19th Iranian Soil Science Congress
2-4 December, 2025

نوزدهمین کنگره علوم خاک ایران
۱۱ تا ۱۳ آذرماه ۱۴۰۴

مدیریت جامع‌نگر و هوشمند خاک و آب
Holistic and Smart Soil and Water Management
دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران
College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran

۰۴۲۵۰-۳۲۰۳۱

تاثیر اسید هیومیک و بیوچار در حذف آلاینده‌ها از خاک

نگار چترنور[۱]، سمانه عبدالرحیمی[۲]، امیر فتوت [۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد، negar.chatrnour@gmail.com
۲- دانشجوی دکتری، گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استاد، گروه علوم خاک دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

آلودگی خاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر به شمار می‌رود که به‌طور مستقیم سلامت انسان، کیفیت منابع آب و تنوع زیستی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. استفاده از جاذب‌ها به‌عنوان روشی کارآمد، مقرون‌به‌صرفه و دوست‌دار محیط زیست، نقش مهمی در کاهش غلظت آلاینده‌های آلی و معدنی در خاک ایفا می‌کند. جاذب‌ها به دلیل داشتن ویژگی‌هایی نظیر سطح ویژه بالا، ظرفیت تبادل یونی مناسب و سازگاری با محیط‌زیست، قادرند فلزات سنگین، ترکیبات آلی پایدار و سایر آلاینده‌ها را از محیط خاک حذف یا غیرفعال کنند. در این میان، جاذب‌های طبیعی و اصلاح‌شده مانند خاک رس، زئولیت، نانوذرات، اسید هیومیک و بایوچار مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته‌اند. اسید هیومیک با ساختار پیچیده آلی خود، توانایی زیادی در تشکیل کمپلکس با فلزات سنگین و کاهش تحرک آن‌ها دارد. همچنین، بایوچار که از پیرولیز زیست‌توده‌های آلی تولید می‌شود، به دلیل ساختار متخلخل و گروه‌های عاملی فعال، به‌عنوان یک جاذب مؤثر در تثبیت آلاینده‌ها در خاک شناخته می‌شود. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از این جاذب‌ها می‌تواند راهکاری پایدار و کارآمد برای بهبود کیفیت خاک و کاهش خطرات ناشی از آلاینده‌ها فراهم آورد.

واژگان کلیدی: اسید هیومیک، بیوچار، حذف آلاینده‌ها، خاک، محیط زیست

مقدمه

پایداری بلندمدت کشاورزی و حفظ محیط‌زیست، به سلامت خاک‌ها بستگی دارد (Tahat et al., 2020). با این‌حال، روند شهرنشینی و رشد اقتصادی منجر به افزایش تولید زباله در سطح جهان شده است؛ مشکلی که انباشت زباله‌ها روی زمین و آلوده کردن خاک را به دنبال داشته و سلامت عمومی، محیط‌زیست و کشاورزی را تهدید می‌کند (Ukaogo et al., 2020). روش‌های مختلفی برای اصلاح خاک‌های آلوده وجود دارد که شامل: روش‌های فیزیکی، شیمیایی و ترکیبی می‌شود (Mai et al., 2025)، اما بسیاری از این روش‌ها با چالش‌هایی نظیر: هزینه‌های زیاد، تخریب خاک، از رده خارج شدن تجهیزات و ایجاد آلودگی‌های ثانویه همراه هستند. از سوی دیگر، اگرچه راهکارهایی مانند فناوری‌های تولید پاک از طریق بهینه‌سازی مصرف منابع و کاهش پسماند و آلاینده‌ها یا جایگزینی محصولات با استفاده از مواد یا کالاهایی که آسیب کمتری به محیط‌زیست می‌زنند، در کاهش آلودگی مؤثرند، اما به سرمایه‌گذاری کلان و همکاری گسترده صنایع نیاز دارند که همیشه امکان‌پذیر نیست (Wang et al., 2020). در پاسخ به این مشکلات پژوهشگران در سال‌های اخیر

به استفاده از ضایعات و روش‌های جذب برای تولید مواد اصلاح کننده آلی خاک، مانند: بیوچار[1]، هیدروچار[2]، کمپوست[3]، و مواد هیومیکی[4] روی آورده‌اند. این راهکارها، ضمن کم‌هزینه و نوآور بودن، سازگار با محیط‌زیست نیز هستند و به کاهش ضایعات، افزایش پایداری زیست‌محیطی و کشاورزی، و توسعه اقتصاد زیستی کمک می‌کنند (Elkhalifa et al., 2019; Ghodake et al., 2021; Nguyen et al., 2022; Timofeev et al., 2018). با توجه به اینکه آلودگی خاک یکی از مشکلات رایج محیط‌زیستی در سطح جهان است و آلاینده‌های معدنی و آلی می‌توانند مخاطرات جدی ایجاد کنند، استفاده از روش‌های پایدار برای پاکسازی خاک ضروری به نظر می‌رسد.

اسید هیومیک

فرانتس کارل آخارد (Franz Carl Achard)، شیمیدان و دانشمند علوم طبیعی آلمانی، نخستین‌بار در سال ۱۷۸۶ اسیدهای هیومیک را کشف کرد (Kleber and Lehmann, 2019). اسید هیومیک نوعی اسید آلی ماکرومولکولی ضعیف است که ساختار آن شامل ترکیبات شیمیایی متنوعی از جمله ترکیبات آروماتیک مانند هسته‌های بنزن، کینولین، کینون، پیرول، پیریدین و فوران می‌شود و همچنین پل‌های شیمیایی نظیر —O—، —NH—، =N—، —CH_2— و —C=C— را در بر می‌گیرد. گروه‌های عاملی رایج در این ترکیبات شامل کربوکسیل، فنولیک، آمینو، کینون، و متوکسیل هستند (Yang et al., 2021). این ماده عمدتاً از طریق تجزیه بقایای گیاهی و جانوری به وسیله‌ی میکروارگانیسم‌ها و همچنین مجموعه‌ای از تحولات ژئوشیمیایی و فیزیکی شکل می‌گیرد و در کشاورزی به منظور بهبود کیفیت محصولات زراعی و ساختار خاک کاربرد گسترده‌ای دارد (Arslan et al., 2016). اسیدهای هیومیک دارای بار منفی، وزن مولکولی بالا، و میزان قابل توجهی کربن و گروه‌های عاملی مانند: کربوکسیل (COOH) و هیدروکسیل (OH) هستند. این ترکیبات به‌دلیل واکنش‌پذیری زیاد با فلزات سنگین در محیط‌های خاکی و آبی و تنوع خواص فیزیکی اهمیت فراوانی دارند (Liu and Gonzalez, 2000).اسیدهای هیومیک در بهبود ساختار خاک، افزایش ظرفیت نگهداری آب، و افزایش دسترسی گیاهان به مواد مغذی نقش موثری ایفا کنند Goldan و همکاران (2023) گزارش کرده‌اند این ترکیبات با تثبیت مواد مضر در کاهش زیست‌فراهمی و سمیت آلاینده‌ها نقش دارند. همچنین اسیدهای هیومیک قادرند به فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها متصل شده و آن‌ها را غیرفعال کنند (Yu et al., 2018). علاوه بر این، توانایی مهار آنزیم‌های میکروبی را نیز دارند؛ که این ویژگی در حوزه‌هایی مانند تولید محصولات کشاورزی، تصفیه زیستی، و تهیه آب آشامیدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eyheraguibel, 2004). فرآیند جذب سطحی (Adsorption) نقش مهمی در کاهش غلظت فلزات سنگین محلول در محیط‌های طبیعی مانند خاک و آب دارد. در همین راستا، برهم‌کنش اسید هیومیک با جاذب‌های مختلف به‌عنوان رویکردی امیدبخش و پایدار برای اصلاح خاک و آب‌های آلوده مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است، چرا که این روش از مزایایی چون هزینه پایین، سازگاری زیست‌محیطی و کارایی بالا برخوردار است. جدول ۱ به بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه اختصاص یافته است.

جدول ۱-جاذب‌های مورد استفاده برای جذب اسیدهای هیومیک

نوع جاذب	نوع آلاینده	نتیجه	منابع
اسید هیومیک و کربن فعال	یون مس	غلظت بحرانی اسید هیومیک تعیین‌کننده تأثیر آن بر جذب مس است؛ زیر این غلظت، جذب کاهش و بالاتر از آن، جذب افزایش می‌یابد.	(Chen and Wu 2004)

[1] Biochar
[2] Hydrochar
[3] Compost
[4] Humic substances

اسید هیومیک و رس‌ها	شوری آب دریا	خاک رس مونتموریلونیت سنتز شده در pH بهینه، عملکرد بهتری در کاهش اسید هیومیک و رسانایی آب شور نسبت به انواع تجاری نشان می‌دهد.	(Zermane et al., 2005)
اسید هیومیک و بیوچار کنوکارپوس	یون‌های سرب، مس، روی وکادمیوم	بیوچار اصلاح‌شده با اسید هیومیک، به طور مؤثری قادر به حذف فلزات سنگین از آب آلوده است و می‌تواند گزینه مناسبی برای تصفیه فاضلاب باشد.	(Alhawas et al., 2023)
اسید هیومیک و کایتوسان (نوعی پلیمر طبیعی)	یون سرب	نتایج نشان می‌دهد که جذب چندگونه‌ای تحت تأثیر برهم‌کنش‌های جاذب، کمپلکس‌سازی سطحی و تعامل بین گونه‌ها قرار دارد.	(Yan and Bai 2005)
اسید هیومیک و بیوچار زمان‌گذری شده	فلزات سنگین	زمان‌گذری بیوچار با مواد هیومیکی باعث افزایش ظرفیت آلاینده‌ها و در نتیجه عملکرد گیاه می‌شود.	(Rahim et al., 2024)
اسید هیومیک و اکسیدهای فلزی	فسفات	مواد هیومیکی تأثیر محدودی بر جذب فسفات توسط اکسیدهای آلومینیوم و آهن دارند.	(Teermann and Jekel 1999)

بیوچار

در میان جاذب‌های مختلفی که در فرآیند جذب به‌کار می‌روند، بیوچار به دلیل ویژگی‌های برجسته جذب و مقرون‌به‌صرفه بودن، توجه جهانی بسیاری را به خود جلب کرده است (Kong et al., 2017). بیوچار ماده‌ای جامد و غنی از کربن است که از تجزیه حرارتی (فرآیند پیرولیز[5]) پسماندهای آلی در در دمای بین ۲۵۰ تا ۸۰۰ درجه سلسیوس و شرایط کم اکسیژن تولید می‌شود (Lehmann 2007; Verheijen et al., 2010). این ماده، به‌عنوان یک اصلاح‌کننده خاک سازگار با محیط‌زیست، اثربخشی بالایی در جذب و تثبیت آلاینده‌ها در فاضلاب و خاک‌های آلوده نشان داده است (Chauhan et al., 2023). بیوچار نقش مهمی در کاهش تنش‌های غیرزیستی خاک مانند شوری، سمیت فلزات سنگین و خشکی خاک و گیاهان ایفا می‌کند (Ahmad et al., 2023). ویژگی‌های جذبی برجسته بیوچار شامل: ساختار متخلخل، وجود گروه‌های عاملی متعدد روی سطح، سطح ویژه فراوان، ظرفیت تبادل کاتیونی زیاد و مقدار قابل‌توجهی کربن باقی‌مانده است که آن را به یکی از اصلاح‌کننده‌های مهم آلی خاک در تحقیقات کشاورزی و علوم زیست‌محیطی تبدیل کرده است (Huang et al., 2018). مطالعات پیشین و جدید نشان داده‌اند که بیوچار به‌عنوان ماده‌ای دوست‌دار محیط زیست، در کاهش سمیت ناشی از فلزات سنگین و سایر آلاینده‌های آلی مؤثر است (Rafique et al., 2020). این ماده به‌عنوان جایگزینی کم‌هزینه برای کربن فعال در تصفیه خاک و آب به‌کار گرفته شده، و توانایی حذف ترکیبات آلی فرّار، یون‌های فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، داروها، رنگ‌ها و هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای را دارا می‌باشد (El-Naggar et al., 2021; Chenxi Zhao et al., 2021). عوامل موثر بر ویژگی‌های بیوچار شامل: نرخ گرمایش، دمای پیرولیز، نوع زیست‌توده، و مدت زمان ماندن در کوره هستند که تحت تأثیر پارامترهایی مانند pH، میزان کربن آلی محلول و محتوای خاکستر موجود در بیوچار، فرایندهای اصلی تعامل بین فلزات سنگین و بیوچار شامل کاهش شیمیایی، جاذبه الکترواستاتیکی، تشکیل کمپلکس، رسوب‌دهی، و تبادل کاتیونی می‌باشند، در حالی‌که در تعامل بیوچار با آلاینده‌های آلی، سازوکارهای غالب شامل برهم‌کنش‌های آب‌گریز، برهم‌کنش π–π و پیوندهای هیدروژنی می‌باشند (Khalid et al., 2019).

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که بیوچار توانایی قابل‌توجهی در تصفیه فاضلاب دارد ، انواع مختلفی از بیوچار برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی مورد استفاده قرار می‌گیرد که در جدول ۲ بصورت خلاصه آورده شده است.

[5] Pyrolysis process

جدول ۲-انواع بیوچار مورد استفاده برای حذف آلاینده‌ها از محلول‌های آبی و خاک

نوع بیوچار	نوع آلاینده	نتیجه	منبع
بیوچار نی گندم	یون‌های کادمیوم و سرب	بیوچار با تغییر شکل‌های شیمیایی کادمیوم و سرب و جذب آن‌ها روی سطح و درون منافذ خود، نقش مؤثری در کاهش طولانی‌مدت تحرک و فراهمی زیستی فلزات سنگین در خاک ایفا می‌کند.	(Cui et al., 2021)
بیوچار دانه عناب	یون‌های روی و سرب	فرآیند جداسازی یون‌های فلزی با انتشار داخلی و خارجی کنترل می‌شودو دانه عناب می‌تواند به‌عنوان جاذبی مؤثر و قابل بازیافت تا ۵ چرخه برای تصفیه فاضلاب حاوی فلزات سنگین استفاده شود.	(Gayathr et al., 2021)
بیوچار چوب درخت داگلاس	یون‌های کروم، کادمیوم و سرب	بیوچار فعال‌شده با KOH ظرفیت جذب قابل‌توجهی برای کروم، سرب و کادمیوم در pHهای بهینه نشان داد و توانایی آن در حذف فلزات سنگین از فاضلاب نشان داد.	(Herath et al., 2020)
بیوچار لجن کارخانه خمیر کاغذ	یون‌های مس، نیکل، کادمیوم و سرب	نوع زیست‌توده و گاز پاک‌کننده در تولید بیوچار تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت جذب فلزات سنگین دارد، به‌طوری‌که بیوچارهای حاصل از لجن کارخانه کاغذ با گاز N_2 عملکرد بهتری در حذف فلزات به‌ویژه سرب نشان داد.	(Islam et al., 2021)
بیوچار چوب کاج	انواع مختلف آلاینده‌های معدنی و آلی	کامپوزیت‌های بیوچار–نانو اکسید فلزی با ترکیب ویژگی‌های مطلوب بیوچار و نانوذرات فلزی، جاذب‌های مؤثری برای حذف آلاینده‌ها هستند..	(Zhao et al., 2021)
بیوچار یونجه	رنگ آلی	جاذب بسیار مؤثری برای حذف رنگ‌های آلی از فاضلاب است و نقش گروه‌های نیتروژن‌دار سطحی در جذب مؤثر آن کلیدی می‌باشد.	(Cheng et al., 2021)
بیوچار پوست نارگیل	یون‌های کادمیوم و سرب	مکانیسم‌های غالب جذب در این جاذب اصلاح‌شده، تبادل یونی و رسوب معدنی هستند.	(Wu et al., 2021)
بیوچار چوب نرم	یون‌های مس، نیکل و سرب	بیوچارها راندمان حذف فلزات سنگین را به طور چشمگیری افزایش می‌دهند و می‌توانند به عنوان جاذب‌های مؤثر برای تصفیه فاضلاب به کار روند.	(Peter et al., 2021)

نتیجه‌گیری

آلاینده‌های متعددی از مسیرهای گوناگون وارد محیط‌زیست می‌شوند که در میان آن‌ها، فلزات سنگین و آلاینده‌های آلی، آسیب‌های جدی به خاک، منابع آبی و سلامت انسان وارد کرده‌اند و همین موضوع موجب جلب توجه گسترده پژوهشگران شده است. با توجه به چالش‌های روزافزون ناشی از آلودگی خاک و ناکارآمدی برخی روش‌های اصلاح متداول، بهره‌گیری از جاذب‌های طبیعی مانند اسیدهای هیومیک و بیوچار به‌عنوان رویکردهایی پایدار، اقتصادی و سازگار با محیط‌زیست اهمیت روزافزونی یافته است. اسیدهای هیومیک با ساختار شیمیایی پیچیده و قابلیت‌های متنوع در تثبیت آلاینده‌ها، و بیوچار با ویژگی‌های جذبی بالا و توانایی در کاهش تنش‌های غیرزیستی، می‌توانند نقشی مؤثر در پالایش خاک‌ها و فاضلاب‌های آلوده ایفا کنند. به‌کارگیری ترکیبی این دو ماده در چارچوب فناوری‌های نوین جذب، علاوه بر بهبود کیفیت خاک و ارتقای کشاورزی پایدار گامی مهم در جهت توسعه اقتصاد زیستی و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از ضایعات به شمار می‌آید.

فهرست منابع

Ahmad, Munir, Muhammad I. Rafique, Mutair A. Akanji, Mohammad I. Al-Wabel, Hamed A. Al-Swadi, and Abdullah S. F. Al-Farraj. 2023. “Silica Modified Biochar Mitigates the Adverse Effects of Salt and Drought Stress and Improves Safflower (Carthamus Tinctorius L.) Growth.” *Journal of Soils and Sediments* 23(1):172–92. doi: 10.1007/s11368-022-03323-8.

Alhawas, Mansour S., Muhammad Imran Rafique, Munir Ahmad, Mohammad I. Al-Wabel, Adel R. A. Usman, Hamed Ahmed Al-Swadi, and Abdullah S. Al-Farraj. 2023. “Ball Mill, Humic Acid, and Rock Phosphate-Modified Conocarpus Biochar for Efficient Removal of Heavy Metals from Contaminated Water.” *Sustainability (Switzerland)* 15(14). doi: 10.3390/su151411474.

Arslan, E., G. Agar, and M. Aydin. 2016. “Humic Acid as a Biostimulant in Improving Drought Tolerance in Wheat: The Expression Patterns of Drought-Related Genes.” *Plant Molecular Biology Reporter* 39(3):508–19. doi: 10.1007/s11105-020-01266-3.

Chauhan, Sahil, Tajamul Shafi, Brajesh Kumar Dubey, and Shamik Chowdhury. 2023. “Biochar-Mediated Removal of Pharmaceutical Compounds from Aqueous Matrices via Adsorption.” *Waste Disposal & Sustainable Energy* 5(1):37–62. doi: 10.1007/s42768-022-00118-y.

Chen, J. Paul, and Shunnian Wu. 2004. “Simultaneous Adsorption of Copper Ions and Humic Acid onto an Activated Carbon.” *Journal of Colloid and Interface Science* 280(2):334–42. doi: https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.08.029.

Cheng, Long, Yuanhui Ji, Xiaomin Liu, Liwen Mu, and Jiahua Zhu. 2021. “Sorption Mechanism of Organic Dyes on a Novel Self-Nitrogen-Doped Porous Graphite Biochar: Coupling DFT Calculations with Experiments.” *Chemical Engineering Science* 242:116739. doi: https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116739.

Cui, Liqiang, Lianqing Li, Rongjun Bian, Jim Ippolito, Jinlong Yan, and Guixiang Quan. 2021. “Physicochemical Disintegration of Biochar: A Potentially Important Process for Long-Term Cadmium and Lead Sorption.” *Biochar* 3:1–8. doi: 10.1007/s42773-021-00108-z.

El-Naggar, Ali, Naveed Qambrani, Ahmed Mosa, Nabeel Niazi, Balal Yousaf, Anket Sharma, Binoy Sarkar, Yanjiang Cai, and Scott Chang. 2021. “Nickel in Soil and Water: Sources, Biogeochemistry, and Remediation Using Biochar.” *Journal of Hazardous Materials*. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126421.

Elkhalifa, Samar, Tareq Al-Ansari, Hamish Mackey, and Gordon Mckay. 2019. “Food Waste to Biochars through Pyrolysis: A Review.” *Resources, Conservation and Recycling* 144:310–20. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.01.024.

Eyheraguibel, Boris. 2004. “Caractérisation Des Substances Humiques Biomimétiques : Effets Sur Les Végétaux.”

Gayathri, R., K. P. Gopinath, and P. Senthil Kumar. 2021. “Adsorptive Separation of Toxic Metals from Aquatic Environment Using Agro Waste Biochar: Application in Electroplating Industrial Wastewater.” *Chemosphere* 262:128031. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128031.

Ghodake, Gajanan, Surendra Shinde, Avinash Kadam, Rijuta Saratale, Ganesh Saratale, Manu Kumar, Palem Ramasubba Reddy, Hind Al-Shwaiman, Abdallah Elgorban, Asad Syed, and Dae-Young Kim. 2021. “Review on Biomass Feedstocks, Pyrolysis Mechanism and Physicochemical Properties of Biochar: State-of-the-Art Framework to Speed up Vision of Circular Bioeconomy.” *Journal of Cleaner Production* 297:126645. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126645.

Goldan, Elena, Valentin Nedeff, Narcis Barsan, Mihaela Culea, Mirela Panainte-Lehadus, Emilian Mosnegutu, Claudia Tomozei, Dana Chitimus, and Oana Irimia. 2023. “Assessment of Manure Compost Used as Soil Amendment—A Review.” *Processes* 11(4).

Herath, Amali, Cody Layne, Felio Perez, El Barbary Hassan, Charles Pittman, and Todd Mlsna. 2020. “KOH-Activated High Surface Area Douglas Fir Biochar for Adsorbing Aqueous Cr(VI), Pb(II) and Cd(II).” *Chemosphere* 269:128409. doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128409.

Huang, Peng, Chengjun Ge, Dan Feng, Huamei Yu, Jiwei Luo, Jiatong Li, P. J. Strong, Ajit K. Sarmah, Nanthi S. Bolan, and Hailong Wang. 2018. “Effects of Metal Ions and PH on Ofloxacin Sorption to Cassava Residue-Derived Biochar.” *Science of The Total Environment* 616–617:1384–91. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.177.

Islam, Md Shahinoor, Jin-Hyeob Kwak, Christopher Nzediegwu, Siyuan Wang, Kumuduni Palansuriya, Eilhann E. Kwon, M. Anne Naeth, Mohamed Gamal El-Din, Yong Sik Ok, and Scott X. Chang. 2021. “Biochar Heavy Metal Removal in Aqueous Solution Depends on Feedstock Type and Pyrolysis Purging Gas.” *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)* 281:117094. doi: 10.1016/j.envpol.2021.117094.

Khalid, Sana, Muhammad Shahid, Behzad Murtaza, Irshad Bibi, Natasha Natasha, Muhammad Asif Naeem, and Nabeel Niazi. 2019. “A Critical Review of Different Factors Governing the Fate of Pesticides in Soil under Biochar Application.” *Science of The Total Environment* Accepted-. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134645.

Kleber, Markus, and Johannes Lehmann. 2019. “Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems.”

Journal of Environmental Quality 48(2):207–16. doi: https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036.

Kong, Xiangrui, Yaoxuan Liu, Jiachang Pi, Wenhong Li, QianJiahua Liao, and Jingge Shang. 2017. "Low-Cost Magnetic Herbal Biochar: Characterization and Application for Antibiotic Removal." *Environmental Science and Pollution Research* 24(7):6679–87. doi: 10.1007/s11356-017-8376-z.

Lehmann, Johannes. 2007. "Bio-Energy in the Black." *Frontiers in Ecology and the Environment* 5(7):381–87. doi: https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2.

M. Tahat, Monther, Kholoud M. Alananbeh, Yahia A. Othman, and Daniel I. Leskovar. 2020. "Soil Health and Sustainable Agriculture." *Sustainability* 12(12).

Mai, Xurui, Jing Tang, Juexuan Tang, Xinyue Zhu, Zhenhao Yang, Xi Liu, Xiaojie Zhuang, Guang Feng, and Lin Tang. 2025. "Research Progress on the Environmental Risk Assessment and Remediation Technologies of Heavy Metal Pollution in Agricultural Soil." *Journal of Environmental Sciences (China)* 149:1–20. doi: 10.1016/j.jes.2024.01.045.

Nguyen, Thi, Anh Phan, Trung Nguyen, Son Nguyen, Arivalagan Pugazhendhi, and Ha Phuong. 2022. "Valorization of Agriculture Waste Biomass as Biochar: As First-Rate Biosorbent for Remediation of Contaminated Soil." *Chemosphere* 307:135834. doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135834.

Peter, Aneeshma, Bruno Chabot, and Eric Loranger. 2021. "Enhanced Activation of Ultrasonic Pre-Treated Softwood Biochar for Efficient Heavy Metal Removal from Water." *Journal of Environmental Management* 290:112569. doi: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112569.

Prince, Ukaogo, Ugochukwu Ewuzie, and Chibuzo Onwuka. 2020. "Environmental Pollution: Causes, Effects, and the Remedies." Pp. 419–29 in.

Rafique, Muhammad Imran, Adel R. A. Usman, Munir Ahmad, Abdelazeem Sallam, and Mohammad I. Al-Wabel. 2020. "In Situ Immobilization of Cr and Its Availability to Maize Plants in Tannery Waste–Contaminated Soil: Effects of Biochar Feedstock and Pyrolysis Temperature." *Journal of Soils and Sediments* 20(1):330–39. doi: 10.1007/s11368-019-02399-z.

Rahim, Hafeez Ur, Enrica Allevato, Francesco Primo Vaccari, and Silvia Rita Stazi. 2024. "Biochar Aged or Combined with Humic Substances: Fabrication and Implications for Sustainable Agriculture and Environment-a Review." *Journal of Soils and Sediments* 24(1):139–62. doi: 10.1007/s11368-023-03644-2.

Teermann, I. P., and M. R. Jekel. 1999. "Adsorption of Humic Substances onto SS-FeOOH and Its Chemical Regeneration." *Water Science and Technology* 40(9):199–206. doi: https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00657-5.

Timofeev, Ivan, Natalia Kosheleva, and Nikolay Kasimov. 2018. "Contamination of Soils by Potentially Toxic Elements in the Impact Zone of Tungsten-molybdenum Ore Mine in the Baikal Region: A Survey and Risk Assessment." *Science of The Total Environment* 642:63–76. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.042.

Verheijen, Frank, Simon Jeffery, Ana Bastos, Marijn Velde, and Iason Diafas. 2010. *Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions*.

Wang, Yupeng, Qintie Lin, Xiao Rongbo, Shuailong Cheng, Haoyu Luo, Xiaoqing Wen, Libin Wu, and Quanfa Zhong. 2020. "Removal of Cu and Pb from Contaminated Agricultural Soil Using Mixed Chelators of Fulvic Acid Potassium and Citric Acid." *Ecotoxicology and Environmental Safety* 206:111179. doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.111179.

Wu, Jiawen, Tao Wang, Jiawei Wang, Yongsheng Zhang, and Wei-Ping Pan. 2021. "A Novel Modified Method for the Efficient Removal of Pb and Cd from Wastewater by Biochar: Enhanced the Ion Exchange and Precipitation Capacity." *Science of The Total Environment* 754:142150. doi: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142150.

Yan, W. L., and Renbi Bai. 2005. "Adsorption of Lead and Humic Acid on Chitosan Hydrogel Beads." *Water Research* 39(4):688–98. doi: https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.11.007.

Yang, Fan, Chunyu Tang, and Markus Antonietti. 2021. "Natural and Artificial Humic Substances to Manage Minerals, Ions, Water, and Soil Microorganisms." *Chemical Society Reviews* 50(10):6221–39. doi: 10.1039/D0CS01363C.

Yu, Yao, Yanan Wan, Aboubacar Younoussa Camara, and Huafen Li. 2018. "Effects of the Addition and Aging of Humic Acid-Based Amendments on the Solubility of Cd in Soil Solution and Its Accumulation in Rice." *Chemosphere* 196:303–10. doi:

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.002.

Zermane, Faiza, Wahib Naceur, Benamar Cheknane, and Noureddine Aït-Messaoudène. 2005. "Adsorption of Humic Acids by a Modified Algerian Montmorillonite in Synthesized Seawater." *Desalination* 179:375–80. doi: 10.1016/j.desal.2004.11.083.

Zhao, Chenhao, Linlin Hu, Changai Zhang, Shengsen Wang, Xiaozhi Wang, and Zhongyang Huo. 2021. "Preparation of Biochar-Interpenetrated Iron-Alginate Hydrogel as a PH-Independent Sorbent for Removal of Cr(VI) and Pb(II)." *Environmental Pollution* 287:117303. doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117303.

Zhao, Chenxi, Bing Wang, Kimleng Theng, Pan Wu, Fang Liu, Shengsen Wang, Xinqing Lee, Miao Chen, Ling Li, and Xueyang Zhang. 2021. "Formation and Mechanisms of Nano-Metal Oxide-Biochar Composites for Pollutant Removal: A Review." *Science of The Total Environment* 767:145305. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145305.

The Effect of Humic Acid and Biochar in Removal of Pollutants from Soil

Negar Chatrnour[1], Samaneh Abduolrahimi[2], Amir Fotovat[3]

1- M.Sc. Students, Department of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad
negar.chatrnour@gmail.com
2- PhD Students**,** Department of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad
3- Professor, Department of Soil Science, Ferdowsi University of Mashhad

Abstract

Soil pollution is considered one of the most significant environmental challenges in recent decades, directly affecting human health, water resource quality, and biodiversity. The use of adsorbents, as an efficient, cost-effective, and environmentally friendly method, plays an important role in reducing the concentration of organic and inorganic pollutants in the soil. Adsorbents, due to characteristics such as high specific surface area, suitable ion exchange capacity, and environmental compatibility, are capable of removing or immobilizing heavy metals, persistent organic compounds, and other pollutants from the soil ecosystem. Among these, natural and modified adsorbents such as clay, zeolite, nanoparticles, humic acid, and biochar have been attracted much attention by researchers. Humic acid, with its complex organic structure, has a high ability to form complexes with heavy metals and reduce their mobility. Additionally, biochar, produced from the pyrolysis of organic biomass, is recognized as an effective adsorbent for stabilizing pollutants in soil due to its porous structure and active functional groups. Studies indicate that the combined use of these adsorbents can provide a sustainable and efficient solution for improving soil quality and diminishing the risks associated with pollutants.

Keywords: Humic acid, Biochar, Pollutant removal, Soil, Environment