پیشرفت‌های اخیر در کربن کوانتوم دات ها برای شناسایی فلزات سنگین و تصفیه فاضلاب: مکانیسم‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

چکیده

رشد روزافزون جمعیت جهان و رشد فعالیت‌های صنعتی با افزایش غلظت آلاینده‌های سمی بخصوص فلزات سنگین در محیط‌های آبی و خاکی سراسر جهان همراه بوده است. بنابراین مقادیر بالایی از عناصر شیمیایی از طریق انتقال به آب‌وخاک کشاورزی وارد گیاه و چرخه غذایی انسان می‌شوند و به‌سلامت جامعه انسانی صدمه می‌زنند. نقاط کوانتومی کربنی دسته‌ای از نانو ذرات کربنی با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر هستند که به دلیل خواص منحصربه‌فردی همچون سمیت پایین، زیست سازگاری، پایداری شیمیایی، انتقال الکترون القایی نوری و رفتار فتولومینسانس قابل تنظیم در سال‌های اخیر موردتوجه محققین در حوزه‌های مختلف علوم قرار گرفته‌اند. کربن کوانتوم دات‌ها را می‌توان با استفاده از روش‌هایی همچون تابش مایکروویو، هیدروترمال، امواج فراصوت، تابش لیزر، اکسیداسیون شیمیایی و ... تولید کرد. در این روش‌ها از واکنش‌های شیمیایی همچون کربن زایی، اکسیداسیون، پیرولیز و پلیمریزاسیون در تولید کربن دات‌ها استفاده می‌شود. ذرات کربن کوانتوم دات به دلیل اندازه کوچک، خواص فلورسانس قوی و قابل تنظیم، داشتن گروه‌های عاملی مبتنی بر اکسیژن، نانو مواد امیدوارکننده‌ای برای فتوکاتالیزگری، شناسایی یون‌ها و فلزات سنگین، تصویربرداری زیستی و تصفیه فاضلاب و آلودگی آب هستند. این مقاله مروری به بررسی پیشرفت‌های اخیر در شناسایی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی کربن کوانتوم دات‌ها، روش‌های مورداستفاده در تولید آن‌ها، پایداری و همچنین کاربردهای بالقوه آن‌ها در شناسایی یون‌های فلزی و تصفیه فاضلاب پرداخته است.

واژه‌های کلیدی: *روش‌های سنتز CQDs، زیست سازگاری، فلزات سنگین، کربن دات، هیدروترمال.*

Recent advances in carbon quantum dots for heavy metal detection and wastewater treatment: mechanisms, challenges, and future prospects

Abstract

The rapid growth of the global population and industrial activities has been accompanied by an increase in the concentration of toxic pollutants, especially heavy metals, in aquatic and soil environments around the world. Therefore, high amounts of chemical elements enter the plant and human food chain through transfer to agricultural water and soil, harming the health of human society. Carbon quantum dots are a class of carbon nanoparticles with a size of less than 10 nm that have attracted the attention of researchers in various fields of science in recent years due to their unique properties such as low toxicity, biocompatibility, chemical stability, optically induced electron transfer, and tunable photoluminescence behavior. Carbon quantum dots can be produced using methods such as microwave radiation, hydrothermal, ultrasound, laser radiation, chemical oxidation, etc. In these methods, chemical reactions such as carbonization, oxidation, pyrolysis, and polymerization are used to produce carbon dots. Due to their small size, strong and tunable fluorescence properties, and oxygen-based functional groups, carbon quantum dots are promising nanomaterials for photocatalysis, detection of ions and heavy metals, bioimaging, and treatment of wastewater and water pollution. This review article examines recent advances in characterizing the physical and chemical properties of carbon quantum dots, the methods used in their production, stability, as well as their potential applications in metal ion detection and wastewater treatment.

Keywords: *Biocompatibility, Carbon dots, CQDs synthesis methods, Heavy metals, Hydrothermal.*

Extended Abstract

Introduction

The rapid growth of the global population and industrial activities has been accompanied by an increase in the concentration of toxic pollutants, especially heavy metals, in aquatic and soil environments around the world. Therefore, high amounts of chemical elements enter the plant and human food chain through transfer to agricultural water and soil, harming the health of human society. Carbon nanomaterials, including Carbon Quantum Dots (CQDs), have been recognized as effective heavy metal detectors in soil and water pollution remediation due to their unique properties such as high specific surface area, significant porosity, chemical stability, and thermal resistance. The high adsorption capacity of CQDs is attributed to the presence of surface-active groups, such as -COOH and -OH, which facilitate direct interaction and complexation with metal ions. These nanoparticles transport and stabilize toxic metals from the environment to their surface, and have high environmental compatibility by generating negligible secondary pollution. This study reviews recent advances in the synthesis method of carbon quantum dots as environmentally friendly sensors for the detection of heavy metals/metalloids and their recognition mechanism, as well as their role in wastewater purification and treatment.

Materials and Methods

This study aims to provide a detailed overview of CQDs by systematically analyzing scientific articles and, based on recent advances, exploring the evolution of CQDs from the production and technical optimization stage (activation and enrichment) to the practical application stage. The present paper also attempts to identify the challenges and opportunities facing this technology to improve the performance of environmental ecosystems.

Results

Several methods are used to synthesize CQDs, including hydrothermal, laser irradiation, heating process, electrochemical process, microwave and ultrasonic irradiation, etc. Among them, the hydrothermal method is the most widely used method for synthesizing CQDs due to its simplicity, high quantum efficiency, and cost-effectiveness. Due to their unique fluorescence properties, these compounds are effective tools for identifying heavy metals in aquatic and soil environments. The high sensitivity of CQDs to chemical changes and the presence of surface functional groups allow for accurate and rapid identification of metals. Also, the biocompatibility and low risk of CQDs make them a suitable option for use in environmental monitoring.

Conclusions

The use of CQDs has been confirmed in various studies due to their low toxicity, strong fluorescence effect, high photochemical stability, and biocompatibility in metal ion detection as well as wastewater purification and treatment; however, this research is in its early stages and it is expected that more fundamental research and in-depth studies on the optical properties of CQDs will be conducted in the near future. To better utilize the capabilities of CQDs in various fields of science, the quantum yield and quality of synthesized CQDs must be improved. Therefore, future studies should simplify the synthesis process, ensure product uniformity with desirable properties, and facilitate the method of purifying the product from residual reactants.

مقدمه

رشد روزافزون جمعیت جهان و رشد فعالیت‌های صنعتی در قرن ۲۱ مانند توسعه صنعتی، سوخت‌های فسیلی، استخراج معادن، فعالیت‌های کشاورزی و تولیدات دامی، با افزایش غلظت آلاینده‌های سمی بخصوص فلزات سنگین در محیط‌های آبی و خاکی سراسر جهان همراه بوده است. آلودگی آب‌وخاک به‌وسیله فلزات سنگین به‌عنوان یکی از مشکلات اساسی محیط‌زیست معرفی‌شده است (Saxena et al., 2019). فلزاتی که معمولاً چگالی بیشتر از پنج گرم در سانتی‌متر مکعب داشته باشد، به‌عنوان فلزات سنگین شناخته می‌شوند که می‌توان به فلزات سنگین ضروری (کروم، کبالت، روی، مس، منگنز و آهن) و غیرضروری (سرب، کادمیم، جیوه و آرسنیک) اشاره نمود (Nasir et al., 2015). خاستگاه این واژه، از خطرناکی و آسیب‌زایی فلزهای سنگین در محیط‌زیست برآمده است و در گذشته منظور از آن بیشتر عناصر سرب، جیوه و کادمیم به دلیل چگالی زیاد آن‌ها بوده است؛ بااین‌حال، امروزه همه فلزها و شبه‌فلزهای آسیب‌رسان و سمی موجود در پوسته زمین فارغ از مقدار چگالی، نظیر آرسنیک در محدوده فلزات سنگین قرار می‌گیرند (Hashim et al., 2011). سمی‌ترین شکل این فلزات حالت یونی آن‌ها است که اکسیداسیون پایدار دارند. فلزات نمی‌توانند برای مدت طولانی به‌صورت محلول باقی بمانند و پس از مدتی بسته به درجه حلالیت خود به‌صورت کلوئید و جذب در سطح مواد آلی و معدنی درمی‌آیند. اگرچه فلزات سنگین می‌توانند به‌طور طبیعی در خاک وجود داشته باشند، مقادیر بالای آن‌ها نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند استفاده از مواد شیمیایی، پساب‌های صنعتی حاصل از کارخانه‌ها تولیدی و آب فلزکاری، اصلاح‌کننده‌های آلی، کودهای حیوانی، بهسازهای معدنی، لجن فاضلاب و ضایعات حاصل از صنایع آهن و فولاد، معدن‌کاوی، حمل‌ونقل جاده‌ای و غیره هستند. در پژوهشی Li et al. (2013b)، آلودگی ۸ فلز سنگین را در یک شهرک صنعتی قدیمی در شمال چین مورد ارزیابی قراردادند که یافته‌ها نشان داد، غلظت سرب، کادمیم و مس فراتر از میزان معمول در خاک است. غلظت بالای این فلزات به همراه فلزات روی و جیوه در این مطالعه ناشی از فعالیت‌های انسانی در نظر گرفته شد. بنابراین مقادیر بالایی از عناصر شیمیایی از طریق انتقال به آب‌وخاک کشاورزی وارد گیاه و چرخه غذایی انسان می‌شوند و به‌سلامت و بهداشت جامعه انسانی و اکوسیستم‌ها از طریق شبکه غذایی صدمه می‌زنند و تغییر در جوامع زیستی و تخریب کیفیت محیط‌زیست را سبب می‌شوند. به‌طور مثال، تجمع عناصر کروم و آرسنیک در بدن باعث واکنش با مولکول‌ها شده و ترکیبات سمی پایدار ایجاد (Ma et al., 2016). تجمع فلزات سنگین در آب‌وخاک و افزایش غلظت آن‌ها و رسیدن به محدوده خطر، می‌تواند از طریق

ورود به زنجیره غذایی انسان، سلامتی او را مورد تهدید قرار دهد (Cui et al., 2005). جذب فلزات سنگین از اراضی و آب‌های آلوده به‌وسیله گیاهان و به‌ویژه محصولات کشاورزی یکی از مهم‌ترین راه‌های ورود این عناصر به زنجیره غذایی است (Fu et al., 2008). گزارش‌شده است که چنانچه مقادیر زیادی از فلزات سنگین ازجمله سرب وارد بدن مادران باردار شود، تولد نوزادان نارس و عقب‌ماندگی ذهنی نوزادان افزایش چشمگیری خواهد داشت (Geneva, 2003). تجمع کادمیم نیز در گیاهان می‌تواند پتانسیل جذب این عنصر توسط انسان را افزایش دهد و این امر در حالتی صورت می‌گیرد که این گیاهان جزو جیره غذایی باشند (Kabata-Pendias, 2000). برای کاهش اثرات این آلودگی، تکنیک‌های اصلاحی مختلف، ازجمله فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، الکتریکی و حرارتی، برای استخراج یا حذف آلاینده‌ها از خاک و آب در دسترس هستند (Thakare et al., 2021). درحالی‌که روش‌های فیزیکی و شیمیایی عملکرد سریع‌تری داشته و نتایج بهتری را ارائه می‌دهند، هزینه بالای آن‌ها و خطر آلودگی ثانویه به‌واسطه تزریق این ترکیبات به محیط ازجمله چالش‌های جدی این روش‌هاست (Xu et al., 2022). در مقابل، روش‌های زیستی ازجمله زیست پالایی با نانو مواد سازگار با محیط‌زیست، رویکردهایی کم‌هزینه‌تر و پایدارتر ارائه داده‌اند که امروزه توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند. فناوری نانو طی دهه‌های اخیر تحولی بنیادین در حوزه‌های زیست‌محیطی ایجاد کرده و استفاده از نانو مواد در حذف یون‌های فلزی سمی از آب و خاک به‌طور گسترده‌ای موردبررسی قرارگرفته است. در این میان، نانو مواد کربنی ازجمله CQDs[1] به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی نظیر سطح ویژه بالا، تخلخل قابل‌توجه، پایداری شیمیایی و مقاومت حرارتی، به‌عنوان جاذب‌های مؤثر فلزات سنگین در اصلاح آلودگی خاک و آب شناخته‌شده‌اند (Dutta et al., 2022). قابلیت جذب بالای CQDs، به وجود گروه‌های فعال سطحی مانند COOH- و OH- نسبت داده می‌شود که امکان برهم‌کنش و کمپلکس شدن با یون‌های فلزی را فراهم می‌کنند. این نانو ذرات ضمن آن‌که فلزات سمی را از محیط به سطح خود منتقل و تثبیت می‌کنند، با ایجاد حداقل آلودگی ثانویه، سازگاری بالایی با محیط‌زیست دارند (Alazaiza et al., 2021).

با وجود گسترش پژوهش‌ها در یک دهه اخیر در ارتباط با CQDs، بسیاری از این مقالات عمدتاً به گزارش روش‌های سنتز و کاربرد نهایی این ساختارهای کوانتومی پرداخته‌اند؛ با این وجود بررسی ارتباط ساختارمند بین روش‌های سنتز، شرایط فرآیند به‌ویژه دما و زمان واکنش و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محصول تولیدی نیازمند بررسی‌های بیشتر است. همچنین بررسی هم‌زمان روش‌های سنتز CQDs ازنظر پارامترهای کلیدی و قابلیت مقیاس‌پذیری جهت انتخاب روش بهینه تولید این ساختارها اهمیت دارد. با توجه به این مسئله نوآوری و وجه تمایز مطالعه حاضر در ارائه یک ارزیابی نظام‌مند از روش‌های متداول و نوظهور سنتز CQDs با تأکید بر ارتباط بین شرایط سنتز و ویژگی‌های ساختاری و عملکرد نهایی محصول است. علاوه براین مزایا و محدودیت‌های هر کدام از روش‌های سنتز موردبررسی قرار گرفته و قابلیت این نانو مواد در شناسایی فلزات سنگین، سازوکار شناسایی آن‌ها و تصفیه فاضلاب بررسی می‌شود.

روش انجام پژوهش

در مطالعه حاضر، مقالات پژوهشی و مروری منتشرشده در زمینه روش‌های سنتز CQDs، مشخصه یابی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و کاربرد زیست‌محیطی این ترکیبات موردبررسی قرار گرفتند. جست‌وجوی علمی با استفاده از پایگاه‌های اطلاعاتی Web of Sience، Scopus، ScienceDirect، SprngerLink، Nature، Google Scholar و SID با تمرکز بر مطالعات انجام شده در محدوده زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۶ صورت گرفت. در فرآیند جست‌وجو از کلیدواژه‌های Carbon Dots، Carbon Quantum Dots، Green Synthesis، Microwave-Assisted Synthesis، hydrothermal Synthesis، Ultrasonic Synthesis، Electrochemical Synthesis، Biomass-based Carbon Quantum Dots، Pyrolysis، Surface Functionalization، Heavy Metal Detection و Wastewater Treatment استفاده شد که در مجموع ۸۷ منبع علمی در تدوین این مقاله مروری به کار رفته است. معیارهای ورود مطالعات، شامل مقالات مروری و پژوهشی در زمینه راهبردها و شرایط سنتز CQDs، ویژگی‌های ساختاری و سطحی محصول تولیدی، و مقالات مرتبط با شناسایی فلزات سنگین و تصفیه آب و فاضلاب بود؛ همچنین منابع تکراری، مقالات مرتبط با نقاط کوانتومی غیر کربنی و سایر نانو مواد و مقالات فاقد اطلاعات کافی درمورد شرایط سنتز و یا ویژگی محصول تولیدی حذف گردیدند. فرآیند انتخاب منابع شامل بررسی عنوان و چکیده و ارزیابی متن مقالات براساس معیارهای ورودی و خروجی بود. کیفیت مقالات

[1] Carbon Quantum Dots; CQDs

ویرایش اولیه نشده

موردبررسی براساس اعتبار روش مورداستفاده جهت سنتز CQDs، کامل بودن داده‌های مربوط به شرایط تولید، کیفیت تعیین خصوصیات ساختاری محصول تولیدی و همچنین گزارش داده‌های تجربی عملکرد محصول تعیین شد.

معرفی کربن دات‌ها

کربن کوانتوم دات‌ها نسل جدیدی از ترکیبات کربنی حاوی اکسیژن می‌باشند که دارای هندسه کروی با اندازه کمتر از ۱۰ نانومتر هستند (Li et al., 2013a). در مقایسه، CQDs از نظر دارا بودن حلالیت بالا در آب، فوتولومینسنت، خواص زیست سازگاری و دسترسی زیستی مطلوب، سهولت عامل‌دار شدن و سمیت کم، برتری فزاینده‌ای نسبت به نقاط کوانتومی نیمه‌رسانا و رنگ‌دانه‌های آلی دارند (Wang et al., 2020). کربن دات‌ها به دلیل دارا بودن گروه‌های کربوکسیلیک اسید بر سطح، حلالیت عالی در آب داشته و برای عامل‌دار شدن توسط انواعی از گونه‌های آلی، پلیمری معدنی و یا زیستی مناسب می‌باشند (Xu et al., 2004; Dong et al., 2024). مطالعات بسیاری در زمینه‌ی روش‌های سنتز این نانو ساختارها از زمان کشف اولیه صورت پذیرفته است و گروه‌های پژوهشی متعددی در تلاش‌اند تا به درک ژرف‌تری از خاستگاه و رفتار فیزیک نوری این ترکیبات، همراه با دستیابی به روش‌های سنتزی بهتر و توسعه کاربردهای جدید این نانو مواد نوظهور برسند (Liu et al., 2019; Zhang et al., 2025). CQDs در کاربردهای متنوع، مزایای زیادی از خود نشان می‌دهند و به موادی بسیار موردتوجه در حوزه‌هایی چون الکترونیک نوری، پزشکی زیستی، تصفیه محیط‌زیست و ذخیره انرژی تبدیل شده‌اند.

روش‌های سنتز CQDs

دو رویکرد اصلی برای سنتز CQDs وجود دارد که به دو دسته روش‌های بالا به پایین[1] و پایین به بالا[2] تقسیم می‌شوند. در ادامه مزایای و معایب این دو روش موردبررسی قرار می‌گیرد.

روش‌های بالا به پایین

رویکرد بالا به پایین یکی از راهبردهای پرکاربرد در سنتز CQDs است که در آن مواد کربنی با ابعاد بزرگ‌تر از طریق روش‌های شیمیایی یا فیزیکی به ذراتی در مقیاس نانو تجزیه می‌شوند. در این روش، ساختارهای کربنی حجیم به‌تدریج شکسته شده و به نقاط کوانتومی کربنی با اندازه نانومتری تبدیل می‌شوند. این روش دارای مزایای متعددی است که ازجمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به تنوع گسترده پیش ماده‌های قابل‌استفاده اشاره کرد. مواد اولیه مورداستفاده در این روش شامل نانولوله‌های کربنی، الیاف کربنی، کربن نوده‌ای، نیتریت کربن گرافیتی توده‌ای، پودر گرافیت و اکسید گرافن هستند. علاوه بر این، فرآیند سنتز در این رویکرد نسبتاً ساده بوده و در بسیاری از موارد منجر به بازده تولید بالایی می‌شود. با وجود این مزایا، روش بالا به پایین با محدودیت‌های قابل‌توجهی نیز همراه است. یکی از مهم‌ترین معایب این روش، کنترل ضعیف بر اندازه و مورفولوژی (ریخت‌شناسی) ذرات تولیدشده است. این مسئله عمدتاً ناشی از ماهیت تصادفی فرآیند خرد شدن و تجزیه مواد اولیه بوده و می‌تواند منجر به تولید ذراتی با اندازه‌ها و شکل‌های ناهمگون شود. افزون بر این، هزینه‌های نسبتاً بالا و احتمال وجود ناخالصی‌ها در محصول نهایی از دیگر چالش‌های مرتبط با این روش به شمار می‌روند (Tavan et al., 2025).

فرسایش لیزری[3]

فرسایش لیزری یکی از روش‌های فیزیکی از دسته روش‌های بالا به پایین است که به‌طور گسترده برای سنتز CQDs مورداستفاده قرار می‌گیرد. در این روش، پالس‌های لیزری پرانرژی با یک هدف کربنی[4] برهم‌کنش می‌کنند. با تابش لیزر، جذب موضعی انرژی موجب افزایش سریع دما

[1] Top-down Methods
[2] Bottom-up Methods
[3] Laser Ablation
[4] Carbonaceous Target

ویراستاری نشده

شده و شرایطی با دمای بیش از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بالاتر از ۷۵ کیلو پاسکال ایجاد می‌شود. این شرایط محیطی سبب تبخیر ماده و تشکیل پلاسما می‌شود و در ادامه، با سرد شدن محیط مایع اطراف، نقاط کوانتومی کربنی هسته‌زایی کرده و رشد می‌کنند(Kong et al., 2024). پیشرفت‌های اخیر در سنتز مبتنی بر لیزر، به‌طور قابل‌توجهی کارایی و کیفیت CQDs تولیدی را افزایش داده است. در مطالعه‌ای Ren et al. (2019) با استفاده از فرسایش لیزری پالسی در آب دیونیزه، نقاط کوانتومی کربنی مزوحفره‌ای آلاییده شده با نیتروژن[1]را سنتز کردند که دارای بازده کوانتومی ۳۲/۴ درصد و طول عمر فلورسانس قابل‌توجه ۶/۵۶ نانوثانیه بودند. با وجود مزایایی نظیر خلوص بالا، احتمال آلودگی کم و عدم نیاز به پیش ماده‌های شیمیایی، روش فرسایش لیزری دارای محدودیت‌هایی نظیر ایجاد نقص‌های سطحی در فرآیند سنتز، نبود کنترل یکنواخت بر فرآیند خرد شدن ذرات و بازده کوانتومی و کارایی پایین فوتولومینسانس هست (Elugoke et al., 2024).

روش تخلیه قوسی[2]

روش تخلیه قوسی یک روش فیزیکی پرانرژی از دسته روش‌های بالا به پایین است که در آن یک منبع کربنی توده‌ای در ناحیه آند، تحت تأثیر پلاسمای قوسی ایجادشده بین دو الکترود کربنی تجزیه می‌شود. در این روش از جریان مستقیم در یک محیط خنثی یا واکنش‌پذیر استفاده می‌شود که منجر به ایجاد دماهای موضعی بسیار بالا تا حدود ۴۰۰۰ کلوین، می‌گردد. در چنین دماهایی، کربن تبخیر شده و سپس متراکم می‌شود و انواع مختلفی از نانوساختارها، از جمله CQDs را تشکیل می‌دهد. این نانوساختارها در ناحیه کاتد رسوب کرده یا از محیط اطراف جمع‌آوری می‌شوند (Das et al., 2024). یکی از نخستین کشفیات اتفاقی نقاط کوانتومی کربنی توسط Xu et al. (2004) با استفاده از روش تخلیه قوسی صورت گرفت. پیشرفت‌های اخیر موجب بهینه‌سازی این روش شده است که از میان آن‌ها می‌توان به تکنیک تخلیه قوسی غوطه‌ور در آب[3]اشاره کرد. در این روش، الکترودهای کربنی در آب دیونیزه غوطه‌ور می‌شوند و آب به‌طور هم‌زمان نقش محیط دی‌الکتریک و عامل سردکننده بخار داغ کربن را ایفا می‌کند. در طول فرآیند، میکرو راکتورهای حبابی در نزدیکی پلاسمای قوسی تشکیل می‌شوند که به‌عنوان مراکز هسته‌زایی برای تشکیل CQDs عمل می‌کنند(Kong et al., 2024). در مطالعه‌ای Chao-Mujica et al. (2021) با موفقیت CQDs را با استفاده از روش تخلیه قوسی غوطه‌ور سنتز کردند. نقاط کوانتومی حاصل دارای اندازه ذراتی در محدوده ۱ تا ۵ نانومتر بودند و نوارهای شبکه‌ای مشابه گرافیت با فاصله بین‌لایه‌ای ۰/۳۴ تا ۰/۳۵ نانومتر را نشان دادند. این نانو ذرات دو باند فلورسانس در محدوده‌های ۳۲۰ تا ۳۴۰ نانومتر و ۴۰۰ تا ۴۱۰ نانومتر از خود نشان دادند و دارای بازده کوانتومی معادل ۱۶ درصد بودند که آن‌ها را برای کاربردهای تصویربرداری زیستی مناسب می‌سازد. در ادامه، Pattanayek et al. (2024) نسخه‌ای سبز از فرآیند تخلیه قوسی را توسعه دادند که در آن از محلول‌های آبی اوره و منابع طبیعی کربن استفاده شد. این روش منجر به تولید CQDs با بازده کوانتومی بالاتر (۲۸ درصد) و فلورسانس آبی قوی گردید. نقاط کوانتومی تولیدشده از پایداری نوری بالایی برخوردار بودند. با وجود سادگی فرآیند و توانایی تولید نقاط کوانتومی کربنی با کیفیت بالا، روش تخلیه قوسی دارای محدودیت‌هایی نیز است. از جمله مهم‌ترین این محدودیت‌ها می‌توان به بازده پایین تولید، یکنواختی ضعیف اندازه ذرات و مصرف بالای انرژی اشاره کرد که استفاده از این روش را برای تولید در مقیاس صنعتی با چالش مواجه می‌سازد.

روش الکتروشیمیایی[4]

روش الکتروشیمیایی نخستین بار توسط Zhou et al. (2007) معرفی شد. این روش بر پایه شکستن اکسایشی منابع کربنی به کمک اعمال پتانسیل الکتریکی استوار بوده و مسیری نسبتاً ساده، سازگار با محیط‌زیست و قابل‌کنترل برای سنتز نقاط کوانتومی کربنی فراهم می‌کند. در این روش، پیش ماده‌های کربنی که معمولاً شامل مواد رسانایی نظیر میله‌های گرافیتی، الیاف کربنی، نانولوله‌های کربنی چند دیواره یا مواد مبتنی بر زغال‌سنگ هستند، در یک محیط الکترولیتی منتخب و تحت شرایط دقیق کنترل‌شده جریان و پتانسیل، دچار اکسایش الکتروشیمیایی

---

[1] Nitrogen-Doped Mesoporous CQDs
[2] Arc Discharge
[3] Submerged Arc Discharge in Water
[4] Electrochemical Method

می‌شوند (Guan et al., 2023). از جمله الکترولیت‌های متداول مورداستفاده در این روش می‌توان به محلول آبی هیدروکسید سدیم، مخلوط NaOH و اتانول، اسیدسیتریک و همچنین حلال‌های آلی نظیر استونیتریل حاوی تترا بوتیل آمونیوم پرکلرات اشاره کرد. این روش به دلیل شرایط واکنش ملایم (دمای و فشار محیط)، تکرارپذیری بالا، قابلیت تنظیم ویژگی‌های ذرات، سازگاری زیست‌محیطی و امکان تولید در مقیاس بزرگ، موردتوجه گسترده قرار گرفته است. بااین‌حال، ایجاد نقص‌های سطحی، بروز اثرات محصورشدگی کوانتومی و اکسایش ناقص می‌تواند موجب توزیع گسترده اندازه ذرات و کاهش درجه بلورینگی شود. این نواقص ساختاری ممکن است بازده فلورسانس، رفتار انتقال بار و عملکرد کاتالیستی ذرات را تحت تأثیر منفی قرار دهند (Tavan et al., 2025; Guan et al., 2023).

فراصوت[1]

فراصوت یک روش ساده اما کارآمد از دسته روش‌های بالا به پایین برای سنتز نقاط کوانتومی کربنی است که بر پایه استفاده از امواج فراصوت با فرکانس بالا عمل می‌کند. در این روش، پدیده‌ای موسوم به کاویتاسیون آکوستیکی[2] ایجاد می‌شود که شامل تشکیل سریع، رشد و فروپاشی انفجاری حباب‌های میکروسکوپی در محیط مایع است. این پدیده موجب ایجاد نواحی موضعی با دما و فشار بسیار بالا در بازه‌های زمانی بسیار کوتاه می‌شود. چنین شرایط شدیدی باعث شکسته شدن مواد کربنی توده‌ای و تبدیل آن‌ها به قطعاتی در مقیاس نانو، از جمله نقاط کوانتومی کربنی، می‌گردد (Guan et al., 2023). در سال‌های اخیر، روش فراصوت به دلیل هزینه پایین، سازگاری با محیط‌زیست و قابلیت توسعه برای تولید در مقیاس صنعتی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. علاوه بر این، اندازه، مورفولوژی و ویژگی‌های نوری CQDs تولیدشده را می‌توان از طریق تغییر پارامترهای فرآیند، از جمله توان فراصوت، مدت‌زمان اعمال امواج، ترکیب حلال و نسبت پیش ماده کربنی به حلال، کنترل و تنظیم کرد (Elugoke et al., 2024). با وجود مزایای متعدد این روش، از جمله توزیع یکنواخت انرژی، عملکرد در دماهای پایین و سهولت اجرا، استفاده از فراصوت به‌تنهایی همیشه منجر به تولید CQDs با بلورینگی بالا یا بازده کوانتومی مطلوب نمی‌شود. به همین دلیل، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب فراصوت با سایر روش‌های سنتز، از جمله فرآیندهای هیدروترمال، اکسایش شیمیایی، یا سنتز به کمک مایکروویو می‌تواند به‌طور چشمگیری کیفیت ساختاری و عملکرد نوری نقاط کوانتومی کربنی را بهبود بخشد (Tavan et al., 2025).

روش‌های پایین به بالا

در روش‌های پایین به بالا مولکول‌های کوچک کربنی به‌عنوان پیش ماده مورداستفاده قرار می‌گیرند و طی فرآیندهای پلیمریزاسیون و کربونیزاسیون به نقاط کوانتومی کربنی تبدیل می‌شوند. این روش‌ها از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه بوده و سازگاری بیشتری با محیط‌زیست دارند. با این حال، کنترل دقیق اندازه نهایی نقاط کوانتومی کربنی در این روش‌ها همواره امکان‌پذیر نیست.

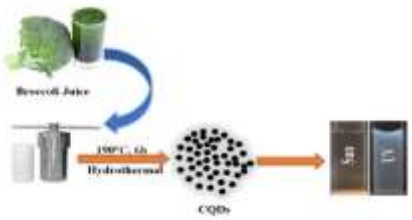
روش هیدروترمال

روش هیدروترمال یکی از پرکاربردترین و سازگارترین روش‌ها با محیط‌زیست برای سنتز نقاط کوانتومی کربنی محسوب می‌شود. محبوبیت این روش به دلیل سادگی فرآیند، هزینه پایین و قابلیت استفاده از طیف گسترده‌ای از پیش ماده‌های طبیعی و مصنوعی کربنی است. در این روش، پیش ماده‌هایی نظیر اسیدسیتریک، فنیلن‌دی‌آمین، کیتوسان، اوره یا زیست‌توده در آب یا حلال‌های آلی پراکنده شده و سپس درون یک اتوکلاو فولادی پوشش داده شده با تفلون تحت شرایط دما و فشار بالا قرار می‌گیرند (Guan et al., 2023). در این روش، با افزایش دما مجموعه‌ای از واکنش‌های کربونیزاسیون، پلیمریزاسیون و آب‌گیری آغاز می‌شود که در نهایت منجر به تشکیل نقاط کوانتومی کربنی با اندازه و گروه‌های عاملی سطحی قابل تنظیم می‌گردد. برای نخستین بار سنتز CQDs فلورسانس با استفاده از این روش و با به‌کارگیری اسید ال–آسکوربیک به‌عنوان منبع کربن، توسط Zhang et al. (2010) گزارش شد. از آن زمان تاکنون، روش هیدروترمال به دلیل انعطاف‌پذیری بالا در تولید CQDs

[1] Ultrasonication
[2] Acoustic Cavitation

ویرایشگری نشده

با توزیع اندازه همگن، بازده کوانتومی نسبتاً بالا و پایداری سطحی مناسب، به‌طور گسترده مورداستفاده قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین مزایای این روش، سازگاری آن با منابع زیستی و پیش ماده‌های سبز است که وابستگی به مواد شیمیایی و آلاینده را کاهش می‌دهد. در پژوهشی Pang et al. (2017) نقاط کوانتومی کربنی دوپ شده با گوگرد و نیتروژن را از طریق یک فرآیند هیدروترمال تک‌مرحله‌ای با استفاده از اتیلن‌دی‌آمین و متیونین سنتز کردند. این CQDs دارای حلالیت مناسب در آب بوده و قابلیت مؤثری در شناسایی یون‌های Fe^{3+} از خود نشان داد. با وجود مزایای متعدد، روش هیدروترمال دارای محدودیت‌هایی نیز است. این فرآیند معمولاً به زمان واکنش نسبتاً طولانی، از چند ساعت تا یک شبانه‌روز، نیاز دارد و کنترل دقیق اندازه نهایی و یکنواختی CQDs ممکن است دشوار باشد. همچنین، نیاز به استفاده از راکتورهای تحت‌فشار، فرآیند مقیاس‌پذیری صنعتی را با پیچیدگی‌هایی همراه می‌کند. با این وجود، این روش بستری مناسب برای آلایش با هتروواتم‌هایی نظیر نیتروژن(N) ، گوگرد (S)، بور (B) و فسفر (P) فراهم می‌کند و امکان توسعه CQDs با ویژگی‌های کاتالیستی، حسگری و نوری بهبودیافته را میسر می‌سازد. این قابلیت تنظیم‌پذیری باعث شده است که روش هیدروترمال به گزینه‌ای امیدوارکننده برای تهیه الکتروکاتالیست‌های نوین تبدیل شود (Tavan et al., 2025; Elugoke et al., 2024). شکل ۱ سنتز CQDs از کلم بروکلی را از طریق فرآیند هیدروترمال به‌صورت شماتیک نشان می‌دهد.



شکل ۱- سنتز CQDs از کلم بروکلی از طریق فرآیند هیدروترمال (Arumugam and Kim 2018)

روش سنتز به کمک مایکروویو[1]

سنتز نقاط کوانتومی کربنی به کمک مایکروویو در سال‌های اخیر به دلیل سرعت بالای واکنش، قابلیت مقیاس‌پذیری و بهره‌وری انرژی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این روش، از تابش الکترومغناطیسی در محدوده مایکروویو (با طول‌موجی بین ۱ میلی‌متر تا ۱ متر) برای ایجاد گرمایش حجمی یکنواخت و مستقیم در محیط واکنش استفاده می‌شود (Sousa et al., 2021). گرمایش سریع داخلی باعث شکسته شدن پیوندهای موجود در پیش ماده‌ها و تسریع فرآیند کربونیزاسیون می‌شود و در نتیجه، CQDs با خواص نوری مطلوب تنها در مدت چند دقیقه تولید می‌شوند. تابش مایکروویو موجب گرم شدن یکنواخت محیط واکنش شده و از ایجاد گرادیان‌های حرارتی جلوگیری می‌کند. این ویژگی تشکیل CQDs یکنواخت، با خلوص بالا و تعداد نقص‌های اندک سطحی را تسهیل می‌کند. از دیگر مزایای این روش می‌توان به کاهش زمان واکنش، مصرف انرژی کمتر و عدم نیاز به مواد شیمیایی آسیب‌زا اشاره کرد (Tungare et al., 2020). بازده کوانتومی در این روش برای CQDs آلاییده شده با نیتروژن و گوگرد به ترتیب ۶۱/۳ درصد (Wang et al., 2015) و ۸۲/۷ درصد (Zhu et al., 2021) گزارش شده است. شکل ۲ سنتز نقاط کوانتومی کربنی با استفاده از آب لیمو و پیاز را تحت تابش مایکروویو به تصویر کشیده است. با وجود مزایای فراوان، روش مایکروویو محدودیت‌هایی نیز دارد. این روش عمدتاً برای تولید در مقیاس کوچک مناسب است و به دلیل برهم‌کنش مستقیم و گاه ناهمگن امواج مایکروویو با محیط واکنش، کنترل دقیق توزیع اندازه CQDs دشوار است. به‌منظور رفع این محدودیت‌ها و بهبود کنترل شرایط واکنش و مقیاس‌پذیری، پژوهشگران روش ترکیبی سنتز هیدروترمال به کمک مایکروویو را توسعه داده‌اند.

[1] Microwave-Assisted Synthesis



شکل ۲- روش سنتز نقاط کوانتومی کربنی با استفاده از آب لیمو و پیاز تحت تابش مایکروویو (Monte-Filho et al., 2019)

روش احتراق[1]

روش احتراق یک رویکرد ساده، کم‌هزینه و کارآمد برای سنتز CQDs است که بر پایه تجزیه اکسایشی پیش ماده‌های آلی غنی از کربن، نظیر اسیدسیتریک، گلوکز، اوره و انواع ترکیبات مشتق‌شده از زیست‌توده، استوار است. در این روش، یک عامل اکسیدکننده آغازگر فرآیند تخریب حرارتی پیش ماده بوده و در نتیجه مواد کربنی تولید می‌شوند که در ادامه به نقاط کوانتومی کربنی با ویژگی‌هایی نظیر فلورسانس مطلوب و حلالیت مناسب در آب تبدیل می‌گردند (Tungare et al., 2020). به دلیل سادگی عملیاتی، قابلیت تولید در مقیاس بالا و سازگاری با محیط‌زیست، روش احتراق موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته و در کاربردهای آزمایشگاهی و صنعتی به‌طور گسترده مورداستفاده قرار گرفته است. منشأ این روش را می‌توان به پژوهش Liu et al. (2007) نسبت داد که پس از فرآیند احتراق، از تیمار اکسایشی با اسید برای بهبود پراکندگی CQDs در آب، افزایش خواص فوتولومینسانس و ایجاد گروه‌های عاملی سطحی استفاده کردند. پیشرفت‌های بعدی نشان داد که این روش قابلیت بالایی در تولید نقاط کوانتومی کربنی آلاییده شده و دارای نشر چندرنگ دارد. به‌عنوان مثال، Li et al. (2017) با استفاده از احتراق مستقیم اسیدسیتریک، نقاط کوانتومی گرافنی یکنواختی با اندازه تقریبی ۸/۵ نانومتر و غلظت بالایی از گروه‌های کربوکسیلی سطحی سنتز کردند. همچنین Cheng et al. (2019) از ضایعات زیستی کرک درخت بید برای سنتز CQDs آلاییده‌شده با نیتروژن و گوگرد بهره بردند که دارای اندازه ذرات یکنواخت و عامل‌دارشدگی سطحی مناسب بودند. با وجود مزایای متعدد، روش احتراق در کنترل دقیق اندازه ذرات و تکرارپذیری نتایج با محدودیت‌هایی مواجه است. به‌منظور رفع این مشکلات، روش‌های پیشرفته‌تری نظیر سنتز مبتنی بر قالب توسعه یافته‌اند که امکان تولید CQDs با اندازه یکنواخت‌تر و ساختار کنترل‌شده‌تر را فراهم می‌کنند.

روش قالبی[2]

روش قالبی یکی از پیشرفته‌ترین راهبردهای سنتز نقاط کوانتومی کربنی است که به دلیل توانایی بالای آن در کنترل دقیق اندازه ذرات، مورفولوژی و ویژگی‌های سطحی CQDs اهمیت ویژه‌ای یافته است. در این روش، از یک چارچوب ساختاری یا قالب استفاده می‌شود که اندازه و شکل نهایی نقاط کوانتومی را تعیین می‌کند. قالب‌های مورداستفاده عموماً به دو دسته قالب‌های سخت (زئولیت‌ها، سیلیکا، هیدروکسیدهای دولایه‌ای و ...) و قالب‌های نرم (سورفکتانت‌ها، کوپلیمرهای بلوکی و ...) تقسیم می‌شوند. جلوگیری از تجمع و کلوخه‌شدن نانوذرات، بهبود غیرفعال‌سازی سطحی، تولید CQDs با توزیع اندازه یکنواخت و قابلیت تنظیم ویژگی‌های ساختاری و فوتولومینسانس از جمله مزایای روش قالبی نسبت به روش‌های سنتی است (Tungare et al., 2020). در مطالعه‌ای، نقاط کربنی فوتولومینسانس با استفاده از یک سیستم قالب دوگانه سخت (سیلیکای مزوحفره‌ای) و نرم (Pluronic P123) سنتز شد؛ CQDs حاصل دارای اندازه یکنواخت، پایداری نوری مطلوب و بازده کوانتومی متوسط در محدوده ۳/۳ تا ۴/۷ درصد بودند (Yang et al., 2013). اگرچه این روش بسیاری از محدودیت‌های روش‌های قبلی، از جمله کنترل ضعیف اندازه ذرات و ناهمگنی ساختاری مشاهده‌شده در روش‌های احتراق و مایکروویو را برطرف می‌کند، اما بدون نقص نیست. حذف قالب

[1] Combustion Method
[2] Template Method

ویراستاری نشده

معمولاً نیازمند استفاده از عواملی است که ممکن است ناخالصی‌های باقی‌مانده بر جای گذاشته یا موجب ایجاد نقص‌های ساختاری جدید شوند. علاوه بر این، فرآیند سنتز قالبی نسبتاً پیچیده، زمان‌بر و پرهزینه است و در مقایسه با روش‌های ساده‌تر، معمولاً بازده تولید کمتری دارد؛ بنابراین، اگرچه سنتز مبتنی بر قالب از نظر دقت، کنترل ساختار و قابلیت سفارشی‌سازی ویژگی‌های CQDs عملکرد بسیار مطلوبی دارد، اما برای تولید در مقیاس صنعتی یا کاربردهای حساس به هزینه، همیشه گزینه ایده‌آلی محسوب نمی‌شود. از این رو، پژوهش‌های آینده احتمالاً بر ترکیب دقت بالای روش قالبی با قابلیت مقیاس‌پذیری روش‌های ساده‌تر متمرکز خواهند شد تا بتوان به‌طور هم‌زمان به عملکرد بالا و توجیه اقتصادی مناسب دست یافت.

جدول ۱- مقایسه مزایا، محدودیت‌ها و قابلیت کاربردی روش‌های سنتزCQDs

ردیف	روش سنتز	پارامترهای کلیدی	مزایا	محدودیت	مصرف انرژی	قابلیت مقیاس پذیری
۱	هیدروترمال	دما، زمان، فشار، غلظت پیش ماده، pH	تجهیزات نسبتا ساده، قابلیت استفاده از مواد اولیه متنوع، امکان اصلاح سطح	زمان واکنش نسبتا طولانی	متوسط تا زیاد	متوسط
۲	مایکروویو	توان، زمان تابش،نوع پیش ماده، حجم نمونه	گرمایش سریع، سرعت واکنش زیاد، کاهش زمان واکنش	وابستگی به نوع ماده اولیه، محدودیت در یکنواختی گرمایش در مقیاس بزرگ	کم تا متوسط	متوسط
۳	فراصوت	فرکانس، توان، دما، زمان	زمان فرآیند کوتاه، امکان اصلاح سطح، تجهیزات نسبتا در دسترس	امکان ایجا محصول ناهمگن، دشواری کنترل شرایط	متوسط	متوسط
۴	احتراق	دما، زمان، نرخ گرمایش	مناسب برای مواد اولیه جامد و زیستی، فرآیند نسبتا ساده	احتمال تشکیل محصولات جانبی، کربنی شدن بیش از حد، مصرف زیاد انرژی	زیاد	متوسط تا زیاد
۵	اکسیداسیون شیمیایی	نوع اکسید کننده، دما، زمان، pH	تولید گروههای اکسیژنی، امکان اصلاح سطح	مصرف مواد اکسید کننده قوی، تولید پسماند شیمیایی	متوسط	متوسط تا زیاد
۶	تخلیه قوس	جریان، ولتاژ، فشار	امکان کنترل اندازه و ساختار نانوذرات کربنی	تجهیزات پیشرفته تر، دشواری کنترل خصوصیات سطحی محصول و خالص سازی	زیاد	محدود
۷	فرسایش لیزری	طول موج، انرژی پالس، تعداد پالس، حلال	بدون نیاز به پیش ماده شیمیایی، تولید محصول نسبتا خالص	تجهیزات گرانقیمت	زیاد	محدود تا متوسط
۸	الکتروشیمیایی	ولتاژ، الکترولیت، جریان، زمان	امکان اصلاح سطح محصول، کنترل شرایط واکنش	امکان تولید محصولات ناهمگن، وابستگی به نوع الکترود و الکترولیت	کم تا متوسط	متوسط

نقش نقاط کوانتومی کربنی در شناسایی فلزات سنگین

در سال‌های اخیر، نقاط کوانتومی کربنی به‌عنوان مواد امیدبخشی در حوزه تصفیه فاضلاب مطرح شده‌اند و به دلیل توانایی چشمگیرشان در حذف طیف گسترده‌ای از آلاینده‌ها از محیط، توجه قابل‌توجهی را به خود جلب کرده‌اند.

کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی یون‌های جیوه

جیوه یکی از فلزات سنگین است که به دلیل سمیت زیستی، غیرقابل تجزیه زیستی بودن و تحرک‌پذیری بالا برای مدت طولانی در محیط باقی می‌ماند و در صورت ورود به بدن انسان می‌تواند مشکلات جدی برای سلامت انسان ایجاد کند. با توجه به اینکه جیوه در مقادیر قابل‌توجهی در نزدیکی مناطقی که مواد معدنی حاوی جیوه استخراج می‌شوند وجود دارد، محدود کردن میزان جیوه در طبیعت اهمیت زیادی دارد و بنابراین شناسایی آن در محیط، نخستین گام برای این امر محسوب می‌شود. روش‌های شناخته‌شده‌ای برای تشخیص جیوه در نمونه‌ها وجود دارد که از

ویراستاری نشده

جمله آن‌ها می‌توان به پراکندگی رامان تقویت‌شده سطحی، طیف‌سنجی جرمی و روش‌های الکتروشیمیایی اشاره کرد. تمامی این روش‌ها به تجهیزات بزرگ و پیچیده و همچنین اپراتورهای متخصص نیاز دارند که کاربرد گسترده آن‌ها را محدود می‌کند. همان‌طور که پیش‌تر بیان شد، CQDs دارای خواص لومینسانس مناسبی است و می‌تواند به‌عنوان حسگر برای تشخیص جیوه عمل کند. در این زمینه، Kasinathan et al. (2022) با استفاده از روش هیدروترمال CQDs را از باگاس نیشکر به‌صورت سبز، کم‌هزینه و سازگار با محیط‌زیست در اندازه ۲ تا ۸ نانومتر سنتز کردند. این CQDs به دلیل سمیت کم و سازگاری زیستی، به‌عنوان پروب فلورسانسی کارآمد برای شناسایی یون جیوه به کار گرفته شد. همچنین CQDs سنتز شده با پلی اتیلن گلیکول جهت تشخیص یون جیوه مورد استفاده قرار گرفته است که با افزایش غلظت جیوه، انتشار فلورسنت خاموش شد (Liu et al., 2013). انتشار فلورسانس تحت تأثیر عواملی همچون شرایط محیطی و خصوصیات سطحی CQDs قرار می‌گیرد (Shen et al., 2016). در یک بررسی انجام‌شده، CQDs عامل‌دارشده با گروه آمینی از اسیدسیتریک بدون آب سنتز شدند؛ حد تشخیص یون جیوه با استفاده از این حسگر برای نمونه‌های آب ۲۰ نانو مول بر لیتر بود (Gao et al., 2016). یون‌های جیوه II می‌توانند با گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن سطح CQDs واکنش دهند و در اثر انتقال الکترون بین گروه‌های عاملی و جیوهII ، خاموشی فلورسانس CQDs اتفاق می‌افتد (Pourreza and Ghomi, 2019). پژوهشگران با استفاده از روش هیدروترمال تک‌مرحله‌ای دو نوع CQDs با قله‌های نشر ۴۸۰ و ۵۲۵ نانومتر جهت شناسایی یون جیوه سنتز کردند برای جبران ضعف شدت نشر در CQDs آبی و حساسیت کمتر CQDs سبز، از مخلوط این دو نوع CQD استفاده شد که عملکرد بهتری در تشخیص جیوه نشان داد. این حسگر در بازه صفر تا ۱ میکرومتر قادر به تشخیص جیوه بود و حد تشخیص آن ۰/۰۰۵ میکرومولار به دست آمد؛ همچنین تغییر شدت فلورسانس در این بازه زیر لامپ UV به‌وضوح قابل‌مشاهده بود(Li et al., 2020). به طور مشابه Zhang et al. (2019) CQDs را از برگ‌های جینکگو به روش هیدروترمال سنتز نمودند که این ترکیبات به دلیل زیست‌سازگاری بالا، سمیت کم و پایداری فلورسانسی مناسب، برای تصویربرداری مورداستفاده قرار گرفتند. این حسگر دارای محدوده تشخیص خطی ۰/۵ تا ۲۰ میکرومولار و حد تشخیص ۱۲/۴ نانومولار بود و در نمونه‌های واقعی مثل آب دریاچه و سرم عملکرد قابل قبولی داشت. در پژوهش دیگری با روش هیدروترمال یک مرحله‌ای CQDs با بازده کوانتومی ۷۷/۲ درصد و با قطر متوسط ۱± ۵ نانومتر با فلورسنت سبز سنتز شد. در این مطالعه کربن کوانتوم دات‌ها به‌عنوان یک حسگر فلورسنت برای شناسایی انتخابی و با حساسیت بالای یون جیوه استفاده شدند. حد تشخیص این کاتیون ۶/۲ نانومولار و محدوده خطی ۵۰۰-۰ میکرومولار گزارش شده است (Dhandapani et al., 2023). در پژوهشی CQDs سنتز شده از ال-سیستئین به‌عنوان پروب تشخیصی در حضور یون‌های فلزی مختلفی مانند مس، سرب، نقره، کادمیم، کروم و کبالت موردبررسی قرار گرفت، اما این یون‌ها حتی در غلظت‌هایی تا ۱۰ برابر بیشتر از غلظت جیوه تأثیر قابل‌توجهی بر طیف نشرCQDs نداشتند؛ در حالی که حضور جیوه موجب کاهش شدید طیف نشر تا حدود ۶۰ درصد میزان اولیه شد (Wu and Tong, 2019). در مقابل بخش بزرگی از CQDs هم وجود دارد که قابلیت شناسایی جیوه را ندارد. به‌عنوان نمونه CQDs حاصل از انگور تاهیتی[1]قابلیت شناسایی جیوه را نداشت ولی برای یون آهن سه ظرفیتی تا حد ۰/۹میکرومولار عملکرد بالایی نشان داد (Atchudan et al., 2018).

کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی یون‌های سرب

سرب یکی از فلزات واسطه سنگین سمی و غیرقابل تجزیه زیستی است که با ورود به زنجیره‌های غذایی می‌تواند سلامت انسان، به‌ویژه کودکان و زنان باردار را به‌طور جدی تهدید کند. سرب دارای سه حالت اکسایش است، اما سرب دو ظرفیتی رایج‌ترین فرم موجود در طبیعت است که حتی در مقادیر نسبتاً کم و بیش از ۵ میلی‌مول بر لیتر، می‌تواند موجب از دست رفتن حافظه، بیماری‌های روانی و میگرن در انسان شود (Shabbir et al., 2023). جهت شناسایی سرب از روش‌های همچون طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی، حسگرهای الکتروشیمیایی، طیف‌سنجی جذب اتمی استفاده می‌شود؛ با این حال این روش‌ها پرهزینه بوده و نیاز به توسعه روش‌های اقتصادی است (Shabbir et al., 2023) . اخیراً پژوهش‌هایی برای شناسایی یون سرب با استفاده از CQDs صورت گرفته است. Luo et al. (2024)، CQDs با فلورسانس آبی جهت شناسایی سرب سنتز نمودند این ذرات در بازه خطی صفر تا ۶ میکرومولار و حد تشخیص ۰/۴۲ میکرومولار قابلیت بالایی جهت شناسایی یون‌های سرب داشت و گزینه مناسب برای تشخیص سرب در نمونه‌های واقعی آب‌لوله‌کشی و آب دریاچه بود. Chauhan et al. (2021) با

[1] Phyllanthus acidus

استفاده از روش هیدروترمال CQDs را از دانه‌های ارزن مرواریدی[1] با بازده کوانتومی بالای ۵۲ درصد سنتز کردند. این CQDs برای تشخیص سرب از نمونه‌های فاضلاب، حد تشخیص بسیار پایین ۰/۱۸ نانومولار را ثبت کردند. Liu et al. (2023) یک حسگر الکتروشیمیایی با استفاده از CQDs سنتز شده به روش هیدروترمال از برگ‌های درخت چنار و یک کامپوزیت زئولیتی برای شناسایی یون سرب تولید کردند. این حسگر یون سرب (II) را با حد تشخیص ۰/۰۴ نانومولار و در محدوده خطی غلظت یک نانومولار تا ۱ میکرومولار شناسایی کرد. همچنین در حضور یون‌های کادمیم و مس به ترتیب با حد تشخیص ۰/۰۲ و ۰/۰۷ نانومولار نیز توانست توانایی تشخیص خود را حفظ کند. عامل‌دار کردن CQDs حاصل از آب هندوانه با استفاده از اتانول آمین و اتیلن دی آمین به بهبود شدت فلورسانس این ترکیبات کمک می‌کند. CQDs عامل‌دار شده با اتیلن دی آمین انتخاب پذیری بالایی برای شناسایی سرب در آب آلوده نشان داده است (Rawat et al., 2023). در مطالعه‌ای Kim et al. (2020) نیز CQDs حاوی گروه عامل تیول با استفاده از ال- لایزین و ال-گلوتاتیون به روش هیدروترمال تک‌مرحله‌ای جهت شناسایی سرب با میانگین قطر ۵ نانومتر سنتز کردند. میانگین طول عمر فلورسانس CQDs در آزمون واپاشی فوتولومینسانس پس از افزودن سرب از ۸/۷۵۳ نانوثانیه به ۷/۲۲۹ نانوثانیه (۱۹ درصد) کاهش یافت. یون‌های فلزی با آنیون‌های تیوفنولات کمپلکس تشکیل داده و دارای حد تشخیص ۲/۲ میکرومولار بود.

کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی یون‌های کروم

کروم عنصری غیرضروری و بسیار سمی است که به دو شکل اکسیدشده سه و شش ظرفیتی در محیط به‌صورت اکسی آنیون‌های کرومات یا دی کرومات وجود دارد. کروم شش ظرفیتی حتی در مقادیر کم بسیار سمی، محلول در آب، جهش‌زا و سرطان‌زا است اما کروم سه ظرفیتی در مقادیر بسیار اندک برای متابولیسم طبیعی کربوهیدرات، پروتئین و چربی لازم است و به‌عنوان بخشی از الیگوپپتیدی به نام کرومودولین موجب تسهیل اتصال انسولین به گیرنده‌ها در سطح سلول می‌شود. کروم از طریق مهار انتقال سولفات در غشای سلول و آسیب اکسیداتیو به بیومولکول‌ها و تولید گونه‌های فعال اکسیژن برای موجودات زنده خطرآفرین است (Shanker et al., 2005).

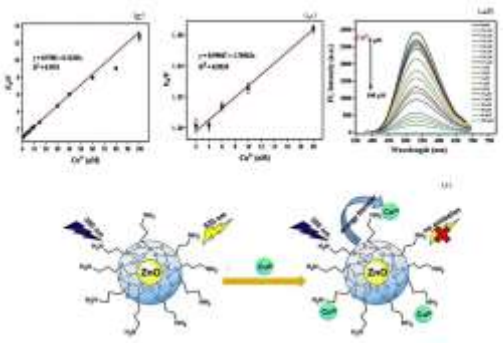
Huang et al. (2022) نمونه CQDs با فلورسانس آبی را از پلی ساکارید قارچی به روش هیدروترمال یک مرحله‌ای سنتز کردند. از این ماده می‌توان به‌عنوان حسگری با حساسیت بالا برای شناسایی یون کروم شش ظرفیتی در نمونه واقعی آب استفاده نمود که دارای پایداری، فلورسانس خوب، حلالیت در آب و سمیت سلولی کم است. حد تشخیص ۲۵ میکرومولار و محدوده خطی شناسایی ۱ تا ۱۰۰ میکرومولار برای این یون ثبت شد. طیف تحریک CQDs با طیف جذب کروم شش ظرفیتی همپوشانی دارد؛ در نتیجه نور تحریک شده توسط کروم شش ظرفیتی جذب می‌شود که منجر به خاموشی فلورسانس CQDs می‌شود. Chang et al. (2016) نیز CQDs را با استفاده از ساکارز به‌عنوان منبع کربن در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه سنتز کردند. این CQDs دارای انتشار رنگ زرد هستند و بسته به غلظت هنگام واکنش با کروم خاموشی فلورسانس در pH اسیدی نشان می‌دهند. میزان خاموشی فلورسانس با غلظت کروم در محدوده صفر تا ۲۰۰ میکرومولار رابطه خطی داشته و حد تشخیص آن ۲۴/۶میکرومولار گزارش شد. در پژوهشی CQDs با فلورسانس آبی از کیتوسان و اورتو فنیلین دی آمین به روش هیدروترمال سنتز شدند که حلالیت، پایداری و فلورسانس عالی را در محلول‌های آبی داشتند که در محدوده خطی ۱ تا ۱۳۰ میکرومولار با حد تشخیص ۰/۹۱ میکرومولار به‌خوبی یون کروم را شناسایی کردند (Zhang et al., 2021). Anpalagan et al. (2024) ابتدا CQDs را با استفاده از نان سبوس‌دار و به روش هیدروترمال با بازده کوانتومی ۰/۸۱ درصد سنتز کردند؛ در ادامه با افزودن آرد سویا و آب لیمو بازده کوانتومی تا چهار برابر افزایش یافت. این CQDs قابلیت شناسایی انتخابی کروم شش ظرفیتی با حد تشخیص ۸ پی‌پی‌ام را داشتند؛ بنابراین گزارش نمودند که برای افزایش بازده کوانتومی لزومی به استفاده از مواد شیمیایی نبوده و با استفاده از پیش ماده‌های غذایی هم می‌توان به نتیجه مناسب دست یافت.
Liu et al. (2024)ضمن بررسی مکانیسم خاموشی فلورسانس حاصل از واکنش کروم با CQDs گزارش نمودند که این فرآیند بر پایه خاموشی دینامیک فلورسانس است و شرایط بهینه آزمایش pH بین ۷-۸، دمای اتاق و زمان واکنش ۳۰ دقیقه است و به نظر می‌رسد این روش به علت سادگی، سرعت مناسب واکنش و کارایی بالا می‌تواند رهیافت مناسبی برای بررسی شکل و رفتار کروم در محیط‌های آبی باشد.

ویرایش اولیه

[1] Pearl millet

کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی یون‌های مس

کاتیون مس با توجه به نقشی که در استحکام استخوان‌ها و تقویت سیستم ایمنی بدن دارد برای فعالیت‌های زیستی ضروری است؛ با این وجود مقادیر بالای یون مس موجب اختلال در عملکرد سلول می‌شود؛ بنابراین، توسعه و کاربرد یک روش ساده و کم‌هزینه برای شناسایی یون مس ضروری است. پژوهشگران از CQDs به‌عنوان یک ماده نیمه‌رسانای اقتصادی و حساس به نور، برای شناسایی مؤثر یون‌های مس در محیط به کار گرفته‌اند و یک سیستم شناسایی برای بررسی حرکت و انتقال این یون به‌ویژه در محیط آبی ارائه کرده‌اند (Shabbir et al., 2023). در پژوهشی Qian et al. (2024) نمونه CQDs با فلورسانس سبزرنگ به روش مایکروویو سنتز کردند که این نقاط کوانتومی یون مس را به‌صورت انتخابی در محدوده خطی ۰/۱ تا ۱ میکرومولار و با حد تشخیص ۲/۴۶ نانومولار در نمونه‌های آب شناسایی نمود. CQDs عامل‌دار شده با پورفیرین با روش هیدروترمال قادر است در محدوده خطی ۱۰ نانومولار تا ۱۰ میکرومولار و حد تشخیص ۲/۷۸ نانومولار یون‌های مس را با گزینش‌پذیری و پایداری بالا شناسایی کند (Zhang et al., 2023). به‌طور مشابه Dang et al. (2020) با استفاده از اسیدسیتریک و اتیلن دی آمین به ترتیب به‌عنوان منبع کربن و نیتروژن CQDs دوپ شده با نیتروژن را با بازده کوانتومی ۸۴ درصد سنتز نمودند. حد تشخیص این ترکیب برای یون مس ۰/۰۷۶ نانومولار در محدوده خطی ۰/۰۱ تا ۰/۳۵ میکرومولار بوده و با افزایش غلظت یون مس فعالیت فلورسانسی آن کاهش می‌یافت. برای سنتز پروب فلورسانس جهت شناسایی یون مس، ابتدا با استفاده از اسیدسیتریک CQDs تهیه‌شده و سپس با اصلاح شیمیایی گروه‌های عاملی به آن اضافه شد. نانو ذرات حاصل با اندازه حدود ۲۵ نانومتر و بازده کوانتومی ۲۰ درصد در محدوده خطی ۰/۰۰۵ تا ۶۰۰ میکرومولار و با حد تشخیص ۵ نانومولار توانست با سرعت بالا و به‌صورت انتخابی یون‌های مس را شناسایی کند (Huang et al., 2020). در پژوهشی Zheng et al. (2019) مکانیسم شناسایی یون‌های مس را توسط CQDs بررسی کردند؛ برای این منظور با استفاده از پیش ماده‌های اسیدسیتریک و پلی‌اتیلن ایمین، CQDs را با بازده کوانتومی ۲۵ درصد در طول‌موج ۳۶۵ نانومتر سنتز کردند. این پژوهشگران تشخیص یون مس را به حضور گروه عاملی آمینی مرتبط دانستند این گروه‌های آمینی باعث شکافت اوربیتال‌های d یون مس شده و مسیر جدیدی برای واپاشی حالت‌های برانگیخته CQDs ایجاد می‌کند؛ علاوه براین پیک مربوط به این گروه عاملی سطحی پس از واکنش با مس، در طیف FTIR ناپدید می‌شود که نشانگر مشارکت گروه‌های آمینی در فرآیند شناسایی یون مس است. شکل ۳ تأثیر غلظت‌های مختلف یون مس را بر طیف‌های فلورسانس کربن کوانتوم دات در محلول آبی و مکانیسم خاموشی را نشان می‌دهد.



شکل ۳- طیف‌های فلورسانس کربن کوانتوم دات NH_2-ZnO با استفاده از غلظت‌های مختلف یون مس، ب) ۲ تا ۲۰ نانومولار، ج) ۱ تا ۱۰۰ میکرومولار در محلول آبی، (د) طرح شماتیک از مکانیسم خاموش‌شدن کربن کوانتوم دات NH_2-ZnO توسط یون مس (Zou et al., 2020)

سازوکار شناسایی یون‌های فلزی توسط CQDs

مکانیسم شناسایی یون‌های فلزی توسط CQDs با توجه به ماهیت پیچیده عوامل دخیل در آن مورد بحث است و به‌صورت کلی می‌توان از طریق دو مکانیسم خاموش شدن و یا تقویت[1] فلورسانس CQDs توسط یون فلزی شرح داد. یکی از رایج‌ترین مکانیسم‌ها در توضیح شناسایی

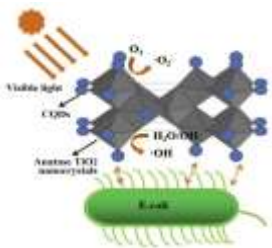
[1] Metal-Enhanced Fluorescence

ویرایشده

یون‌های فلزی توسط CQDs، خاموش شدن فلورسانس این ترکیبات است. در حضور یون‌های فلزی مکانیسم‌های متنوعی ازجمله انتقال انرژی، انتقال بار و تشکیل ترکیبات غیر فلورسنت می‌توانند موجب خاموشی فلورسانس CQDs شوند (Song et al., 2014). یون‌های فلزی در هنگام برخورد با CQDs برانگیخته، انرژی یا الکترون آن را دریافت کرده و شدت فلورسانس این ترکیبات را کاهش می‌دهند. میزان خاموشی یا کاهش شدت فلورسانس CQDs به غلظت یون‌های فلزی و میل ترکیبی آن‌ها به گروه‌های عاملی سطحی این ترکیبات وابسته است و با توجه به اینکه یون‌های فلزی مختلف بازده خاموش‌کنندگی متفاوتی دارند شناسایی انتخابی یون‌ها فراهم می‌شود (Song et al., 2014). با این وجود در برهم‌کنش یون فلزی و CQDs ممکن است خاصیت فلورسانس CQDs تقویت شود که این مسئله درنتیجه توانایی یون‌های فلزی در ایجاد اثرات تشدیدی پلاسمون سطحی موضعی[1]است که یک میدان الکترومغناطیسی تقویت‌شده در اطراف CQDs ایجاد می‌کند (Zhang et al., 2011; Li et al., 2012). نرخ واپاشی تابشی CQDs درنتیجه این میدان الکترومغناطیسی تقویت‌شده افزایش یافته و نشر فلورسانس افزایش می‌یابد که از این افزایش فلورسانس CQDs می‌توان برای تمایز و شناسایی یون‌های فلزی استفاده کرد. مکانیسم‌هایی همچون واکنش‌های اکسید–احیا و تبادل لیگاند نیز قادر هستند با تأثیر بر طیف‌های فلورسانس CQDs زمینه شناسایی یون‌های فلزی را فراهم آورند (Dubois et al., 2007).

کاربرد CQDs در تصفیه پساب‌ها

استفاده از کربن دات‌ها به‌منظور تصفیه پساب‌ها در مطالعات گوناگونی موردبررسی قرارگرفته است. به‌عنوان نمونه CQDs در تصفیه پساب‌های صنعتی (Li et al., 2018)، حذف اورانیوم (Huang et al., 2019)، کادمیم (Rahmanian et al., 2018)، و حذف بنزوپایرن (Yang et al., 2019) از نمونه‌های آب موردبررسی قرار گرفته‌اند (جدول ۲). علاوه براین CQDs می‌توانند به‌عنوان یک عامل ضد باکتری که توانایی تخریب و حذف باکتری‌ها را دارد مورداستفاده قرار گیرند. در مطالعه‌ای فعالیت ضدباکتریایی CQDs- TiO_2 در محیط آبی موردبررسی قرار گرفت. برای این منظور سوسپانسیون CQDs- TiO_2 به لوله حاوی نمونه‌های باکتریایی تلقیح شد و نمونه‌ها در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت تحت نور مرئی انکوبه شدند. نتایج این محققین نشان داد که فعالیت ضد باکتریایی CQDs در سطح ۸۲ درصد حفظ می‌شود درحالی‌که هیچ فعالیت ضد باکتریایی در تیمار TiO_2 مشاهده نشد (Yan et al., 2019). شکل ۴ مکانیسم تخریب فوتوکاتالیستی *E. coli* را با استفاده از CQDs- TiO_2 به‌عنوان فوتوکاتالیست نشان می‌دهد. تخریب فوتوکاتالیستی *E. coli* توسط تولید نوری جفت‌های الکترون–حفره در سطح CQDها فعال می‌شود. الکترون‌ها می‌توانند با مولکول‌های اکسیژن واکنش داده و آنیون سوپراکسید را از طریق یک فرآیند کاهشی تولید کنند، درحالی‌که حفره‌های تولیدشده می‌توانند مولکول‌های آب را اکسید کرده و رادیکال‌های هیدروکسیل واکنش‌پذیر تولید کنند (Moradlou et al., 2019). برای دستیابی به تخریب کامل باکتریایی، این رادیکال‌های آزاد به باکتری‌ها حمله کرده و باعث تجزیه مواد آلی و همچنین غشای سلولی باکتری‌ها می‌شوند.



شکل ۴- مکانیسم ضدباکتریایی کاتالیزوری نور مرئی CQDs-TiO_2 (Yan et al., 2019)

جدول ۲- مطالعات تجربی صورت گرفته در ارتباط با حذف فلزات سنگین توسط CQDs

منبع	ماده اولیه و روش سنتز	محصول	فلز هدف	شرایط آزمایش	ظرفیت جذب	سینتیک و ایزوترم جذب

[1] localized surface plasmon resonance

پذیرفته شده

Rahmanian et al., 2018	آمونیوم سیترات- هیدروترمال	CQDs /ZnAl-LDH	Cd(II)	pH بهینه ۷، زمان ۲۰ دقیقه	۱۲/۶ میلی‌گرم بر گرم در ۲۰ دقیقه	سینتیک جذب و ایزوترم‌های جذب کادمیوم روی CQDs/ZnAl-LDH به ترتیب با مدل سینتیکی شبه درجه دوم و مدل ایزوترم فروندلیچ مطابقت خوبی دارند
Yahaya et al., 2020	نشاسته تاپیوکا- آون حرارتی	CQDs	Pb(II)	غلظت: ۱۰۰-۲۰ میلی‌گرم در لیتر زمان: ۲۶۰-۵ دقیقه pH: ۱۲-۳	۸۰/۶ درصد	جذب سرب روی CQDs از مدل سینتیکی مرتبه دوم با ضریب تعیین R^2 برابر با ۰/۹۶۶۸ و ۰/۹۹۹۶ به ترتیب در غلظت اولیه سرب ۲۰ میلی‌گرم در لیتر و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر پیروی کرد
Perumal et al., 2022	میوه‌های قرمز مالوس فلوریبوندا-	N- CQDs	Hg(II) Cd(II) Pb(II) Cr(III)	غلظت های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر	برای جیوه به ترتیب حدود ۷۲ و ۹۹ درصد در سیستم تک‌فلزی و چندفلزی؛ برای سایر فلزات حذف بیش از ۷۰ درصد در سیستم چندفلزی ثبت شد.	بررسی نشده
Issa et al., 2022	کربوکسی متیل سلولز خوشه میوه خالی نخل روغنی و اوره- هیدروترمال	N- CQDs	Hg (II)	متغیرهای بهینه pH برابر با ۷، دوز ۰,۱ گرم، غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و مدت زمان ۳۰ دقیقه بودند	ظرفیت جذب بهینه ۱۱۶/۳میلی‌گرم در گرم و راندمان جذب ۸۴/۶ درصد	معادله لانگمویر با R^2 (۰/۹۹۴۶) به خوبی با داده‌های تجربی نسبت به ایزوترم فروندلیچ (۰/۹۸۶۵) مطابقت داشت.
Tohamy et al., 2023	اوره با باگاس، سلولز یا کربوکسی متیل سلولز- مایکروویو	CQDs	Pb(II)	دمای ۲۵ درجه سانتیگراد، زمان بهینه برای کربوکسی متیل سلولز، سلولز و باگاس به ترتیب ۷۵، ۱۵ و ۹۰ دقیقه	درصد راندمان حذف برای نانوذرات حاصل از کربوکسی متیل سلولز، سلولز و باگاس به ترتیب ۹۹/۱۶، ۹۴/۳۶ و ۹۸/۴۸ درصد بود	همه ایزوترم‌های CQDs با مدل لانگمویر نسبت به مدل‌های فروندلیچ و تمکین مطابقت بهتری دارند.
Ryabchenko et al., 2024	سنتز مستقیم CD روی HPMC؛ سپس تثبیت با SiO_2 از طریق هیدرولیز تترااتیل سیلوکسان	$CD/HPMC/SiO_2$ متخلخل با ظرفیت جذب بالا	Co (II) Pb (II)		دارای ظرفیت جذب ۲۵۸ ± ۴ میلی‌گرم بر گرم و ۱۶۸ ± ۶ میلی‌گرم بر گرم به ترتیب برای سرب و کبالت	بررسی نشده
Younis et al., 2025	نیلوفر آبی-	هیدروژل کامپوزیتی مرکب از آلژینات سدیم و نقاط کربنی نیلوفر آبی	Cd(II)	تأثیر pH، غلظت اولیه محلول، دوره جذب و دما، بر فرآیند جذب کادمیوم بررسی شد.	این جاذب ظرفیت جذب ۱۷۹/۳۵ و ۲۹۱/۲۳ میلی‌گرم بر گرم به ترتیب برای کادمیوم و سرب دارد.	ایزوترم جذب با دقت بالا R^2 = ۰/۹۶۰۴ با مدل ایزوترم لانگمویر برازش داده شد و سینتیک جذب با مدل سینتیکی شبه مرتبه دوم مطابقت داشت R^2 = ۰/۹۲۳۸ .
Krisanova et al., 2025	پسماند قهوه-مایکروویو	CQDs	Pb(II) Cd(II) Cu(II)	بررسی در محیط آبی و محیط زیستی	تشکیل کمپلکس با هر سه فلز	بررسی نشده

ویراستاری نشده

Rahmanian et al. (2018)با استفاده از آمونیوم سیترات CQDs غنی شده با LDH[1] را جهت حذف Cd(II) سنتز کردند که نتایج نشان داد حداکثر جذب این ذرات کربنی ۱۲/۶ میلی گرم بر گرم است. در آزمایش دیگری مشخص شد CQDs-LDH قابلیت حذف فلزاتی همچون Hg(II)و Ag(I) را نیز دارد (Asiabi et al., 2018). ظرفیت جذب این کامپوزیت برای Hg(II) و Ag(I) به ترتیب ۶۲۵ و ۷۱۴/۳ میلی گرم بر گرم بود. برازش مدل‌های ایزوترم لانگمویر و فروندلیچ برای جذب Hg(II) و Ag(I) بر روی CQDs- LDH حاکی از آن بود که فرایند جذب این آلاینده‌ها به صورت تک‌لایه و با راندمان بالا روی ساختار کامپوزیت صورت گرفته و مدل لانگمویر توصیف دقیق‌تر و بهتری (مقادیر ضریب همبستگی برای یون جیوه ۰/۹۹۸۵ و نقره ۰/۹۹۷۴) از رفتار تعادلیِ جذب این یون‌ها ارائه می‌دهد. Singh et al. (2019) اثر گرمایشی آب را در یک سیستم هیدروژل حاوی نقاط کربنی بررسی کردند. آن‌ها در مطالعه خود، نقاط کربنی را از پارافنیلن‌دی‌آمین و متا–فنیلن‌دی‌آمین تهیه کرده و آن را در یک سیستم هیدروژل بر پایه کربوکسی‌متیل‌سلولز و کیتوسان ادغام کردند. نتایج نشان داد که پس از تابش خورشیدی با شدت ۱ کیلووات بر متر مربع توسط یک شبیه‌ساز خورشیدی، دما در سیستم هیدروژل با نسبت مشخصی از نقاط کربنی، تا ۵۸ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. افزایش دمای بخار آب می‌تواند منجر به واجذب سریع‌تر آب از سیستم هیدروژل شود. در هنگام استفاده از محلول نمک فلز سنگین، یون‌های فلز سنگین توسط سیستم هیدروژلِ حاوی نقاط کربنی حفظ (جذب) می‌شوند و پس از تابش نور، آب توسط سیستم آزاد می‌گردد. بنابراین، تابش خورشیدی بر روی یک سیستم هیدروژل مبتنی بر نقاط کربنی می‌تواند برای تصفیه آب بر پایه چرخه‌های تکرارشونده‌ی جذب–واجذب مورد استفاده قرار گیرد (Singh et al., 2019). Rachmina et al. (2026) با استفاده از پوست موز و ال–آسپارتیک اسید، CQDs دوپ‌شده با نیتروژن را از طریق روش هیدروترمال–مایکروویو سنتز کردند. یافته‌ها نشان داد که این نانوذرات توانایی بالایی در شناسایی یون‌های Pb^{2+}، Cr^{3+} و Fe^{3+} از طریق خاموشی فلورسانس داشته و پتانسیل بالایی در پایش محیط‌زیست و شناسایی سریع فلزات سنگین سمی دارند.

زیست سازگاری

نقاط کوانتومی کربنی، همان‌طور که پیش‌تر تأکید شد، عمدتاً از یک اسکلت کربنی غیرسمی تشکیل شده‌اند که دارای تعداد زیادی گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار بر روی سطح خود هستند؛ این ویژگی‌ها آن‌ها را به نانو مواد بسیار زیست‌سازگار تبدیل می‌کند. منابع و روش‌های سنتزی که در تولید آن‌ها به کار گرفته می‌شوند، سازگار با محیط‌زیست بوده و با اصول شیمی سبز همخوانی دارند. زیست‌سازگاری و خواص لومینسانس CQDs، آن‌ها را به ابزارهایی ارزشمند در کاربردهای زیستی مختلف در حوزه‌های مختلف علوم تبدیل کرده است. اگرچه CQDs عموماً زیست‌سازگار در نظر گرفته می‌شوند، لازم است توجه شود که سمیت مواد اولیه مورداستفاده در سنتز آن‌ها می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌ها و پروفایل ایمنی آن‌ها در سامانه‌های زیستی داشته باشد. به‌عنوان مثال، نقاط کوانتومی کربنی حاصل از منابع سمی، ازجمله موادی مانند اتیلن‌دی‌آمین یا دی‌متیل‌فرم‌آمید، ممکن است تا حدی سمیت این مواد را به ارث ببرند. با این حال، هنگامی‌که نقاط کوانتومی کربنی از منابع سبز مانند زیست‌توده‌ها، پوست سبزیجات و میوه‌ها و گلبرگ‌های دورریز گل‌ها تولید شوند، انتظار می‌رود که غیرسمی باشند. مطالعات نشان داده‌اند که سمیت نقاط کوانتومی کربنی در غلظت حدود ۱۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر بسیار ناچیز است و این موضوع باعث می‌شود که این نانو ذرات به‌راحتی توسط سیستم دفعی بدن تجزیه و حذف شوند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه به معرفی پیشرفت‌های اخیر در حوزه CQDs پرداخته و خصوصیات شیمیایی و فیزیکی و روش‌های سنتز و حوزه کاربرد آن‌ها را موردبررسی قرار داده است. روش‌های متعددی برای سنتز CQDs ازجمله هیدروترمال، تابش لیزر، فرآیند گرمایشی، فرآیند الکتروشیمیایی، تابش مایکروویو و اولتراسونیک و ... مورداستفاده قرار می‌گیرد. تنوع در روش‌های سنتز CQDs نشان‌دهنده وجود چالش‌های مختلف در دستیابی به ویژگی‌های بهینه محصول است و انتخاب استراتژی مناسب برای سنتز، مستلزم توجه به تعادل میان مزایا و محدودیت‌های هر روش است؛ به‌عبارت‌دیگر، هیچ روش واحدی برای تمامی کاربردها ایده‌آل نیست و انتخاب نهایی باید بر اساس معیارهای مشخصی نظیر مقیاس‌پذیری،

[1]Layered double hydroxides

ویرایش نشده

هزینه، و ویژگی‌های سطحی محصول صورت گیرد. با این حال روش هیدروترمال عموماً به دلیل ماهیت تطبیق‌پذیری بالا، یکی از رایج‌ترین رویکردها در سنتز CQDs محسوب می‌شود. این روش امکان استفاده از طیف گسترده‌ای از پیش‌سازهای کربنی به‌عنوان ماده اولیه را فراهم می‌کند و قابلیت کنترل دقیق بر اندازه، شکل و ساختار سطح را از طریق تنظیم پارامترهایی نظیر دما، فشار و زمان واکنش را دارد. استفاده از CQDs به‌عنوان فتوکاتالیست به دلیل سمیت پایین، اثر فلورسانس قوی، پایداری فتوشیمیایی بالا و زیست سازگاری آن‌ها در شناسایی فلزات و همچنین پالایش و تصفیه فاضلاب‌ها در مطالعات مختلف مورد تائید قرار گرفته است؛ با این وجود این تحقیقات در مراحل اولیه بوده و انتظار می‌رود در آینده نزدیک تحقیقات بنیادی‌تر و مطالعات عمیق‌تری بر روی خواص نوری CQDs صورت گیرد. برای بهره‌گیری بهتر از قابلیت CQDs در حوزه‌های مختلف علوم، بایستی بازده کوانتومی و کیفیت CQDs سنتز شده بهبود یابد؛ بنابراین مطالعات آتی بایستی فرآیند سنتز را ساده نموده، یکنواختی محصول با خواص مطلوب را تأمین کرده و روش خالص‌سازی محصول از واکنش‌گرهای باقیمانده را تسهیل نماید به این منظور توجه به سنتز سبز و زیست‌تخریب‌پذیر با استفاده از ضایعات کشاورزی جهت کاهش هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی یک اولویت حیاتی است؛ همچنین تلفیق CQDs با مواد نانوکامپوزیتی مثل گرافن، اکسیدهای فلزی می‌تواند انتخاب پذیری و ظرفیت جذب فلزات سمی را افزایش دهد. درنهایت انتقال یافته‌های آزمایشگاهی به محیط‌های واقعی و کاربرد برای تصفیه فاضلاب‌ها چالش نهایی برای تبدیل این ساختارهای کوانتومی به یک فناوری تجاری و کاربردی در حیطه محیط‌زیست می‌باشد.

منابع

Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Copty, N. K., Amr, S. S. A., Abushammala, M. F. M., & Al Maskari, T. (2021). Recent advances of nanoremediation technologies for soil and groundwater remediation: A review. *Water*, *13*(16), 2186.

Anpalagan, K., Yin, H., Cole, I., Zhang, T., & Lai, D. T. (2024). Quantum yield enhancement of carbon quantum dots using chemical-free precursors for sensing Cr (VI) ions. *Inorganics*, *12*(4), 96.

Arumugam, N., & Kim, J. (2018). Synthesis of carbon quantum dots from Broccoli and their ability to detect silver ions. *Materials Letters*, *219*, 37-40.

Asiabi, H., Yamini, Y., Shamsayei, M., Molaei, K., & Shamsipur, M. (2018). Functionalized layered double hydroxide with nitrogen and sulfur co-decorated carbondots for highly selective and efficient removal of soft Hg2+ and Ag+ ions. *Journal of hazardous materials*, *357*, 217-225.

Atchudan, R., Edison, T. N. J. I., Aseer, K. R., Perumal, S., Karthik, N., & Lee, Y. R. (2018). Highly fluorescent nitrogen-doped carbon dots derived from Phyllanthus acidus utilized as a fluorescent probe for label-free selective detection of Fe3+ ions, live cell imaging and fluorescent ink. *Biosensors and Bioelectronics*, *99*, 303-311.

Chang, M. M. F., Ginjom, I. R., Ngu-Schwemlein, M., & Ng, S. M. (2016). Synthesis of yellow fluorescent carbon dots and their application to the determination of chromium (III) with selectivity improved by pH tuning. *Microchimica Acta*, *183*(6), 1899-1907.

Chao-Mujica, F. J., Garcia-Hernández, L., Camacho-López, S., Camacho-López, M., Camacho-López, M. A., Reyes Contreras, D., ... & Desdin-García, L. F. (2021). Carbon quantum dots by submerged arc discharge in water: Synthesis, characterization, and mechanism of formation. *Journal of Applied Physics*, *129*(16).

Chauhan, P., Chaudhary, S., & Kumar, R. (2021). Biogenic approach for fabricating biocompatible carbon dots and their application in colorimetric and fluorometric sensing of lead ion. *Journal of Cleaner Production*, *279*, 123639.

Cheng, C., Xing, M., & Wu, Q. (2019). A universal facile synthesis of nitrogen and sulfur co-doped carbon dots from cellulose-based biowaste for fluorescent detection of Fe3+ ions and intracellular bioimaging. *Materials Science and Engineering: C*, *99*, 611-619.

Cui, Y., Zhu, Y. G., Zhai, R., Huang, Y., Qiu, Y., & Liang, J. (2005). Exposure to metal mixtures and human health impacts in a contaminated area in Nanning, China. *Environment international*, *31*(6), 784-790.

ویراستاری پذیرفته

Dang, V. D., Ganganboina, A. B., & Doong, R. A. (2020). Bipyridine-and copper-functionalized N-doped carbon dots for fluorescence turn off–on detection of ciprofloxacin. *ACS applied materials & interfaces*, *12*(29), 32247-32258.

Das, S., Mondal, S., & Ghosh, D. (2024). Carbon quantum dots in bioimaging and biomedicines. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, *11*, 1333752.

Dhandapani, E., Maadeswaran, P., Raj, R. M., Raj, V., Kandiah, K., & Duraisamy, N. (2023). A potential forecast of carbon quantum dots (CQDs) as an ultrasensitive and selective fluorescence probe for Hg (II) ions sensing. *Materials Science and Engineering: B, 287,* 116098.

Dong, Z., Qi, J., Yue, L., Zhou, H., Chen, L., Gu, J., ... & Wu, H. (2024). Biomass-based carbon quantum dots and their agricultural applications. *Plant Stress, 11*, 100411.

Dubois, F., Mahler, B., Dubertret, B., Doris, E., & Mioskowski, C. (2007). A versatile strategy for quantum dot ligand exchange. *Journal of the American Chemical Society*, *129*(3), 482-483.

Dutta, V., Devasia, J., Chauhan, A., VL, V., Jha, A., Nizam, A., Lin, K.-Y. A., & Ghotekar, S. (2022). Photocatalytic nanomaterials: applications for remediation of toxic polycyclic aromatic hydrocarbons and green management. *Chemical Engineering Journal Advances*, *11*, 100353.

Elugoke, S. E., Uwaya, G. E., Quadri, T. W., & Ebenso, E. E. (2024). Carbon quantum dots: basics, properties, and fundamentals. In *Carbon dots: recent developments and future perspectives* (pp. 3-42). American Chemical Society.

Fu, J., Zhou, Q., Liu, J., Liu, W., Wang, T., Zhang, Q., & Jiang, G. (2008). High levels of heavy metals in rice (*Oryzasativa* L.) from a typical E-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health. *Chemosphere*, *71*(7), 1269-1275.

Gao, Z. H., Lin, Z. Z., Chen, X. M., Lai, Z. Z., & Huang, Z. Y. (2016). Carbon dots-based fluorescent probe for trace Hg2+ detection in water sample. *Sensors and Actuators B: Chemical, 222,* 965-971.

Geneva, (2003), "World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking Water Quality". 3rd ed. World Health Organization.

Guan, X., Li, Z., Geng, X., Lei, Z., Karakoti, A., Wu, T., ... & Vinu, A. (2023). Emerging trends of carbon-based quantum dots: nanoarchitectonics and applications. *Small*, *19*(17), 2207181.

Hashim, M. A., Mukhopadhyay, S., Sahu, J. N., & Sengupta, B. (2011). Remediation technologies for heavy metal contaminated groundwater. *Journal of environmental management*, *92*(10), 2355-2388.

Huang, Q., Bao, Q., Wu, C., Hu, M., Chen, Y., Wang, L., & Chen, W. (2022). Carbon dots derived from Poria cocos polysaccharide as an effective "on-off" fluorescence sensor for chromium (VI) detection. *Journal of Pharmaceutical Analysis*, *12*(1), 104-112.

Huang, S., Jiang, S., Pang, H., Wen, T., Asiri, A. M., Alamry, K. A., ... & Wang, S. (2019). Dual functional nanocomposites of magnetic MnFe2O4 and fluorescent carbon dots for efficient U (VI) removal. *Chemical Engineering Journal*, *368*, 941-950.

Huang, S., Wang, W., Cheng, J., Zhou, X., Xie, M., Luo, Q., ... & Xue, W. (2020). Amino-functional carbon quantum dots as a rational nanosensor for Cu2+. *Microchemical Journal*, *159*, 105494.

Issa, M. A., Zentou, H., Jabbar, Z. H., Abidin, Z. Z., Harun, H., Halim, N. A. A., ... & Pudza, M. Y. (2022). Ecofriendly adsorption and sensitive detection of Hg (II) by biomass-derived nitrogen-doped carbon dots: process modelling using central composite design. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(57), 86859-86872.

Kabata-Pendias, A. (2000). *Trace elements in soils and plants*. CRC press.

Kasinathan, K., Samayanan, S., Marimuthu, K., & Yim, J. H. (2022). Green synthesis of multicolour fluorescence carbon quantum dots from sugarcane waste: Investigation of mercury (II) ion sensing, and bio-imaging applications. *Applied Surface Science*, *601*, 154266.

Kim, Y., & Kim, J. (2020). Bioinspired thiol functionalized carbon dots for rapid detection of lead (II) ions in human serum. *Optical Materials*, *99*, 109514.

Kong, J., Wei, Y., Zhou, F., Shi, L., Zhao, S., Wan, M., & Zhang, X. (2024). Carbon quantum dots: properties, preparation, and applications. *Molecules*, *29*(9), 2002.

Krisanova, N., Paliienko, K., Pozdnyakova, N., Pastukhov, A., Driuk, M., Kalynovska, L., ... & Borisova, T. (2025). "Green" carbon dots from coffee waste for adsorption of xenobiotic and trace heavy metals in both aquatic and physiological media. *Environmental Science: Nano*, *12*(9), 4395-4407.

Li, C., Zhu, Y., Zhang, X., Yang, X., & Li, C. (2012). Metal-enhanced fluorescence of carbon dots adsorbed Ag@ SiO2 core-shell nanoparticles. *RSC advances*, *2*(5), 1765-1768.

Li, D. Y., Wang, S. P., Azad, F., & Su, S. C. (2020). Single-step synthesis of polychromatic carbon quantum dots for macroscopic detection of Hg2+. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *190*, 110141.

Li, H. Y., Li, D., Guo, Y., Yang, Y., Wei, W., & Xie, B. (2018). On-site chemosensing and quantification of Cr (VI) in industrial wastewater using one-step synthesized fluorescent carbon quantum dots. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *277*, 30-38.

Li, L., Wu, G., Yang, G., Peng, J., Zhao, J., & Zhu, J. J. (2013a). Focusing on luminescent graphene quantum dots: current status and future perspectives. *Nanoscale, 5*(10), 4015-4039.

Li, S., Zhou, S., Li, Y., Li, X., Zhu, J., Fan, L., & Yang, S. (2017). Exceptionally high payload of the IR780 iodide on folic acid-functionalized graphene quantum dots for targeted photothermal therapy. *ACS applied materials & interfaces*, *9*(27), 22332-22341.

Li, X., Liu, L., Wang, Y., Luo, G., Chen, X., Yang, X., ... & He, X. (2013b). Heavy metal contamination of urban soil in an old industrial city (Shenyang) in Northeast China. *Geoderma*, *192*, 50-58.

Liu, H., Ding, J., Zhang, K., & Ding, L. (2019). Construction of biomass carbon dots based fluorescence sensors and their applications in chemical and biological analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *118*, 315-337.

Liu, H., Ye, T., & Mao, C. (2007). Fluorescent carbon nanoparticles derived from candle soot. *Angewandte chemie*, *119*(34), 6593-6595.

Liu, Q., Gao, X., Liu, Z., Gai, L., Yan, Y., & Ma, H. (2023). Sensitive and selective electrochemical detection of lead (II) based on waste-biomass-derived carbon quantum dots@ zeolitic imidazolate framework-8. *Materials*, *16*(9), 3378.

Liu, R., Li, H., Kong, W., Liu, J., Liu, Y., Tong, C., ... & Kang, Z. (2013). Ultra-sensitive and selective Hg2+ detection based on fluorescent carbon dots. *Materials Research Bulletin*, *48*(7), 2529-2534

Liu, S., Wu, Z., Nian, N., Zhang, P., & Ni, L. (2024). The speciation of heavy metal chromium in water environment by carbon quantum dots system. *Water, Air, & Soil Pollution*, *235*(7), 449.

Luo, J., Lei, Y., Ge, Q., Liu, M., Jiang, N., Huang, Y. H., ... & Zhao, J. L. (2024). Carbon quantum dots from hemicucur [6] bit and the application for the detection of Pb2+. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *317*, 124459.

Ma, Y., Egodawatta, P., McGree, J., Liu, A., & Goonetilleke, A. (2016). Human health risk assessment of heavy metals in urban stormwater. *Science of the Total Environment*, *557*, 764-772.

Moradlou, O., Rabiei, Z., & Delavari, N. (2019). Antibacterial effects of carbon quantum dots@ hematite nanostructures deposited on titanium against Gram-positive and Gram-negative bacteria. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *379*, 144-149.

Nasir, Z. A., Colbeck, I., Ali, Z., & Ahmed, S. (2015). Heavy metal composition of particulate matter in rural and urban residential built environments in Pakistan. *Journal of Animal and Plant Sciences*, *25*(3), 706-712.

Pang, Y., Gao, H., Wu, S., & Li, X. (2017). Facile synthesis the nitrogen and sulfur co-doped carbon dots for selective fluorescence detection of heavy metal ions. *Materials Letters*, *193*, 236-239.

Pattanayek, S., Sahoo, N. K., Nasrin, A., Saha, I., Dhal, A., Paria, S., ... & Hossain, M. (2024). Facile and green synthesis of highly fluorescence carbon dots derived from Mucuna pruriens seeds: A versatile platform for sensitive detection of Au3+ ions and in vitro cell imaging. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *12*(5), 113932.

Perumal, S., Atchudan, R., Thirukumaran, P., Yoon, D. H., Lee, Y. R., & Cheong, I. W. (2022). Simultaneous removal of heavy metal ions using carbon dots-doped hydrogel particles. *Chemosphere*, *286*, 131760.

Pourreza, N., & Ghomi, M. (2019). Green synthesized carbon quantum dots from Prosopis juliflora leaves as a dual off-on fluorescence probe for sensing mercury (II) and chemet drug. *Materials Science and Engineering: C*, *98*, 887-896.

Qian, X., Wang, Z., Chen, Z., El-Bahy, S. M., Li, D., Qin, L., ... & Zhao, J. (2024). Green-emitting carbon quantum dots as efficient fluorescent probes for Cu2+ and EDTA detection by "turn-on-off" strategy. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *693*, 134089.

Rachmina, R., Hasan, M., Suhartono, S., & Sulaiman, M. I. (2026). Enhanced fluorescence and heavy metal ion sensing using nitrogen-doped carbon quantum dots synthesized from banana peel waste. *Results in Engineering*, 109321.

Rahmanian, O., Dinari, M., & Abdolmaleki, M. K. (2018). Carbon quantum dots/layered double hydroxide hybrid for fast and efficient decontamination of Cd (II): The adsorption kinetics and isotherms. *Applied Surface Science*, *428*, 272-279.

Rawat, K. S., Singh, V., Sharma, C. P., Vyas, A., Pandey, P., Singh, J., ... & Goel, A. (2023). Picomolar detection of lead ions (Pb2+) by functionally modified fluorescent carbon quantum dots from watermelon juice and their imaging in cancer cells. *Journal of Imaging*, *9*(1), 19.

Ren, X., Zhang, F., Guo, B., Gao, N., & Zhang, X. (2019). Synthesis of N-doped micropore carbon quantum dots with high quantum yield and dual-wavelength photoluminescence emission from biomass for cellular imaging. *Nanomaterials*, *9*(4), 495.

Ryabchenko, E. O., Suslov, A. P., Morozov, N. A., & Krivoshapkina, E. F. (2024). Silica/carbon dot nanosorbent for the detection and removal of Pb (II) and Co (II) ions from wastewater. *Chemical Engineering Journal*, *500*, 156610.

Saxena, G., Purchase, D., Mulla, S. I., Saratale, G. D., & Bharagava, R. N. (2019). Phytoremediation of heavy metal-contaminated sites: eco-environmental concerns, field studies, sustainability issues, and future prospects. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 249*, 71-131.

Shabbir, H., Csapó, E., & Wojnicki, M. (2023). Carbon quantum dots: the role of surface functional groups and proposed mechanisms for metal ion sensing. *Inorganics*, *11*(6), 262.

Shanker, A. K., Cervantes, C., Loza-Tavera, H., & Avudainayagam, S. (2005). Chromium toxicity in plants. *Environment international*, *31*(5), 739-753.

Shen, L. M., & Liu, J. (2016). New development in carbon quantum dots technical applications. *Talanta, 156*, 245-256.

Singh, S., Shauloff, N., & Jelinek, R. (2019). Solar-enabled water remediation via recyclable carbon dot/hydrogel composites. *ACS sustainable chemistry & engineering*, *7*(15), 13186-13194.

Song, Y., Zhu, S., Xiang, S., Zhao, X., Zhang, J., Zhang, H., ... & Yang, B. (2014). Investigation into the fluorescence quenching behaviors and applications of carbon dots. *nanoscale*, *6*(9), 4676-4682.

Sousa, H. B., Martins, C. S., & Prior, J. A. (2021). You don't learn that in school: an updated practical guide to carbon quantum dots. *Nanomaterials*, *11*(3), 611.

Tavan, M., Yousefian, Z., Bakhtiar, Z., Rahmandoust, M., & Mirjalili, M. H. (2025). Carbon quantum dots: Multifunctional fluorescent nanomaterials for sustainable advances in biomedicine and agriculture. *Industrial Crops and Products*, *231*, 121207.

Thakare, M., Sarma, H., Datar, S., Roy, A., Pawar, P., Gupta, K., Pandit, S., & Prasad, R. (2021). Understanding the holistic approach to plant-microbe remediation technologies for removing heavy metals and radionuclides from soil. *Current Research in Biotechnology*, *3*, 84–98.

Tohamy, H. A. S., El-Sakhawy, M., & Kamel, S. (2023). Eco-friendly synthesis of carbon quantum dots as an effective adsorbent. *Journal of Fluorescence*, *33*(2), 423-435.

Tungare, K., Bhori, M., Racherla, K. S., & Sawant, S. (2020). Synthesis, characterization and biocompatibility studies of carbon quantum dots from Phoenix dactylifera. *3 Biotech*, *10*(12), 540.

Wang, C., Shi, H., Yang, M., Yan, Y., Liu, E., Ji, Z., & Fan, J. (2020). Facile synthesis of novel carbon quantum dots from biomass waste for highly sensitive detection of iron ions. *Materials Research Bulletin*, *124*, 110730.

Wang, Y., Wang, Z., Rui, Y., & Li, M. (2015). Horseradish peroxidase immobilization on carbon nanodots/CoFe layered double hydroxides: direct electrochemistry and hydrogen peroxide sensing. *Biosensors and Bioelectronics*, *64*, 57-62.

Wu, H., & Tong, C. (2019). Nitrogen-and sulfur-codoped carbon dots for highly selective and sensitive fluorescent detection of Hg2+ ions and sulfide in environmental water samples. *Journal of agricultural and food chemistry, 67*(10), 2794-2800.

Xu, Q., Wu, B., & Chai, X. (2022). In situ remediation technology for heavy metal contaminated sediment: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(24), 16767.

Xu, X., Ray, R., Gu, Y., Ploehn, H. J., Gearheart, L., Raker, K., & Scrivens, W. A. (2004). Electrophoretic analysis and purification of fluorescent single-walled carbon nanotube fragments. *Journal of the American Chemical Society*, *126*(40), 12736-12737.

Yahaya Pudza, M., Zainal Abidin, Z., Abdul Rashid, S., Md Yasin, F., Noor, A. S. M., & Issa, M. A. (2020). Eco-friendly sustainable fluorescent carbon dots for the adsorption of heavy metal ions in aqueous environment. *Nanomaterials*, *10*(2), 315.

Yan, Y., Kuang, W., Shi, L., Ye, X., Yang, Y., Xie, X., ... & Tan, S. (2019). Carbon quantum dot-decorated TiO2 for fast and sustainable antibacterial properties under visible-light. *Journal of Alloys and Compounds*, *777*, 234-243.

Yang, D., Tammina, S. K., Li, X., & Yang, Y. (2019). Enhanced removal and detection of benzo [a] pyrene in environmental water samples using carbon dots-modified magnetic nanocomposites. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *170*, 383-390.

Yang, Y., Wu, D., Han, S., Hu, P., & Liu, R. (2013). Bottom-up fabrication of photoluminescent carbon dots with uniform morphology via a soft–hard template approach. *Chemical Communications*, *49*(43), 4920-4922.

Younis, M. Y., Li, W., Khan, J., & Wei, Y. (2025). Lotus carbon dots doped sodium alginate hydrogel beads for effective adsorptive removal of Cd2+ and potential application in Pb2+ removal from wastewater. *International Journal of Biological Macromolecules*, 146638.

Zhang, B., Liu, C. Y., & Liu, Y. (2010). A novel one-step approach to synthesize fluorescent carbon nanoparticles. 4411-4414.

Zhang, Q., Zhang, X., Bao, L., Wu, Y., Jiang, L., Zheng, Y., ... & Chen, Y. (2019). The application of green-synthesis-derived carbon quantum dots to bioimaging and the analysis of mercury (II). *Journal of analytical methods in chemistry*, *2019*(1), 8183134.

Zhang, T., Chen, X., Gu, H., Chen, H., Huang, K., Wang, J., ... & Li, W. (2025). Preparation and Application of Core–Shell Nanocarbon-Based Slow-Release Foliar Fertilizer. *Nanomaterials, 15*(7), 565.

Zhang, X., Hou, X., Lu, D., Chen, Y., & Feng, L. (2023). Porphyrin functionalized carbon quantum dots for enhanced electrochemiluminescence and sensitive detection of Cu^{2+}. *Molecules*, *28*(3), 1459.

Zhang, Y., Dong, Y., Zheng, H., Yang, X., & Yao, C. (2021). High Quantum Yield Fluorescent Chitosan-Based Carbon Dots for the Turn-On-Off-On Detection of Cr (VI) and H2O2. *Nano*, *16*(09), 2150103.

Zhang, Y., Goncalves, H., Esteves da Silva, J. C., & Geddes, C. D. (2011). Metal-enhanced photoluminescence from carbon nanodots. *Chemical Communications*, *47*(18), 5313-5315.

Zheng, X., Liu, W., Gai, Q., Tian, Z., & Ren, S. (2019). A carbon-dot-based fluorescent probe for the sensitive and selective detection of Copper (II) Ions. *ChemistrySelect*, *4*(8), 2392-2397.

Zhou, J., Booker, C., Li, R., Zhou, X., Sham, T. K., Sun, X., & Ding, Z. (2007). An electrochemical avenue to blue luminescent nanocrystals from multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs). *Journal of the American Chemical Society*, *129*(4), 744-745.

Zhu, J., Wu, C., Cui, Y., Li, D., Zhang, Y., Xu, J., ... & Cao, M. (2021). Blue-emitting carbon quantum dots: Ultrafast microwave synthesis, purification and strong fluorescence in organic solvents. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *623*, 126673.

Zou, T., Xing, X., Yang, Y., Wang, Z., Wang, Z., Zhao, R., ... & Wang, Y. (2020). Water-soluble ZnO quantum dots modified by (3-aminopropyl) triethoxysilane: The promising fluorescent probe for the selective detection of Cu^{2+} ion in drinking water. *Journal of Alloys and Compounds, 825*, 153904.