

مروری بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده در حسگرهای فلورسنت برای شناسایی آلاینده‌های فلزی

نرگس یوسفی لیمائی، یکتا رضایی

مقاله مروری
JSCW-2504-1228

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴-۰۱-۱۷

تاریخ اصلاح: ۱۴۰۴-۰۳-۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴-۰۴-۰۳

خواهشمند است این مقاله به صورت زیر در مراجع قید شود:

ن. یوسفی لیمائی، ی. رضایی، "مروری بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ‌شده در حسگرهای فلورسنت برای شناسایی آلاینده‌های فلزی"، نشریه علمی مطالعات در دنیای رنگ، JSCW-2504-1228، 1404. این فایل PDF مقاله ویرایش نشده است که برای چاپ پذیرفته شده است. ماکت مقاله توسط دفتر نشریه مطالعات در دنیای رنگ تهیه شده و قبل از چاپ ویرایش نهایی به نویسنده مسئول مقاله ارسال می‌شود.

مروری بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده در حسگرهای فلورسنت برای شناسایی آلایندهای فلزی

نرگس یوسفی لیمائی^{۱*}، یکتا رضایی^۲

۱- استادیار، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

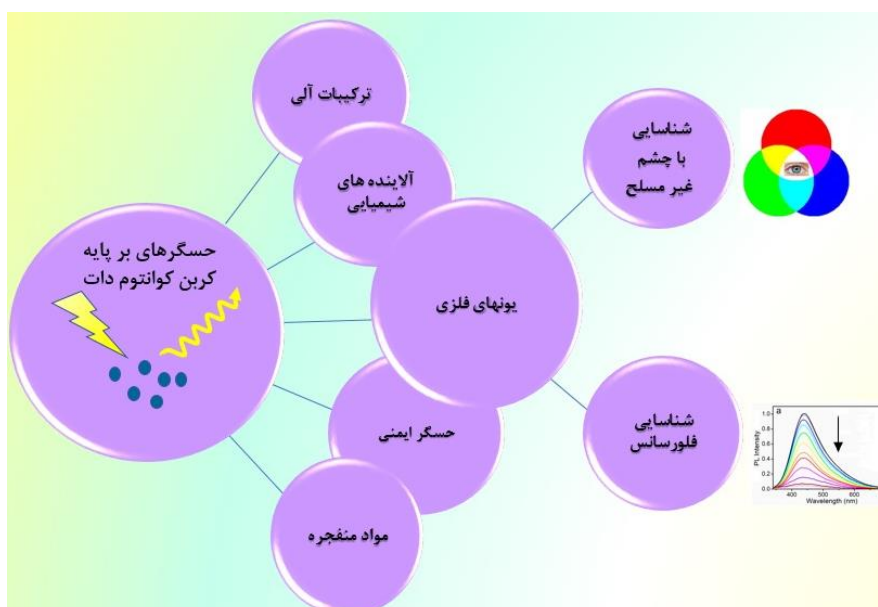
۲- کارشناسی، گروه پژوهشی محیط زیست و رنگ، پژوهشگاه رنگ، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۶۷۶۵-۶۵۴.

*yousefi-n@icrc.ac.ir

چکیده

کربن کوانتوم دات‌ها (CQDs)، نانوذرات شبه کروی صفر بعدی با اندازه کوچکتر از ۱۰ نانومتر می‌باشند که از کربن و گروههای سطحی چسبیده به سطح آنها تشکیل شده‌اند. این ترکیبات، با توجه به ویژگی‌هایی از جمله حلالیت قابل توجه در آب، پایداری نوری، خواص لومینسانس، و زیست سازگاری در کاربردهای گوناگونی همچون شناسایی یونهای فلزی، تجزیه نوری آلایندها، تصویر برداری زیستی و تحویل دارو کاربرد دارند. کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل خواص فلورسنت قادر به پاسخ انتخابی به مولکولهای هدف در نمونه‌های زیست محیطی و بیولوژیکی می‌باشند. ویژگی‌های فلورسانس و تغییرات رنگی کربن کوانتوم دات‌ها، پایه‌ای کلیدی در عملکرد حسگرهای نوری برای شناسایی دقیق آلایندهای فلزی به شمار می‌آید. در این مقاله، علاوه بر کاربردهای کربن کوانتوم دات در حوزه‌های گوناگون، کاربرد کربن کوانتوم دات به عنوان حسگر نوری در شناسایی یک یا چند آلاینده فلزی به صورت تک و یا همزمان بیان شده است. سپس، به کاربرد کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با یک یا چند عنصر در شناسایی کاتیونهای فلزی پرداخته شده است. در نهایت، چالش‌های موجود و چشم انداز آینده کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان حسگر مورد بررسی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کربن کوانتوم دات، شناسایی، فلزات سنگین، حسگر فلورسنت، کربن کوانتوم دات دوپ شده



A Review on the Application of Carbon Quantum dots and Doped Carbon Quantum Dots in Fluorescent Sensors for the Detection of Metal Pollutants

Nargess Yousefi-Limaee*, Yekta Rezaei

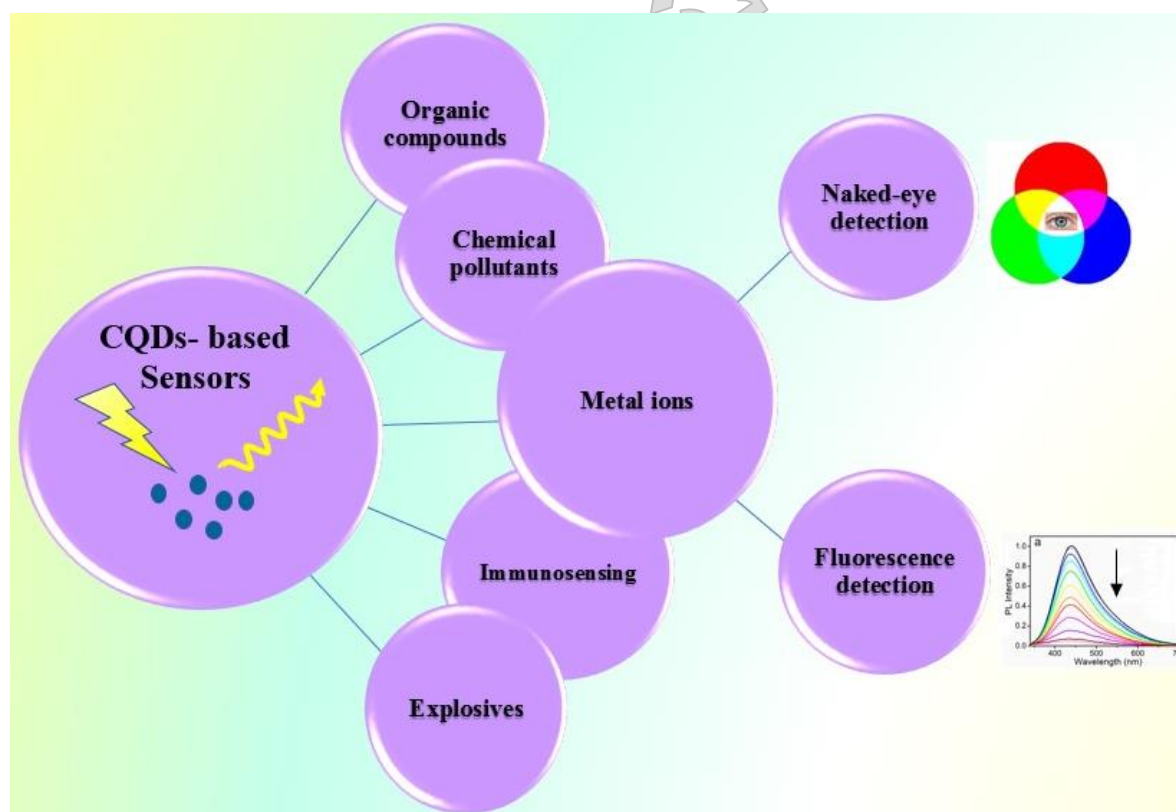
Department of Environmental Research, Institute for Color Science and Technology, P.O.Box:16765-654, Tehran, Iran.

*yousefi-n@icrc.ac.ir

Abstract

Carbon quantum dots (CQDs) are zero-dimensional quasi-spherical nanoparticles smaller than 10 nm, composed of carbon and various surface groups. These compounds are utilized in applications such as metal ion detection, photodegradation of pollutant, bio-imaging, and drug delivery, in order to their high solubility in water, optical stability, luminescence properties, and biocompatibility. Due to their fluorescent characteristics, carbon quantum dots can selectively respond to target molecules in environmental and biological samples. The fluorescence properties and color changes of carbon quantum dots serve as a key foundation for the performance of optical sensors in the accurate detection of metal pollutants. This article discusses the applications of carbon quantum dots across various fields, particularly their role as optical sensors for identifying one or more metal pollutants, either individually or simultaneously. It also explores the use of carbon quantum dots doped with one or more elements for detecting metal cations. Finally, the article examines the current challenges and future prospects of using carbon quantum dots as sensors.

Keywords: Carbon Quantum Dot, Detection, Heavy Metals, Fluorescent Sensor, Doped Carbon Quantum Dot



نانو نورهای کربنی پس از کشف آن‌ها در فرایند خالص‌سازی نانولوله‌های کربنی، توجه بسیاری از پژوهشگران را در حوزه حسگرهای (شیمیایی/زیستی)، تصویربرداری زیستی، استخراج/بازیابی انرژی، زیست پزشکی و فوتوکاتالیز به خود جلب کرده‌اند. این کوچک‌ترین عضو خانواده کربنی دارای خواص نوری و فیزیکوشیمیایی منحصر به فردی از جمله بازده کوانتومی بالا و لومینسانس قابل تنظیم است، اگرچه منشأ این خواص هنوز به‌طور کامل توضیح داده نشده است. علاوه بر این، تنوع ذاتی آن‌ها (مانند ویژگی‌های سطحی، سازگاری محیطی و غیرسمی بودن) استفاده گسترده آن‌ها را به عنوان پروب‌های حسگر نسبت به سایر نانومواد و ترکیبات آلی تقویت کرده است. در مقابل، سایر اعضای این خانواده (مانند رنگزاهای نشانگر و کوانتوم دات‌های نیمه‌رسانا) گزارش شده‌اند که از مشکلاتی مانند سنتز پیچیده، سفید شدن (bleaching) یا مسائل سمیت رنج می‌برند. در میان نانومواد فلورسنت کربنی مختلف، کربن کوانتوم دات‌ها که به عنوان کربن دات‌ها نیز شناخته می‌شوند، به دلیل قابلیت آن‌ها در پیوند با گیرنده‌های انتخابی مطلوب بر روی سطح‌شان توجه علمی را به خود جلب کرده‌اند. به دلیل اصلاح سطحی آسان آن‌ها با استفاده از گروه‌های عاملی متنوع (مانند کربوکسیل، اپوکسی و هیدروکسیل)، کربن کوانتوم دات‌ها می‌توانند به راحتی انتخاب‌پذیری خود را در برابر مولکولهای هدف جدید ارتقا دهند. هم‌چنین از دیدگاه تجاری، به دلیل روش‌های سنتز تثبیت‌شده (از جمله پیرولیز، سنتز هیدروترمال، سنتز میکروویو و غیره)، این مواد برای تولید در مقیاس بزرگ نیز مناسب هستند (۱).

امکان‌پذیری استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها در کاربردهای حسگری به طور گسترده‌ای برای تشخیص آلاینده‌های زیست محیطی مانند کاتیون‌ها، آنیون‌ها، مولکول‌های زیستی و آلاینده‌های آلی کوچک (علف‌کش‌ها/آفت‌کش‌ها) بررسی شده است. مکانیزم اساسی حسگری برای استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان پروب‌های حسگر بر اساس خاموشی یا تقویت فلورسانس ناشی از آنالیت با تشکیل کمپلکس با کربن کوانتوم دات‌های از پیش خاموش‌شده (از طریق مکانیزم انتقال الکترون/انرژی با گیرندگی یا دهنندگی الکترون توسط آنالیت) استوار است. در چند سال اخیر افزایش تعداد مقالات مرتبط با استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان حسگر برای فلزات سنگین/شبه فلزات در محیط‌های آبی مشاهده شده است (۲).

آلودگی منابع آب به فلزات سنگین/شبه فلزات به دلیل اثرات زیان‌بار آن‌ها بر سلامت، یک چالش جهانی است. ماهیت غیرقابل تجزیه و سمی بودن آن‌ها در مقادیر کم، لزوم نظارت بر سطح و تکامل آن‌ها در منابع آب در طول زمان را ضروری می‌سازد (۳). این آلاینده‌های معدنی عمده‌ترین سهم را از انواع آلاینده‌های معدنی تشکیل می‌دهند و عمدتاً به شکل کاتیون‌ها (مانند Hg^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Co^{2+} , Fe^{3+} , Zn^{2+} و Ni^{2+}) و آنیون‌ها (مانند AsO_4^{3-} , AsO_3^{3-} , $Cr_2O_7^{2-}$, SeO_3^{2-} و غیره) حضور دارند. لازم به ذکر است که برخی از این عناصر (به جز Hg) در سطوح کم برای تنظیم فعالیت‌های متابولیک انسانی و عملکردهای زیستی سلولی مانند انتقال و سیگنال‌دهی سلولی ضروری هستند. با این حال، حتی غلظت‌های بسیار کم فلزات سمی (مانند جیوه و آرسنیک) می‌توانند اثرات زیان‌باری در قالب آسیب به استخوان‌ها، اندام‌های حیاتی بدن (مانند کبد، کلیه و غیره) و سیستم عصبی مرکزی داشته باشند. این فلزات از طریق مهار آنزیم‌ها، تنش اکسایشی و نقص در مکانیسم‌های آنتی‌اکسیدانی باعث اختلالات سلولی می‌شوند. این مسیرها منجر به تشکیل گونه‌های اکسیژن فعال می‌شوند که می‌تواند باعث آسیب به DNA، پراکسیداسیون لیپیدها، توقف مسیرهای سنتزی و کاهش پروتئین‌های سولفیدریل شود. وجود این آلاینده‌های معدنی عمدتاً به دلیل فعالیت‌های با منشأ زمینی است، در حالی که فعالیت‌های صنعتی سطح و میزان آن‌ها را بیشتر کرده است (۴).

به‌طور کلی، روش‌های متداول مانند طیف‌سنجی جرمی پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-MS)، کروماتوگرافی یونی (IC)، طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)، طیف‌سنجی نشری نوری با پلاسمای جفت‌شده القایی (ICP-OES)، آنالیز فعال‌سازی نوترونی و آنالیز فلورسانس اشعه ایکس برای ارزیابی کیفی و کمی فلزات مورد استفاده قرار گرفته‌اند که در آن نمونه‌ها به‌صورت خارج از محل جمع‌آوری، ذخیره و قبل از آنالیز پیش‌پردازش می‌شوند. با این حال، این گزینه‌های متداول معمولاً از چندین عیب از جمله ابزارهای گران‌قیمت، نیاز به تخصص و روش‌های آماده‌سازی پیچیده رنج می‌برند. به عنوان جایگزینی برای این روش‌های متداول، تکنیک‌های حسگری با استفاده از انتقال نوری و الکتروشیمیایی به دلیل مزایای فراوان (مانند حساسیت خوب، طراحی سخته‌افزار ساده‌تر و قابلیت استفاده در میدان) مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. با این حال، ویژگی‌های تحلیلی این تکنیک‌های قابل‌استفاده در میدان به شدت به قابلیت آن‌ها برای کاربردهای تحلیلی در ماتریکس واقعی با حساسیت عالی، انتخاب‌پذیری، پایداری، غیرسمی بودن، قابلیت استفاده مجدد، بازه تشخیص و هزینه وابسته است (۵-۸).

در طول سالیان، پژوهشگران مواد طیف گسترده‌ای از نانومواد (مانند نانوذرات فلزی، نانوساختارهای نیمه‌رسانا، اکسیدها، پلیمرها، چارچوب‌های آلی-فلزی و کالکوژنیدها) را به عنوان پروب‌های حساس برای تشخیص فلزات سنگین/شبه فلزات در آب گزارش کرده‌اند. کربن کوانتوم دات‌ها دارای خواص فلورسانس هستند که طی آن، پس از تحریک توسط نور در طول موج مشخص، نوری با رنگ خاص گسیل می‌کنند. این رنگ فلورسانسی، به اندازه نقاط کوانتومی، گروه‌های عاملی سطحی و نوع دوپینگ (مثلاً نیتروژن، گوگرد، فلزات) بستگی دارد. بنابراین، بررسی تغییر رنگ تابشی کربن کوانتوم دات (در ناحیه مرئی) یک ابزار کلیدی در شناسایی نوری آلاینده‌های فلزی است. در حسگرهای

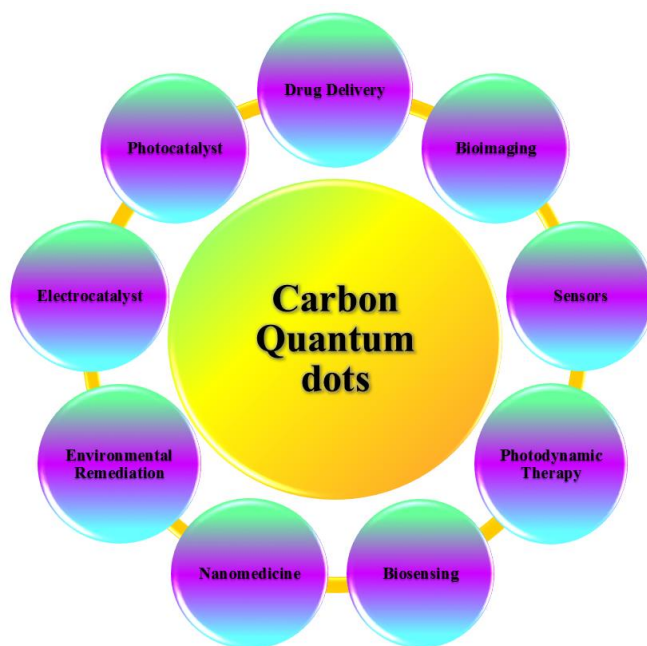
نوری مبتنی بر کربن کوانتوم دات، در حضور یون‌های فلزی، شدت یا رنگ تابش فلورسانس می‌تواند کاهش (quenching)، افزایش یا حتی جابجایی طیفی پیدا کند. این تغییر رنگ، نشانه‌ای از برهم‌کنش با یون هدف است و مبنای عملکرد حسگری به‌شمار می‌رود. با این حال، کشف اخیر کربن کوانتوم دات‌ها به طور قابل‌توجهی به گسترش انتخاب شرایط حسگری برای تشخیص فلزات سنگین کمک کرده است. در نتیجه، این بررسی بر کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی فلزات سنگین در آب تمرکز دارد. هم‌چنین کربن کوانتوم دات‌ها در دسته‌های کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌نشده و اصلاح‌شده برای تشخیص فلزات سنگین در آب بررسی شده‌اند. برای تنظیم خواص نوری و سطحی کربن کوانتوم دات‌ها، به طور کلی اصلاح سطحی، پاسیو کردن سطح یا دوپ کردن اتمی ترجیح داده می‌شود تا خواص طیفی آن، برای ویژگی‌های حسگری و یا انتخاب پذیری ارتقا یابد (۶).

همچنین، مسیر سنتز سبز برای به‌دست آوردن کربن کوانتوم دات‌ها از منابع طبیعی موجود به عنوان یک عمل اقتصادی قابل قبول شناخته شده است. این روش سنتز از دیدگاه تجاری برای تولید در مقیاس بزرگ کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل دسترسی به پیش‌ماده‌های فراوان و ارزان قیمت/مواد زائد مناسب است. این امر به مدیریت پسماند نیز کمک خواهد کرد (۷).

در مقاله پیشین، روش تهیه حسگرهای نوری بر پایه کربن کوانتوم دات برای شناسایی یون‌های فلزی و ساز و کار شناسایی آن، توضیح داده شد (۸). این بررسی با هدف برجسته‌سازی و بحث در مورد کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها و کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده به عنوان حسگرهای دوست‌دار محیط زیست برای آلاینده‌های فلزات سنگین/شبه فلزات در آب ترتیب داده شده است. به‌کارگیری کربن کوانتوم دات‌ها که دوست‌دار محیط زیست و مقرون به‌صرفه هستند، به عنوان مواد حسگر در سیستم‌های مختلف با قابلیت خوانش در محل و دیجیتال می‌تواند یک راه‌حل جامع و کم‌هزینه برای تشخیص فلزات سنگین/شبه فلزات به کاربران ارائه دهد (۶).

۲- کاربردهای کربن کوانتوم دات

کربن کوانتوم دات‌ها نانومواد نوظهوری هستند که به دلیل خواص نوری، الکتریکی، حرارتی و زیست‌سازگاری منحصر به فردشان به طور گسترده در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند (۹). استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد و کاربردهای بالقوه آن‌ها در رشته‌های مختلف، توجه زیادی را به این مواد جلب کرده است. کاربردهای متعدد آن‌ها شامل تصویربرداری زیستی، حسگرها، اپتوالکترونیک، ذخیره‌سازی انرژی و کاتالیز است، اما تنها به این‌ها محدود نمی‌شود. کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان پروب‌های فلورسانس برای لیبل‌گذاری و ردیابی سلول‌ها یا بافت‌ها در سیستم‌های بیولوژیکی در تصویربرداری زیستی قابلیت خود را نشان داده‌اند (۱۰). علاوه بر این، خواص فتولومینسانس برتر آن‌ها، این مواد را حسگرهایی مناسب می‌سازد که برای تشخیص انواع آنالیت‌ها مانند فلزات سنگین یا آلاینده‌های آلی استفاده می‌شوند. کربن کوانتوم دات‌ها در اپتوالکترونیک برای ایجاد سلول‌های خورشیدی کارآمد مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تکنیک‌های تصویربرداری زیستی و حسگرهای زیستی که از کربن کوانتوم دات‌ها استفاده می‌کنند، تحولی در شناسایی و ویژگی‌یابی کاندیداهای دارویی در کشف دارو ایجاد کرده‌اند. کربن کوانتوم دات‌ها در کاربردهای متنوع، مزایای زیادی از خود نشان می‌دهند و به موادی بسیار مورد توجه در حوزه‌هایی چون اپتوالکترونیک، پزشکی زیستی، تصفیه محیط زیست و ذخیره انرژی تبدیل شده‌اند. خواص نوری قابل تنظیم آن‌ها، به‌ویژه فتولومینسانس وابسته به اندازه، که امکان کنترل دقیق طول موج‌های انتشار را فراهم می‌آورد، یک مزیت قابل توجه است و استفاده از آن‌ها در LEDها، آشکارسازهای نوری و تصویربرداری زیستی را تسهیل می‌کند. علاوه بر این، طیف جذب گسترده آن‌ها باعث می‌شود که کاندیداهای مناسبی برای سلول‌های خورشیدی و فوتوترایی باشند. زیست‌سازگاری بالا و سمیت پایین آن‌ها، به‌ویژه در کاربردهای زیست‌پزشکی، جذابیت کربن کوانتوم دات‌ها را افزایش می‌دهد. زیست‌سازگاری بالای آن‌ها امکان استفاده ایمن در تصویربرداری زیستی، دارورسانی و تشخیص و درمان را فراهم می‌کند و روش‌های درمانی هدفمند و کارآمدی برای بیماری‌هایی هم‌چون سرطان ارائه می‌دهد. وجود گروه‌های عاملی غنی روی سطح کربن کوانتوم دات‌ها، از جمله گروه‌های هیدروکسیل، کربوکسیل و آمینو، اصلاح سطح آن‌ها را به راحتی ممکن می‌سازد و اتصال لیگاندهای هدف و بیومولکول‌ها را تسهیل کرده و در نتیجه، اختصاصی بودن و تطبیق پذیری آن‌ها در کاربردهای مختلف را افزایش می‌دهد (۱۱). کربن کوانتوم دات‌ها در حسگرهای محیطی و شناسایی، حساسیت فوق‌العاده‌ای به تغییرات محیطی و آنالیت‌ها نشان می‌دهند که آن‌ها را به ابزارهای ارزشمندی برای پایش محیط زیست، ایمنی غذایی، تشخیص پزشکی و کنترل فرآیندهای صنعتی تبدیل کرده است. توانایی آن‌ها در تشخیص مواد مختلف، از فلزات سنگین گرفته تا بیومولکول‌ها و گازها، تطبیق پذیری و کاربردپذیری آن‌ها را در محیط‌های گوناگون نشان می‌دهد. علاوه بر این، کربن کوانتوم دات‌ها در فناوری‌های ذخیره و تبدیل انرژی نیز به دلیل سطح مقطع بالا، رسانایی الکتریکی عالی و فعالیت الکتروکاتالیستی خود نوید بخش هستند. ادغام آن‌ها در ابرخازن‌ها، باتری‌ها و الکتروکاتالیست‌ها به توسعه راه‌حل‌های انرژی کارآمد و پایدار کمک می‌کند (۱۲). دسترسی به روش‌های تولید انبوه، از جمله روش‌های هیدروترمال، سنتز به کمک مایکروویو و روش الکتروشیمیایی، امکان تولید انبوه و تجاری‌سازی کربن کوانتوم دات‌ها را فراهم کرده است. در نهایت، تنوع کربن کوانتوم دات‌ها به ادغام آن‌ها در مواد کاربردی مختلف مانند پلیمرها، کامپوزیت‌ها، منسوجات و پوشش‌ها می‌انجامد (۱۳). زمینه‌های کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در تصویر زیر نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱: کاربردهای کربن کوانتوم دات‌ها در حوزه‌های مختلف.

Figure 1: Application areas of Carbon Quantum dots.

کربن کوانتوم دات‌ها به دلیل خواص فلورسانس متحصربه‌فرد خود، ابزار موثری برای شناسایی فلزات سنگین در محیط‌های آبی هستند. حساسیت بالای آن‌ها به تغییرات شیمیایی و وجود گروه‌های عاملی سطحی، امکان شناسایی دقیق و سریع این فلزات را فراهم می‌کند. همچنین زیست‌سازگاری و کم‌خطر بودن کربن کوانتوم دات‌ها، آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای استفاده در پایش محیط زیست و ایمنی غذایی تبدیل کرده است. در ادامه به کاربرد کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی فلزات مختلف به تفصیل پرداخته شده است.

۱-۲ ویژگی‌های کربن کوانتوم دات‌ها

با توجه به آنچه در ادامه ذکر خواهد شد کربن کوانتوم های دوپ شده و دوپ نشده دارای مزایا و معایبی می باشند که هر کدام به طور مجزا در بخش مربوطه بحث خواهد شد. جدول ۱، مزایا و معایب کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و نشده را بیان می کند (۹، ۱۴). در مجموع، کربن کوانتوم دات‌ها، به‌تنهایی مزایای متعددی در کاربردهای نوری دارند، اما دوپینگ با عناصر مناسب موجب ارتقاء عملکرد حسگری آن‌ها می‌شود.

جدول ۱: ویژگی‌ها (مزایا و معایب) کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و دوپ نشده.

Table 1: Properties (advantages and disadvantages) of doped and undoped carbon quantum dots.

ویژگی‌ها	CQDs (دوپ نشده)	CQDs (دوپ شده)
مزایا	-سنتز ساده و ارزان -زیست‌سازگاری بالا -پایداری نوری خوب -قابلیت پراکندگی در آب	-بهبود شدت و بازده فلورسانس -افزایش انتخاب‌پذیری نسبت به یون‌های خاص -قابلیت تنظیم باندگپ نوری -کاهش حد تشخیص (LOD)
معایب	-حساسیت و انتخاب‌پذیری نسبتاً پایین در برابر برخی یون‌ها -عملکرد محدود در شناسایی هم‌زمان	-فرآیند دوپینگ ممکن است شرایط کنترل‌شده‌ای بخواهد -احتمال کاهش زیست‌سازگاری در دوپینگ‌های خاص -افزایش پیچیدگی فرآیند سنتز

۲-۲- پایداری و بازیابی کربن کوانتوم داتها

پایداری کربن کوانتوم داتها به لحاظ پایداری نوری و پایداری شیمیایی قابل بررسی می باشد. کربن کوانتوم داتها، به دلیل ساختار کربنی و گروه‌های عاملی سطحی، پایداری نوری بالایی دارند و در طول زمان، تابش فلورسنت خود را حفظ می کنند. این ویژگی باعث می شود که در اندازه گیری های مکرر و در شرایط محیطی مختلف، عملکرد حسگر دچار افت قابل توجهی نشود. کربن کوانتوم داتهای دوپ شده معمولاً پایداری نوری بهتری نسبت به دوپ نشده دارند، زیرا، فرایند دوپینگ ساختار نانومواد را تقویت و انتقال بار را بهبود می بخشد. کربن کوانتوم داتهای دوپ شده و دوپ نشده، معمولاً در محیط های آبی و متنوع شیمیایی مقاوم هستند. با این حال، در حضور یون های فلزی بسیار قوی و یا pH بسیار بالا/پایین ممکن است تغییراتی در سطح کربن کوانتوم دات ایجاد شود که بر عملکرد فلورسانس تاثیر گذار است (۱۵). یکی از موضوعات قابل توجه در ارتباط با کربن کوانتوم داتها، موضوع بازیابی آنها می باشد. برخی از کربن کوانتوم داتها، امکان استفاده مجدد در فرآیند شناسایی را دارند، به ویژه اگر فرآیند جذب یون فلزی برگشت پذیر باشد. این موضوع در حسگرهای فلورسانس اهمیت بالایی دارد تا بتوانند در چند چرخه اندازه گیری بدون افت عملکرد کار کنند. در این میان، شستشو با بافرهای مناسب یا محلول های شیمیایی برای دفع یون های جذب شده و استفاده از تغییر شرایط pH یا دما برای آزادسازی یون های فلزی از سطح کربن کوانتوم دات، از روش های بازیابی کربن کوانتوم داتها می باشد. ولیکن، فرایند بازیابی دارای محدودیتهایی نیز می باشد، از جمله زمانی که یون ها کمپلکس های قوی یا واکنش های شیمیایی غیر قابل برگشت با کربن کوانتوم داتها تشکیل دهند. در این موارد، افت تدریجی عملکرد حسگر دیده می شود (۱۶).

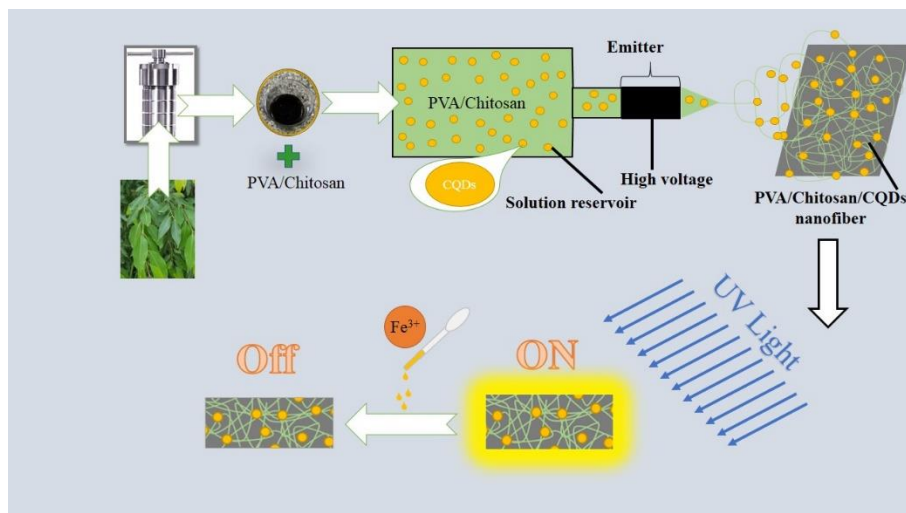
۳- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی آلاینده های فلزی

۳-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون آهن (III)

در سال ۲۰۲۴ گروهی از محققان با استفاده از پودر تخمه کدو حلوائی به روش کربونیزاسیون به کمک مایکروویو، موفق شدند کربن دات سنتز کنند. ذرات سنتز شده دارای خواص فوتولومینسانس با پیک نشری به رنگ آبی روشن در ۳۹۹ nm و بازده کوانتومی حدود ۹/۵ درصد بودند. کربن دات ها برای تشخیص یون های آهن با حد تشخیص $2/54 \mu\text{M}$ استفاده شدند. تعامل بین یون های Fe^{3+} و کربن دات ها با استفاده از تکنیک های طیف سنجی فلورسانس ارزیابی شد که روش شناسایی انتخابی و ساده ای برای یون های Fe^{3+} در محیط آبی است (۱۷). ژانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ از روش هیدروترمال از پایین به بالا برای تهیه کربن کوانتوم دات از گیاه سنبل آبی در دمای ثابت 180°C استفاده کردند. کربن کوانتوم دات ها دارای اندازه یکنواخت، ساختار گرافیت آمورف، حلالیت بالا در آب و پایداری نوری بالا بودند. نتایج نشان داد که محلول آبی این مواد می تواند یون های Fe^{3+} را با سرعت، حساسیت و انتخاب پذیری بالا شناسایی کند. حد تشخیص $0/084 \mu\text{M}$ در محدوده خطی $0-30 \mu\text{M}$ گزارش شده است، که بسیار کمتر از حد تشخیص $0/77 \mu\text{M}$ تعیین شده توسط سازمان بهداشت جهانی می باشد (۱۸). در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۲۱، سنتز کربن کوانتوم دات ها با استفاده از آسکوربیک اسید به عنوان پیش ساز ارزان و دوست دار محیط زیست در راکتورهای با فشار و دمای بالا انجام شد. اندازه ذرات در محدوده ۲-۶ nm و دارای ساختار منظم گزارش شده است. آزمایشات نشان داد که کربن کوانتوم دات ها گزینه خوبی برای شناسایی Fe^{3+} در محیط های آبی هستند و قادر به تشخیص غلظت های تا $0/49 \text{ ppm}$ می باشند (۱۹). در سال ۲۰۲۳ جمعی از محققان بر روی تولید کربن دات از زرده تخم مرغ تمرکز کردند. آن ها توانستند کربن دات هایی سنتز کنند که تحت تابش UV فلورسانس آبی روشن از خود ساطع کرده و به طور انتخابی Fe^{3+} را در محلول شناسایی کنند. محدوده خطی تشخیص این یون $0/05-0/45 \text{ mM}$ تعیین شد. علاوه بر این، این کربن دات ها می توانند توسط سلول های سرطانی کبد انسان (HepG2) جذب شده و فلورسانس آبی روشنی را ساطع کنند. شدت فلورسانس می تواند سطح Fe^{3+} درون سلولی را نشان دهد و بدین ترتیب این مواد می توانند برای تصویربرداری سلولی و پایش Fe^{3+} درون سلولی استفاده شوند (۲۰). یوسفی و همکاران در تحقیقی، کربن کوانتوم دات با بازده کوانتومی فلورسانس بالا، به روش هیدروترمال، از برگ درخت جمبو تهیه نمودند. همچنین، از نانو الیاف پلی وینیل الکل/کیتوسان به عنوان بستر برای تثبیت کربن کوانتوم داتها استفاده شد و برای شناسایی کاتیون های آهن (III) استفاده گردید. نتایج نشان دهنده کاهش خاصیت فلورسانس حسگر تهیه شده در مواجهه با آهن (III) در مقایسه با سایر کاتیونها بوده است (شکل ۲) (۲۱). در پژوهش های متعدد دیگری نیز در زمینه شناسایی Fe^{3+} در سال های اخیر انجام شده اند (۲۲-۲۵).

¹Limit Of detection (LOD)

²Zhang



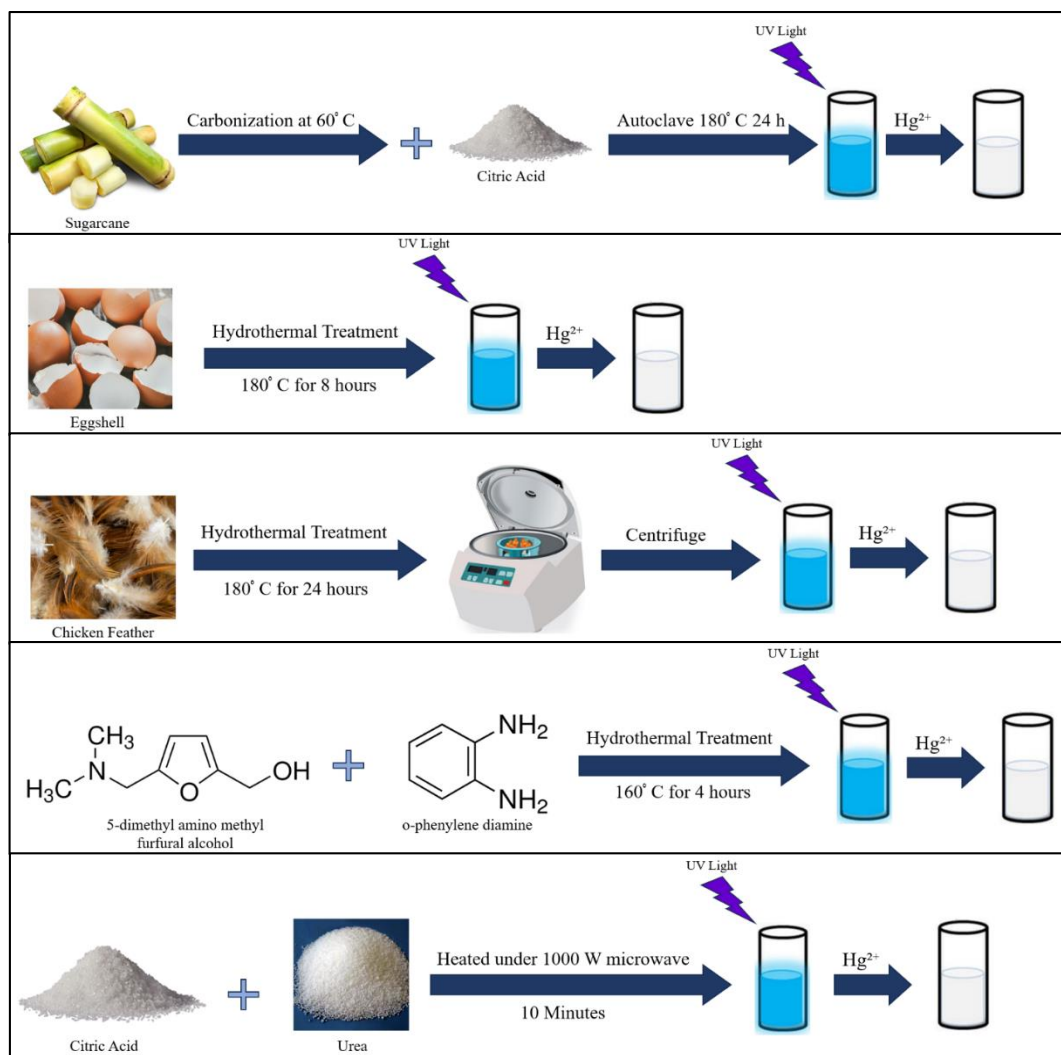
شکل ۲: تهیه کوانتوم دات از برگ درخت جمبو و تثبیت آن بر روی پلی وینیل الکل/کیتوسان برای شناسایی آهن (III) (۱۷).
Figure 2: Preparation of CQDs from Syzygium Cumini leaves and its stabilization on PVA/Chitosan for the detection of Fe (III) (17).

۲-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون جیوه (II)

پژوهش‌های زیادی برای شناسایی یون Hg^{2+} با استفاده از کربن کوانتوم دات‌ها صورت گرفته است (شکل ۳) (۲۶، ۲۷). در سال ۲۰۲۲ جمعی از پژوهشگران، سنتز کربن کوانتوم دات‌ها با استفاده از نیشکر به عنوان منبع کربن به روش هیدروترمال، که از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی مقرون به صرفه است، را بررسی کردند. این مواد به عنوان حسگر برای شناسایی یون‌های Hg^{2+} استفاده شد. حد تشخیص $0.1 \mu M$ و محدوده خطی $0.300 - 300 \mu M$ گزارش شده است. به دلیل سمیت سلولی پایین و زیست‌سازگاری خوب، از کربن کوانتوم دات‌های سنتز شده برای تصویربرداری زنده سلولی استفاده گشت که نتیجه قابل قبولی داشت (۲۸). پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ از پوسته تخم‌مرغ به عنوان منبع کربن برای سنتز کربن کوانتوم دات‌های محلول در آب استفاده کردند. کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار تولید شده حداکثر پیک نشری فلورسانس در 420 nm داشتند و بازده سنتز تقریباً $9/6\%$ درصد بود. این ذرات با استفاده از خواص فلورسانس خود توانستند یون Hg^{2+} را با حد تشخیص $2/6 \mu M$ شناسایی کنند. همچنین محدوده خطی تشخیص $100 - 10 \mu M$ می‌باشد (۲۹). دورایسامی^۱ و همکاران، در سال ۲۰۲۳ با روش هیدروترمال یک مرحله‌ای با بازده کوانتومی $77/2\%$ درصد، کربن کوانتوم دات‌هایی به قطر $5 - 1 \text{ nm}$ با فلورسنت سبز سنتز کردند. کربن کوانتوم دات‌ها به عنوان یک حسگر فلورسنت برای شناسایی انتخابی و با حساسیت بالای یون Hg^{2+} استفاده شدند. حد تشخیص این کاتیون $6/2 \text{ nM}$ و محدوده خطی $500 - 0 \mu M$ گزارش شده است (۳۰). در پژوهش دیگری در همان سال، کربن کوانتوم دات‌ها از طریق روش هیدروترمال سنتز شد. کربن کوانتوم دات‌های تولید شده در معرض تابش اشعه ماوراء بنفش، انتشار زرد رنگ نشان دادند. از این ذرات برای شناسایی یون Hg^{2+} استفاده شد و مشخص گردید که محدوده خطی $100 - 15 \mu M$ و حد تشخیص $5/2 \text{ nM}$ می‌باشد. همچنین یون جیوه (II) در نمونه‌های آب واقعی نیز با موفقیت شناسایی شد (۳۱). ژانگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ کربن کوانتوم دات‌هایی اصلاح‌شده با پیروفسفات برای تشخیص جیوه (II) سنتز کردند. کاتیون Hg^{2+} با گروه‌های پیروفسفات روی سطح کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌شده با پیروفسفات واکنش داده و یک کمپلکس غیر فلورسنت تشکیل می‌دهد که منجر به خاموش شدن فلورسانس سبزرنگ می‌شود. شناسایی یون Hg^{2+} توسط این ذرات حد تشخیص 2 nM داشته و در محدوده $0.1 - 1/4 \mu M$ خطی می‌باشد. کربن کوانتوم دات‌های اصلاح‌شده با پیروفسفات همچنین برای تشخیص یون جیوه (II) در سلول‌های هپاتوسیت انسان نیز به کار رفت (۳۲).

^۱Duraisamy

^۲Zhang



شکل ۳: کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی یون جیوه (II) (۲۶-۲۲).

Figure 3: Carbon Quantum Dots in Mercury (II) Sensing (22-26).

۳-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون کروم (VI)

وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ به روش هیدروترمال یک مرحله‌ای، کربن کوانتوم دات دارای فلورسنت آبی سنتز کردند. این کربن کوانتوم دات‌ها پایداری فلورسانس خوب، حلالیت در آب و سمیت سلولی کم از خود نشان دادند. از این ماده می‌توان به عنوان حسگری با حساسیت بالا برای تشخیص یون کروم (VI) استفاده نمود. حد تشخیص $0.25 \mu\text{M}$ و محدوده خطی شناسایی $1-100 \mu\text{M}$ برای این یون مشاهده شد. همچنین کربن کوانتوم دات‌های تولید شده موفق شدند کروم (VI) را در نمونه واقعی آب نیز شناسایی کنند (۳۳). یانگ و همکاران در سال ۲۰۲۱ از کیتوسان و اورتو فنیلین دی‌آمین به روش کربنیزاسیون هیدروترمال موفق به تولید کربن دات‌هایی با انتشار آبی شدند. این مواد حلالیت، پایداری و فلورسانس عالی را در محلول‌های آبی نشان دادند. کربن دات‌ها به عنوان حسگر برای شناسایی یون کروم (VI) به کار رفتند. این حسگر توانست در محدوده خطی $1-130 \mu\text{M}$ به خوبی این کاتیون را شناسایی کند و همچنین حد تشخیص $0.91 \mu\text{M}$ به دست آمد. این شناساگر می‌تواند برای نمونه‌های واقعی آب نیز به کار گرفته شود (۳۴). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی با استفاده از ترکیبی از نان کامل، آرد سویا و آب لیمو به روش هیدروترمال سنتز کردند. بالاترین بازده کوانتومی $2/31$ درصد به دست آمد. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند به طور انتخابی یون‌های کروم (VI) را با حد تشخیص 8 ppm شناسایی کنند و محدوده خطی تشخیص از $2/5 \text{ ppm}$ تا 50 ppm گزارش شده است (۳۵). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ از یک روش هیدروترمال ساده برای سنتز کربن کوانتوم دات‌ها استفاده کردند که سپس به عنوان حسگرهای شیمیایی فوق حساس برای تشخیص کاتیون کروم (VI) به کار رفت. محدوده خطی شناسایی برای این یون بازه $0.25-1 \mu\text{M}$ تعیین شد و حد تشخیص $1/40 \mu\text{M}$ به دست آمد (۳۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۴ به روش هیدروترمال موفق شدند کربن کوانتوم دات‌هایی سنتز کنند که قادر به شناسایی یون کروم (VI) بود. شرایط بهینه برای شناسایی،

^۱Wang

^۲Yang

دمای اتاق، pH از ۷ تا ۸ و زمان واکنش ۳۰ دقیقه به دست آمد. حد تشخیص $3/86 \mu\text{M}$ و بازه خطی شناسایی $90-20 \mu\text{M}$ بود (۳۷). تحقیقات دیگری نیز در این زمینه انجام گرفته است (۳۸-۴۰).

۳-۴- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون سرب (II)

مطالعاتی بر روی شناسایی یون سرب به کمک کربن کوانتوم دات‌ها صورت گرفته است. ژائو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی با فلورسانس آبی رنگ تولید نمودند. ذرات تولید شده توانستند به عنوان حسگر حساس برای شناسایی یون Pb^{2+} به کار روند. در محدوده غلظت بین $6-0 \mu\text{M}$ رابطه خطی وجود داشت و حد تشخیص مقدار $0/42 \mu\text{M}$ مشخص گردید. همچنین این حسگر می‌تواند در حضور یون‌های فلزی دیگری نیز یون سرب (II) را شناسایی کند که می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاربری در نمونه‌های آب واقعی باشد (۴۱). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ کربن دات‌هایی با اصلاح شیمیایی با گلوپتاتین^۲ سنتز کردند که انتشار سبز رنگی از خود نشان دادند. این ماده توانست به عنوان حسگر فلورسنت یون Pb^{2+} را در محدوده خطی $700-10 \text{ nM}$ شناسایی کند. همچنین حد تشخیص $2/7 \text{ nM}$ گزارش شده است (۴۲). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ یک حسگر الکتروشیمیایی با استفاده از کربن کوانتوم دات‌های سنتز شده به روش هیدروترمال و یک کامپوزیت ژئولیتی برای شناسایی یون Pb^{2+} ساخته شد. این حسگر یون سرب (II) را با حد تشخیص $0/4 \text{ nM}$ و در محدوده خطی غلظت 1 nM تا $1 \mu\text{M}$ شناسایی نمود. همچنین در حضور یون‌های دیگر نیز توانست توانایی تشخیص خود را حفظ کند (۴۳). محققان در سال ۲۰۲۱ با استفاده از محصولات کشاورزی مقرون به صرفه و به روش هیدروترمال ساده، موفق به تولید کربن دات با بازده کوانتومی ۵۲ درصد شدند. خواص نوری این ماده تابعی از pH و طول موج گزارش شد. کربن دات‌ها توانستند یون فلزی Pb^{2+} را به صورت انتخابی و با حساسیت بالا در نمونه واقعی پساب با حد تشخیص $0/18 \text{ nM}$ شناسایی نمایند (۴۴). در پژوهشی در سال ۲۰۲۳ پژوهشگران توانستند با آب هندوانه به عنوان ماده پیش‌ساز، کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده گوناگونی تولید کنند. در میان آن‌ها تنها کربن کوانتوم دات‌هایی که با اتیلن دی‌آمین عامل‌دار شده بودند توانستند یون Pb^{2+} را به صورت انتخابی شناسایی کنند. حد تشخیص مقدار بسیار خوب 190 pM به دست آمد که کمتر از حد مجاز در آب آشامیدنی (72 nM) می‌باشد. این حسگر برای شناسایی یون سرب (II) در آب آلوده و سلول انسان به کار گرفته شد که می‌تواند به عنوان ابزار تشخیصی در محیط زیست و همچنین تحقیقاتی در زمینه‌های زیست پزشکی به کار رود (۴۵).

۳-۵- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون مس (II)

لی^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۴ موفق شدند کربن کوانتوم دات‌هایی با انتشار سبز رنگ به وسیله روش مایکروویو سنتز کنند. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند یون Cu^{2+} را با دقت بالا و به صورت انتخابی در نمونه‌های واقعی آب شناسایی نمایند. حد تشخیص این کاتیون فلزی $2/46 \text{ nM}$ و محدوده خطی غلظت $1-0/1 \mu\text{M}$ به دست آمد (۴۶). فنگ^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۳ کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده با پورفیرین^۵ با روش هیدروترمال تولید نمودند. با استفاده از این ماده حسگر حساس برای شناسایی یون Cu^{2+} تهیه شد. این حسگر توانست یون مس (II) را در محدوده خطی غلظت 10 nM تا $10 \mu\text{M}$ شناسایی کند و حد تشخیص نیز $2/78 \text{ nM}$ به دست آمد. پایداری، قدرت شناسایی انتخابی خوب و پاسخ مناسب در شرایط پیچیده، روشی کارآمد و با حساسیت بالا را برای شناسایی این یون فلزی فراهم می‌کند (۴۷). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۰ با استفاده از سیتریک اسید، کربن دات‌هایی عامل‌دار شده با آمینو را تولید کردند. بازده کوانتومی این ذرات ۲۰ درصد به دست آمد. کربن دات‌های عامل‌دار شده یون فلزی Cu^{2+} را با سرعت بالا و به صورت انتخابی با حد تشخیص 5 nM شناسایی نمودند. محدوده خطی تشخیص نیز غلظت $600-0/05 \mu\text{M}$ گزارش شده است. همچنین از این حسگر برای شناسایی یون مس (II) در دو نوع سلول استفاده شد که پتانسیل آن را برای کاربردهای تشخیص بیماری نشان می‌دهد (۴۸). در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۰ پژوهشگران موفق شدند به روش هیدروترمال یک مرحله‌ای کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده با پلی اتیلن ایمین^۶ با میانگین اندازه ذرات $1/98 \text{ nm}$ سنتز کنند. بازده کوانتومی پس از عامل‌دار شدن از $11/3$ درصد به $27/3$ درصد افزایش یافت. با استفاده از این ماده حسگر ساخته شد که توانست با دقت بالا یون فلزی Cu^{2+} را با حد تشخیص 80 nM شناسایی کند. محدوده خطی غلظت نیز $0/8-0/400 \mu\text{M}$ به دست آمد (۴۸). ساندرامورتی^۷ و همکاران در سال ۲۰۱۹ با رویکردی سریع و آسان کربن کوانتوم دات‌هایی به روش پیرولیز

^۱Zhao

^۲Glutathione

^۳Li

^۴Feng

^۵Porphyrin

^۶Polyethyleneimine

^۷Sundramoorthy

تولید نمودند. اندازه ذرات سنتز شده ۸-۲ nm بود که تابش فلورسانس آبی رنگ در طول موج ۳۴۰ nm نشان دادند. کربن کوانتوم دات‌ها موفق شدند کاتیون Cu^{2+} را در نمونه‌های واقعی آب با حد تشخیص ۱۰ nM و محدوده خطی ۱۰۰-۰ μM شناسایی کنند (۴۹). ژیانو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۱ کربن کوانتوم دات‌هایی به طریق روش هیدروترمال در یک فرایند پلیمریزاسیون و کربنیزاسیون متوالی سنتز کردند. این ذرات خاصیت انتشار دوگانه فلورسانس به رنگ‌های سبز در ۵۰۵ nm و قرمز در ۶۸۲ nm را دارا بودند. حسگر ساخته شده از کربن کوانتوم دات‌ها با حساسیت بسیار زیاد به صورت خطی یون Cu^{2+} را در محدوده ۵۰-۰ nM شناسایی نمود. حد پایین تشخیص ۳۷ pM به دست آمد. این حسگر می‌تواند برای شناسایی یون Cu^{2+} در سلول‌های زنده نیز به کار گرفته شود (۵۰). پژوهش‌های دیگری نیز در زمینه شناسایی این یون انجام گرفته است (۵۱).

۳-۶- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون آهن (II)

لی^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۹ برای سنتز سریع و با بازده بالا کربن دات‌ها از آکریل آمید/کیتوسان به روش کربنیزاسیون مایکروویو-هیدروترمال استفاده کردند. زمان واکنش و بازده سنتز به ترتیب ۳۰ دقیقه و ۴۵/۹ درصد بود. کربن دات‌های تولید شده توانستند یون Fe^{2+} را با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی کنند و حد تشخیص برای این کاتیون فلزی ۱۶۰ nM به دست آمد. هم‌چنین دامنه خطی غلظت ۵۰-۰ μM گزارش شده است (۵۲). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از گلوکز که یک پیش‌ساز در دسترس است، به طریق فرایند سنتز جریان هیدروترمال پیوسته توانستند کربن کوانتوم دات‌هایی با اندازه $5 \pm 2/3$ nm با شدت انتشار بهینه در ۴۴۶ nm تولید کنند. کربن کوانتوم دات‌ها بدون تغییرات اضافه دیگری توانستند یون آهن (II) را با حد تشخیص ۶/۰۹ ppm شناسایی کنند. ارزیابی چرخه حیات تایید می‌کند که فرایند سنتز جریان هیدروترمال پیوسته یک مسیر کارآمد و سبز برای سنتز کربن کوانتوم دات از پیش‌ساز گلوکز است (۵۳). داس^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۱ از عصاره ریشه جینسنگ به روش تابش مایکروویو موفق به تولید کربن دات شدند. این کربن دات‌ها با خاصیت انتشار فلورسانس توانستند یون Fe^{2+} را با حد تشخیص ۰/۲۷ μM شناسایی کنند. هم‌چنین محدوده خطی شناسایی این یون ۲۵-۰/۰۲ μM به دست آمد (۵۴).

۳-۷- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی کاتیون‌های دیگر

کربن کوانتوم دات‌ها در شناسایی یون‌های فلزی دیگری نیز کاربرد دارند و از جمله آن‌ها می‌توان به Ni^{2+} , Co^{2+} , Ag^+ , Mn^{7+} , As^{3+} و ... اشاره نمود. ورما^۴ و همکاران در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌هایی از برگ‌های نوعی درخت سنتز کردند. ذرات تولید شده دارای دو انتشار سبز-آبی (۴۸۵ nm) و قرمز رنگ (۶۷۶ nm) بودند. حسگر ساخته شده با این ذرات توانست یون As^{3+} را با حد تشخیص ۱۲/۱۵ nM در نمونه آب واقعی شناسایی کند. زیست‌سازگاری و سمیت سلولی این حسگر و هم‌چنین توانایی آن در شناسایی یون As^{3+} در سلول فیبروپلاست موش نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج مطلوبی به همراه داشت (۵۵). ژانگ^۵ و همکاران در سال ۲۰۲۰ موفق شدند با روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌هایی با شکل کروی منظم و اندازه متوسط ۷/۱۵ nm تولید کنند. کربن کوانتوم دات‌ها تحت تابش UV طول موج ۳۶۵ nm نور فلورسنت آبی ساطع کرده و خواص طیف‌سنجی بسیار خوبی داشتند. حسگر ساخته شده از این ماده در بافر تنظیم شده با pH برابر ۷، یون Mn^{7+} را با دقت بالا و به صورت انتخابی با حد تشخیص ۲/۳ nM شناسایی کرد (۵۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌هایی سنتز کردند که بازده کوانتومی آن ۲۴ درصد بود. این ذرات توانستند کاتیون فلزی Ag^+ را از طریق مکانیسم خاموش شدن استاتیک شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت برای این یون ۴-۱ μM و حد تشخیص ۳۱ nM گزارش شده است. کربن دات‌ها سمیت سلولی پایینی از خود نشان دادند و برای تصویربرداری یون Ag^+ در سلول‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفتند (۵۷). لی^۶ و همکاران در سال ۲۰۱۹ کربن کوانتوم دات‌های عامل‌دار شده با آمین سنتز کرده و به عنوان حسگر یون Co^{2+} به کار بردند. این حسگر موفق شد با حساسیت بالا و به شکل انتخابی کاتیون مدنظر را با حد تشخیص ۱۲ nM و محدوده خطی ۵۰ تا ۴۰ μM شناسایی کند. پتانسیل کربن کوانتوم دات‌ها در نمونه‌های آب واقعی نیز مورد سنجش قرار گرفت (۵۸). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌هایی عامل‌دار شده با ایمیدازول^۷ سنتز کردند. حسگر ساخته شده با این ذرات برای شناسایی یون Ni^{2+} استفاده شد و نتایج نشان دادند که حد تشخیص ۰/۹۳ mM و محدوده خطی غلظت ۱۰۰-۶ mM می‌باشد (۵۹).

^۱Xiao

^۲Li

^۳Das

^۴Verma

^۵Zhang

^۶Li

^۷Imidazole

۳-۸- کاربرد کربن کوانتوم دات در شناسایی چند کاتیون به طور همزمان

کربن کوانتوم دات‌ها می‌توانند برای شناسایی همزمان چند یون نیز به کار روند. پژوهشگران در سال ۲۰۲۳، کربن کوانتوم دات‌هایی با مورفولوژی شبه کروی از الیاف نوعی درخت نخل تهیه کردند. این حسگر توانست یون Fe^{3+} را با حد تشخیص $0.069 \mu M$ ، یون Cu^{2+} را با حد تشخیص $0.099 \mu M$ و در نهایت یون Hg^{2+} را با حد تشخیص $0.25 \mu M$ با حساسیتی بالا شناسایی کند (۶۰). ژو و همکاران در سال ۲۰۲۲ با سنتز کربن کوانتوم دات، آن را به عنوان حسگر برای چهار یون Fe^{3+} ، Cr^{6+} ، Fe^{2+} و Hg^{2+} در نمونه‌های آب ساختگی و واقعی به کار بردند. نتایج نشان داد که این حسگر چهار یون فلزی سنگین نامبرده را در محدوده غلظت $1-50 \mu M$ با دقت ۹۵ درصد شناسایی می‌کند (۶۱). جمعی از محققان در سال ۲۰۱۹ به روش هیدروترمال موفق به سنتز کربن کوانتوم دات شدند. کربن کوانتوم دات‌های تولید شده توانستند یون‌های Hg^{2+} ، Cu^{2+} ، Pb^{2+} و Fe^{3+} را به ترتیب با حد تشخیص $3/3 \text{ nM}$ ، $0.045 \mu M$ ، $0.27 \mu M$ و $6/2 \mu M$ به خوبی شناسایی کنند (۶۲). در پژوهشی در سال ۲۰۲۰ پژوهشگران با استفاده از برگ نوعی گیاه، کربن کوانتوم دات‌هایی با حلالیت آب بالا، پایدار و غیرسمی را به روش هیدروترمال تولید نمودند. میانگین اندازه ذرات حدود 5 nm و حداکثر بازده کوانتومی $28/2$ درصد گزارش شده است. حسگر ساخته شده با کربن کوانتوم دات‌ها موفق شد یون فلزی Al^{3+} را در محدوده خطی $6-0 \mu M$ با حد تشخیص $0.5 \mu M$ و یون Fe^{3+} را در محدوده خطی $6-0 \mu M$ با حد تشخیص $0.3 \mu M$ با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی نماید. همچنین این ماده به دلیل ویژگی زیست‌سازگاری می‌تواند برای تصویربرداری سلولی نیز مورد استفاده قرار گیرد (۶۳).

۴- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده در شناسایی کاتیون‌های فلزی

دوپ کردن یک تکنیک مفید برای تغییر ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های ساختاری کربن کوانتوم دات‌ها است و خواص نوری، الکتریکی و شیمیایی آن‌ها را اصلاح می‌کند و در نتیجه، دامنه کاربرد آن‌ها را گسترش می‌دهد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده را می‌توان به روش از بالا به پایین یا پایین به بالا تولید نمود. عناصر متداول مورد استفاده برای دوپ کردن عبارت‌اند از نیتروژن، گوگرد، بور، فسفر، باریوم و غیره. عناصر و روش‌های مختلف دوپ کردن بر ویژگی‌های لومینسانس، طول موج فلورسانس، بازده کوانتومی و سایر پارامترهای کربن کوانتوم دات‌ها تأثیر می‌گذارند. علاوه بر این، تحقیقات اخیر نشان داده است که دوپ کردن با اتم‌ها، می‌تواند به طور قابل توجهی بازده کوانتومی فلورسانس کربن کوانتوم دات‌ها را افزایش دهد. با توجه به تمام این مزایا، تعداد فزاینده‌ای از محققان به بررسی دوپ کردن کربن کوانتوم دات‌ها پرداخته‌اند (۶۴).

۴-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با یک عنصر در شناسایی کاتیون‌های فلزی

۴-۱-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن در شناسایی کاتیون‌های فلزی

وو و همکاران در سال ۲۰۲۴ به روش هیدروترمال با استفاده از نوعی گیاه، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن تهیه کردند. این ذرات در طول موج 415 nm تابش فلورسانس پرشدتی از خود نشان دادند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده توانستند یون Cr^{6+} را با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت $40-1 \mu M$ و حد تشخیص $0.16 \mu M$ به دست آمد (۶۵). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن را از گلوکز در فرایند جریان هیدروترمال پیوسته سنتز کردند. بازده کوانتومی در حالت دوپ شده با نیتروژن از کم‌تر از ۱ درصد به ۹/۶ درصد افزایش یافت. این ذرات با پایداری در pHهای بین ۲ تا ۱۱، با حساسیت فوق‌العاده یون Cr^{6+} را با حد تشخیص 0.95 ppm شناسایی کردند (۶۶). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن پایدار را به طریق روش مایکروویو با بازده کوانتومی $26/9$ درصد تولید نمودند. این ذرات تحت تابش فرابنفش با طول موج 315 nm ، تابش فلورسانسی به رنگ آبی روشن از خود نشان دادند. شکل ذرات سنتز شده کروی بوده میانگین اندازه آن‌ها $1/2 \text{ nm}$ ± به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با حساسیت و گزینش‌پذیری بالا یون‌های Mn^{7+} را با حد تشخیص $0.81 \mu M$ شناسایی نمودند. محدوده خطی غلظت $2-30 \mu M$ گزارش شده است. از این حسگر در نمونه‌های آب واقعی نیز استفاده شده است (۶۷). پیاو و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از H_2O_2 به عنوان اکسیدکننده و پلی‌اتریمید به عنوان پیش‌ساز نیتروژن در روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن سنتز کردند. ذرات تولید شده تابش فلورسانس آبی رنگ از خود نشان دادند و اندازه متوسط آن‌ها nm ۴ گزارش شد. بازده کوانتومی نیز $30/7$ درصد به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده به عنوان حسگر موفق شدند یون Fe^{3+} را با حد تشخیص $2/22 \mu M$ شناسایی کنند (۶۸). جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از لیمو توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ

^۱Xu

^۲Doped

^۳Wu

^۴Piao

^۵polyetherimide

شده با نیتروژن را به روش هیدروترمال با اندازه متوسط ۳ nm تولید کنند. این مواد دارای ویژگی‌های حلالیت در آب و پایداری یونی بالا بودند و بازده کوانتومی آن‌ها مقدار خوب ۳۱ درصد به دست آمد. ذرات تولید شده با دقت و به صورت انتخابی کاتیون‌های Hg^{2+} را با حد تشخیص ۵/۳ nm شناسایی کردند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن به دلیل سمیت پایین و زیست‌سازگاری خوب می‌تواند برای تصویربرداری سلول‌های زنده به کار رود (۶۹). پژوهش‌های متعدد دیگری نیز در این زمینه انجام شده است (۷۰-۷۳).

۴-۱-۲- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با فسفر در شناسایی کاتیون‌های فلزی

پژوهشگران در سال ۲۰۲۲ موفق شدند کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر کروی شکل سنتز کنند. اندازه متوسط ذرات ۵/۴ nm و بازده کوانتومی ۳۲/۶ درصد به دست آمد. این کربن کوانتوم دات‌ها توانستند یون فلزی Cu^{2+} را با حد تشخیص $0.032 \mu M$ و در بازه خطی غلظت $0.026-0.26 \mu M$ شناسایی کنند. این حسگر برای نمونه‌های واقعی آب شیر نیز به کار گرفته شد (۷۴). یاداو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۴ به روش تابش مایکروویو و استفاده از پیش‌سازهای سبز، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر تولید نمودند. بازده کوانتومی مقدار قابل توجه ۳۳ درصد گزارش شده است. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون Fe^{3+} را با حد تشخیص ۵۱ nm و یون Hg^{2+} را با حد تشخیص ۸۱ nm شناسایی کنند. کربن کوانتوم دات‌ها علاوه بر این، توانایی تجزیه رنگ متیل نارنجی را نشان دادند و تنها در عرض ۲۴۰ دقیقه بدون هیچ گونه ادغام بیشتر با مواد دیگر، به راندمان تخریب ۷۰ درصد رسیدند (۷۵). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ موفق شدند با استفاده از شیر و فسفریک اسید به طریق روش هیدروترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر سنتز کنند. این ذرات تحت تابش ماورا بنفش از خود فلورسانس سبز ساطع کردند. حسگر کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده توانست با حساسیت بالا کاتیون فلزی Au^{+3} را با حد تشخیص ۴/۲ nm و محدوده خطی $10-140 \mu M$ شناسایی نماید و می‌تواند برای نمونه‌های واقعی آب نیز به کار گرفته شود (۷۶). جوزف^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۰ کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر را با استفاده از تری سدیم سیترات و فسفریک اسید به روش هیدروترمال تولید نمودند. بازده کوانتومی ۱۶/۱ درصد گزارش شده است. این مواد به عنوان حسگر موفق شدند یون فلزی Fe^{3+} را در محدوده خطی غلظت ۲۰ nm تا $30 \mu M$ با حد تشخیص ۹/۵ nm شناسایی کنند. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر برای شناسایی این کاتیون در نمونه‌های آب واقعی نیز به کار رفتند (۷۷).

۴-۱-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با سیلیکون در شناسایی کاتیون‌های فلزی

ژانگ^۳ و همکاران، در سال ۲۰۲۴ موفق به تولید کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با سیلیکون با بازده کوانتومی ۲۳/۳ درصد شدند. این ذرات سنتز شده به عنوان حسگر توانستند یون Cu^{2+} را با حد تشخیص ۳۲/۶۶ nm در محدوده خطی $0.03-0.3 \mu M$ ، یون Mn^{2+} را با حد تشخیص ۲۶/۷ nm در محدوده خطی $0.03-0.5 \mu M$ و در نهایت یون Co^{2+} را با حد تشخیص $0.224 \mu M$ در محدوده خطی $5-0.3 \mu M$ شناسایی کنند. از کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده می‌توان برای شناسایی این یون‌های فلزی در نمونه‌های آب واقعی نیز استفاده نمود (۷۸). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۳ با به کارگیری سیتریک اسید توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر را سنتز نمایند. ذرات تولید شده حلالیت خوبی در آب داشتند و اندازه آن‌ها یکنواخت گزارش شده است. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با فسفر با حساسیت بالا و به صورت انتخابی یون Hg^{2+} را شناسایی کردند. محدوده خطی غلظت $0.02-50 \mu M$ و حد تشخیص $0.015 \mu M$ به دست آمد. از این حسگر برای تشخیص مقدار این کاتیون در نمونه‌های واقعی نیز استفاده به عمل آمد (۷۹). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۱۹ از طریق یک روش هیدروترمال ساده موفق شدند کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با سیلیکون سنتز کنند. بازده کوانتومی در اثر دوپ کردن با سیلیکون از ۷/۸ درصد به ۱۸/۱ درصد افزایش پیدا کرد. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون فلزی Fe^{3+} را در محدوده خطی غلظت $0.01-2.5 \mu M$ با حد تشخیص $0.002 \mu M$ شناسایی کنند. از این روش برای تعیین مقدار این یون در پلاسما نیز استفاده شد (۸۰). پژوهش‌های دیگری نیز در سال‌های اخیر به این موضوع اختصاص یافته‌اند (۸۱).

۴-۲- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با دو یا چند عنصر در شناسایی کاتیون‌های فلزی

۴-۲-۱- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن و گوگرد در شناسایی کاتیون‌های فلزی

جمعی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۴ به روش هیدرو ترمال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و گوگرد سنتز کردند. این ذرات به عنوان حسگر حساس توانستند یون فلزی Hg^{2+} را در محدوده خطی غلظت $0.1-30 \mu M$ شناسایی کنند. حد تشخیص برای این یون مقدار $0.045 \mu M$ گزارش شده است. توانایی این حسگر در آب‌های لوله‌کشی، آب معدنی و آب دریاچه نیز محک زده شد و نتایج، پتانسیل

^۱Yadav

^۲Joseph

^۳Zhang

آن را برای شناسایی این کاتیون نشان می‌دهند (۸۲). یانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۲، موفق شدند کربن دات‌های دوپ شده با نیتروژن و گوگرد با بازده کوانتومی ۲۱/۸۲ درصد تولید کنند. از ویژگی‌های آن‌ها می‌توان به پایداری بالا، تاثیر محیطی کم، کم هزینه بودن و حلالیت خوب در آب اشاره کرد. کربن دات‌های دوپ شده با نیتروژن و گوگرد با مکانیسم افزایش فلورسانس، یون Cr^{6+} را با حساسیت بالا شناسایی کردند. حد تشخیص این کاتیون فلزی سنگین با استفاده از این حسگر، $0.64 \mu M$ گزارش شده است (۸۳). گروهی از محققان در سال ۲۰۱۹ کربن دات‌های دوپ شده با نیتروژن و گوگرد با تابش فلورسانس آبی در 435 nm به روش هیدروترمال ساده سنتز کردند. بازده کوانتومی ۱۶/۱ درصد به دست آمد و با توجه به آزمایشات، سمیت سلولی کم و زیست‌سازگاری خوب این ذرات تایید گشت. کربن دات‌های دوپ شده به عنوان حسگر توانستند کاتیون فلزی Hg^{2+} را با حد تشخیص 83 nM شناسایی کنند. از این ماده برای تصویربرداری سلولی از یون های Hg^{2+} در سلول‌های سرطانی کبد انسان (HepG2) توسط میکروسکوپ فلورسانس استفاده شد (۸۴). تحقیقات دیگری نیز در این زمینه صورت گرفته‌اند (۸۵).

۴-۲-۲- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن و بور در شناسایی کاتیون‌های فلزی

جمعی از محققان در سال ۲۰۲۲ با ۲-آمینو-۳-هیدروکسی پیریدین و سدیم بورهیدرید به عنوان منبع نیتروژن و منبع بور، موفق به سنتز کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و بور به روش هیدروترمال شدند. بازده کوانتومی مقدار $21/2$ به دست آمد. این ذرات به عنوان حسگر، یون فلزی سنگین Cd^{2+} را در محدوده خطی غلظت $2/5-22/5 \mu M$ شناسایی نمودند. حد تشخیص $0.45 \mu M$ گزارش شده است. نتایج این حسگر در نمونه‌های واقعی نیز رضایت‌بخش بوده است (۸۶). در پژوهش دیگری در همان سال، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و بور برای شناسایی یون‌های Al^{3+} و Fe^{2+} به کار گرفته شدند. حد تشخیص برای کاتیون Al^{3+} مقدار $0.187 \mu M$ و برای کاتیون Fe^{2+} مقدار $0.276 \mu M$ گزارش شده است. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده در نمونه‌های آب واقعی نیز نتایج خوبی از خود نشان دادند (۸۷). گروهی از پژوهشگران در سال ۲۰۲۰، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و بور با استفاده از آمونیوم سترات به روش هیدروترمال سنتز کردند. بازده کوانتومی پس از دوپ شدن به مقدار $59/01$ درصد رسید. این ذرات به عنوان حسگر توانستند یون Cr^{6+} را با حساسیت بالا و در محدوده خطی $0.3-500 \mu M$ شناسایی کنند. حد تشخیص $0.24 \mu M$ به دست آمد. این حسگر توانست با موفقیت یون Cr^{6+} را در نمونه‌های آب واقعی شناسایی کند که چشم‌انداز گسترده آن را برای تشخیص این کاتیون نشان می‌دهد (۸۸). پژوهش‌های دیگری نیز در این باره انجام گرفته است (۸۹).

۴-۲-۳- کاربرد کربن کوانتوم دات دوپ شده با عناصر مختلف در شناسایی کاتیون‌های فلزی

زکریا^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۴ کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و اکسیژن را با بازده کوانتومی $57/6$ درصد به روش کربونیزاسیون تولید کردند. اندازه متوسط ذرات 2 nm و شکل آن‌ها کروی به دست آمد. کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده به عنوان حسگر، یون Cr^{6+} را با حساسیت بالا و به صورت انتخابی شناسایی کردند. حد تشخیص این کاتیون مقدار $5 \mu M$ به دست آمد که از حد مجاز آن که $50 \mu M$ می‌باشد، پایین‌تر است (۹۰). جمعی از محققان در سال ۲۰۲۲ با دی‌استون آکریل آمید با یک روش هیدروترمال ساده توانستند کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با نیتروژن و سیلکون سنتز کنند. بازده کوانتومی این ذرات 75 درصد گزارش شده است. این مواد به عنوان حسگر برای شناسایی یون فلزی سنگین Cr^{6+} به کار رفتند. کربن کوانتوم دات‌ها، این یون را با حد تشخیص $0.995 \mu M$ در محدوده خطی غلظت $0-200 \mu M$ به خوبی شناسایی نمودند (۹۱). لی^۳ و همکاران در سال ۲۰۲۲، کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده با چند عنصر نیتروژن، گوگرد و بور با پایداری یونی و حلالیت خوب در آب و بازده کوانتومی $17/6$ درصد تولید نمودند. این ذرات به عنوان حسگر توانستند با حساسیت بالا و به صورت انتخابی، کاتیون‌های Hg^{2+} را شناسایی کنند. محدوده خطی غلظت $30-0 \mu M$ و حد تشخیص $3/1 \text{ nM}$ گزارش شده است. از کربن کوانتوم دات‌ها برای تصویربرداری و تشخیص یون‌های Hg^{2+} در سلول‌های سرطانی روده انسان (HCT-116) استفاده شد که کاربرد آن را در سیستم‌های بیولوژیکی نشان می‌دهد (۹۲). تحقیقات متعدد دیگری نیز در این خصوص انجام شده است (۹۳، ۹۴). جدول ۲، مقایسه ای از کربن کوانتوم دات‌های دوپ شده و دوپ نشده جهت کاربرد در شناسایی یونها را نشان می‌دهد. در همه مثال‌های عنوان شده روش شناسایی مبتنی بر فلورسانس بوده و نکات کلیدی هر تحقیق در آن برجسته شده است.

^۱Yang

^۲Zachariah

^۳Lee

جدول ۲. مقایسه ای از کربن کوانتوم داتهای دوپ شده و دوپ نشده در شناسایی فلورسانس یونهای فلزی.

Table 2. Comparative study of doped and undoped carbon quantum dots in fluorescence detection of metal ions.

Row	Type of CQD	Target ion	Synthesis method	Detection method	Limit of Detection (LOD)	Key points	References
1	Undoped	Pb ²⁺ Ni ²⁺ Mn ²⁺ Co ²⁺ Cr ³⁺	thin film-CQD	Fluorescence	0.006–0.019 ppm	High accuracy in real water samples	(95)
2	Undoped	Multiple metal ions	green precursors	Fluorescence	-	Use of a green precursor for synthesis	(96)
3	Undoped	Fe ³⁺	Hydrothermal	Fluorescence	0.115 μM	a reference for constructing portable sensors	(97)
4	Undoped	Cu ²⁺	Hydrothermal	Fluorescence	0.09 nM	Study the effect of particle size	(98)
5	Doped with Eu and Tb	Mn ²⁺ , Cr ⁶⁺	Hydrothermal	Fluorescence	Mn(II) (0.16 μM) Cr(VI) (0.10 μM)	Simultaneous detection of multiple metal ions	(99)
6	Doped with N and P	Hg ²⁺	Hydrothermal	Fluorescence	0.0245 μM	High sensitivity	(100)
7	Doped with folic acid, m-phenylenediamine and p-phenylenediamine	Hg ²⁺	Hydrothermal	Fluorescence	2.15 nM	Two probe preparation	(101)
8	Doped with Mn, Sr, Al, Ga and In	Multiple metal ions	simple heating approach	Fluorescence	-	great potential for optical and electrical applications	(15)
9	Doped with N and S	Pb ²⁺ and F ⁻	Hydrothermal	Fluorescence	13.35 nM (Pb ²⁺) 43.17 nM (F ⁻)	Simultaneous detection of Pb ²⁺ and F ⁻	(102)
10	Doped with N and S	Fe ³⁺ and Co ²⁺	solvothelmal method	Fluorescence	0.82 μM (Fe ³⁺) 1.19 μM (Co ²⁺)	Dual ion detection	(103)

۵- نتیجه، چالشها و چشم انداز آینده

با استفاده از انواع عوامل دوپ شونده، می توان طیف وسیعی از کربن کوانتوم داتهای دوپ شده را به دست آورد. اکثر کربن کوانتوم دات ها در اثر تابش اشعه ماوراء بنفش فلورسانس آبی ساطع می کنند، همچنین، گزارش های محدودی در خصوص کربن کوانتوم داتهایی که لومینسانس سبز ساطع می کنند، وجود دارد. تحقیقات بیشتر در این زمینه می تواند منجر به توسعه کاربرد شناسایی گردد. از جمله زمینه دیگری که نیاز به توجه دارد، توسعه کربن کوانتوم دات هایی است که در ناحیه قرمز عمیق یا نزدیک به مادون قرمز دارای نشر با بازده کوانتومی بالا هستند، که استراتژی های سنتزی جدید در این خصوص، در حال توسعه هستند. اگرچه این موضوع به خوبی شناخته شده است که دوپ شدن می تواند بازده کوانتومی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد، و منابع طبیعی که سرشار از نیتروژن، فسفر و گوگرد هستند، فراوان است، اما این موضوع، نیاز به مطالعه گسترده برای شناسایی میزان هر یک از اجزا آن دارد. گروه های اکسوکرومیک عالی، به ویژه گروه های حاوی نیتروژن، به بازده کوانتومی بالای کربن کوانتوم داتها کمک می کنند، که ممکن است ناشی از نیتروژن دوپ شده باشد که سطح انرژی جدیدی را به ساختار الکترونیکی کربن کوانتوم دات دوپ شده با نیتروژن وارد می کند. در مقایسه با کربن کوانتوم داتها و کربن کوانتوم داتهای دوپ شده با نیتروژن، کربن کوانتوم داتهای دوپ شده با نیتروژن و گوگرد حاوی مقادیر فراوانی از گروه های نیتروژن و گوگرد هستند و این انواع گسترده از گروه های عملکردی سطح ممکن است عملکرد جدید و چشم انداز کاربردهای گسترده تری را برای مواد فلورسنت به ارمغان بیاورد. عوامل متعددی مانند دمای عملیاتی، حلال های به کار رفته، غلظت پیش سازها، pH و غیره، عملکرد، همگنی و خاصیت نورتایی کربن کوانتوم دات ها را تعیین می کنند. از جمله چالشهای مطرح در این فناوری، سهولت تکرارپذیری و تولید در مقیاس بزرگ می باشد. زیرا، استفاده از تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده و ترکیبات شیمیایی گران قیمت، کاربرد اقتصادی این نانوذرات را

محدود می‌کند. از این رو، استفاده از منابع طبیعی باعث کاهش هزینه‌ها و جایگزینی برای تولید در مقیاس بالا می‌باشد. این بررسی، کربن کوانتوم دات‌های تهیه شده از پیش سازهای گوناگون را برای شناسایی نوری فلزات سنگین و کاربرد آن به عنوان حسگر ارائه نمود. امید است که این بررسی به عنوان پله‌ای برای تحقیقات بیشتر در این حوزه، برای توسعه فناوری حسگرهای نوری باشد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۶- مراجع

1. Wang Y, Hu A. Carbon quantum dots: synthesis, properties and applications. *J Mater Chem. C*. 2014;2(34):6921-39. <https://doi.org/10.1039/C4TC00988F>.
2. Lim SY, Shen W, Gao Z. Carbon quantum dots and their applications. *Chem Soc Rev*. 2015;44(1):362-81. <https://doi.org/10.1039/C4CS00269E>.
3. Yousefi-Limaee N, Peik-Rayekan L, Seifpanahi-Shabani K. A review of ion-imprinted polymer for the removal and colorimetric detection of lead: preparation, mechanism and application. *J stud color world*. 2024;14:253-264. <https://dorl.net/dor/10.30509/JSCW.2024.167332.1195> [In Persian].
4. Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew B, Beeregowda K. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdiscip Toxicol*. 2014;7:60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>.
5. Yousefi-Limaee N, Rouhani S. A review on the application of molecularly imprinted polymers in the detection of pollutants: A case study of optical sensors. *J stud color world*. 2021;10(4):53-68. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.22517278.1399.10.4.5.2> [In Persian].
6. Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Kamandi R. Highly selective and sensitive colorimetric chemosensor using PVA/chitosan ion-imprinted nanofibers for copper ion detection and removal. *Heliyon*. 2024;10(15):e35193. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35193>.
7. Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Olya ME, Najafi F. Selective 2,4-dichlorophenoxyacetic acid optosensor employing a polyethersulfone nanofiber-coated fluorescent molecularly imprinted polymer. *Polym*. 2019;177:73-83. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.05.067>.
8. Yousefi-Limaee N, Rouhani S, Olya ME, Najafi F. Selective Recognition of Herbicides in Water Using a Fluorescent Molecularly Imprinted Polymer Sensor. *J Fluorescence*. 2020;30(2):375-87. <https://doi.org/10.1007/s10895-020-02508-z>.
9. Devi P, Rajput P, Thakur A, Kim K-H, Kumar P. Recent advances in carbon quantum dot-based sensing of heavy metals in water. *TrAC, Trends Anal Chem*. 2019;114:171-95. <https://doi.org/10.1039/D3SU00375B>.
10. Lu Y, Liang X, Niyungeko C, Zhou J, Xu J, Tian G. A review of the identification and detection of heavy metal ions in the environment by voltammetry. *Talanta*. 2018;178:324-38. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2017.08.033>.
11. Yousefi-Limaee N, Rezaei Y, CQDs-based Optical Sensors for the Detection of Metal ions: Preparation and Mechanism of Detection. *J stud color world*. 2024;14:363-378. <https://dorl.net/dor/10.30509/jscw.2024.167400.1210> [In Persian].
12. Kong J, Wei Y, Zhou F, Shi L, Zhao S, Wan M, et al. Carbon Quantum Dots: Properties, Preparation, and Applications. *Molecules*. 2024;29(9):2002. <https://doi.org/10.3390/molecules29092002>.
13. Rawat D, Singh RR. Fluorescent Magnetic Quantum Dots in Bioimaging. *Magnetic Quantum Dots for Bioimaging: CRC Press*; 2023. 133-52. <https://doi.org/10.1201/9781003319870>.

14. Li J, Zhao H, Zhao X, Gong X. Boosting efficiency of luminescent solar concentrators using ultra-bright carbon dots with large Stokes shift. *Nanoscale Horiz.* 2023;8(1):83-94. <https://doi.org/10.1039/D2NH00360K>.
15. Li J, Gong X. The emerging development of multicolor carbon dots. *Small.* 2022;18(51):2205099. <https://doi.org/10.1002/sml.202205099>.
16. Acharya B, Behera A, Behera S, Moharana S. Carbon quantum dots: A systematic overview of recent developments in synthesis, properties, and novel therapeutic applications. *Inorg Chem Commun.* 2024;112492. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.112492>.
17. Ansari L, Hallaj S, Hallaj T, Amjadi M. Doped-carbon dots: Recent advances in their biosensing, bioimaging and therapy applications. *Colloids Surf B Biointerfaces.* 2021;203:111743. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2021.111743>.
18. Han Y, Li W, Lin J, Zhao H, Wang X, Zhang Y. Carbon quantum dots capped with metal ions for efficient optoelectronic applications. *J Mater Chem C.* 2024;12(16):5818-25. <https://doi.org/10.1039/D4TC00419A>.
19. Ozyurt D, Kobaisi MA, Hocking RK, Fox B. Properties, synthesis, and applications of carbon dots: A review. *Carbon Trends.* 2023;12:100276. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2023.100276>.
20. Selvaraj H, Bruntha G, Ilangoan A. Synthesis of Carbon Dots via Microwave-Assisted Process: Specific Sensing of Fe (III) and Antibacterial Activity. *J Fluoresc.* 2024;1-11. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03845-z>.
21. Zhao P, Zhang Q, Cao J, Qian C, Ye J, Xu S, et al. Facile and green synthesis of highly fluorescent carbon quantum dots from water hyacinth for the detection of ferric iron and cellular imaging. *Nanomater.* 2022;12(9):1528. <https://doi.org/10.3390/nano12091528>.
22. Shabbir H, Tokarski T, Ungor D, Wojnicki M. Eco friendly synthesis of carbon dot by hydrothermal method for metal ions salt identification. *Mater.* 2021;14(24):7604. <https://doi.org/10.3390/ma14247604>.
23. Chen J, Wang Y, Wang L, Liu M, Fang L, Chu P, et al. Multi-applications of carbon dots and polydopamine-coated carbon dots for Fe³⁺ detection, bioimaging, dopamine assay and photothermal therapy. *Discover Nano.* 2023;18(1):30. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03809-5>.
24. Yousefi-Limaee N, Tammari S. Preparation of a highly selective fluorescence sensor based on CQDs/PVA/Chitosan nanofiber. 16th International Seminar on Polymer Science & Technology (ISPST 2024), 7-9 September 2024, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.
25. Das GS, Shim JP, Bhatnagar A, Tripathi KM, Kim T. Biomass-derived carbon quantum dots for visible-light-induced photocatalysis and label-free detection of Fe (III) and ascorbic acid. *Sci Rep.* 2019;9(1):15084. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49266-y>.
26. Hu Y, Gao Z, Yang J, Chen H, Han L. Environmentally benign conversion of waste polyethylene terephthalate to fluorescent carbon dots for “on-off-on” sensing of ferric and pyrophosphate ions. *J colloid Interface Sci.* 2019;538:481-8. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.12.016>.
27. Li W, Liu Y, Wang B, Song H, Liu Z, Lu S, et al. Kilogram-scale synthesis of carbon quantum dots for hydrogen evolution, sensing and bioimaging. *Chin Chem Lett.* 2019;30(12):2323-7. <https://doi.org/10.1016/j.cclet.2019.06.040>.
28. Yan F, Zu F, Xu J, Zhou X, Bai Z, Ma C, et al. Fluorescent carbon dots for ratiometric detection of curcumin and ferric ion based on inner filter effect, cell imaging and PVDF membrane fouling research of iron flocculants in wastewater treatment. *Sens Actuators B: Chem.* 2019;287:231-40. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.01.144>.
29. Li D, Wang S, Azad F, Su S. Single-step synthesis of polychromatic carbon quantum dots for macroscopic detection of Hg²⁺. *Ecotoxicol Environ Saf.* 2020;190:110141. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110141>.

30. Zhang Q, Zhang X, Bao L, Wu Y, Jiang L, Zheng Y, et al. The Application of Green-Synthesis-Derived Carbon Quantum Dots to Bioimaging and the Analysis of Mercury (II). *J anal methods chem.* 2019;2019(1):8183134. <https://doi.org/10.1155/2019/8183134>.
31. Kasinathan K, Samayanan S, Marimuthu K, Yim J-H. Green synthesis of multicolour fluorescence carbon quantum dots from sugarcane waste: Investigation of mercury (II) ion sensing, and bio-imaging applications. *Appl Surf Sci.* 2022;601:154266. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.154266>.
32. Ye Z, Zhang Y, Li G, Li B. Fluorescent determination of mercury (II) by green carbon quantum dots synthesized from eggshell membrane. *Anal Lett.* 2020;53(18):2841-53. <https://doi.org/10.1080/00032719.2020.1759618>.
33. Dhandapani E, Maadeswaran P, Raj RM, Raj V, Kandiah K, Duraisamy N. A potential forecast of carbon quantum dots (CQDs) as an ultrasensitive and selective fluorescence probe for Hg (II) ions sensing. *Mater Sci Eng B.* 2023;287:116098. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2022.116098>.
34. Jaison AMC, Vasudevan D, Ponmudi K, George A, Varghese A. One pot hydrothermal synthesis and application of bright-yellow-emissive carbon quantum dots in Hg²⁺ detection. *J Fluoresc.* 2023;33(6):2281-94. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03233-z>.
35. Duan Q, Wang X, Zhang B, Li Y, Zhang W, Zhang Y, et al. A fluorometric method for mercury (II) detection based on the use of pyrophosphate-modified carbon quantum dots. *Mikrochim Acta.* 2019;186:1-7. <https://doi.org/10.1007/s00604-019-3872-0>.
36. Huang Q, Bao Q, Wu C, Hu M, Chen Y, Wang L, et al. Carbon dots derived from Poria cocos polysaccharide as an effective "on-off" fluorescence sensor for chromium (VI) detection. *J Pharm. Anal.* 2022;12(1):104-12. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2021.04.004>.
37. Zhang Y, Dong Y, Zheng H, Yang X, Yao C. High Quantum Yield Fluorescent Chitosan-Based Carbon Dots for the Turn-On-Off-On Detection of Cr (VI) and H₂O₂. *Nano.* 2021;16(09):2150103. <https://doi.org/10.1142/S1793292021501034>.
38. Anpalagan K, Yin H, Cole I, Zhang T, Lai DT. Quantum Yield Enhancement of Carbon Quantum Dots Using Chemical-Free Precursors for Sensing Cr (VI) Ions. *Inorgan.* 2024;12(4):96. <https://doi.org/10.3390/inorganics12040096>.
39. He Z, Shen J, Zhang J, Lin W, Gu H. Cleaner, High-Efficiency, and High-Value Conversion of Chrome-Containing Leather Solid Waste into Carbon Quantum Dots as Renewable Bimetallic Ions Detection Sensors. *ACS Sustain Chem Eng.* 2023;11(35):13126-41. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c03382>.
40. Liu S, Wu Z, Nian N, Zhang P, Ni L. The Speciation of Heavy Metal Chromium in Water Environment by Carbon Quantum Dots System. *Water Air Soil Pollut.* 2024;235(7):449. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07222-1>.
41. Das P, Maruthapandi M, Saravanan A, Natan M, Jacobi G, Banin E, et al. Carbon dots for heavy-metal sensing, pH-sensitive cargo delivery, and antibacterial applications. *ACS Appl. Nano Mater.* 2020;3(12):11777-90. <https://doi.org/10.1021/acsanm.0c02305>.
42. Ghosh B, Roy S, Bardhan S, Mondal D, Saha I, Ghosh S, et al. Biocompatible carbon dot decorated α -FeOOH nanohybrid for an effective fluorometric sensing of Cr (VI) in wastewater and living cells. *J Fluoresc.* 2022;32(4):1489-500. <https://doi.org/10.1007/s10895-022-02962-x>.
43. Shen J, Gu H, He Z, Lin W. Wattle-bark-tannin-derived carbon quantum dots as multi-functional nanomaterials for intelligent detection of Cr⁶⁺ ions, bio-imaging, and fluorescent ink applications. *Ind Eng Chem Res.* 2023;62(8):3622-34. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c04348>.
44. Luo J, Lei Y, Ge Q, Liu M, Jiang N, Huang Y-H, et al. Carbon quantum dots from hemicucur [6] bit and the application for the detection of Pb²⁺. *Spectrochim. Acta A.* 2024;317:124459. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2024.124459>.
45. Paydar S, Feizi F, Shamsipur M, Barati A, Chehri N, Taherpour AA, et al. An ideal ratiometric fluorescent probe provided by the surface modification of carbon dots for the

- determination of Pb^{2+} . *Sens Actuators B Chem.* 2022;369:132243. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.132243>.
46. Liu Q, Gao X, Liu Z, Gai L, Yue Y, Ma H. Sensitive and Selective Electrochemical Detection of Lead (II) Based on Waste-Biomass-Derived Carbon Quantum Dots@ Zeolitic Imidazolate Framework-8. *Mater.* 2023;16(9):3378. <https://doi.org/10.3390/ma16093378>.
47. Chauhan P, Chaudhary S, Kumar R. Biogenic approach for fabricating biocompatible carbon dots and their application in colorimetric and fluorometric sensing of lead ion. *J Clean Prod.* 2021;279:123639. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123639>.
48. Rawat KS, Singh V, Sharma CP, Vyas A, Pandey P, Singh J, et al. Picomolar detection of lead ions (Pb^{2+}) by functionally modified fluorescent carbon quantum dots from watermelon juice and their imaging in cancer cells. *J Imaging.* 2023;9(1):19. <https://doi.org/10.3390/jimaging9010019>.
49. Qian X, Wang Z, Chen Z, El-Bahy SM, Li D, Qin L, et al. Green-emitting carbon quantum dots as efficient fluorescent probes for Cu^{2+} and EDTA detection by "turn-on-off" strategy. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp.* 2024;693:134089. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.134089>.
50. Zhang X, Hou X, Lu D, Chen Y, Feng L. Porphyrin functionalized carbon quantum dots for enhanced electrochemiluminescence and sensitive detection of Cu^{2+} . *Molecules.* 2023;28(3):1459. <https://doi.org/10.3390/molecules28031459>.
51. Huang S, Wang W, Cheng J, Zhou X, Xie M, Luo Q, et al. Amino-functional carbon quantum dots as a rational nanosensor for Cu^{2+} . *Microchem J* 2020;159:105494. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105494>.
52. Murugan N, Prakash M, Jayakumar M, Sundaramurthy A, Sundramoorthy AK. Green synthesis of fluorescent carbon quantum dots from Eleusine coracana and their application as a fluorescence 'turn-off' sensor probe for selective detection of Cu^{2+} . *Appl Sur Sci.* 2019;476:468-80. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.090>.
53. Liu Y, Seidi F, Deng C, Li R, Xu T, Xiao H. Porphyrin derived dual-emissive carbon quantum dots: Customizable synthesis and application for intracellular Cu^{2+} quantification. *Sens Actuators B Chem.* 2021;343:130072. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.130072>.
54. Han Z, Nan D, Yang H, Sun Q, Pan S, Liu H, et al. Carbon quantum dots based ratiometric fluorescence probe for sensitive and selective detection of Cu^{2+} and glutathione. *Sens. Actuators B Chem.* 2019;298:126842. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126842>.
55. Liu G, Li B, Liu Y, Feng Y, Jia D, Zhou Y. Rapid and high yield synthesis of carbon dots with chelating ability derived from acrylamide/chitosan for selective detection of ferrous ions. *Appl Surf Sci.* 2019;487:1167-75. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.05.069>.
56. Baragau I-A, Power NP, Morgan DJ, Lobo RA, Roberts CS, Titirici M-M, et al. Efficient continuous hydrothermal flow synthesis of carbon quantum dots from a targeted biomass precursor for on-off metal ions nanosensing. *ACS Sustain Chem Eng.* 2021;9(6):2559-69. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08594>.
57. Tejwan N, Sharma A, Thakur S, Das J. Green synthesis of a novel carbon dots from red Korean ginseng and its application for Fe^{2+} sensing and preparation of nanocatalyst. *Inorg Chem Commun.* 2021;134:108985. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2021.108985>.
58. Pratap R, Hassan N, Yadav M, Srivastava SK, Chaudhary S, Verma AK, et al. Biogenic synthesis of dual-emission chlorophyll-rich carbon quantum dots for detection of toxic heavy metal ions—Hg (ii) and As (iii) in water and mouse fibroblast cell line NIH-3T3. *Environ Sci Nano.* 2024;11(4):1636-53. <https://doi.org/10.1039/D3EN00789H>.
59. Liu F, Li H, Liao D, Xu Y, Yu M, Deng S, et al. Carbon quantum dots derived from the extracellular polymeric substance of anaerobic ammonium oxidation granular sludge for detection of trace Mn (vii) and Cr (vi). *RSC Adv.* 2020;10(53):32249-58. <https://doi.org/10.1039/D0RA06133F>.
60. Yan F, Bai Z, Zu F, Zhang Y, Sun X, Ma T, et al. Yellow-emissive carbon dots with a large Stokes shift are viable fluorescent probes for detection and cellular imaging of silver

- ions and glutathione. *Mikrochim Acta*. 2019;186:1-11. <https://doi.org/10.1007/s00604-018-3221-8>.
61. Wu Y, Liu Y, Yin J, Li H, Huang J. Facile ultrasonic synthesized NH₂-carbon quantum dots for ultrasensitive Co²⁺ ion detection and cell imaging. *Talanta*. 2019;205:120121. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120121>.
62. Gong Y, Liang H. Nickel ion detection by imidazole modified carbon dots. *Spectrochim. Acta A*. 2019;211:342-7. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.12.024>.
63. Raja S, da Silva GT, Anbu S, Ribeiro C, Mattoso LH. Biomass-derived carbon quantum dot: "On-off-on" fluorescent sensor for rapid detection of multi-metal ions and green photocatalytic CO₂ reduction in water. *Biomass Convers. Biorefinery*. 2023;1-13. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04247-0>.
64. Liu Y, Chen J, Xu Z, Liu H, Yuan T, Wang X, et al. Detection of multiple metal ions in water with a fluorescence sensor based on carbon quantum dots assisted by stepwise prediction and machine learning. *Environ Chem Lett*. 2022;20(6):3415-20. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01475-0>.
65. Radhakrishnan K, Panneerselvam P, Marieeswaran M. A green synthetic route for the surface-passivation of carbon dots as an effective multifunctional fluorescent sensor for the recognition and detection of toxic metal ions from aqueous solution. *Anal Methods*. 2019;11(4):490-506. <https://doi.org/10.1039/C8AY02451K>.
66. Arumugham T, Alagumuthu M, Amimodu RG, Munusamy S, Iyer SK. A sustainable synthesis of green carbon quantum dot (CQD) from *Catharanthus roseus* (white flowering plant) leaves and investigation of its dual fluorescence responsive behavior in multi-ion detection and biological applications. *Sustain Mater Technol*. 2020;23:e00138. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00138>.
67. Park Y, Yoo J, Lim B, Kwon W, Rhee S-W. Improving the functionality of carbon nanodots: doping and surface functionalization. *J Mater Chem*. 2016;4(30):11582-603. <https://doi.org/10.1039/C6TA04813G>.
68. Xie J, Wu Z, Sun J, Lv C, Sun Q. Green synthesis of carbon quantum dots derived from *lycium barbarum* for effective fluorescence detection of Cr (VI) sensing. *J Fluoresc*. 2024;34(2):571-8. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03300-5>.
69. Nguyen KG, Baragau I-A, Gromicova R, Nicolaev A, Thomson SA, Rennie A, et al. Investigating the effect of N-doping on carbon quantum dots structure, optical properties and metal ion screening. *Sci Rep*. 2022;12(1):13806. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16893-x>.
70. Swathi R, Reddy GB, Rajkumar B, Ramakrishna D, Swamy PY. Jamun Seed-Derived Nitrogen-Doped Carbon Dots: A Novel Microwave-Assisted Synthesis for Ultra-Bright Fluorescence and Mn⁷⁺ Detection. *J Fluoresc*. 2023;1-12. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03438-2>.
71. Liu R, Zhang Y, Piao Y, Meng L-Y. Development of nitrogen-doped carbon quantum dots as fluorescent probes for highly selective and sensitive detection of the heavy-ion Fe³⁺. *Carbon Lett*. 2021;31(4):821-9. <https://doi.org/10.1007/s42823-020-00222-1>.
72. Tadesse A, Hagos M, RamaDevi D, Basavaiah K, Belachew N. Fluorescent-nitrogen-doped carbon quantum dots derived from citrus lemon juice: green synthesis, mercury (II) ion sensing, and live cell imaging. *ACS omega*. 2020;5(8):3889-98. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b03175>.
73. Cheng S, Zhang J, Liu Y, Wang Y, Xiao Y, Zhang Y. One-pot synthesis of nitrogen-doped carbon dots for sensing of Co²⁺ and tetracycline antibiotics, biological imaging, and fluorescent inks. *J. Nanoparticle Res*. 2022;24(2):44. <https://doi.org/10.1007/s11051-022-05398-3>.
74. Tan A, Yang G, Wan X. Ultra-high quantum yield nitrogen-doped carbon quantum dots and their versatile application in fluorescence sensing, bioimaging and anti-counterfeiting. *Spectrochim Acta A*. 2021;253:119583. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2021.119583>.

75. Xing S, Zheng K, Shi L, Kang K, Peng Z, Zhang X, et al. Fluorescence Detection of Pb²⁺ in Environmental Water Using Biomass Carbon Quantum Dots Modified with Acetamide-Glycolic Acid Deep Eutectic Solvent. *Molecules*. 2024;29(7):1662. <https://doi.org/10.3390/molecules29071662>.
76. Zhang Y, Li Z, Sheng L, Meng A. Lemon juice-derived nitrogen-doped carbon quantum dots for highly sensitive and selective determination of ferrous ions and cell imaging. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2023;657:130580. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130580>.
77. Preethi M, Viswanathan C, Ponpandian N. Fluorescence quenching mechanism of P-doped carbon quantum dots as fluorescent sensor for Cu²⁺ ions. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2022;653:129942. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129942>.
78. Yadav A, Yadav R, Lahariya V, Singh AK. Versatile P-doped carbon quantum dots derived from green precursor: an efficient metal ion sensor and photocatalytic behaviour in aqueous environment. *Res Chem Intermed*. 2024;50(4):1873-93. <https://doi.org/10.1007/s11164-023-05225-x>.
79. Zhang L, Li B, Zhou Y, Wu Y, Sun Q, Le T. Preparation of phosphorus-doped cow milk-derived carbon quantum dots and detection of Au³⁺. *J Food Process Eng*. 2023;46(7):e14349. <https://doi.org/10.1111/jfpe.14349>.
80. Kalaiyarasan G, Joseph J, Kumar P. Phosphorus-doped carbon quantum dots as fluorometric probes for iron detection. *ACS omega*. 2020;5(35):22278-88. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c02627>.
81. Hao Y, Li T, Tian M, Dai Q, Zhang F, Chai F. A silicon-doped carbon dot-based multivariate fluorometric and colorimetric probe for the simultaneous detection of heavy metal ions and dopamine. *New J Chem*. 2024;48(4):1828-36. <https://doi.org/10.1039/D3NJ04627C>.
82. Liao S, Zhang L, Li S, Yue S, Wang G. Selective detection of mercury ions via single and dual signals by silicon-doped carbon quantum dots. *New J Chem*. 2023;47(30):14242-8. <https://doi.org/10.1039/D3NJ02521G>.
83. Desai ML, Basu H, Saha S, Singhal RK, Kailasa SK. Investigation of silicon doping into carbon dots for improved fluorescence properties for selective detection of Fe³⁺ ion. *Opt Mater*. 2019;96:109374. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109374>.
84. Zan M, Li C, Zhu D, Rao L, Meng Q-F, Chen B, et al. A novel "on-off-on" fluorescence assay for the discriminative detection of Cu (ii) and l-cysteine based on red-emissive Si-CDs and cellular imaging applications. *J Mater Chem B*. 2020;8(5):919-27. <https://doi.org/10.1039/C9TB02681A>.
85. Hu A, Chen G, Huang A, Cai Z, Yang T, Ma C, et al. o-phenylenediamine Derived Fluorescent Carbon Quantum dots for Detection of Hg (II) in Environmental Water. *J Fluoresc*. 2024;34(2):905-13. <https://doi.org/10.1007/s10895-023-03331-y>.
86. Chen Y, Cui H, Wang M, Yang X, Pang S. N and S doped carbon dots as novel probes with fluorescence enhancement for fast and sensitive detection of Cr (VI). *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*. 2022;638:128164. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.128164>.
87. Wu H, Tong C. Nitrogen-and sulfur-codoped carbon dots for highly selective and sensitive fluorescent detection of Hg²⁺ ions and sulfide in environmental water samples. *J Agric Food Chem*. 2019;67(10):2794-800. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b07176>.
88. Wang Y, Xu G, Zhang X, Yang X, Hou H, Ai W, et al. N-and S-codoped carbon quantum dots for enhancing fluorescence sensing of trace Hg²⁺. *Phys Chem Chem Phys*. 2023;25(41):28230-40. <https://doi.org/10.1039/D3CP02924G>.
89. Yan Z, Yao W, Mai K, Huang J, Wan Y, Huang L, et al. A highly selective and sensitive "on-off" fluorescent probe for detecting cadmium ions and L-cysteine based on nitrogen and boron co-doped carbon quantum dots. *RSC Adv*. 2022;12(13):8202-10. <https://doi.org/10.1039/D1RA08219A>.
90. Wang C, Sun Q, Li C, Tang D, Shi H, Liu E, et al. Biocompatible double emission boron nitrogen co-doped carbon quantum dots for selective and sensitive detection of Al³⁺

- and Fe^{2+} . Mater Res Bull. 2022;155:111970. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.111970>.
91. Wang Y, Hu X, Li W, Huang X, Li Z, Zhang W, et al. Preparation of boron nitrogen co-doped carbon quantum dots for rapid detection of Cr (VI). Spectrochim Acta A. 2020;243:118807. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118807>.
92. Wu H, Pang L-F, Fu M-J, Guo X-F, Wang H. Boron and nitrogen codoped carbon dots as fluorescence sensor for Fe^{3+} with improved selectivity. J Pharm Biomed Anal. 2020;180:113052. <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2019.113052>.
93. John A, Roy RE, Hari H, Zachariah AK. Emerging Stoke's Shift-Based Cr (VI) Fingerprint Sensor from Intensely Blue Fluorescent, High Quantum Yield, Pepitas-Derived Carbon Dots. ACS Appl Opt Mater. 2024;2(2):291-300. <https://doi.org/10.1021/acsaom.3c00411>.
94. Zhang J, Jing C, Wang B. A label-free fluorescent sensor based on Si, N-codoped carbon quantum dots with enhanced sensitivity for the determination of Cr (VI). Mater. 2022;15(5):1733. <https://doi.org/10.3390/ma15051733>.
95. Mohandoss S, Khanal HD, Palanisamy S, You S, Shim J-J, Lee YR. Multiple heteroatom-doped photoluminescent carbon dots for ratiometric detection of Hg^{2+} ions in cell imaging and environmental applications. Anal Methods. 2022;14(6):635-42. <https://doi.org/10.1039/D1AY02077C>.
96. Karami C, Taher MA, Shahlaei M. A simple method for determination of mercury (II) ions by PNBS-doped carbon dots as a fluorescent probe. J Mater Sci Mater Electron. 2020;31:5975-83. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03157-5>.
97. Mondal TK, Mondal S, Ghorai UK, Saha SK. White light emitting lanthanide based carbon quantum dots as toxic Cr (VI) and pH sensor. J Colloid Interface Sci. 2019;553:177-85. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.009>.
98. Vyas T, Joshi A. Chemical sensor thin film-based carbon quantum dots (CQDs) for the detection of heavy metal count in various water matrices. Analyst. 2024;149(4):1297-309. <https://doi.org/10.1039/D3AN01571H>.
99. Torres Landa SD, Reddy Bogireddy NK, Kaur I, Batra V, Agarwal V. Heavy metal ion detection using green precursor derived carbon dots. iScience. 2022;25(2):103816. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.103816>.
100. Yin Y, Huanhuan L, Weijun S, Xiaofeng H, and Sun C. Carbon Quantum Dot (CQD)-Based Composite Fluorescent Hydrogel for the Isolation and Determination of Iron (III). Anal Lett. 2024;57(10):1595-610. <https://doi.org/10.1080/00032719.2023.2262631>.
101. Liu Y, Feng S, Zhu Q. The effect of CQDs' particle size on its fluorescence behavior and Cu^{2+} detection. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc. 2025;341:126408. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2025.126408>.
102. Che H, Tian X, Chen W, Dai C, Nie Y, Li Y, et al. Simultaneous visual detection of multiple heavy metal ions by a high-throughput fluorescent probe. Mikrochim Acta. 2023;190(8):311. <https://doi.org/10.1007/s00604-023-05882-0>.
103. Yang D, Ma C, Chen G, Li L, Hu A, Huang A, et al. Investigation of the application and mechanism of Nitrogen and Phosphorus co-doped Carbon dots for Mercury Ion Detection. J Fluoresc. 2024;1-9. <https://doi.org/10.1007/s10895-024-03594-z>.
104. Chu C, Zou C, Qiu Y, Huo D, Deng Y, Wang X, et al. Synthesis of two nitrogen-doped carbon quantum dots to construct fluorescence probes for sensitive Hg^{2+} detection with dual signal output. Dalton Trans. 2023;52(23):7982-91. <https://doi.org/10.1039/D3DT00663H>.
105. Aladesuyi OA, Oluwafemi OS. 'Off-On' determination of lead (Pb^{2+}) and fluoride (F^-) ion in fish and wastewater samples using N, S co-doped carbon quantum dots (N, S-CQDs). Appl Water Sci. 2024;14(7):153. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02191-6>.
106. Yu J, Kalimuthu R, Liu X, Zhang W, Tan Y, Yan K, et al. Unveiling the quenching mechanism of metal ions using solvent-driven N, S-doped carbon quantum dots. Opt Mater. 2025;162:116948. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2025.116948>.