会在紫外灯下显现出强烈的荧光。

这种特性同时赋予了碳点的特异性识别能力。在碳点识别到淬灭剂时, 其荧光会被淬灭或增强。其淬灭机制目前可大致归为四类, 分别是荧光共振能量转移 (FRET)、光致电子转移 (PET)、内滤效应 (IFE)、静态淬灭 (SQE) 和动态淬灭 (DQE)。FRET 具备两个发生

条件, 其一是碳点的发射光谱与淬灭剂的紫外吸收光谱存在重叠的部分; 其二是二者的距离足够近, 在发生能量转移后, 碳点的荧光寿命会发生明显的降低^[5]。Ali 等人^[6]利用 FRET 淬灭机制设计出铋和氮共掺杂碳点结合硫辛酸官能化铜纳米团簇, 用来检测喹诺酮类抗生素。

PET 是指光激发状态下电子从碳点向淬灭剂转移的过程。该淬灭机制常用于特异性识别金属离子。Wang 等人^[7]利用 PET 机制制备了一种基于镧系元素配合物的荧光探针用于检测铜离子。IFE 机制的发生条件与 FRET 类似, 碳点的发射光谱与淬灭剂的紫外吸收光谱要有部分重叠, 不同的是, 在碳点与淬灭剂反应前后, 碳点的荧光寿命不发生明显的改变。因此, IFE 机制往往更容易构建, 且更广泛应用于检测方面。例如, He 等人^[8]以对苯二胺和 D-谷氨酸为前驱体合成的 NCDs 通过 IFE 机制特异性识别人血清样品中的吉非替尼。S QE 是指碳点与淬灭剂混合之后形成非荧光的络合物, 此时碳点的紫外可见光谱会发生改变。DQE 是指激发态的碳点与淬灭剂之间发生电子转移或能量转移, 导致碳量子点返回基态的过程。此机制常用于构建“开-关-开”形式的荧光探针。

碳点表面具备的大量羧基和氨基, 也赋予了碳点优异的水溶性。此外, 碳点还具有优异的生物相容性、低毒性、稳定性等物理化学性质。Liu 等人^[9]制备的碳点在高盐条件下仍具备出色的稳定性, 使其在复杂水样中仍保持作为荧光探针的能力。这些性质使得碳点成为近年来纳米材料领域的热点之一, 更多研究者研究发现通过不同的制备方法、利用不同的碳源制得的碳点物理化学性质会发生变化。

3 碳量子点的制备方法

随着研究人员对碳点的研究深入, 碳点的制备方法也变得多样化。碳点的制备方法可根据制备条件分为物

理法、化学法和其他制备方法。

3.1 物理法

物理法包括激光烧蚀法、气相沉积法等。激光烧蚀法是指通过激光束来照射碳材料,如石墨、碳纳米管等。激光能量促使材料局部加热,进而生成碳点。例如, Cortes 等人^[10]通过脉冲激光碎裂成功合成了荧光碳量子点,成功用作葡萄糖检测的荧光探针。但该方法需要对激光进行严格的控制,且操作复杂。并且对碳点的尺寸大小难以调控,很少用于大规模生产。气相沉淀法是指利用气体原料通过热解或电弧等方法沉积在基底表面形成碳点。Yan 等人^[11]首次通过化学气相沉积合成了具有石墨结构的荧光碳量子点。这种方法适用于大规模生产,但需要精确地控制气体流量和沉积温度,操作较为复杂。

3.2 化学法

化学法是目前最常见的碳点合成方法之一,主要包括水热法、溶剂热法、高温裂解法等。水热法是一种通过水作为溶剂,利用高温高压条件促进前体物质的反应,从而制备碳点的方法。该方法可以实现碳点的大规模制备,并且操作简单,能够通过控制反应条件从而改变碳点的形貌与尺寸。目前一锅水热法也是最常用于碳点制备的首选方法。例如,刘等人^[12]通过简单的一步水热法合成氮掺杂碳点,用于在可见光下检测和高效去除烟草废水中的高浓度尼古丁。Varatharajan 等人^[13]使用邻苯二胺和氨基脲通过水热法合成橙色荧光碳量子点,应用于暖白光发光二极管。溶剂热法与水热法相似,但在溶剂的选择方面不同。一般溶剂法常使用有机溶剂来代替水,但存在着高成本与溶剂的选择性问题。高温裂解法是指通过高温使含碳有机物进行裂解,如糖类、蛋白质等。Zhang 等人^[14]以柠檬酸、三斯碱和油胺为前驱体,使用高温裂解法成功制备了油溶性碳点。在高温条件下,有机物的空间结构被破坏,从而释放出碳源。但此方法在温度调控时存在较大困难。

3.3 其他制备方法

除物理化学方法外,还存在着其他的制备方法。如电化学法利用电解反应生成碳点,反应过程中电解液中的碳源被还原,形成碳点。Zhao 等人^[15]通过将尿素基质与电化学合成的多色碳点相结合来实现固态荧光增强和余辉发光。该方法具有简便、绿色、可调的优点,但需要控制电流密度和电解液的成分。微波辅助法通过微波加热前驱体物质,迅速将其加热至高温并形成碳点。

George 等人^[16]使用微波辅助法从木瓜种子中合成蓝色发射高荧光碳点,用于检测 Fe^{3+} 的荧光传感器探针。该方法的优点是加热均匀、反应时间短,但须精准控制

微波炉功率以及反应时间。

4 碳量子点的制备原料

碳点的制备原料在很大程度上决定了碳点的性质与潜在应用价值。其原料中存在的某些元素可以为最终碳点的形成提供掺杂原子或者在碳点表面形成某些官能团,从而提高碳点的荧光强度、荧光量子产率,拓宽碳点的应用领域范围。根据原料的来源和性质,可分为化学原料与生物质原料两大类。

4.1 化学原料

化学原料是碳点制备中最常用的一类,包括小分子有机化合物、高分子材料和无机碳源。这些原料因其纯度高、结构可控而便于实现碳点的精准合成。常见的小分子有机化合物包括柠檬酸、尿素、乙二胺、葡萄糖等。这类原料结构简单,具有良好的化学反应活性。使用小分子有机化合物的优点是原料易得,合成方法成熟,但存在某些化学试剂可能有毒及对环境有污染等局限性。并且其产物可能需要进一步纯化。常用的高分子原料包括聚丙烯腈、聚乙烯醇、聚乙二醇等。该种化学原料的优点是可以合成某些功能化碳点,适合特定应用需求,但存在高分子材料成本较高且制备过程中需要某些特殊仪器等问题。无机碳源包括碳酸盐、碳黑、石墨等。其制备方法常为电化学反应,利用强酸或强碱对石墨进行化学处理,从中剥离出碳点。该原料来源广泛,但产物的均一性较差,尺寸分布较宽。

4.2 生物质原料

生物质原料则主要来源于植物、动物、废弃物和微生物,具有低成本、可持续性和环境友好的特点,适合大规模制备和绿色化学研究。在近期的碳点研究中,生物质原料受到广泛关注。

植物来源的生物质原料种类多样,包括水果、蔬菜、种子、树叶等。例如 Xue 等人^[17]采用简单环保的乙醇溶剂热处理,以生物质莢蒾叶为原料,合成了双发射生物质碳量子点,用于检测 Fe^{3+} 或 Cu^{2+} 。Ji 等人^[5]以大豆为碳源合成生物质衍生碳点,喷涂于玉米叶片表面,从而提升叶肉细胞的叶状微生物的丰度和离子稳态。Kathiravan 等人^[18]将楝树花用于开发廉价的碳点,用作 Fe^{3+} 离子和铁蛋白的灵敏和选择性检测的荧光探针。水果和蔬菜的果皮富含氨基、硫、羧基和羟基,具体取决于合成方法。这些官能团作为出色的螯合配体,可改善光学和物理化学性质,应用范围广泛。除此之外,果壳也是制备绿色环保碳点的一个选择。例如 Mokhati 等人^[19]将摩洛哥果壳进行重新利用,制备出具有吸附能力的纳米多孔碳点。Balakrishnan 等人^[20]利用低成本、

丰富的生物质棕榈仁壳制备碳点,用于实际应用中的 Cu^{2+} 离子传感。马等人^[21]使用花生壳制备量子产率为 10.58% 的碳点,实现了废弃花生壳的回收再利用。将废弃的生物质原料制作成碳点,不仅绿色环保,并且减少了化学试剂的污染问题,从源头上实现了绿色工艺化。

动物来源的生物质原料则包括动物血液、蛋壳、蛋白质、小龙虾壳等。例如, Yuan 等人^[22]以鸡血为原料,采用水热法制备碳量子点,作为过氧化物酶模拟物,用于生物硫醇的比色检验。Ghiasi 等人^[23]利用蛋壳废料合成 N-S-CDs,并且通过将 N-S-CDs 连接到玻碳电极表面制造适配体传感界面。Wang 等人^[24]以虾肉为前驱体,通过水热法成功制备了蛋白质衍生的碳量子点,作为缓蚀剂有效阻碍了腐蚀离子的扩散。Du 等人^[25]以小龙虾壳和醋酸锌为原料合成 Zn-CQDs 并对其表征,成功应用于食品包装。但动物来源的生物质原料往往成分复杂,有时会涉及伦理问题。

废弃物来源的生物质原料通常包括农业废弃物、工业废弃物和生活垃圾。农业废弃物在研究领域比重较多,如 Dhongde 等人^[26]利用稻壳合成的碳量子点用于防腐应用; Li 等人^[27]利用玉米秸秆所制备的 CQD 可用于检测和生物成像领域,显示出独特的应用潜力; Alfi 等人^[28]利用废弃甘蔗渣制备了荧光碳点并制成试纸来检测抗生素; Koparde 等人^[29]通过水热法简单回收使牛粪变为碳点,选择性识别 Y^{3+} 离子。使用农业废弃物不仅可以解决大量的废除处理问题,也为碳点制备工业提供了大量的原料来源。将工业废料转化为增值产品是全球环境科学家的主要关注点,因为它们不可生物降解性质对环境构成严重威胁。将它们用作生产碳点的来源,通过减轻污染环境的废物的负担,对生态系统来说是一个优势。如 Momo 等人^[30]利用废木锯末合成氮硫共掺杂碳点用于提高析氢反应的催化活性。生活垃圾主要包括塑料瓶、厨余垃圾、烟头。如 Aji 等人^[31]利用废塑料瓶为原料,通过简单的一步加热法生产具有高光致发光的碳化聚合物点; Yang 等人^[32]将废弃烟头制备荧光碳点用于检测铁离子。废弃物的传统处理方式即焚烧或填埋,而将这些废弃物重新回收利用转换为功能性材料正是最好的新型处理方式。

微生物来源的生物质材料往往包括酵母菌、细菌、原核藻类等微生物。例如 Yu 等人^[33]利用酵母通过简单的单罐微波辅助水热方法合成了荧光量子产率为 16% 的掺杂碳点,适用于 pH 传感和维生素探测应用。Wang 等人^[34]通过简单的微波辅助水热过程成功合成了一种源自光合细菌的新型红色发射碳点,用于溶酶体成像。Enriquez 等人^[35]使用螺旋藻制备了多色荧光碳点,并将其作为发光纳米材料应用在 LED 领域。

相比化学原料,生物质材料具有可再生性、绿色环

保的优点。目前,绿色发展理念也贯穿于碳点的制备过程中,研究人员往往在最初原料的选择时更倾向于具有某些元素或功能的生物质原料来制备碳点。这是因为仅由碳元素、氢元素、氧元素制备而成的碳点往往荧光量子产率低,且缺乏某些官能团和表面缺陷而不能特异性识别淬灭剂。为了提高碳点的荧光性能,并扩大其应用领域,研究者们往往会采用掺杂其他原子对碳点进行表面修饰。

5 碳量子点的表面修饰

目前,常用于被掺杂在碳点表面的金属元素有 Fe、Na、Cu、Pt、Pd、Au。这些金属离子具有更多的未占据轨道和电子,这有利于改变碳点表面的电荷密度^[36]。此外,金属离子的螯合作用有利于通过化学反应程序与碳点中的氨基和羧基结合、特定金属离子(如稀土元素)能赋予碳点多色发光特性和独特的上转换发光能力。然而,一些金属掺杂的碳点在高浓度下对细胞和生物体有害,并且重金属掺杂通常需要严格的反应条件(如高温高压),增加了合成难度和成本。重金属离子在制备过程中也可能对环境产生污染,从而违背了环保理念的初衷。目前更多的研究者更倾向于在碳点中掺杂非金属元素。如 N、S、P 等。这些非金属元素往往有着跟碳原子更相似的原子结构,从而可以有效地调节碳点的物理化学性质。例如 Peng 等人^[37]通过对不同氮源制备出来的碳点进行各种性质分析发现:以葡萄糖或柠檬酸为碳源,多巴胺或 13-十三烷二胺为氮源,制备的四种类型的发光氮掺杂碳点中,由 13-十三烷二胺制备的碳点比在多巴胺存在下制备的碳点具有更强的荧光强度。然而,用多巴胺获得的碳点显示出更好的 pH 敏感性。除了氮掺杂,硫掺杂也引起了人们的广泛关注。Gao 等人^[38]制备了多色自发光碳点 Y-CDs,证明硫掺杂可以显著增加石墨氮的量,从而有效地缩小制备的碳点的带隙,导致荧光的红移。得益于硫的掺杂, Y-CDs 对 Fe^{3+} 也表现出高选择性和灵敏度检测能力。氮和硫的共掺杂在碳点的性能提升方面表现出显著优势,与近年来研究较多的单掺杂碳点相比,这一方法具有独特的优越性。因此,氮-硫共掺杂已被广泛视为一种创新性且具有前景的掺杂策略。通过氮和硫的协同作用,共掺杂的碳点展现出许多优异特性,例如更宽广的光致发光范围、更均匀且可调控的多色发射(从短波长的紫光和蓝光到长波长的近红外红光),以及显著提升的水溶性。此外,这类碳点表现出卓越的光稳定性和更低的检测限,同时具备更好的生物相容性。这些特点不仅增强了其荧光性能和选择性,还使其在食品安全探针领域展现出广阔应用潜力,同时为生物医学纳米材料提供了新的选择。值得注意的是,氮和硫的共掺杂在碳点表面引入了多种官能

团。这些官能团的存在进一步优化了碳点的物理化学特性，从而显著提升了其综合性能。

6 碳量子点的在食品检测中的应用

随着世界人口不断增长，食品的需求也不断地上升。农业和食品生产系统面临着巨大压力。很多生产商为提升家畜的存活率和生长率往往在养殖过程中选择使用抗生素，这会导致动物源食品如牛奶、鸡蛋、虾类中存在抗生素的残留。虽然国家明令禁止使用某些抗生素，但仍存在不良商家不按国家标准滥用抗生素的情况。传统的食品分析检测技术往往可以满足实验室分析的需求，但日常人们所食用的产品并没有简单快捷的方法来检测，而碳点作为一种具有荧光特性的传感器，在食品检测行业已经展露了巨大的潜力。目前碳点能够被用于识别食品中的抗生素残留、重金属残留、农药残留、色素残留等。例如 Zhang 等人^[39]使用简单的溶剂热方法从 L-苹果酸和尿素合成新型红色发射氮掺杂碳点（R-NCD），食用色素苋菜有效淬灭了 R-NCD 的荧光，该碳点能够检测苏打水、水果软糖、硬糖、伏特加、蜜饯、果汁和鸡尾酒中的痕量苋菜，回收率从 88.0% 到 119% 不等，相对标准偏差为 1.1-3.9%。Hao 等人^[40]设计了碳点纳米酶建立了一个可访问的双信号比率传感系统，用于检测食品基质中的亚硝酸盐，并将其与智能手机结合使用，做到现场检测。通过采用比率策略、双信号输出和智能手机兼容性，该碳点在环境水和食品样品中实现了低检出限和令人满意的回收率。Shan 等人^[41]所制备的以 2,3-二氨基吡啶和柠檬酸为前驱体，制备了蓝色荧光氮掺杂碳量子点，用于识别食品中 Hg^{2+} ，检测限测量为纳摩尔级，线性范围为 0-5.0 $\mu\text{mol/L}$ 。

王等人^[42]制备多色碳点并开发了一个智能手机集成平台，用于食品中甲硝唑残留物的荧光定量。Zhang 等人^[43]合成氮掺杂碳点，通过卷心菜叶上草甘膦的荧光成像证明了可视化蔬菜中有机磷农药检测的可行性。由此可见，碳点不仅能有效提升食品安全监控能力，还为快速、经济的检测方法提供了重要解决方案，有助于保障食品供应链的质量和安

7 结论与展望

生物质原料因其绿色环保特性，作为碳点制备的原材料具有重要意义，不仅能有效解决废弃物处理难题，还符合可持续发展的要求。同时，非金属原子掺杂技术能够进一步推动绿色发展理念的实践。然而，将生物质原料与非金属原子掺杂技术相结合并将其应用于食品检测的研究尚处于起步阶段。碳点作为一种新兴的纳米材料，已在食品检测领域展现出显著的应用潜力。特别

是从环保理念出发，以生物质为基础制备碳点，有望在未来开辟更为广阔的应用前景，为食品安全检测提供新的解决方案

参考文献

- [1]. Xu, X.; Ray, R.; Gu, Y.; Ploehn, H. J.; Gearheart, L.; Raker, K.; Scrivens, W. A., *Journal of the American Chemical Society* 126, 12736 2004.
- [2]. Sun, Y.-P.; Zhou, B.; Lin, Y.; Wang, W.; Fernando, K. A. S.; Pathak, P.; Mezziani, M. J.; Harruff, B. A.; Wang, X.; Wang, H.; Luo, P. G.; Yang, H.; Kose, M. E.; Chen, B.; Veca, L. M.; Xie, S.-Y., *Journal of the American Chemical Society* 128, 7756 2006.
- [3]. Sanvicens, N.; Mannelli, I.; Salvador, J. P.; Valera, E.; Marco, M. P., *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 30, 541 2011.
- [4]. Qian, L.; Durairaj, S.; Prins, S.; Chen, A., *Biosens Bioelectron* 175, 112836 2021.
- [5]. Ji, Y.; Cheng, B., *Environmental and Experimental Botany* 226 2024.
- [6]. Ali, R.; Alshaman, R.; Albalawi, A. S.; Alsharif, O. M.; Hakami, O. A.; Alharthi, H. H.; Jumah, F. F.; Al-Qarni, A. M.; Albalawi, N. S.; Alashjaee, M. S.; Aljohani, F. S.; Alghuzawi, A. M.; Al-Atwi, M. H.; Alharbi, A. H., *Food Chem* 465, 142076 2024.
- [7]. Wang, J.; Pei, J.; Li, G., *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 290, 122287 2023.
- [8]. He, Y.; Wang, H.; Yan, Y.; Jiang, X.; Zou, H.; Zhang, Z., *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 310, 123942 2024.
- [9]. Liu, M. L.; Chen, B. B.; Liu, Z. X.; Huang, C. Z., *Talanta* 161, 875 2016.
- [10]. Cortes, F. R. U.; Falomir, E.; Lancis, J.; Mínguez-Vega, G., *Applied Surface Science* 66 52024.
- [11]. Yan, L.; Yang, Y.; Ma, C.-Q.; Liu, X.; Wang, H.; Xu, B., *Carbon* 109, 598 2016.
- [12]. 刘丽晓; 王亚平; 顾燕, *化学工程杂志* 499 2024.
- [13]. Varatharajan, P.; Banu, I. B. S.; Mamat, M. H.; Vasimalai, N., *Physica B: Condensed Matter* 654 2023.
- [14]. Zhang, Y.; Fan, X.; Sun, X.; Yang, Z.; Don

- g, C., *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 304, 123406 2024.
- [15].Zhao, Q.; Fan, C.; Bu, H.; Zhang, X., *Chemical Engineering Journal* 5002024.
- [16].George, H. S.; Selvaraj, H.; Ilangovan, A.; Chandrasekaran, K.; Kannan, V. R.; Parthipan, P.; Almutairi, B. O.; Balu, R., *Inorganic Chemistry Communications* 1572023.
- [17].Xue, J.-j.; Gan, M.-h.; Lu, Y.-g.; Wu, Q.-l., *New Carbon Materials* 39, 1213 2024.
- [18].Kathiravan, A.; Premkumar, S.; Jhonsi, M. A., *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 6812024.
- [19].Mokhati, A.; Benturki, O.; Bernardo, M.; Kecira, Z.; Matos, I.; Lapa, N.; Ventura, M.; Soares, O. S. G. P.; do Rego, A. M. B.; Fonseca, I. M., *Journal of Molecular Liquids* 3262021.
- [20].Balakrishnan, T.; Ang, W. L.; Mahmoudi, E.; Mohammad, A. W.; Sambudi, N. S., *Carbon Resources Conversion* 5, 150 2022.
- [21].马晓红; 董元华; 孙汉元, *今日材料化学* 5, 1 2017.
- [22].Yuan, C.; Qin, X.; Xu, Y.; Li, X.; Chen, Y.; Wang, Y., *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 3962020.
- [23].Ghiasi, M.; Ghanbarzadeh, M.; Ghaffarinejad, A.; Shahdost-Fard, F., *Talanta* 285, 127363 2024.
- [24].Wang, Q.; Wang, R.; Zhao, J.; Zou, Z.; Aslam, R.; Yan, Z., *Microchemical Journal* 2072024.
- [25].Du, H.; He, L.; Zhang, J.; Lu, H.-X., *Lwt* 2082024.
- [26].Dhongde, N. R.; Das, N. K.; Banerjee, T.; Rajaraman, P. V., *Industrial Crops and Products* 2122024.
- [27].Li, Z.; Wang, Q.; Zhou, Z.; Zhao, S., *Microchemical Journal* 1662021.
- [28].Alfi, A. A.; Alamrani, N. A.; Azher, O. A.; Abumelha, H. M.; Al-Ahmed, Z. A.; El-Metwally, N. M., *Journal of Materials Research and Technology* 19, 4697 2022.
- [29].Koparde, S. V.; Nille, O. S.; Kolekar, A. G.; Kamble, P. A.; Pandey Tiwari, A.; Kolekar, G. B.; Pawar, S. P., *Inorganic Chemistry Communications* 1702024.
- [30].Momo, B. Z.; Domga; Doumbi, R. T.; Motue Waffo, L. C.; Tchatchueng, J. B., *Results in Engineering* 222024.
- [31].Prasetya Aji, M.; Rahmawati, I.; Priyanto, A.; Marwoto, P., *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management* 202023.
- [32].Yang, M.; Yan, Y.; He, F.; Wang, Z.; Liu, E.; Fan, J., *Materials Letters* 3572024.
- [33].Yu, Y.; Li, C.; Chen, C.; Huang, H.; Liang, C.; Feng, S., *Talanta* 195, 117 2019.
- [34].Wang, J.; An, J.; Zhang, G.; Wang, R.; Xu, Y.; Zhu, F.; Shen, K.; Wang, Y., *Materials Letters* 3072022.
- [35].Enriquez, B. U. M.; Rangel, M.; Kumar, Y.; Khandual, S.; Agarwal, V., *Journal of Luminescence* 2772025.
- [36].Liu, Y.; Wu, P.; Wu, X.; Ma, C.; Luo, S.; Xu, M.; Li, W.; Liu, S., *Talanta* 210, 120649 2020.
- [37].Peng, H.; Li, Y.; Jiang, C.; Luo, C.; Duan, C.-G.; Travas-Sejdic, J., *Carbon* 100, 386 2016.
- [38].Gao, D.; Zhang, Y.; Liu, A.; Zhu, Y.; Chen, S., *Chemical Engineering Journal* 3882020.
- [39].Zhang, Q.; Liu, J.; Ao, Y.; Tian, F.; Tian, X., *Journal of Food Composition and Analysis* 1392025.
- [40].Hao, Y.; Wang, Z.; Wang, H.; Dong, W.; Liu, Y.; Hu, Q.; Shuang, S.; Dong, C.; Guo, Y.; Gong, X., *J Hazard Mater* 480, 136156 2024.
- [41].Shan, D.; Yu, H.; Yang, Z.; Zhang, Y., *Food Chem* 463, 141308 2025.
- [42].王少杰; 王永波; 宁远娜, *塔兰塔* 271, 125679 2024.
- [43].Zhang, J.; Chu, S.; Tao, C.; . *ChemPhysMater* 3, 462 2024.

作者简介: 张淼, (2000-), 女, 满族, 黑龙江省海伦市, 大连大学, 硕士, 研究方向为生物学
唐川, 男, 汉族, 山东省日照市, 大连大学副教授, 博士, 研究方向为生物学。