

## زیست‌پالایی فلزات سنگین با کربن کوانتوم‌دات‌ها: ارزیابی امکان‌سنجی با در نظر گرفتن

### تأثیرات متضاد آن‌ها بر میکروبیوم خاک

آی‌سان شیخی<sup>۱</sup>، احمد گلچین<sup>۲\*</sup>، حسینعلی علیخانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان

۲- استاد، گروه علوم خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه زنجان agolchin2011@yahoo.com

۳- استاد، گروه علوم خاک، دانشگاه تهران

#### چکیده

آلودگی خاک به فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر به شمار می‌رود، چرا که به دلیل پایداری، تجمع‌پذیری زیستی و سمیت بالا، سلامت اکوسیستم‌های خاکی و عملکردهای زیستی آن‌ها را به شدت تهدید می‌کنند. در این میان، نانومواد کربنی، به‌ویژه کربن کوانتوم‌دات (CQDs)، به‌عنوان جاذب‌های نانومقیاس نوین و کارآمد برای حذف مستقیم یون‌های فلزی در خاک‌های آلوده، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نانوذرات با برخورداری از سطح ویژه بالا، قابلیت اصلاح سطح، پایداری شیمیایی و زیست‌سازگاری، ضمن افزایش توان جذب فلزات سنگین، باعث بهبود ویژگی‌های شیمیایی خاک و تحریک رشد ریزجانداران مفید می‌گردند. نقش اصلی CQDs در کاهش تحرک و دسترسی زیستی فلزات سنگین، از طریق مکانیزم‌های جذب سطحی و کمپلکس شدن، سبب ارتقاء کارایی زیست‌پالایی می‌شود. با این حال، علی‌رغم مزایای ذکرشده، کاربرد این نانوذرات نباید بدون در نظر گرفتن پیامدهای بالقوه آن‌ها بر سلامت بلندمدت خاک و میکروبیوم آن صورت گیرد. این نانوذرات از طریق جذب، انتقال و برهم‌کنش با جوامع میکروبی می‌توانند فرآیندهای زیستی مانند چرخه کربن و نیتروژن را دگرگون ساخته و بر حاصلخیزی و بهره‌وری خاک تأثیرگذار باشند. بنابراین، شناسایی و درک سازوکارهای اثرگذاری نانومواد بر ساختار و عملکرد میکروبی خاک، برای ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی و مدیریت خطرات ناشی از کاربردهای نانوفناوری در زیست‌پالایی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است.

**واژگان کلیدی:** نانوزیست‌پالایی، کربن‌دات، فلزات سنگین، جامعه میکروبی خاک

#### آلودگی فلزات سنگین و روش‌های اصلاح

خاک به عنوان نقطه شروع زنجیره غذایی محل تجمع تمامی عناصر غذایی ضروری برای موجودات زنده محسوب می‌شود. در میان عوامل آلاینده مختلفی که سلامت خاک را تهدید می‌کنند، آلودگی با فلزات سنگین از بحرانی‌ترین نوع آلودگی‌هاست، زیرا فلزات سنگین برخلاف ترکیبات آلی، به‌ندرت زیست‌تخریب‌پذیر بوده و از این‌رو، در محیط‌زیست تجمع می‌یابند (Feng et al., 2022). این تجمع نه‌تنها خواص فیزیکی و شیمیایی خاک را دچار اختلال می‌سازد بلکه تنوع، فراوانی و فعالیت جامعه میکروبی خاک را نیز کاهش می‌دهد (Li et al., 2024).

برای کاهش اثرات این آلودگی، تکنیک‌های مختلف اصلاح، از جمله فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی، الکتریکی و حرارتی، برای استخراج یا حذف آلاینده‌ها از خاک‌ها در دسترس هستند (Thakare et al., 2021). درحالی‌که روش‌های فیزیکی و شیمیایی عملکرد سریعی داشته و نتایج بهتری را ارائه می‌دهند، هزینه بالای آن‌ها و خطر آلودگی ثانویه به‌واسطه تزریق ترکیبات شیمیایی از جمله چالش‌های جدی این روش‌هاست (Xu et al., 2022). در مقابل، روش‌های زیستی از جمله زیست‌پالایی با نانومواد سازگار با محیط‌زیست، رویکردهایی کم‌هزینه‌تر و پایدارتر ارائه داده‌اند که توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده‌اند.

#### استفاده از نانوتکنولوژی در اصلاح آلودگی

فناوری نانو طی دهه‌های اخیر تحولی بنیادین در حوزه‌های زیست‌محیطی ایجاد کرده و استفاده از نانومواد در حذف یون‌های فلزی سمی از آب و خاک به‌طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان، نانومواد کربنی از جمله CQDs به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی نظیر سطح ویژه بالا، تخلخل قابل توجه، پایداری شیمیایی و مقاومت حرارتی، به‌عنوان جاذب‌های مؤثر فلزات سنگین در اصلاح آلودگی خاک شناخته شده‌اند (Dutta et al., 2022). این ویژگی جذب خاص به دلیل گروه‌های عاملی  $\text{COOH}$ - و  $\text{OH}$ - است که در جذب آلاینده بر روی سطح آن نقش دارند (Alazaiza et al., 2021). قابلیت جذب بالای CQDs، به وجود گروه‌های فعال سطحی مانند  $\text{COOH}$ - و  $\text{OH}$ - نسبت داده می‌شود که امکان برهم‌کنش و کمپلکس شدن مستقیم با یون‌های فلزی را فراهم می‌کنند. این نانوذرات ضمن آن‌که فلزات سمی را از فاز خاک به سطح خود منتقل و تثبیت می‌کنند، با حداقل ایجاد آلودگی ثانویه، سازگاری بالایی با محیط‌زیست نشان داده‌اند (Chen et al., 2021).

### کربن کوانتوم‌دات

کربن کوانتوم‌دات (CQDs یا C-dots) دسته‌ای از نانومواد کربنی هستند که معمولاً اندازه‌ای کمتر از ۱۰ نانومتر دارند. این نانومواد از اتم‌های کربن، هیدروژن و اکسیژن تشکیل شده‌اند که به صورت کروی شبه‌بلوری (quasi-spherical) با یک هسته کربنی و گروه‌های عاملی سطحی آرایش یافته‌اند. جذب نانوذرات توسط ذرات خاک یک پدیده پیچیده است که پیامدهای بسیار مهمی در زمینه‌های علوم زیست‌محیطی، کشاورزی و احتمالاً سلامت انسان دارد. باید توجه داشت که فاصله قابل توجهی میان سیاست‌های زیست‌محیطی در بخش کشاورزی و دستاوردهای علمی مرتبط با نانوذرات وجود دارد؛ زیرا CQDs تاکنون در چارچوب‌های مقرراتی موجود از جمله حدود مجاز تماس (PEL) گنجانده نشده‌اند و هیچ مرجع رسمی برای تعیین آستانه‌های ایمنی یا محدودیت‌های کاربرد آن‌ها تعریف نشده است. این فقدان، خلأ چشمگیر در نظام تنظیم‌گری میان رشته‌ای ایجاد کرده است (Liu et al., 2022).

### تأثیر کربن کوانتوم‌دات بر میکروبیوم خاک

نانوذراتی همچون کربن کوانتوم‌دات‌ها می‌توانند در خاک با میکروب‌های خاک تعامل داشته باشند و باعث تغییر فیزیولوژی و متابولیسم آن‌ها شوند. میکروارگانیسم‌ها نانومواد را بر اساس مکانیسم‌های انتشار غیرفعال، انتقال فعال، اندوسیتوز و چسبندگی نانوذرات به سطوح سلولی جذب می‌کنند. نوع مکانیسمی که اتفاق می‌افتد به خواص فیزیکی شیمیایی نانومواد و سلول‌های میکروبی بستگی دارد (Kah et al., 2013). از طرفی باید گفت که تغییرات در ساختارهای فیزیکی و شیمی سطح، میزان مصرف، زمان استفاده، اندازه و واکنش‌پذیری نانومواد کربنی احتمالاً در اثرات متفاوت آن‌ها بر فراوانی، تنوع و ترکیب جامعه میکروبی خاک تأثیرگذار است (Hao et al., 2018).

### اثرات متفاوت نانوذرات بر میکروبیوم خاک

تحقیقات درباره تأثیر نانو مواد کربنی بر میکروب‌های خاک نتایج متناقضی را نشان داده است. تعدادی از مطالعات نشان داده‌اند که نانو مواد کربنی ممکن است برای محیط‌زیست مضر باشند و تنوع و فعالیت میکروبی را کاهش دهند. اما تحقیقات دیگری حاکی از آن است که اثرات نانومواد کربنی بر جامعه‌های میکروبی یا قابل توجه نیستند یا حتی مثبت هستند (J. Cheng et al., 2020). گزارش شده که نانومواد کربنی می‌توانند به روش‌های مختلف بر میکروارگانیسم‌های خاک تأثیرگذار باشند که شامل: (۱) تغییر در تنوع و فراوانی میکروبی، (۲) سمیت برای میکروب‌های خاک، (۳) تغییر در تعاملات گیاه-میکروب، (۴) باقی‌ماندگی در محیط‌زیست، و (۵) امکان تجمع زیستی می‌باشند (Khan et al., 2021).

در مورد بررسی اثرات مثبت استفاده از کربن کوانتوم‌دات بر خصوصیات زیستی خاک Yin و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کرده‌اند که استفاده از CQDs دوپ‌شده با سلنیوم موجب افزایش تنوع و فراوانی نسبی برخی جوامع باکتریایی سودمند از

جمله شاخه *Actinobacteria* شده است که نقش مهمی در ارتقاء رشد گیاه ایفا می‌کنند (Yin et al., 2024). مطالعه‌های دیگر توسط Yang و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که کاربرد CQDs موجب افزایش قابل توجه جمعیت میکروبی گونه‌هایی مانند *Nitrospira* (۱۲۶/۱۲)، *Conocybe* (۱۲۲/۱۶) و *Sphingomonas* (۲۳۳/۱۳) و *Pseudomonas* (۳۴۴/۱۳) شده است (Yang et al., 2022). گزارش شده که کاربرد محلول‌پاشی کربن‌کوانتوم‌دات سنتز شده به روش هیدروترمال با استفاده از اسید سیتریک و اتیلن‌دی‌آمین به‌عنوان منابع کربن، باعث افزایش ترشحات ریشه‌ای از جمله اسید سوکسینیک و اسید پیروویک (افزایش ۱۰ برابری) و بتائین (افزایش ۱۱/۸ برابری) شد. این افزایش ترشحات ریشه‌ای رشد میکروبی در ریزوسفر گیاه را تحریک کرد و در نتیجه، میزان فسفر قابل دسترس خاک را به میزان ۱۶/۸ درصد و نیتروژن را به میزان ۳۳/۵ درصد افزایش داد (Ji et al., 2023). در مطالعه‌های دیگر، صادقی و همکاران (2023) گزارش دادند که CQDs تولید شده از گزوپلی‌ساکاریدهای قارچی، میزان کربن آلی محلول را در خاک‌های آلوده به کادمیم تا ۳۹/۹٪ و در خاک‌های غیر آلوده تا ۷۷/۹٪ افزایش داد. علاوه بر این، زیست‌توده میکروبی در خاک‌های تیمار شده با CQDs تا ۵۴/۹٪ افزایش یافت که نشان‌دهنده توانایی CQDs در تحریک چرخه کربن در خاک است (Sadeghi et al., 2023).

علاوه بر تأثیرات مثبت استفاده از این ترکیبات نانو بر جامعه میکروبی خاک، بروز اثرات منفی در پی استفاده از آن‌ها نیز گزارش شده است. در این زمینه گزارش شده که میزان سمیت CQDs به عوامل مختلفی از جمله روش سنتز، اندازه ذره، بار سطحی، میزان مصرفی و شرایط تماس بستگی دارد (Truskewycz et al., 2022). به عنوان مثال گزارش شده که در روش‌های هیدروترمال سنتز CQDs، اغلب ترکیبات جانبی سمی مانند آلدهیدها، کتون‌ها و اسیدهای کربوکسیلیک تولید می‌شوند که در نتیجه تجزیه ناقص مواد پیش‌ساز آلی به وجود می‌آیند. این ترکیبات می‌توانند یا به تولید گونه‌های فعال اکسیژن (ROS) منجر شوند یا خود به‌عنوان آلاینده‌های زیست‌محیطی عمل کنند (Peralta-Videa et al., 2020). گروه‌های عاملی که به‌صورت کووالانسی به سطح CQDs متصل می‌شوند، معمولاً از واکنش‌دهنده‌های استفاده شده در فرآیند سنتز ناشی شده و نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان سمیت نهایی آن‌ها دارند. CQDs حاصل از منابع زیستی یا مسیرهای سنتز سبز، به دلیل فقدان مواد شیمیایی مضر، از سمیت کمتری برخوردارند. در مقابل، نانوذرات تولیدشده به روش‌های شیمیایی اغلب حاوی گروه‌های عاملی سمی هستند که می‌توانند اثرات زیست‌محیطی نامطلوب‌تری داشته باشند. همچنین، ذرات کوچک با بار مثبت سطحی، تمایل بیشتری برای جذب توسط سلول‌ها دارند و این امر ممکن است موجب آسیب به غشای سلولی شوند (Leal et al., 2023). با این حال، Leal و همکاران (۲۰۲۳) گزارش کردند که بسیاری از CQDs می‌توانند به‌راحتی توسط بدن موجودات زنده تجزیه شده و از بدن دفع شوند، که احتمال بروز اثرات بلندمدت را کاهش می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

بررسی تأثیرات نانومواد کربنی بر تنوع میکروبی، ساختار جوامع زیستی، فعالیت‌های آنزیمی و فرآیندهای چرخه عناصر غذایی، توانمندی این نانومواد در تغییر فرآیندهای بنیادی خاک و تقویت تعاملات پیچیده بین گیاه و میکروبی را به‌وضوح نشان می‌دهد. با این وجود، سرنوشت زیست‌محیطی، مسیر انتقال و پیامدهای بالقوه این نانومواد در اکوسیستم‌های خاکی، نگرانی‌های قابل توجهی را ایجاد می‌کند که بر ضرورت اتخاذ تصمیمات آگاهانه و تدوین استراتژی‌های مدیریت ریسک مبتنی بر شواهد علمی تأکید دارد. تحقق استفاده پایدار و ایمن از نانوکربن‌ها در محیط‌های خاکی، نیازمند تحقیقات عمیق‌تر برای درک تأثیرات بلندمدت و توسعه روش‌های کاهش‌یافته است که ضمن حفظ سلامت محیط‌زیست، کارایی و مزایای زیست‌پالایی این نانومواد را به حداکثر برسانند. همچنین باید به این نکته اشاره کرد که فقدان حدود تماس قانونی مشخص و نبود داده‌های میدانی بلندمدت، به‌ویژه در محیط‌های کشاورزی که امکان کاربرد مستقیم این نانومواد وجود دارد، ضرورت انجام مطالعات جامع در زمینه ارزیابی اثرات کاربرد طولانی مدت، پتانسیل تجمع زیستی و مخاطرات اکولوژیکی استفاده از این ترکیبات را بیش از پیش آشکار می‌سازد.

## فهرست منابع

- Ahmed, S. F., Kumar, P. S., Rozbu, M. R., Chowdhury, A. T., Nuzhat, S., Rafa, N., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., & Mofijur, M. (2022). Heavy metal toxicity, sources, and remediation techniques for contaminated water and soil. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102114.
- Alazaiza, M. Y. D., Albahnasawi, A., Ali, G. A. M., Bashir, M. J. K., Copt, 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.
- Aparicio, J. D., Raimondo, E. E., Saez, J. M., Costa-Gutierrez, S. B., Alvarez, A., Benimeli, C. S., & Polti, M. A. (2022). The current approach to soil remediation: A review of physicochemical and biological technologies, and the potential of their strategic combination. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107141.
- Arshad, I., Noor, A., Rashid, H., Hussan, M. U., Waqas, M., Fatima, N., Anwer, A., Ijaz, V., Qayyum, A., & Arshad, F. (2022). A comprehensive review on role of nanotechnology in the soil pollutants remediation. *Agricultural Sciences Journal*, 4(1), 17–38.
- Bhaduri, D., Sihi, D., Bhowmik, A., Verma, B. C., Munda, S., & Dari, B. (2022). A review on effective soil health bio-indicators for ecosystem restoration and sustainability. *Frontiers in Microbiology*, 13, 938481.
- Chen, X., Wang, J., Hayat, K., Zhang, D., & Zhou, P. (2021). Small structures with big impact: Multi-walled carbon nanotubes enhanced remediation efficiency in hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. under cadmium and arsenic stress. *Chemosphere*, 276, 130130.
- Cheng, J., Sun, Z., Li, X., & Yu, Y. (2020). Effects of modified nanoscale carbon black on plant growth, root cellular morphogenesis, and microbial community in cadmium-contaminated soil. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(15), 18423–18433.
- Cheng, M., Fang, Y., Li, H., & Yang, Z. (2022). Review of recently used adsorbents for antimony removal from contaminated water. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(18), 26021–26044.
- Das, S., Chakraborty, J., Chatterjee, S., & Kumar, H. (2018). Prospects of biosynthesized nanomaterials for the remediation of organic and inorganic environmental contaminants. *Environmental Science: Nano*, 5(12), 2784–2808.
- Del Prado-Audelo, M. L., García Kerdan, I., Escutia-Guadarrama, L., Reyna-González, J. M., Magaña, J. J., & Leyva-Gómez, G. (2021). Nanoremediation: nanomaterials and nanotechnologies for environmental cleanup. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 793765. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.793765>
- 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.
- Feng, G., Yong, J., Liu, Q., Chen, H., & Mao, P. (2022). Response of soil microbial communities to natural radionuclides along specific-activity gradients. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 246, 114156.
- Hao, Y., Ma, C., Zhang, Z., Song, Y., Cao, W., Guo, J., Zhou, G., Rui, Y., Liu, L., & Xing, B. (2018). Carbon nanomaterials alter plant physiology and soil bacterial community composition in a rice-soil-bacterial ecosystem. *Environmental Pollution*, 232, 123–136.
- Inobeme, A. (2021). Effect of heavy metals on activities of soil microorganism. In *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment: Volume 3* (pp. 115–142). Springer.
- Ji, Y., Yue, L., Cao, X., Chen, F., Li, J., Zhang, J., Wang, C., Wang, Z., & Xing, B. (2023). Carbon dots promoted soybean photosynthesis and amino acid biosynthesis under drought stress: Reactive oxygen species scavenging and nitrogen metabolism. *Science of the Total Environment*, 856, 159125.
- Kah, M., Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2013). Nanopesticides: state of knowledge, environmental fate, and exposure modeling. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(16), 1823–1867.
- Khan, S. T., Adil, S. F., Shaik, M. R., Alkathlan, H. Z., Khan, M., & Khan, M. (2021). Engineered nanomaterials in soil: their impact on soil microbiome and plant health. *Plants*, 11(1), 109.
- Lai, H., Ding, X., Cui, M., Zheng, J., Chen, Z., Pei, J., & Zhang, J. (2023). Mechanisms and influencing factors

- of biomineralization based heavy metal remediation: a review. *Biogeotechnics*, 1(3), 100039.
- Leal, M. F. C., Catarino, R. I. L., Pimenta, A. M., & Souto, M. R. S. (2023). The influence of the biometals Cu, Fe, and Zn and the toxic metals Cd and Pb on human health and disease. *Trace Elements and Electrolytes*, 40(1), 1.
- Li, W., Zhang, S., Gao, F., Chen, Z., Jiang, J., & Sun, G.-X. (2024). Spatial distribution, sources apportionment and risk assessment of heavy metals in the Changchun black soil area, China. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 13, 100402.
- Liu, Q., Ding, X., Pang, Y., Cao, Y., Lei, J., Wu, J., & Zhang, T. (2022). New insights into the safety assessment of quantum dots: potential release pathways, environmental transformations, and health risks. *Environmental Science: Nano*, 9(9), 3277–3311.
- Peralta-Videa, J., Sreenivasan, S. T., & Narayan, M. (2020). Influence of carbon quantum dots on the biome. *Processes*, 8(4), 445.
- Prajapati, D. H., Ausma, T., De Boer, J., Hawkesford, M. J., & De Kok, L. J. (2020). Nickel toxicity in Brassica rapa seedlings-Impact on sulfur metabolism and mineral nutrient content. *Journal Fur Kulturpflanzen-Journal of Cultivated Plants*, 72(9 S), 473–478.
- Sadeghi, J., Lakzian, A., Halajnia, A., & Alikhani, M. (2023). Effects of fungal carbon dots application on growth characteristics and cadmium uptake in maize. *Plant Physiology and Biochemistry*, 204, 108102.
- Sathish, T., Ahalya, N., Thirunavukkarasu, M., Senthil, T. S., Hussain, Z., Siddiqui, M. I. H., Panchal, H., & Sadasivuni, K. K. (2024). A comprehensive review on the novel approaches using nanomaterials for the remediation of soil and water pollution. *Alexandria Engineering Journal*, 86, 373–385.
- Shahi, M. P., Kumari, P., Mahobiya, D., & Shahi, S. K. (2021). Nano-bioremediation of environmental contaminants: applications, challenges, and future prospects. *Bioremediation for Environmental Sustainability*, 83–98.
- Singh, J., Vishwakarma, K., Ramawat, N., Rai, P., Singh, V. K., Mishra, R. K., Kumar, V., Tripathi, D. K., & Sharma, S. (2019). Nanomaterials and microbes' interactions: A contemporary overview. *3 Biotech*, 9(3), 68.
- 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.
- Truskewycz, A., Yin, H., Halberg, N., Lai, D. T. H., Ball, A. S., Truong, V. K., Rybicka, A. M., & Cole, I. (2022). Carbon dot therapeutic platforms: administration, distribution, metabolism, excretion, toxicity, and therapeutic potential. *Small*, 18(16), 2106342.
- Wang, L., Hu, C., & Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, 1227–1249.
- 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.
- Yamini, V., Shanmugam, V., Rameshpathy, M., Venkatraman, G., Ramanathan, G., Garalleh, H. A. L., Hashmi, A., Brindhadevi, K., & Rajeswari, V. D. (2023). Environmental effects and interaction of nanoparticles on beneficial soil and aquatic microorganisms. *Environmental Research*, 236, 116776.
- Yang, H., Wang, C., Chen, F., Yue, L., Cao, X., Li, J., Zhao, X., Wu, F., Wang, Z., & Xing, B. (2022). Foliar carbon dot amendment modulates carbohydrate metabolism, rhizospheric properties and drought tolerance in maize seedling. *Science of The Total Environment*, 809, 151105. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151105>
- Yin, K., Bao, Q., Li, J., Wang, M., Wang, F., Sun, B., Gong, Y., & Lian, F. (2024). Molecular mechanisms of growth promotion and selenium enrichment in tomato plants by novel selenium-doped carbon quantum dots. *Chemosphere*, 364, 143175.
- Yu, M., & Li, J. (2023). Application and Prospect of Soil Microorganisms in Agro-ecological Environment. *Frontiers in Sustainable Development*, 3, 83–88. <https://doi.org/10.54691/fsd.v3i4.4767>

Zhang, J., Chen, Q., Tian, L., Shi, K., & Wu, M. (2023). Environmental-Friendly Remediation Technology and Its Application in Heavy Metal Polluted Soil. *Mater. Rep*, 37, 21030011–21030018.

Zheng, R., Feng, X., Zou, W., Wang, R., Yang, D., Wei, W., Li, S., & Chen, H. (2021). Converting loess into zeolite for heavy metal polluted soil remediation based on “soil for soil-remediation” strategy. *Journal of Hazardous Materials*, 412, 125199.

### **Evaluating the potential of nanoscale carbon quantum dot adsorbents in remediation of heavy metal pollution and its impact on the soil microbiome: Challenges and opportunities**

Aysan Sheikhi<sup>1</sup>, Ahmad Golchin<sup>2\*</sup>, Hossein Ali Alikhani<sup>3</sup>

1- PhD. student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University

2- Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Zanjan University

3- Professor, Department of Soil Science, Tehran University

#### **Abstract**

Soil contamination with heavy metals is one of the most critical environmental challenges of the modern era, as their persistence, bioaccumulation potential, and high toxicity severely threaten soil ecosystem health and biological functions. Among the various remediation approaches, carbon-based nanomaterials—particularly carbon quantum dots (CQDs)—have attracted considerable attention as novel and efficient nanoscale adsorbents for the direct removal of metal ions from contaminated soils. Owing to their high specific surface area, tunable surface chemistry, chemical stability, and biocompatibility, these nanoparticles not only enhance heavy metal adsorption capacity but also contribute to improving soil chemical properties and stimulating the growth of beneficial microorganisms. The primary role of CQDs in reducing the mobility and bioavailability of heavy metals, through mechanisms such as surface adsorption and complexation, significantly enhances the efficiency of bioremediation processes. However, despite these advantages, the application of such nanomaterials should not proceed without careful consideration of their potential long-term impacts on soil health and microbial communities. Through adsorption, translocation, and interactions with microbial populations, these nanoparticles can alter key biological processes such as carbon and nitrogen cycling, thereby affecting soil fertility and productivity. Consequently, identifying and understanding the mechanisms by which nanomaterials influence soil microbial structure and function is essential for evaluating environmental outcomes and managing the risks associated with the use of nanotechnology in bioremediation strategies.

**Keywords:** nanobioremediation, carbon quantum dots, heavy Metals, soil microbiome