میکروب‌های خاک؛ راه حل مسئله تغییر اقلیم در کره زمین

سیده خمساء اسبقیان

دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی بیولوژی و بیوتکنولوژی خاک دانشگاه تهران

Khamsa.asbaghian@ut.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی است که به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی به وجود آمده است. میکروب‌های خاک به عنوان موجودات زنده‌ای که در اکوسیستم‌های خاکی زندگی می‌کنند، نقش حیاتی در بهبود کیفیت خاک، افزایش ذخیره کربن و کاهش گازهای گلخانه‌ای دارند. میکروب‌های خاک به طور فزاینده‌ای به عنوان بازیگران اصلی در کاهش تغییرات آب و هوایی به دلیل نقش آن‌ها در ترسیب کربن، چرخه مواد مغذی و پایداری اکوسیستم شناخته می‌شوند. مشارکت آن‌ها چندوجهی است و بر چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌های زمینی در مواجهه با تغییرات آب‌وهوایی تأثیر می‌گذارند. این مقاله به بررسی نقش میکروب‌های خاک در مقابله با تغییر اقلیم و ارائه راهکارهایی برای بهره‌برداری از این موجودات در مدیریت پایدار خاک در راستای کاهش اثرات تغییر اقلیم بر حیات بشر می‌پردازد.

کلمات کلیدی

تغییر اقلیم، خاک، گرمایش جهانی، ترسیب کربن، میکروارگانیسم‌های خاک، گازهای گلخانه‌ای، مهندسی میکروب، مهندسی اقلیم

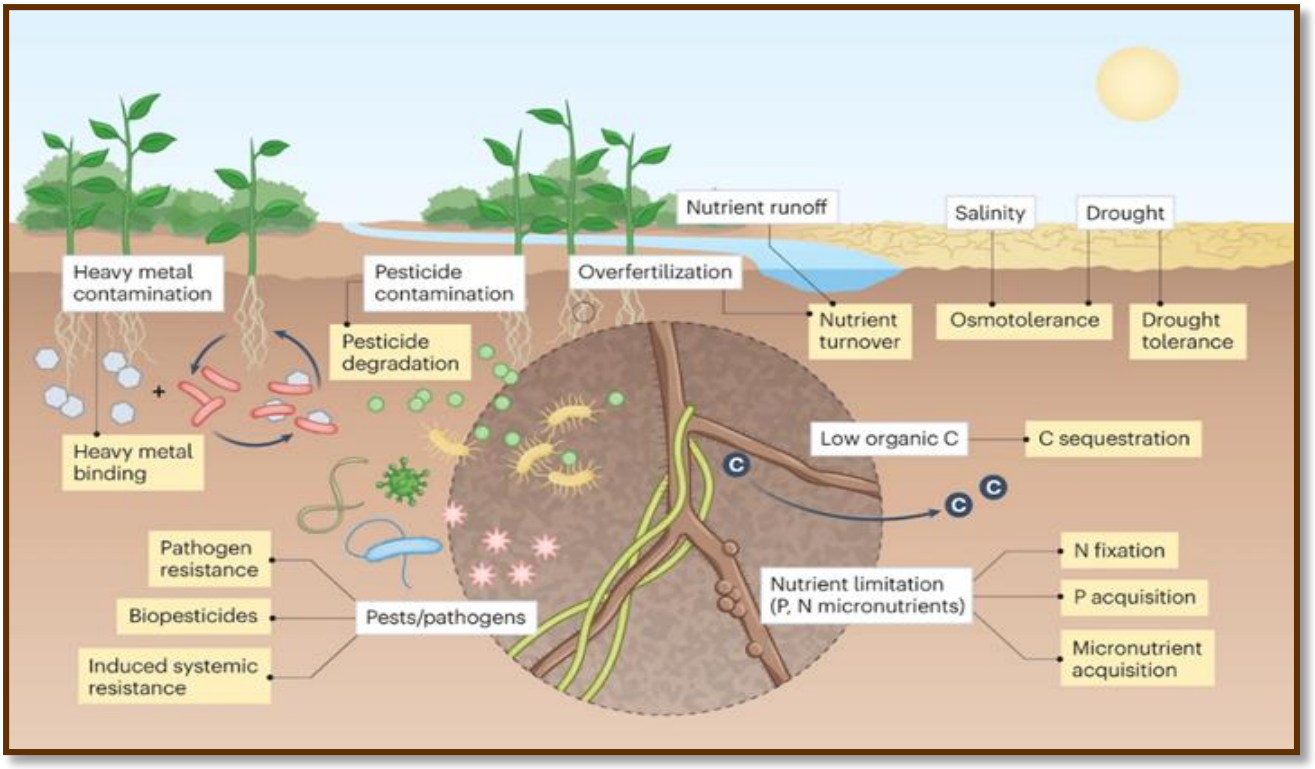
مقدمه

نقش میکروب‌های خاک در چرخه کربن

میکروبیوم خاک، شامل باکتری‌ها، قارچ‌ها، آرکی‌ها و سایر میکروارگانیسم‌ها برای چرخه کربن ضروری هستند. آن‌ها تجزیه مواد آلی را در خاک تسهیل می‌کنند و آن را به اشکال پایدار کربن تبدیل می‌کنند که می‌تواند در خاک تثبیت شود. تحقیقات نشان می‌دهد که قارچ‌های میکوریز در نتیجه برقراری روابط همزیستی با گیاهان، جذب مواد مغذی را افزایش می‌دهند و در عین حال به ذخیره‌سازی کربن آلی خاک نیز کمک می‌کنند. تخمین‌ها نشان از این دارد که این قارچ‌ها به تنهایی ممکن است به جذب سالانه ۱۳.۱۲ گیگا تن CO_2 کمک کنند که بخش قابل‌توجهی از انتشار جهانی از سوخت‌های فسیلی، محسوب می‌شود (شکل ۱)

(Asa DeHaan & Elise Osenge, 2024; Jansson & Hofmockel, 2020).

روابط پیچیده بین جوامع میکروبی، ویژگی‌های خاک و پویایی آب و هوا بر اهمیت این میکروارگانیسم‌ها در چرخه جهانی کربن و پایداری اکوسیستم تأکید می‌کند.



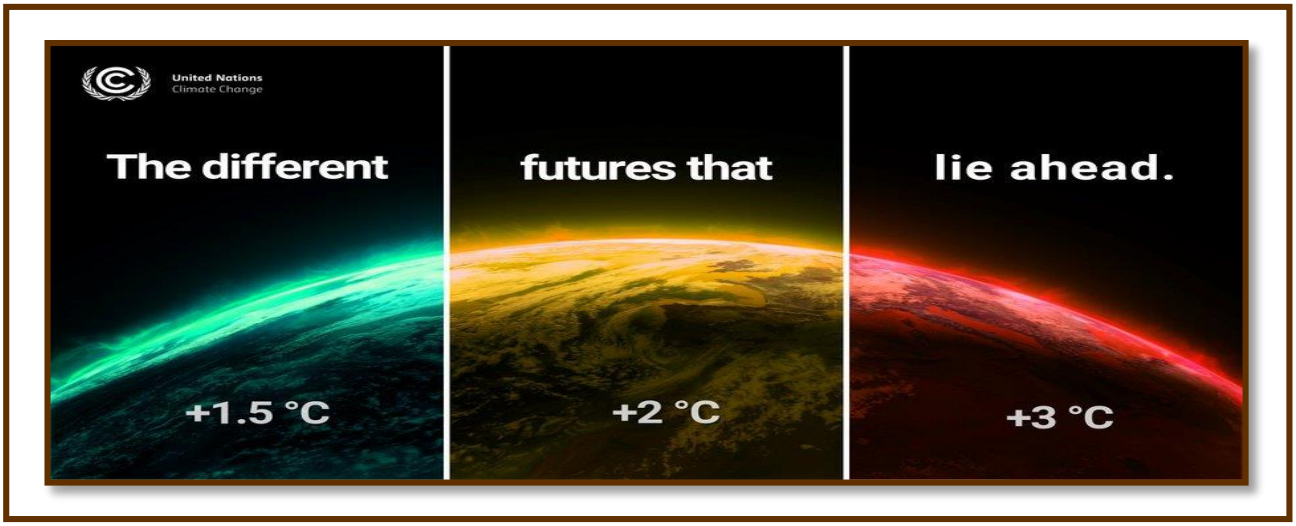
شکل ۱. برهمکنش میکروبیوم خاک-گیاه (جانسون و همکاران، ۲۰۲۳)

تاثیر تغییر اقلیم بر جامعه میکروبی خاک

تغییرات آب و هوایی چالش‌های مهمی را برای جوامع میکروبی خاک ایجاد می‌کند. افزایش دما و الگوهای بارندگی تغییریافته می‌توانند عملکرد میکروبی و ساختارهای جامعه را مختل کنند و به طور بالقوه منجر به کاهش حاصلخیزی خاک و به خطر افتادن اکوسیستم شوند. مطالعات نشان داده‌اند که رویدادهای شدید آب و هوایی (Extreme)، مانند خشکسالی، می‌توانند جمعیت میکروبی را به سمت گونه‌های مقاوم به خشکی سوق دهند، در نتیجه، پویایی چرخه مواد مغذی و فعل و انفعالات گیاهان را تغییر می‌دهند.

(Liu et al., 2024; Asa DeHaan & Elise Osenge, 2024).

علاوه بر این، تغییرات ناشی از آب و هوا می‌تواند بر فرآیند ذخیره‌سازی کربن تأثیر بگذارد و منجر به افزایش انتشار کربن به جو به جای ذخیره‌سازی و تثبیت کربن شود (Mukhtar et al., 2023; Haowei et al., 2024).

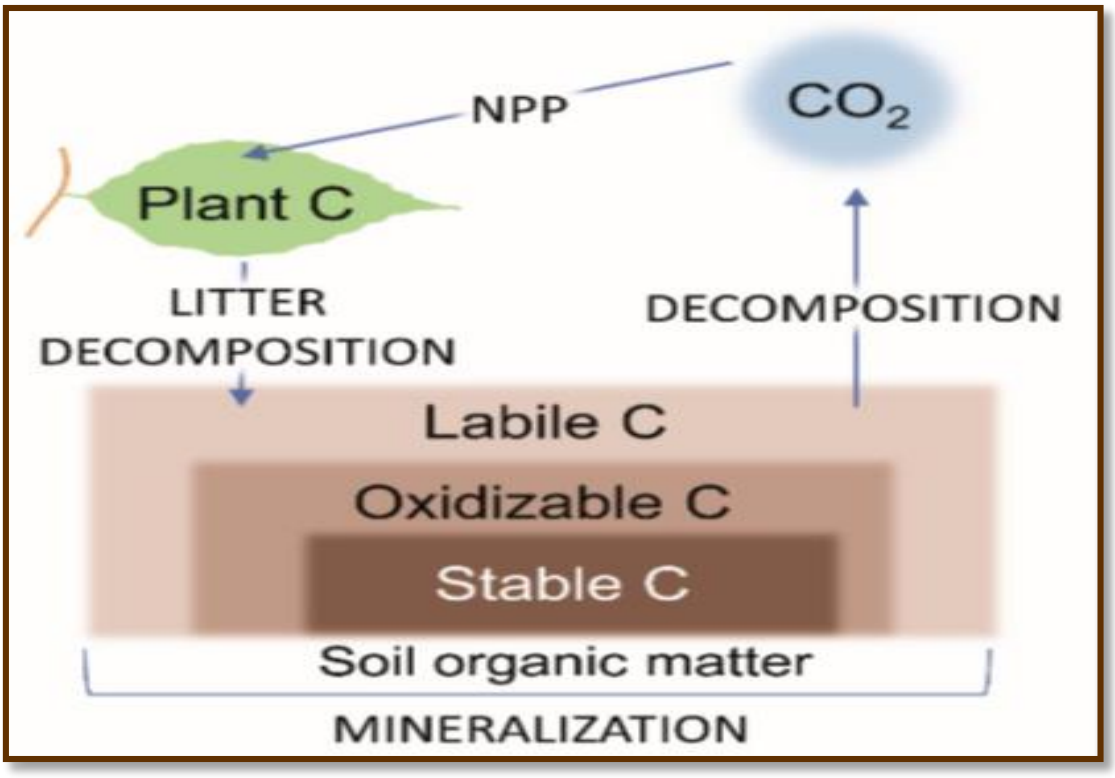


انعطاف‌پذیری میکروبی و سازگاری

با وجود این چالش‌ها، میکروب‌های خاک، انعطاف‌پذیری قابل توجهی از خود نشان می‌دهند. آن‌ها می‌توانند از طریق تغییر در ترکیب جامعه میکروبی و مسیرهای متابولیکی، خود را با شرایط متغیر محیطی سازگار کنند. برای مثال، گونه‌های میکروبی خاصی ممکن است با بهبود کارایی مصرف آب و کمک به رشد عمیق‌تر ریشه، انعطاف‌پذیری گیاه را در برابر عوامل استرس‌زا مانند خشکی افزایش دهند (Asa DeHaan & Elise Osenge, 2024). درک این مکانیسم‌های تطبیقی برای توسعه استراتژی‌هایی که از قابلیت‌های جامعه میکروبی برای افزایش انعطاف‌پذیری اکوسیستم تحت سناریوهای تغییر آب و هوا استفاده می‌کنند، حیاتی است.

یکی از اصلی‌ترین راه‌هایی که میکروب‌های خاک در کاهش تغییرات آب و هوایی نقش دارند، نقش آن‌ها در ترسیب کربن است. خاک به عنوان یک مخزن کربن قابل توجه عمل می‌کند و فرآیندهای میکروبی برای تبدیل مواد آلی به اشکال پایدار کربن، معروف به کربن آلی خاک (*SOC*) ضروری هستند (Srivastava, 2023; Amulothu, 2023).

میکروب‌ها تجزیه ورودی‌های کربن مشتق شده از گیاه را تسهیل می‌کنند که این امر، برای حفظ ذخایر کربن خاک حیاتی است (Gougoulias et al., 2014). پمپ کربن میکروبی، مفهومی است که توضیح می‌دهد چگونه میکروب‌ها کربن آلی ناپایدار (*Labile*) را به اشکال پایدارتر تبدیل می‌کنند و این پمپ برای درک ذخیره طولانی مدت کربن در خاک حائز اهمیت است (Kou et al., 2023; Feng & Wang, 2023). علاوه بر این، اصلاح‌کننده‌های خاک، مانند بیوچار و کمپوست آلی، فعالیت میکروبی را افزایش می‌دهند و ترسیب کربن را نیز بیشتر می‌کنند، و پتانسیل فعالیت‌های کشاورزی پایدار را برای استفاده از عملکردهای میکروبی در شرایط تغییر اقلیم برجسته می‌کنند (Amulothu, 2023; Morya, 2023) (شکل۲).



شکل۲. نمودار چرخه کربن و اجزای کربن آلی خاک (Enchilik et al., 2023)

علاوه بر ترسیب کربن، میکروب‌های خاک بر کیفیت و سلامت خاک تأثیر می‌گذارند که در نتیجه برای فعالیت‌های کشاورزی پایدار ضروری هستند. آن‌ها چرخه مواد مغذی را فعال می‌کنند و افزایش می‌دهند، ساختار خاک را بهبود می‌بخشند و انعطاف پذیری اکوسیستم‌ها را در برابر عوامل استرس زا افزایش می‌دهند (Ahmed, 2023). به عنوان مثال به این مطلب اشاره می‌شود که، فعل و انفعالات بین میکروب‌های خاک و گیاهان برای جذب مواد مغذی و مقاومت در برابر تنش بسیار مهم است، در نتیجه از رشد و بهره‌وری گیاه حمایت می‌کند (Chauhan, 2023). علاوه بر این، تنوع و ترکیب جوامع میکروبی به طور قابل توجهی بر چندکارکردی بودن اکوسیستم، از جمله فرآیندهای تبدیل نیتروژن، که می‌تواند بر انتشار گازهای گلخانه‌ای تأثیر بگذارد، اثر دارد (Wagg et al., 2014).

مدیریت جوامع میکروبی خاک یک راه امیدوارکننده برای افزایش ترسیب کربن و بهبود سلامت خاک ارائه می‌دهد. می توان اقداماتی مانند تناوب زراعی، کشت پوششی و کاهش خاکورزی (شخم زدن) را نام برد که می‌توانند جامعه میکروبی مفید خاک را تقویت کنند و به دنبال آن مواد آلی خاک و ذخیره کربن را افزایش می‌دهند (Fierer & Walsh, 2023؛ Singh, 2022). با این حال، پیچیدگی اکوسیستم‌های خاک مستلزم درک دقیقی از چگونگی تأثیر شیوه‌های مدیریت مختلف بر پویایی میکروبی و در نتیجه، نرخ ترسیب کربن است (Morya, 2023). مطالعات اخیر بر نیاز به رویکردهای یکپارچه‌ای تأکید می‌کند که تعاملات بین میکروب‌های خاک، شرایط محیطی و شیوه های کشاورزی را برای بهینه‌سازی استراتژی‌های ترسیب کربن در نظر می‌گیرد (Fierer & Walsh, 2023).

با این حال، یک آزمایش گلخانه‌ای جدید توسط محققان دانشگاه ایلینویز، Ricks و Yannarell در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که برخی از جوامع میکروبی خاک ممکن است مستقل از سیگنال‌های گیاهی با خشکی سازگار شوند. محققان سلامت گیاه را تحت شرایط متضاد دسترسی به آب مشاهده کردند. آن‌ها با استفاده از مخلوطی از خاک که شامل نمونه‌های مزرعه‌ای از چمنزار مرمت

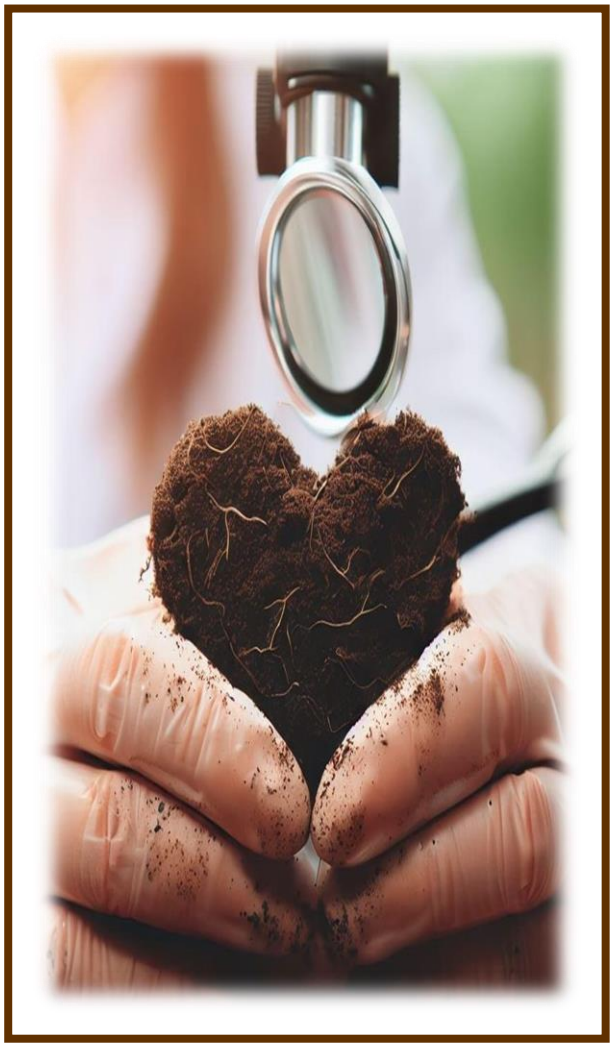
شده محلی بود، گلدان‌هایی ایجاد کردند که یا با گیاهان خردل (*Abidopsis thaliana* یا *Brassica rapa*) کاشته می‌شدند یا به‌عنوان خاک لخت رها می‌شدند. در طول سه نسل گیاه، گروه‌های مختلف گلدان رژیم‌های آبیاری متفاوتی را دریافت کردند که برخی از گلدان‌ها خشکسالی شبیه‌سازی شده را تجربه کردند. برای نسل چهارم و آخر گیاهان، محققان میزان عملکرد گیاهان را بر اساس سابقه آبیاری آن‌ها در مقایسه با سابقه آبیاری خاک‌هایی که در آن کاشته شده بودند، مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که به نظر می‌رسد میکروب‌های خاک با محیط خود (چه مرطوب یا خشک) سازگار هستند، صرف نظر از اینکه گیاهان میزبان مرتبط با آن‌ها در زمان خشکسالی شبیه‌سازی شده وجود داشته یا نه. علاوه بر این، گیاهانی که در خاک‌هایی که قبلاً کاشته نشده بودند و در معرض خشکی قرار داشتند رشد کردند، در شرایط محدود آب در آینده بهتر از گیاهانی که در خاک‌هایی رشد می‌کردند که میکروب‌های آن‌ها قبلاً تحت خشکسالی شبیه‌سازی شده قرار نگرفته بودند، عمل کردند. در حالی که Ricks و Yannarell اذعان دارند که آزمایش آن‌ها تنها بر روی یک زیرمجموعه کوچک از تعاملات میکروب-گیاه متمرکز است، این مطالعه سؤالات جدیدی را در مورد پتانسیل سازگاری میکروبی مستقل از گیاه با خشکسالی و نتایج برای بقای گیاه در مناطقی که آینده خشک‌تری دارند، بررسی می‌کند.

در حالی که پیشرفت قابل توجهی در درک نقش میکروب‌های خاک در پویایی آب و هوا انجام شده است، چندین شکاف دانش باقی مانده است. تحقیقات بیشتری برای روشن کردن فعل و انفعالات پیچیده در جوامع میکروبی و پاسخ آن‌ها به عوامل استرس‌زای مختلف آب و هوایی مورد نیاز است. روش‌های پیشرفته مانند متاژنومیکس و رویکردهای مدل‌سازی برای پیش‌بینی رفتار میکروبی در آینده تحت شرایط آب و هوایی متغیر ضروری هستند. علاوه بر این، همکاری های بین رشته ای بین میکروبیولوژیست‌ها، بوم‌شناسان و دانشمندان حوزه اقلیم و آب‌وهواشناسی برای توسعه استراتژی‌های جامع با هدف استفاده از میکروب‌های خاک در کاهش تغییرات آب و هوایی حیاتی خواهد بود.

در نتیجه، میکروب‌های خاک از طریق نقش خود در ترسیب کربن و بهبود سلامت خاک در پرداختن به تغییرات آب و هوایی بسیار مهم هستند. با درک و استفاده از قابلیت‌های این میکروارگانیسم‌ها، می‌توان شیوه‌های کشاورزی پایدار را توسعه داد که نه تنها تغییرات آب و هوایی را کاهش می‌دهد، بلکه انعطاف‌پذیری و بهره‌وری اکوسیستم را ارتقا می‌دهد.

بررسی تحقیقات کنونی توسط میسون و همکاران در سال ۲۰۲۳ به طور مشابه، با توجه به اینکه چگونه اصلاحات و تلقیح خاک بر میکروبیوم‌ها و ذخیره کربن تأثیر می‌گذارد، توجه بیشتری به نقش میکروبیوم خاک را می‌طلبد. این بررسی، قارچ‌ها و باکتری‌ها را مورد بحث قرار می‌دهد و اشاره می‌کند که چگونه میکروب‌های مختلف با فرآیندهای چرخه کربن در هم تنیده می‌شوند. در حالی که رابطه قارچ‌های خاک در ذخیره‌سازی کربن مورد مطالعه قرار گرفته است، نقش باکتری‌ها به دقت مورد بررسی قرار نگرفته است، حتی به نظر می‌رسد برخی از باکتری‌ها نقشی مشابه قارچ‌ها در ذخیره‌سازی کربن دارند. به عنوان مثال، یک گروه از باکتری ها، اکتینومیست‌ها، می‌توانند ساختار رشته‌ای تولید کنند که می‌تواند کربن را در زیر زمین ذخیره کند. این باکتری‌ها می‌توانند به افزایش بیومس خاک کمک کنند و قادر به زنده ماندن در شرایط خاص و تشدید شده از نظر آب و هوایی (Extreme) هستند. با این حال، حقایق زیادی در مورد پتانسیل باکتریایی خاک در ترسیب کربن ناشناخته باقی مانده است.

میکروب‌های خاک یک جزء مهم و در عین حال اغلب نادیده گرفته شده در مبارزه با تغییرات آب و هوایی هستند. توانایی آن‌ها برای تأثیرگذاری بر چرخه کربن و سلامت اکوسیستم بر نیاز به تأکید بیشتر بر اکولوژی میکروبی در سیاست‌های زیست‌محیطی و شیوه‌های کشاورزی تأکید می‌کند. همانطور که ما با چالش‌های ناشی از تغییر آب و هوا روبرو هستیم، شناخت و استفاده از قدرت این میکروارگانیسم‌ها می تواند راه‌حل‌های نوآورانه‌ای برای آینده‌ای پایدار بر روی زمین ارائه دهد.



منابع

- Ahmed, A. (2023). Harnessing the power of microbes for sustainable development: climate change mitigation and sustainable food security. Ecological Research, 39(2), 159-168. https://doi.org/10.1111/1440-1703.12436.
- Amulothu, D. 2023. Microbial responses to carbon sequestration soil amendment and productivity. International Journal of Environment and Climate Change, 13(10), 3587-3597. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i103029.
- Chauhan, P. (2023). Soil microbiome: diversity, benefits and interactions with plants. Sustainability, 15(19), 14643. https://doi.org/10.3390/su151914643.
- DeHaan, A., Osenga, E. 2024. Small but mighty: The role of soil microbes in a changing climate. Research Review, Aspen Global Change Institute.
- Enchilik P, Aseyeva E, Semenkov I. Labile and Stable Fractions of Organic Carbon in a Soil Catena (the Central Forest Nature Reserve, Russia). Forests. 2023; 14(7):1367. https://doi.org/10.3390/f14071367.
- Feng, X. and Wang, S. (2023). Plant influences on soil microbial carbon pump efficiency. Global Change Biology, 29(14), 3854-3856. https://doi.org/10.1111/gcb.16728.
- Fierer, N. and Walsh, C. (2023). Can we manipulate the soil microbiome to promote carbon sequestration in croplands?. Plos Biology, 21(7), e3002207. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3002207.
- Gougoulias, C., Clark, J., & Shaw, L. 2014. The role of soil microbes in the global carbon cycle: tracking the below-ground microbial processing of plant-derived carbon for manipulating carbon dynamics in agricultural systems. Journal of the Science of Food and Agriculture, 94(12), 2362-2371. https://doi.org/10.1002/jsfa.6577.
- Haowei Wu, Huiling Cui, Chenxi Fu, Ran Li, Fengyuan Qi, Zhelun Liu, Guang Yang, Keqing Xiao, Min Qiao, Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review, Science of The Total Environment, Volume 909, 2024, 168627, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168627.
- Hussnain Mukhtar, Rainer Ferdinand Wunderlich, Adnan Muzaffar, Andrianto Ansari, Oleg V. Shipin, Thanh Ngoc-Dan Cao, Yu-Pin Lin, Soil microbiome feedback to climate change and options for mitigation, Science of The Total Environment, Volume 882, 2023, 163412, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163412.
- Jansson, J.K., Hofmockel, K.S. 2020. Soil microbiomes and climate change. Nat Rev Microbiol 18, 35–46. https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7.
- Jansson, J.K., McClure, R. & Egbert, R.G. 2023. Soil microbiome engineering for sustainability in a changing environment. Nat Biotechnol 41, 1716–1728. https://doi.org/10.1038/s41587-023-01932-3.
- Kou, X., Morriën, E., Tian, Y., Zhang, X., Lu, C., Xie, H., … & Liang, C. (2023). Exogenous carbon turnover within the soil food web strengthens soil carbon sequestration through microbial necromass accumulation. Global Change Biology, 29(14), 4069-4080. https://doi.org/10.1111/gcb.16749 .
- Liu, Xiao A., Han, Shun, Frey, Serita D., Melillo, Jerry M., Zhou, Jizhong, and DeAngelis, Kristen M. Microbial responses to long-term warming differ across soil microenvironments. United States: N. p., 2024. Web. doi:10.1093/ismeco/ycae051.
- Mason, A. R. G., Salomon, M. J., Lowe, A. J., & Cavagnaro, T. R. (2023). Microbial solutions to soil carbon sequestration. Journal of Cleaner Production, 417, 137993. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137993.
- Morya, R. (2023). Soil management practices to enhance carbon sequestration rates- a review. International Journal of Environment and Climate Change, 13(11), 3762-3776. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113556.
- Morya, R. 2023. Soil management practices to enhance carbon sequestration rates- a review. International Journal of Environment and Climate Change, 13(11), 3762-3776. https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i113556.
- Ricks, K.D., & Yannarell, A.C. (2023). Soil moisture incidentally selects for microbes that facilitate locally adaptive plant response. Proceedings of the Royal Society B 290 29020230469. https://doi.org/10.1098/rspb.2023.0469.
- Singh, D. (2022). Leveraging soil microbes with good farming practices for higher soil carbon sequestration (scs) and farm productivity.. https://doi.org/10.5772/intechopen.105201.
- Srivastava, P. 2023. Soil microbes expertly balancing nutrient demands and environmental preservation and ensuring the delicate stability of our ecosystems- a review. International Journal of Plant & Soil Science, 35(18), 989-1000. https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i183363.
- Wagg, C., Bender, S., Widmer, F., & Heijden, M. (2014). Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(14), 5266-5270. https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111.