



## نقش نیتريدکربن گرافيتی در کاهش سميت کروم (VI)

حميده شيرواني سرخسي

دانشجوی دکترای آگروتکنولوژی گرایش فیزیولوژی گیاهان زراعی، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

### چکیده

فلزات سنگین برای فرآیندهای بیولوژیکی مختلف ضروری هستند، اما بیش از حد مضر می‌شوند و با تولید رادیکال‌های آزاد و کاهش سطح آنتی‌اکسیدان، استرس اکسیداتیو را القا می‌کنند. بسیاری از آن‌ها به عنوان عوامل سرطان‌زای بالقوه شناخته شده‌اند. آلودگی فلز سنگین کروم (VI) به دلیل تداوم طولانی مدت آن در محیط‌زیست و ماهیت بسیار کشنده در موجودات زنده، به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی در جهان تبدیل شده است که از خطرناک‌ترین عوامل سرطان‌زاست. صنایع متالورژیک، دباغی، تولید رنگ، پالایشگاه‌های نفت از جمله فعالیت‌های مختلف انسانی هستند که کروم (VI) را به محیط‌زیست تخلیه می‌کنند. فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر نیتريدکربن گرافيتی ( $g-C_3N_4$ ) به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود برای کاهش  $Cr(VI)$  ایده‌آل هستند.  $g-C_3N_4$  با محیط‌زیست سازگار بوده و قابلیت جذب نور مرئی فراوان در زمین را دارد که می‌تواند با صرف هزینه کم، عملکرد گیاهان را افزایش داده و کروم (VI) کاهش دهد.

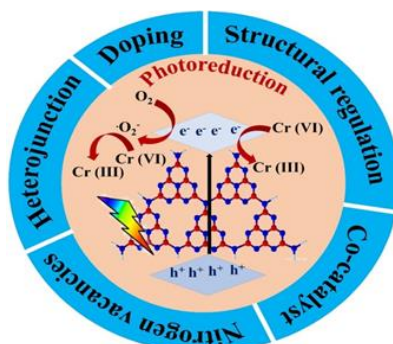
**واژگان کلیدی:** نیتريدکربن گرافيتی، فلزات سنگین، کروم



## مقدمه

گرافیت، شکل آلوتروپیک عنصر کربن است که از لایه‌های اتم‌های کربن به صورت شش ضلعی در یک سیستم حلقه‌ای متراکم مسطح (لایه‌های گرافن) تشکیل شده است (Marsh & Rodríguez-Reinoso, 2006). نیتريدکربن گرافیتی<sup>۱</sup> ( $g-C_3N_4$ ) به عنوان یک پلیمر مزدوج جذاب با فاصله باند مناسب ( $2.7\text{ eV}$ )، فوتوکاتالیست بدون فلز، پایداری حرارتی و شیمیایی عالی، ساختار الکترونیکی قابل تنظیم که می‌تواند به عنوان یک نامزد برجسته برای جفت شدن با مواد مختلف کاربردی عمل کند، با محیط‌زیست سازگار بوده و قابلیت جذب نور مرئی فراوان در زمین را دارد که می‌تواند با صرف هزینه کم، عملکرد را نیز افزایش دهد (Cheng et al, 2020).

امروزه استفاده‌های مختلف از فلزات سنگین در صنعت، کشاورزی، پزشکی و فناوری، منجر به توزیع گسترده در طبیعت شده و نگرانی‌هایی را در مورد اثرات آن‌ها بر سلامت انسان و محیط‌زیست ایجاد کرده است (Mehrandish et al, 2019). آلودگی محیط‌زیست به فلزات سنگین به یکی از موارد حاد تبدیل شده و از مشکلات طولانی‌مدت زیست‌محیطی به شمار می‌رود که تحقیقات فشرده متمرکزی، در سراسر جهان بر روی آن در حال انجام است (Janyasuthiwong et al, 2017). Chen, (2012). برای حفاظت از محیط زیست، حذف موثر محیط طبیعی از سمیت آلاینده‌ها، برای انسان و موجودات زنده، حیاتی است (Chen et al, 2020). در میان آلودگی‌های خطرناک فلزات سنگین در خاک کشاورزی، آب و هوا، کروم شش ظرفیتی (VI) خطرناک‌ترین عامل سرطان‌زایی است. صنایع متالورژیک، دباغی، تولید رنگ، پالایشگاه‌های نفت از جمله فعالیت‌های مختلف انسانی هستند که کروم (VI) را به محیط‌زیست تخلیه می‌کنند (ATSDR, 2021) (Azeez et al, 2021). فوتوکاتالیست‌های مبتنی بر  $g-C_3N_4$  به دلیل ویژگی‌های ذاتی خود برای کاهش  $Cr(VI)$  ایده‌آل هستند (شکل ۱) (Hasija et al, 2021b).



شکل ۱: (Hasija et al, 2021b)

مکانیسم کاهش فوتوکاتالیستی کروم (VI) برای توسعه فوتوکاتالیست‌های کارآمد که می‌توانند ظرفیت یون‌های فلز کروم را تنظیم کنند، حیاتی است و شامل سه مرحله تکمیلی و ضروری فوتوکاتالیز می‌باشد:

۱. روشنایی خورشیدی فوتوکاتالیست به عنوان واسطه تحریک و جداسازی بار

۲. انتشار توده‌های الکترون‌ها روی سطوح واکنش

۳. واکنش‌های ردوکس کارآمد (Kumar et al., 2020) (Hasija et al., 2021a)

روش‌های رایج برای کاهش کروم (VI) شامل احیای الکتروشیمیایی، احیای شیمیایی و احیای فوتوکاتالیستی است که احیای فوتوکاتالیستی به دلیل کارایی بالا و هزینه کم، توجه بسیاری را به خود جلب کرده است (Yao et al, 2017).

طی مطالعه‌ای، ترکیبات بازی  $g-C_3N_4$  (cOH-CN) و اسیدی  $g-C_3N_4$  (cH-CN) با موفقیت سنتز شدند و فعالیت‌های فوتوکاتالیستی آن‌ها برای کاهش کروم (VI) تحت تابش نور مرئی مورد آزمایش قرار گرفت. کاهش کروم (VI) عمدتاً توسط

<sup>1</sup> Graphitic Carbon Nitride

الکترون‌های آزاد در سیستم فوتوکاتالیستی مواد اصلاح شده صورت گرفت و کروم (VI) تقریباً به طور کامل به کروم (III) تبدیل شد (Sun et al, 2022). طی تحقیقی،  $g-C_3N_4$  توام با Br باعث کاهش فتوکاتالیستی قابل توجهی از کروم (VI) شده که دو برابر افزایش نسبت به  $g-C_3N_4$  با پایداری بالا در طول عملیات فوتوکاتالیستی طولانی در مقایسه با  $g-C_3N_4$  بدون تابش نور مرئی، نشان داد (Wang et al, 2020a).

نانوکامپوزیت‌های  $g-C_3N_4/Fe_3O_4$  با خاصیت فلورسانس و خواص مغناطیسی، برای جداسازی کروم (VI) در آب، طراحی و آماده شدند. طی این سنتز، نانوکامپوزیت‌های  $g-C_3N_4/Fe_3O_4$  به عنوان یک جاذب جدید، قدرت حذف کروم (VI) را داشتند. علاوه بر این، نانوکامپوزیت‌ها، توانستند خواص سوپراپارامغناطیسی از خود نشان دهند که به راحتی از فاز مایع از طریق یک میدان مغناطیسی خارجی جدا شدند (Duan et al, 2019).

### فلزات سنگین

فلزات سنگین به فلزات و متالوئیدهای مرتبط با آلودگی محیطی، سمیت و اثرات نامطلوب بر موجودات زنده اطلاق می‌شود (Ali & Ezzat, 2018). فلزات سنگین برای فرآیندهای بیولوژیکی مختلف ضروری هستند، اما بیش از حد مضر می‌شوند. با تولید رادیکال‌های آزاد و کاهش سطح آنتی‌اکسیدان، استرس اکسیداتیو را القا می‌کنند. تأیید پروتئین و DNA را تغییر داده و عملکرد آن‌ها را نیز مهار می‌کنند (Kim et al, 2019). یون‌های فلزی ممکن است با اجزای سلولی مانند DNA و پروتئین‌های هسته‌ای تعامل داشته باشند که منجر به آپوپتوز و سرطان‌زایی ناشی از آسیب DNA و تغییرات ساختاری می‌شوند (Mehrandish et al, 2019). بسیاری از آن‌ها به عنوان عوامل سرطان‌زای بالقوه شناخته شده‌اند (Inamuddin et al, 2021) (Yadav et al, 2019).

### کروم

کروم عضوی از گروه ۶ از فلزات واسطه است. حالت‌های کروم (۰)، کروم (III) و کروم (VI) در ترکیبات کروم رایج‌ترین‌اند (ATSDR, 2021). کروم (III) به طور طبیعی در محیط وجود دارد و یک ماده مغذی ضروری است (Maret, 2019). در مقابل، کروم شش ظرفیتی (VI) یک محصول جانبی سمی در تولید صنعتی است (NIH, 2022) و سرطان‌زا است (Sharma et al, 2021) (et al, 2021). آلودگی کروم (VI) به دلیل تداوم طولانی مدت آن در محیط زیست و ماهیت بسیار کشنده در موجودات زنده به یکی از جدی‌ترین نگرانی‌های زیست‌محیطی در جهان تبدیل شده است (Sharma et al, 2022).

### نیتريدکربن گرافیتی

نیتريدکربن گرافیتی ( $g-C_3N_4$ ) یک خانواده از ترکیبات نیتريدکربن با فرمول کلی  $C_3N_4$  (معمولاً با مقادیر غیرصفر هیدروژن مطرح است) و دو زیرساخت اصلی، مبتنی بر واحدهای هپتازین و پلی (تریازین ایمید) است که بسته به شرایط واکنش، درجات مختلفی از تراکم، خواص و واکنش‌پذیری را نشان می‌دهد (Jiang et al, 2017) (Wikipedia, 2023).

شش سیستم اولیه نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر  $g-C_3N_4$  را می‌توان طبقه‌بندی و خلاصه کرد:

۱. ناهمگونی بدون فلز مبتنی بر  $g-C_3N_4$
۲. پیوند ناهمگون  $g-C_3N_4$  و اکسید تک‌فلزی (سولفید فلز)
۳. اکسید کامپوزیت  $g-C_3N_4$
۴. پیوند ناهمگون هالید  $g-C_3N_4$
۵. هتروساختارهای فلز  $g-C_3N_4$
۶. سیستم پیچیده مبتنی بر  $g-C_3N_4$  (Zhao et al, 2015)



### سنتر نیتريدکربن گرافیتی

۱۰ گرم اوره ( $\text{CN}_2\text{H}_4\text{O}$ ) در یک کوره لوله‌ای با سرعت ۵ درجه C در دقیقه تا ۵۵۰ درجه C تحت جریان نیتروژن به مدت ۴ ساعت نگه داشته شد. سپس نمونه خنک شد. آسیاب شد و کم تر از ۲ میلی‌لیتر به دست آمد که الک شد (Song et al, 2019) (Qi et al, 2018).

### کاربردهای نیتريدکربن گرافیتی

ترکیبی از آفتکش‌ها و فلزات سنگین در خاک برنج به عنوان یکی از منابع آلوده عمده کشاورزی، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Akter et al, 2022).  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  به عنوان عامل اصلاح خاک، پاسخ‌گوی نوری برای کنترل آفتکش‌ها و آلودگی ترکیبات فلزات سنگین در مزارع شالیزاری می‌تواند باشد (Qie et al, 2023). استفاده از  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  در برنج به میزان ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر گرم، به طور قابل توجهی طول ریشه، وزن تر و اندام هوایی را در مقایسه با شاهد و همچنین محتوای نیتروژن را افزایش داده است. علاوه بر این، جیره C/N را در شاخه‌های برنج و سمیت ناشی از Cd را نیز کاهش داده است (Hao et al, 2021). نهال‌های برنج با تیمار  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  به میزان ۲۵۰ mg.kg به طور قابل توجهی وزن تر اندام هوایی و ریشه را به ترتیب ۲۲.۴ و ۲۹.۹ درصد افزایش داد و محتوای مواد مغذی ضروری مانند K, S, Mg, Cu و Zn را در مقایسه با شاهد زیاد کرد و تجمع Cd و As را در بافت‌های برنج را کاهش داد (Hao et al, 2023).

ذرت (*Zea mays L*) مهم‌ترین محصول غلات در آفریقای جنوبی است. علی‌رغم اهمیت آن، غلات توسط چندین پاتوژن قارچی برگی تخریب می‌شوند که باعث کاهش کمیت و کیفیت ذرت در هنگام برداشت می‌شوند. در بررسی قارچ‌های مرتبط با بیماری‌های برگی ذرت در موللوان، آفریقای جنوبی، از  $\text{gC}_3\text{N}_4$  (مبتنی بر کربن غیرفلزی) با روش‌های استاندارد استفاده شد که در غلظت‌های بالاتر در برابر پاتوژن‌ها مؤثر بودند (Akanmu et al, 2023).

در دانشگاه Widener آمریکا، کاهش آهسته فوتوکاتالیستی کروم (VI) توسط نانوالیاف  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  تحت نور مرئی شکل گرفت (Saha et al, 2020). در دانشگاه Normal چین، کاهش فوتوکاتالیستی شبیه‌سازی شده با نور خورشید از کروم (VI) روی  $\text{gC}_3\text{N}_4$  اصلاح شده با هیدروکسیل صورت گرفت (Wang et al, 2020b). طی تحقیقی، یک نانوکامپوزیت جدید به نام FCN که با بارگذاری  $\text{FeS}$  (Mackinawite) روی  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  سنتر شد و برای حذف کروم (VI) در محلول‌های آبی استفاده شد که می‌تواند یک ماده بالقوه، برای حذف کروم (VI) از محلول‌های آبی باشد (Su et al, 2020).

آلودگی آب ناشی از کروم (VI) یک مشکل جدی است. طی تحقیقی، یک جاذب سبز و کم‌هزینه از نانوصفحات  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  ساخته شد. واحدهای تری-اس-تریازین و گروه‌های حاوی N سطح نانوصفحات  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ، مسئول فرآیند جذب بودند. حداکثر ظرفیت جذب کروم (VI) در نانوصفحات  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  ۶۸۴.۴۵۱  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  بود (Xiao et al, 2019). در مطالعه‌ای، کامپوزیت  $\text{polyaniline@g-C}_3\text{N}_4$  با آرژنین عامل‌دار شده طی یک واکنش پلیمریزاسیون طراحی شد. این کامپوزیت، به عنوان ماده جاذب، برای جذب یون‌های کروم (VI) از محلول استفاده شد. بالاترین میزان جذب، ۲۰۴.۰۴  $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$  در  $\text{pH} = 2$  بود که می‌توان گفت که دارای پتانسیل تصفیه فاضلاب با محتوای کروم (VI) است (Mahir et al, 2023).

نانومواد، نامزدهای امیدوارکننده‌ای برای کاهش تجمع فلزات سنگین در گیاهان هستند. در مطالعه‌ای،  $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ، به عنوان یک نانومواد پلیمری دُوْبعُدی، برای بهبود سمیت گیاهی Cd در سویا مورد استفاده قرار گرفت.  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  محتوای C, N و P را افزایش داده و پروبیوتیک‌های *Nitrososphaeria* و *Actinobacteria* را به ترتیب ۷۰٪ و ۲۲۶٪ غنی کرد؛ ضمناً بقای میکروبی و سازگاری را از طریق تقویت ژن‌های عملکردی تسهیل کرده و نهایتاً  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  در جوامع میکروبی ریزوسفر سویا کاهش پیدا کرد (Yan et al, 2023). نانومواد، برای کاهش سمیت Cd در گیاهان، پتانسیل خوبی نشان داده‌اند. طی تحقیقی، از نانوصفحات  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  NSs برای کاهش سمیت Cd در سویا استفاده شد.  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  NSs رشد گیاه را به طور قابل توجهی



بهبود بخشید و آسیب اکسیداتیو را در نهال سویای سمی شده با Cd از طریق کشت هیدروپونیک کاهش داد ( Xu et al, 2024).

### نتیجه گیری

با توجه به آسیب‌های فراوان ناشی از مسمومیت با فلزات سنگین روی اندام‌های مختلف بدن، بررسی و شناسایی روش‌های کاهش یا حذف مسمومیت با فلزات سنگین، بسیار حائز اهمیت می‌باشد؛ لذا باید برای این معضل تدریجی زیست‌محیطی، راه-کارهایی ارائه شود. نیتريدکربن گرافیتی ( $g-C_3N_4$ ) با محیط‌زیست سازگار بوده و قابلیت جذب نور مرئی فراوان در زمین را دارد که می‌تواند با صرف هزینه کم، عملکرد گیاهان را افزایش داده و میزان فلزات سنگین را که اثرات سمی دارند، کاهش دهد.



## منابع

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry), Centers for Disease Control and Prevention (CDC) (10<sup>th</sup> February 2021). Toxic Substances Portal: TSP Home: Substances list: "Chromium", CAS ID#: 7440-47-3.

<https://wwwn.cdc.gov/TSP/substances/ToxSubstance.aspx?toxid=17>

Akanmu, A.O., Ajiboye, T.O., Seleke, M., Mhlanga, S.D., Onwudiwe, D.C. and Babalola, O.O. (15<sup>th</sup> March 2023). "The Potency of Graphitic Carbon Nitride (gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) and Bismuth Sulphide Nanoparticles (Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) in the Management of Foliar Fungal Pathogens of Maize", MDPI, Applied Sciences Journal, Volume: 13, Issue: 6, 3731. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.3390/app13063731>

Akter, R., Mukhles, M.B., Rahman, M.M., Rana, M.R., Huda, N., Ferdous, J., Rahman, F., Rafi, M.H. and Biswas, S.K. (October 2022). "Effect of pesticides on nitrification activity and its interaction with chemical fertilizer and manure in long-term paddy soils", Elsevier, Science Direct: Chemosphere (Open Access), Volume: 304, 135379. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135379>

Ali, H. and Khan, E. (2<sup>nd</sup> Jan 2018). "What are heavy metals? Long-standing controversy over the scientific use of the term 'heavy metals' – proposal of a comprehensive definition", Taylor and Frances Online, Toxicological & Environmental Chemistry Journal, Volume: 100, Issue: 1, Pages: 6-19. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1080/02772248.2017.1413652>

Azeez, N.A., Dash, S.S., Gummadi, S.N. and Deepa, V.S. (March 2021). "Nano-remediation of toxic heavy metal contamination: Hexavalent chromium Cr (VI)", Elsevier, Science direct: Chemosphere Journal, Volume: 266, 129204. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129204>

Chen, J.P. (2012). "Decontamination of Heavy Metals: processes, mechanisms, and applications", 1<sup>st</sup> Edition, Boca Raton, CRC Press, ISBN: 9780429130939, Pages: 454. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1201/b12672>

Chen, Z., Zhang, S., Liu, Y., Alharbi, N.S., Rabah, S.O., Wang, S. and Wang, X. (20<sup>th</sup> August 2020). "Synthesis and fabrication of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based materials and their application in elimination of pollutants", Elsevier, Science Direct: Science of The Total Environment (Open Access), Volume: 731, 139054. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139054>

Duan, J., Zhao, L., Lv, W., Li, Y., Zhang, Y., Ai, S. and Zhu, L. (November 2019). "Facile synthesis of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanocomposites for fluorescent detection and removal of Cr(VI)", Elsevier, Science Direct: Micro chemical Journal (Open Access), Volume: 150, 104105. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104105>

ECHA (European Chemicals Agency), (2021), "Chromium trioxide widely used in plating and surface treatment", ECHA/NR/21/17.

<https://echa.europa.eu/-/chromium-trioxide-widely-used-in-plating-and-surface-treatment>

Hao, Y., Cai, Z., Ma, C., White, J.C., Cao, Y., Chang, Z., Xu, X., Han, L., Jia, W., Zhao, J. and Xing, B. (9<sup>th</sup> October 2023). "Root Exposure of Graphitic Carbon Nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) Modulates Metabolite Profile and Endophytic Bacterial Community to Alleviate Cadmium- and Arsenate-Induced Phytotoxicity to Rice (Oryza sativa L.)", ACS Nano Journal, 17, 20, 19724–19739. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1021/acsnano.3c03066>

Hao, Y., Lv, R., Ma, C., Adeel, M., Zhao, Z., Rao, Y. and Rui, Y. (7<sup>th</sup> January 2021). "Graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) alleviates cadmium-induced phytotoxicity to rice (Oryza sativa L.)", Springer link: Environmental Science and Pollution Research Journal, Volume: 28, Pages: 21276–21284. (Google Scholar)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-020-12027-w>

Hasija, V., Nguyen, V.H., Kumar, A., Raizada, P., Krishnan, V., Khan, A.A.P., Singh, P., Lichtfouse, E., Wang, C. and Huong, P.T. (5<sup>th</sup> July 2021a). "Advanced activation of persulfate by polymeric g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> based photocatalysts for environmental remediation: A review", Elsevier, Science Direct: Journal of Hazardous Materials, Volume: 413, 125324. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125324>

Hasija, V., Raizada, P., Singh, P., Verma, N., Khan, A.A.P., Singh, A., Selvasembian, R., Kim, S.Y., Hussain, C.M., Nguyen, V.H. and Le, Q.V. (August 2021b). "Progress on the photocatalytic reduction of hexavalent Cr (VI) using engineered graphitic carbon nitride", Elsevier, Science Direct: Process Safety and Environmental Protection Journal, Volume: 152, Pages: 663-678. (Google Scholar)





<https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.06.042>

Inamuddin, Ahamed, M.I., Lichtfouse, E. and Altalhi, T. Book: (2021). "Remediation of Heavy Metals", Publisher: Springer Nature, Edition: 1, ISBN: 978-3-030-80333-9, Pages: 454.

James, B.R. (7<sup>th</sup> June 2011). "Peer Reviewed: The challenge of remediating chromium-contaminated soil", Environmental Science and Technology Journal, 1996, 30, 6: 248A–251A. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1021/es962269h>

Janyasuthiwong, S., Rene, E.R., Esposito, G. and Lens, P.N.L. (25<sup>th</sup> July 2017). "Techniques for metal removal and recovery from waste stream", Springer Link: Sustainable heavy metal remediation (Book), Part of the Environmental Chemistry for a Sustainable World book series, ECSW, Volume: 8, Pages: 1–23. (Google Scholar)

[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58622-9\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-58622-9_1)

Jiang, L., Yuan, X., Pan, Y., Liang, J., Zeng, G., Wu, Z. and Wang, H. (15<sup>th</sup> November 2017). "Doping of graphitic carbon nitride for photocatalysis: A review", Elsevier, Science Direct: Applied CATALYSIS B: Environmental Journal (Open access), Volume: 217, Pages 388–406. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.06.003>

Kim, J.J., Kim, Y.S. and Kumar, V. (July 2019). "Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies", Elsevier, Science direct: Journal of trace elements in medicine and biology, Volume: 54, Pages: 226–231. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.003>

Kumar, A., Raizada, P., Singh, P., Saini, R.V., Saini, A.K. and Bandegharai, A.H. (1<sup>st</sup> July 2020). "Perspective and status of polymeric graphitic carbon nitride based Z-scheme photocatalytic systems for sustainable photocatalytic water purification", Elsevier, Science Direct: Chemical Engineering Journal, Volume: 391, 123496. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123496>

Mahir, F.Z., Zouggari, H., Imgharn, A., Hsini, A., Aarab, N., Laabd, M., Addi, A.A., Jazouli, H.E. and Albourine, A. (June 2023). "Facile elaboration of arginine-functionalized PANI@graphitic carbon nitride for efficient removal of hexavalent chromium", Elsevier, Science Direct: Diamond and Related Materials Journal, Volume: 136, 109963. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109963>

Maret, W. (2019). "Chromium Supplementation in Human Health, Metabolic Syndrome, and Diabetes", Metal Ions in Life Sciences J, Edited by: Carver, P.L. / Published by Gruyter, D. / From the Book: "Essential Metals in Medicine: Therapeutic Use and Toxicity of Metal Ions in the Clinic", Berlin, Germany, Chapter: 9, Volume: 19, pp. 231–251. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1515/9783110527872-008>

Marsh, H. and Rodríguez-Reinoso, F. (2006). "Chapter 9 - Production and Reference Material" From Activated Carbon (Book), Elsevier, Science Direct: Pages: 454–508. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/B978-008044463-5/50023-6>

Mehrandish, R., Rahimian, A. and Shahriary, A. (2019). "Heavy metals detoxification: A review of herbal compounds for chelation therapy in heavy metals toxicity", Scopus Preview, Journal of HerbMed Pharmacology, ISSN: 23455004, Volume: 8, Issue: 2, Pages: 69–77. (Google Scholar)

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2...>

National Institutes of Health (NIH) Office of Dietary Supplements, (2<sup>nd</sup> June 2022). "Chromium".

<https://ods.od.nih.gov/factsheets/Chromium-HealthProfessional/>

Qi, Y., Liang, Q., Lv, R., Shen, W., Kang, F. and Huang, Z.H. (16<sup>th</sup> May 2018). "Synthesis and photocatalytic activity of mesoporous g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> hybrid catalysts", The Royal Society Open Science (Open Access). Volume: 5, Issue: 5. (Google Scholar)

[CrossRef] [PubMed] <https://doi.org/10.1098/rsos.180187>

Qie, H., Ren, M., You, C., Cui, X., Tan, X., Ning, Y., Liu, M., Hou, D., Lin, A. and Cui, J. (15<sup>th</sup> January 2023). "High-efficiency control of pesticide and heavy metal combined pollution in paddy soil using biochar/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> photoresponsive soil remediation agent", Elsevier, Science Direct: Chemical Engineering Journal (Open Access), Volume: 452, Part: 4, 139579. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139579>

Saha, D., Hoinkis, T.J. and Bramer, S.E.V. (1<sup>st</sup> September 2020). "Electrospun, flexible and reusable nanofiber mat of graphitic carbon nitride: Photocatalytic reduction of hexavalent chromium", Elsevier, Science Direct: Journal of Colloid and Interface Science, Volume: 575, Pages: 433–442. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.04.090>



Sharma, N., Sodhi, K.K. Kumar, M. and Singh, D.K. (May 2021). "Heavy metal pollution: Insights into chromium eco-toxicity and recent advancement in its remediation", Elsevier, Science direct: Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management Journal, Volume: 15, 100388. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100388>

Sharma, P., Singh, S.P., Parakh S.K. and Tong, Y.W. (14<sup>th</sup> February 2022). "Health hazards of hexavalent chromium (Cr (VI)) and its microbial reduction", Taylor and Francis Online: Bioengineered Journal. Volume: 13, Issue: 3. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2037273>

Song, W., Ge, P., Ke, Q., Sun, Y., Chen, F., Wang, H., Shi, Y., Wu, X.L., Lin, H., Chen, J. and Shen, C. (April 2019). "Insight into the mechanisms for hexavalent chromium reduction and sulfoxazole degradation catalyzed by graphitic carbon nitride: the Yin and Yang in the photo-assisted processes". Elsevier, Science Direct: Chemosphere Journal (Open Access), Volume: 221, Pages: 166–174. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.01.045>

Su, J., Hao, H., Lv, X., Jin, X. and Yang, Q. (20<sup>th</sup> July 2020). "Properties and mechanism of hexavalent chromium removal by FeS@ graphite carbon nitride nanocomposites", Elsevier, Science Direct: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects Journal, Volume: 597, 124751. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124751>

Sun, H., Wang, L., Liu, Y., Cheng, Z., Zhao, Y., Guo, H., Qu, G., Wang, T. and Yin, X. (15<sup>th</sup> December 2022). "Photocatalytic reduction of Cr(VI) via surface modified g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> by acid-base regulation", Elsevier, Science Direct: Journal of Environmental Management (Open Access), Volume: 324, 116431. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116431>

Wang, M., Zeng, Y., Dong, G. and Wang, C. (October 2020a). "Br-doping of g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> towards enhanced photocatalytic performance in Cr (VI) reduction", Elsevier, Science Direct: Chinese Journal of Catalysis, Volume: 41, Issue: 10, Pages: 1498-1510. (Google Scholar)

[https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(19\)63435-2](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(19)63435-2)

Wang, X., Li, L., Meng, J., Xia, P., Yang, Y. and Gao, Y. (15<sup>th</sup> March 2020b). "Enhanced simulated sunlight photocatalytic reduction of an aqueous hexavalent chromium over hydroxyl-modified graphitic carbon nitride", Elsevier, Science Direct: Applied Surface Science Journal, Volume: 506, 144181. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144181>

Wikipedia, (2023), "Graphitic carbon nitride".

[https://en.wikipedia.org/wiki/Graphitic\\_carbon\\_nitride](https://en.wikipedia.org/wiki/Graphitic_carbon_nitride)

Xiao, G., Wang, Y., Xu, S., Li, P., Yang, C., Jin, Y., Sun, Q. and Su, H. (February 2019). "Superior adsorption performance of graphitic carbon nitride nanosheets for both cationic and anionic heavy metals from wastewater", Elsevier, Science Direct: Chinese Journal of Chemical Engineering, Volume: 27, Issue: 2, Pages: 305-313. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.09.028>

Xu, K., Guo, Y., Xing, C., Fu, R., Zou, B., Liu, R., Cai, L., Yan, J., Wu, X.L. and Cai, M. (May 2024). "Graphitic carbon nitride nanosheets mitigate cadmium toxicity in Glycine max L. by promoting cadmium retention in root and improving photosynthetic performance", Elsevier, Science Direct: Journal of Environmental Sciences (Open Access), Volume: 139, Pages: 543-555. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.08.027>

Yadav, M., Gupta, R. and Sharma, R.K. (2019). "Chapter 14 - Green and Sustainable Pathways for Wastewater Purification", Elsevier, Science direct: Advances in Water Purification Techniques, Meeting the Needs of Developed and Developing Countries (Book), Pages: 355-383. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814790-0.00014-4>

Yan, J., Wang, L., Xing, C., Ma, S., Xu, J., Shou, B., Lan, S., Wu, X. and Cai, M. (5<sup>th</sup> August 2023). "Graphitic carbon nitride alleviates cadmium toxicity to microbial communities in soybean rhizosphere", Springer Link: Environmental Science and Pollution Research Journal, 30, Pages: 94988–95001. (Google Scholar)

<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-29040-4>

Yao, G., Sun, Z. and Zheng, S. (February 2017). "Synthesis and enhanced visible-light photocatalytic activity of wollastonite/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composite", Elsevier, Science Direct: Materials Research Bulletin Journal (Open Access), Volume: 86, Pages: 186-193. (Google Scholar)

<https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2016.10.028>





Zhao, Z., Sun, Y. and Dong, F. (2015). “Graphitic carbon nitride based nanocomposites: a review”, Royal Society of Chemistry: Nanoscale Journal, 7, 15-37. (Google Scholar)

DOI: [10.1039/C4NR03008G](https://doi.org/10.1039/C4NR03008G)

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2014/nr/c4nr03008g>



## The Role of Graphite Carbon Nitride in Reducing the Toxicity of Chromium (VI)

Hamideh Shirvani Sarakhsi<sup>1</sup>

PhD Student of Physiology of Agricultural Plants, Department of Plant Production and Genetics,  
Faculty of Agriculture and Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

### Abstract

Heavy metals are essential for various biological processes; but they become harmful in excess and induce oxidative stress by producing free radicals and reducing antioxidant levels. Many of them are known as potential carcinogens. Chromium (VI) heavy metal pollution has become one of the most serious environmental concerns in the world due to its long-term persistence in the environment and its very lethal nature in living organisms, which is one of the most dangerous carcinogenic factors. Metallurgical industries, tanning, paint production, oil refineries are among the various human activities that discharge chromium (VI) into the environment. Photo-catalysts based on graphitic carbon nitride (g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) are ideal for the reduction of Cr (VI) due to their inherent properties. g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> is environmentally friendly and has the ability to absorb abundant visible light on earth. It can increase the yield of plants and reduce chromium (VI) by spending low cost.

**Keywords:** Graphitic Carbon Nitride, Heavy metals, Chromium

---

<sup>1</sup> Hamideh Shirvani Sarakhsi