Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Soil Management and Sustainable Production

Print ISSN: 2322-1267
Online ISSN: 2322-1275

Soil Science Society of Iran

(OPEN ACCESS)

Impacts of Microplastic Pollution on the Quality of Agricultural Soils: A Review Paper

Zahra Arabi*

* Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Agricultural Sciences and Natural Resources, Islamic Azad University, Gorgan, Iran. E-mail: zahra.arabi@iau.ac.ir

Article Info

Article type:
Review Paper

Article history:
Received: 12.26.2024
Revised: 06.10.2025
Accepted: 06.24.2025

Keywords:
Agriculture,
Biodiversity,
Microplastics,
Soil pollution

ABSTRACT

Background and Objectives: Microplastic pollution, as a significant environmental concern, exerts extensive effects on agricultural soils. This pollution originates from various sources, including plastic waste, sewage sludge, and plastic mulches. These particles can widely disperse in agricultural environments, leading to alterations in soil structure and function. Investigating these changes requires a thorough study of the physical, chemical, and biological impacts of this pollution on soil systems. The increasing presence of microplastics in soil poses risks to agricultural productivity and ecosystem health.

Materials and Methods: Previous studies have extensively examined the comprehensive effects of microplastics on agricultural soils and their environmental consequences. In this context, scientific data on the introduction of microplastics into soils through the degradation of plastic waste, application of sewage sludge, and use of plastic mulches were collected and analyzed. Various studies have indicated that the presence of microplastics can induce changes in soil physical properties, such as aggregate stability, water-holding capacity, and permeability. Additionally, findings from laboratory and field investigations demonstrate the influence of these particles on soil nutrient cycles, including nitrogen and carbon, as well as on microbial activities. The role of microplastics as carriers of chemical contaminants, including heavy metals and toxic organic compounds, has also been emphasized in some studies.

Results: The results of previous research indicate that microplastics have extensive impacts on the physical, chemical, and biological properties of soil. Their presence disrupts natural soil functions by reducing aggregate stability, clogging pores, and decreasing permeability. Evidence also suggests that microplastics, by acting as carriers of chemical pollutants, contribute to reduced biodiversity and diminished microbial activity. Furthermore, disruptions in biogeochemical cycles, particularly nitrogen and carbon cycles, can increase greenhouse gas emissions. Collectively, these alterations lead to decreased soil fertility, reduced quantity and quality of agricultural products, and oxidative stress in plants, highlighting the necessity for more comprehensive research and the development of sustainable management strategies to address this emerging contaminant.

Conclusion: Although the effects of microplastics on soil depend on the physicochemical characteristics of the soil and the type and size of the microplastics, and may sometimes be transient or mitigated, managing microplastic pollution in agricultural soils is essential to minimize negative impacts. This requires the development of innovative technologies and practical strategies to reduce environmental harm. Future research should focus on understanding the long-term effects of microplastics on soil ecosystems and devising strategies to prevent their accumulation. Additionally, policymakers should prioritize legislation and strengthen international cooperation. Immediate actions in this regard are crucial to ensure food security, agricultural sustainability, and the environmental health of future generations.

Cite this article: Arabi, Zahra. 2026. Impacts of Microplastic Pollution on the Quality of Agricultural Soils: A Review Paper. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 15 (4), 1-33.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/ejsms.2026.23118.2172
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار
شاپا چاپی: ۱۲٦۷-۲۳۲۲
شاپا آنلاین: ۱۲۷۵-۲۳۲۲
انجمن علوم خاک ایران

ارزیابی اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر کیفیت خاک‌های کشاورزی (مقاله مروری)

زهرا عربی*

* نویسنده مسئول، استادیار گروه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه آزاد اسلامی گرگان، گرگان، ایران. رایانامه: zahra.arabi@iau.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله مروری

تاریخ دریافت: ۱٤۰۳/۱۰/۰٦
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰۳/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰٤/۰۳

واژه‌های کلیدی:
آلودگی خاک،
تنوع‌زیستی،
کشاورزی،
میکروپلاستیک

چکیده

سابقه و هدف: آلودگی میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان یک معضل زیست‌محیطی مهم، تأثیرات گسترده‌ای بر خاک‌های کشاورزی دارد. این آلودگی از منابع مختلفی مانند زباله‌های پلاستیکی، لجن فاضلاب و مالچ‌های پلاستیکی ناشی می‌شود. این ذرات می‌توانند به‌طور گسترده‌ای در محیط‌های کشاورزی پخش شده و باعث تغییرات در ساختار و عملکرد خاک شوند. بررسی این تغییرات مستلزم مطالعه دقیق اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی این آلودگی بر سیستم خاک است. افزایش حضور میکروپلاستیک‌ها در خاک، خطراتی برای بهره‌وری کشاورزی و سلامت اکوسیستم به همراه دارد.

مواد و روش‌ها: مطالعات پیشین به‌طور گسترده، به بررسی جامع اثرات میکروپلاستیک‌ها بر خاک‌های کشاورزی و پیامدهای زیست‌محیطی آن پرداخته‌اند. در این راستا، داده‌های علمی موجود در مورد ورود میکروپلاستیک‌ها به خاک از طریق تجزیه زباله‌های پلاستیکی، استفاده از لجن فاضلاب و کاربرد مالچ‌های پلاستیکی جمع‌آوری و تحلیل شد. مطالعات مختلف نشان داده اند که حضور میکروپلاستیک‌ها می‌تواند منجر به تغییراتی در ویژگی‌های فیزیکی خاک مانند پایداری ساختمان، ظرفیت نگهداشت رطوبت و نفوذپذیری شود. هم‌چنین، یافته‌های حاصل از پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی بیانگر تأثیر این ذرات بر چرخه‌های عناصر غذایی خاک مانند نیتروژن و کربن و نیز بر فعالیت‌های میکروبی هستند. نقش میکروپلاستیک‌ها به‌عنوان حامل آلاینده‌های شیمیایی از جمله فلزات سنگین و ترکیبات آلی سمی نیز در برخی مطالعات مورد تأکید قرار گرفته است.

یافته‌ها: نتایج حاصل از مطالعات پیشین نشان می‌دهد که میکروپلاستیک‌ها تأثیرات گسترده‌ای بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی خاک دارند. حضور این ذرات با کاهش پایداری ساختمان خاک، انسداد منافذ و کاهش نفوذپذیری، موجب اختلال در عملکرد طبیعی خاک می‌شود. هم‌چنین، شواهد بیانگر آن است که میکروپلاستیک‌ها با ایفای نقش به‌عنوان ناقل

آلاینده‌های شیمیایی، به کاهش تنوع زیستی و افت فعالیت‌های میکروبی منجر می‌گردند. افزون بر این، اختلال در چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی به‌ویژه چرخه نیتروژن و کربن، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در پی دارد. مجموعه این تغییرات، کاهش حاصلخیزی خاک، افت کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی و بروز تنش‌های اکسیداتیو در گیاهان را به دنبال داشته و بر لزوم انجام پژوهش‌های جامع‌تر و توسعه راهکارهای مدیریتی و پایدار در مواجهه با این آلاینده نوظهور تأکید دارد.

نتیجه‌گیری: اگر چه تأثیر میکروپلاستیک‌ها بر خاک به ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک و نوع و اندازه میکروپلاستیک وابسته است و گاهی با اثرات موقتی با خنثی همراه است اما در راستای کاهش اثرات منفی، مدیریت آلودگی میکروپلاستیک‌ها در خاک‌های کشاورزی ضروری است. این امر نیازمند توسعه فناوری‌های نوآورانه و ارائه راهکارهای عملی جهت کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی است. پژوهش‌های آینده باید بر درک اثرات بلندمدت میکروپلاستیک‌ها بر اکوسیستم خاک و تدوین راهبردهایی برای جلوگیری از تجمع آن‌ها تمرکز داشته باشد. هم‌چنین، سیاست‌گذاران باید تدوین قوانین و تقویت همکاری‌های بین‌المللی را در اولویت قرار دهند. اقدام‌های فوری در این زمینه برای حفظ امنیت غذایی، پایداری کشاورزی و سلامت زیست‌محیطی نسل‌های آینده حیاتی است.

استناد: عربی، زهرا (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات منفی میکروپلاستیک‌ها بر کیفیت خاک‌های کشاورزی (مقاله مروری). *نشریه مدیریت خاک و تولید پایدار*، ۱۵ (۴)، ۳۳-۱.

DOI: 10.22069/ejsms.2026.23118.2172

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

پلاستیک‌ها، که به‌دلیل مقرون‌به‌صرفه بودن، چندمنظوره بودن و دوام بالا شناخته می‌شوند، در سال‌های اخیر با افزایش تقاضا برای مصرف مواجه بوده‌اند؛ موضوعی که نگرانی‌های زیست‌محیطی قابل‌توجهی را به همراه داشته است (۱و ۲). با تجزیه قطعات بزرگ پلاستیک در اکوسیستم‌ها در اثر فرآیندهای طبیعی یا نیروهای خارجی، ذرات کوچک‌تری تشکیل می‌شود که به یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی امروز یعنی آلودگی میکروپلاستیکی منجر شده است (۳ و ٤). میکروپلاستیک‌ها (MPs[1]) به ذراتی با اندازه کم‌تر از ۵ میلی‌متر گفته می‌شوند که از طریق مکانیسم‌هایی مانند تخریب نوری (فتودگرادیسیون)، سایش مکانیکی و فعالیت‌های زیستی مانند بیوتورباسیون تشکیل می‌شوند. این فرآیندها به شکسته شدن و تجزیه تدریجی پلاستیک‌های بزرگ‌تر منجر شده و حضور میکروپلاستیک‌ها را در محیط‌های مختلف افزایش می‌دهند (۵). MPs تأثیر قابل‌توجهی بر اکوسیستم‌های مختلف دارند و اولین بار در دهه‌های ۱۹٦۰ و ۱۹۷۰ در محیط‌های دریایی شناسایی شدند (٦). پژوهش‌ها بر روی MPs ابتدا عمدتاً بر روی سیستم‌های دریایی و آب شیرین متمرکز بود. با گذشت زمان، پلاستیک‌ها به روش‌های مختلفی مانند استفاده از لجن فاضلاب، پساب، کمپوست، کودهای پلیمری، پوشش‌های پلاستیکی، سایش لاستیک از جاده‌ها، آبیاری با فاضلاب، تجزیه زباله‌های پلاستیکی، نفوذ از محل‌های دفن زباله و انتقال هوایی میکروپلاستیک‌ها و رسوب‌گذاری از طریق اتمسفر، وارد خاک‌ها شدند (۷ و ۸). MPs در سراسر جهان به‌عنوان یک تهدید جدی برای اکوسیستم‌های خاکی شناخته شده‌اند و با وجود تجزیه‌پذیری اندک آن‌ها، حدود ۳۲٪ از زباله‌های پلاستیکی می‌تواند در خاک انباشته شود (۹، ۱۰ و ۱۱) به عنوان مثال تنها ۰/٤٪ (۱۲) از پلی‌پروپیلن در یک سال تجزیه می‌شود و پلی‌وینیل کلراید حتی پس از ۱۰ تا ۳۵ سال در خاک هیچ کاهش وزنی نشان نمی‌دهد (۱۳، ۱٤ و ۱۵).

MPs بر اساس منشأ پیدایش‌شان به دو گروه اصلی، یعنی اولیه و ثانویه، طبقه‌بندی می‌شوند (۱٦). MPs اولیه شامل ذرات ریز پلاستیکی هستند که به‌طور مستقیم در فرایند تولید محصولات صنعتی، به‌ویژه در صنایع آرایشی و بهداشتی، مورد استفاده قرار می‌گیرند. این ذرات همچنین ممکن است از طریق مسیرهایی مانند آبیاری با فاضلاب، استفاده از زیست‌توده (بیوماس)، افزودن کمپوست و هم‌چنین سایش و فرسایش ابزارآلات کشاورزی به خاک‌های زراعی راه یابند (۱٦). در مقابل، MPs ثانویه حاصل تجزیه پلاستیک‌های با ابعاد بزرگ‌تر مانند فیلم‌های مالچ و لوله‌های آبیاری هستند که تحت‌تأثیر عوامل محیطی از جمله تابش فرابنفش، تغییرات حرارتی، و سایش مکانیکی به ذرات کوچک‌تر شکسته شده و در خاک تجمع می‌یابند (۱٦ و ۱۷). بررسی مطالعات متعددی که در خصوص MPs خاک در دهه گذشته در سطح دنیا صورت گرفته، الگوی خاصی از آلودگی را نشان می‌دهد (۱۸). بیش‌تر اراضی کشاورزی و باغبانی که در معرض لجن فاضلاب و فیلم‌های مالچ هستند، دارای غلظت‌هایی کم‌تر از ۱۳۰۰۰ ذره MPs در هر کیلوگرم خاک خشک (معادل ٤/۵ میلی‌گرم در هر کیلوگرم خاک خشک) می‌باشند (۱۸). MPs حدود ۱۰ برابر بیش‌تر از مناطق روستایی است و در مناطق صنعتی، می‌تواند ۲ تا ٤ برابر بیش‌تر از میانگین باشد (۱۸). مطالعات در مورد MPs خاک در دهه گذشته رو به افزایش بوده ولی هم‌چنان نیاز به داده‌های بیش‌تر درباره غلظت و انواع مختلف MPs و تأثیر آن‌ها بر منابع زیست‌محیطی وجود دارد.

1- Microplastics

میکروپلاستیک‌ها در خاک: تولید و مصرف گسترده پلاستیک (تولید جهانی پلاستیک به ۳۵۹ میلیون تن در سال ۲۰۱۸ رسید (۱۹)، باعث ورود مقادیر زیادی MPs به محیط‌های آبی، خاک‌ها و جو شده است که در این بین، خاک به عنوان بزرگ‌ترین مخزن MPs شناخته شده است (۲۰ و ۲۱). بر اساس داده‌های هوانگ و همکاران (۲۰۱۹)، مقدار MPs در خاک به‌ندرت به بیش از ۱ درصد وزنی خاک می‌رسد (۲۲). مطالعات میدانی نشان داده ۵۰ تا ۸۰ درصد از MPs شناسایی‌شده در خاک دارای قطر کم‌تر از ۱ میلی‌متر بوده و فراوانی آن‌ها در خاک بین ٦۲/۵ تا ٤۰۸۰۰ ذره در هر کیلوگرم خاک خشک متغیر است (۲۳ و ٢٤). ورود MPs به خاک، سلامت خاک را تحت‌تأثیر قرار داده و خواص فیزیکی و شیمیایی آن را تغییر می‌دهند (۲۵). این تغییرات می‌توانند منجر به کاهش کیفیت خاک و اختلال در عملکرد اکوسیستم‌های خاکی شوند. شکل ۱ مسیرهای مختلف ورود MPs به اکوسیستم‌های خاکی را به تصویر می‌کشد. این مسیرها شامل تخریب فیزیکی و شیمیایی پلاستیک‌ها تحت‌تأثیر عوامل محیطی مانند تابش فرابنفش خورشید، بارندگی و هیدرولیز در سامانه‌های آبی، هم‌چنین سایش مکانیکی لاستیک‌ها در حین استفاده، کاربرد لجن فاضلاب تصفیه‌شده در کشاورزی، و تخلیه مستقیم پساب‌های صنعتی به محیط هستند. این فرایندها، از ساییدگی مکانیکی لاستیک‌ها تا واکنش‌های شیمیایی در آب و تولید لجن، منجر به تجزیه پلاستیک‌های بزرگ به MPs می‌شود که در خاک انباشته شده و مشکلات زیست‌محیطی به همراه دارند (٢٦). اگرچه MPs عمدتاً از پلیمرها تشکیل شده‌اند، اما اغلب حاوی آلاینده‌های شیمیایی مختلف مانند فلزات سنگین، دیوکسین‌ها و هیدروکربن‌های آروماتیک چندحلقه‌ای هستند (۲۷). که به دلیل بهبود ویژگی‌های محصولات نهایی به آن‌ها اضافه می‌شوند (۲۸). با گذشت زمان، این مواد شیمیایی از طریق رهایش آهسته یا تخریب، به محیط خاک وارد شده و باعث آسیب به جمعیت و تنوع میکروبی و کیفیت خاک می‌شوند (۲۹). به عنوان مثال آلاینده‌های آزاد شده از MPs می‌تواند به بدن موجودات مفید خاک مانند کرم‌های خاکی منتقل شوند (۳۰، ۳۱ و ۳۲). MPs به دلیل ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاص خود از جمله نسبت سطح به حجم بالا، تخلخل و آب‌گریزی، تمایل بالایی برای جذب و تجمع انواع مختلفی از آلاینده‌های زیست‌محیطی دارند. پژوهش‌های متعددی حضور ترکیبات شیمیایی خطرناک در محیط‌های آلوده به MPs را گزارش کرده‌اند که این موضوع بر نقش بالقوه‌ی آن‌ها به‌عنوان ناقل آلاینده‌ها تأکید دارد. به‌عنوان نمونه، مشخص شده است که آفت‌کش‌ها به‌راحتی بر سطح MPs جذب می‌شوند (۳۳)، و هم‌چنین رنگ‌های صنعتی نیز به دلیل ساختار آلی پیچیده خود، برهم‌کنش زیادی با سطح MPs دارند (٣٤). فلزات سنگین مانند کادمیم، سرب و جیوه نیز در حضور MPs در خاک تجمع یافته‌اند که نشان‌دهنده نقش آن‌ها در افزایش پایداری و انتقال این عناصر سمی در اکوسیستم‌های خاکی است (۳۵). مطالعه ژانگ و همکاران (۲۰۱۹) نیز شواهد بیش‌تری مبنی بر این‌که MPs می‌توانند به‌عنوان ناقل غیرفعال آلاینده‌ها در محیط خاک عمل کنند، ارائه داده است؛ این ویژگی می‌تواند منجر به افزایش پایداری، تحرک‌پذیری و انتقال این آلاینده‌ها در محیط شود (٣٦). هم‌چنین، یافته‌های گزارش‌شده توسط آویو و همکاران (۲۰۱۵) و چو و همکاران (۲۰۱٤) تأیید می‌کنند که MPs می‌توانند مسیرهای جدیدی برای ورود آلاینده‌های شیمیایی خطرناک به سیستم‌های زیستی فراهم آورند (۳۷ و ۳۸). مجموع این مطالعات، اهمیت بررسی بیش‌تر برهم‌کنش MPs با سایر آلاینده‌های شیمیایی در خاک و اثرات زیست‌محیطی آن‌ها را برجسته می‌سازد.



شکل ۱- مسیرهای ورود MPs به خاک (Chukwuemeka et al., 2024).

Figure 1. Pathways of microplastic introduction into soil.

جابجایی و تغییر شکل MPs در خاک: عوامل متعددی مانند مدیریت ضعیف پسماند، ویژگی‌های فیزیکی ذرات پلاستیکی، شرایط آب و هوایی (مانند شدت بارش و سرعت باد) و ویژگی‌های توپوگرافی می‌تواند بر میزان رسوب، نگهداشت و انتقال MPs در محیط خاک تأثیرگذار باشد (۳۹، ٤٠ و ٤١). حرکت MPs به‌صورت عمودی و جانبی در خاک، می‌تواند تحت‌تأثیر عواملی مانند ساختمان خاک، موجودات خاکزی و روش‌های کشاورزی، قرار گیرد (٤٢). اندازه و نوع MPs نیز بر حرکت آن‌ها تأثیر دارد. MPs کوچک‌تر به‌ویژه ذرات کروی، تمایل به مهاجرت به لایه‌های عمیق‌تر خاک دارند (۹، ٤٣ و ٤٤). حرکت MPs در خاک تحت‌تأثیر مجموعه‌ای از عوامل فیزیکی و شیمیایی قرار دارد که هر یک به‌نحوی می‌توانند مسیر، سرعت و پایداری آن‌ها را تغییر دهند (٤٥، ٤٦ و ٤٧). یکی از مهم‌ترین این عوامل، فرسایش خاک است که از طریق رواناب یا باد، موجب جابه‌جایی افقی و عمودی ذرات می‌شود (۹). هم‌چنین، قدرت یونی محلول خاک با افزایش غلظت یون‌ها می‌تواند منجر به کاهش دافعه الکترواستاتیکی بین MPs و ذرات خاک شده و در نتیجه، تجمع و کاهش تحرک آن‌ها را به دنبال داشته باشد (٤٨). در کنار آن، نوع کاتیون‌های موجود نیز اهمیت دارد؛ به‌طور مثال، یون‌های دو ظرفیتی مانند Ca^{2+} باعث پایداری بیش‌تر MPs در خاک و کاهش تحرک آن‌ها می‌شوند (٤٩). از سوی دیگر، ناهمگنی ساختاری خاک شامل تفاوت در اندازه ذرات، مواد معدنی و خلل و فرج، می‌تواند مسیر حرکت MPs را پیچیده‌تر کرده و از نفوذ یکنواخت آن‌ها جلوگیری کند (٤٢). وجود مواد آلی در خاک نیز از طریق برهم‌کنش‌های سطحی با MPs، بر رفتار حرکتی آن‌ها تأثیرگذار است، چرا که مواد آلی می‌توانند سطح ذرات را بپوشانند و از طریق تغییر بار سطحی، حرکت را تسهیل یا محدود کنند (٥٠). در نهایت، پوشش سطحی خاک مانند پوشش گیاهی یا مالچ، با کاهش اثر فرسایش و رواناب، می‌تواند از انتقال MPs جلوگیری کند و به حفظ آن‌ها در لایه‌های سطحی خاک کمک نماید (٥١).

رشد ریشه گیاهان (٥٢)، فعالیت موجودات خاکزی (حشرات، کرم‌های خاکی و غیره) و کانال‌های

ایجادشده توسط آن‌ها نیز از عوامل اصلی حرکت MPs هستند (۵۳). در این میان کرم‌های خاکی نقش مهمی دارند، زیرا MPs را بلعیده و پس از دفع از طریق دالان‌هایی که ایجاد می‌کنند به لایه‌های عمیق‌تر خاک منتقل می‌کنند (٥٤). فعالیت‌های کشاورزی مانند شخم زدن و برداشت محصولات نیز می‌تواند منجر به جابه‌جایی خاک سطحی و زیرسطحی شده و به جابجایی MPs کمک کند (۵۵ و ٤٢). کربن آلی خاک و رس هم از عواملی هستند که بر مهاجرت برخی پلاستیک‌ها، مانند پلی‌استایرن، تأثیرگذارند (٤٢). کربن آلی خاک (SOC[1]) به‌واسطه سطح فعال بالا و خواص هیدروفوبی خود، می‌تواند از طریق پیوندهای ضعیف بین‌مولکولی مانند برهم‌کنش‌های واندروالسی یا نیروهای هیدروفوبیک، به سطح MPs متصل شود. این تعامل باعث ایجاد پوشش آلی روی سطح پلاستیک‌ها شده و حرکت آن‌ها در خاک را محدود می‌سازد. از سوی دیگر، ذرات رس که اندازه بسیار ریزی دارند و دارای بار سطحی منفی هستند، توانایی بالایی در جذب فیزیکی و شیمیایی میکروپلاستیک‌ها، به‌ویژه پلی‌استایرن (PS)، دارند. این فرایند معمولاً از طریق نیروهای الکترواستاتیکی و سطح ویژه زیاد رس انجام می‌شود. حضور هم‌زمان SOC و رس می‌تواند موجب افزایش پتانسیل نگه‌داشت MPs در خاک شده و از مهاجرت آن‌ها به اعماق خاک یا آب‌های زیرزمینی جلوگیری کند (٤٢). حرکت عمقی MPs در خاک، یکی از ابعاد نگران‌کننده آلودگی‌های نوظهور در اکوسیستم‌های خاکی به شمار می‌رود. این پدیده می‌تواند پیامدهای محیط‌زیستی و بهداشتی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد، چرا که با نفوذ به لایه‌های زیرین خاک، امکان انتقال این ذرات به منابع آب زیرزمینی، که تأمین‌کننده آب شرب و کشاورزی در بسیاری از مناطق هستند، فراهم می‌شود (٤٢). از آن‌جا که MPs می‌توانند به‌عنوان ناقل ترکیبات سمی، فلزات سنگین، مواد آلی زیست‌تخریب‌ناپذیر و حتی میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا عمل کنند، ورود آن‌ها به سفره‌های آب زیرزمینی یک تهدید جدی برای سلامت انسان و موجودات زنده محسوب می‌شود (٤٨). افزون بر آن، قرارگیری این ذرات در اعماق خاک، آن‌ها را از حوزه عملکرد زیست‌فرایندهای فعال در لایه‌های سطحی خاک (مانند تجزیه توسط میکروارگانیسم‌ها و فعالیت زیستی بی‌مهرگان خاکزی) خارج کرده و پایداری طولانی‌مدت آن‌ها را در محیط افزایش می‌دهد (۹). این شرایط نه‌تنها موجب کاهش سرعت تجزیه و دفع این آلاینده‌ها می‌شود، بلکه خطرات مزمن و پنهانی برای اکوسیستم‌های خاکی و آبی ایجاد می‌کند. بنابراین، حرکت عمقی MPs در خاک را می‌توان به‌عنوان یک تهدید بالقوه جدی با پیامدهای گسترده اکولوژیکی و بهداشتی ارزیابی کرد.

پلاستیک‌ها در محیط از طریق فرایندهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی تغییر می‌کنند (جدول ۱). تجزیه شیمیایی که توسط نور فرابنفش (UV) صورت می‌گیرد، به عنوان اولین مرحله تجزیه بسیار مهم است (۲۷). MPs که در نزدیکی سطح خاک هستند تحت‌تأثیر نور UV و دما و اکسیژن تغییر ساختار می‌دهند (٥٦). تغییرات شیمیایی شامل شکسته شدن زنجیره، ایجاد پیوند متقاطع و تشکیل گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن و حتی تبدیل پلاستیک‌ها به CO_2 می‌باشد (۱۹ و ۵۷). در فرایند تجزیه شیمیایی MPs کوچک‌تر یا حتی نانوپلاستیک‌ها تولید می‌شوند (۵۸ و ٤٦). نانوپلاستیک‌ها ذراتی با اندازه کم‌تر از ۱ میکرومتر هستند که می‌توانند به‌صورت اولیه تولید شده یا از تجزیه پلاستیک‌های بزرگ‌تر در محیط زیست به‌وجود آیند (۵۹). این ذرات می‌توانند از طریق مسیرهای تنفسی، گوارشی یا پوستی وارد بدن انسان شده و به دلیل اندازه بسیار کوچک خود، به

1- Soil Organic Carbon

بافت‌ها و اندام‌های مختلف نفوذ کرده و اثرات بالقوه‌ای چون التهاب و استرس اکسیداتیو ایجاد کنند (٦٠). ترکیب تابش UV و سایش مکانیکی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، دو عامل اصلی در تخریب فیزیکی فیلم‌های پلاستیکی کشاورزی به شمار می‌آیند که می‌توانند منجر به آزادسازی ذرات میکرو و نانوپلاستیک در خاک شوند (٦١ و ٦٢). این فرآیند تخریب، باعث ایجاد نانوپلاستیک‌های ثانویه در خاک‌های کشاورزی می‌شود که ممکن است اثرات زیست‌محیطی و اکولوژیکی قابل‌توجهی داشته باشد (٦٣ و ٦٤). پژوهش‌ها نشان داده‌اند که تابش UV می‌تواند ساختار پلاستیک‌ها را تغییر دهد و سایش مکانیکی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی مانند شخم‌زنی و آبیاری، این تغییرات را تسریع کرده و در نتیجه ذرات نانوپلاستیک بیش‌تری وارد محیط زیست شود (٦١ و ٦٢). ترشحات ریشه گیاهان و یا جانوران خاکزی باعث اتصال MPs کوچک‌تر به ذرات خاک شده (١٩) و آن‌ها را از مواجهه بیش‌تر با نور UV و سایش مکانیکی حفظ می‌کنند که در نهایت منجر به تجزیه ناقص و تجمع ذرات پلاستیکی کوچکتر می‌شود (٦٥). در مجموع تجزیه پلاستیک‌ها از طریق تابش UV و سایش مکانیکی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، می‌تواند منجر به تولید نانوپلاستیک‌های ثانویه در خاک شود که به دلیل اندازه کوچک‌تر، ممکن است اثرات منفی زیست‌محیطی و اکولوژیکی ایجاد کرده و از طریق مسیرهای مختلف وارد بدن موجودات شوند، در حالی‌که تعاملات با خاک می‌تواند از تجزیه بیش‌تر آن‌ها جلوگیری کند و موجب تجمع پلاستیک‌های کوچک‌تر شود.

جدول ١- دلایل و تغییرات پیری MPs در خاک (٢٥).

Table 1. Reasons and aging changes of microplastics in the soil.

تعاملات شیمیایی Chemical interaction	تعاملات فیزیکی Physical interaction
• تابش اشعه UV UV radiation • اکسیداسیون Exposure to oxygen	• سایش مکانیکی: Mechanical wear: – برخورد با جریان‌های توربولانسی هوا یا آب Collision with turbulence – برخورد با شن و سنگریزه‌ها – برخورد با زباله‌های اطراف Gravel or surrounding debris
تعاملات بیولوژیکی Biological interaction باکتری، قارچ، جلبک و ... Bacteria, fungi, algae, etc,	• نیروهای طبیعی مانند جزر و مد Natural forces, as waves and tides • فعالیت‌های کشاورزی Artificials actions, as farming
فرایند پیری Aging	
تغییرات شیمیایی Chemical changes تغییر در ساختار کریستالی Changes in crystallinity	ترک برداشتن یا پوسته پوسته شدن Cracks, spalling and flakes افزایش سطح ویژه Higher specific surface area
افزایش سطوح قابل‌جذب برای آلاینده‌ها More adsorption sites foe pollutants	
گروه‌های عاملی حاوی اکسیژن بیش‌تر More oxygen-containing functional groups	

تأثیر MPs بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک: بر اساس مطالعات، MPs ممکن است تحت‌تأثیر فعالیت‌های زیستی، شست‌وشوی ناشی از بارندگی یا فعالیت‌های کشاورزی، به لایه‌های عمیق‌تر خاک منتقل شوند (٦٦). هم‌چنین، حضور MPs می‌تواند به تغییر ساختار خاک و در نتیجه تغییر در ظرفیت نگهداشت رطوبت منجر شود، اگر چه جهت و شدت این تغییرات بسته به نوع، اندازه و شکل میکروپلاستیک و هم‌چنین نوع خاک ممکن است متفاوت باشد (۹ ، ٦٧ و ٦٨). این ذرات، به‌ویژه در اشکال رشته‌ای یا فیبری، با قرار گرفتن میان ذرات معدنی خاک، از برقراری پیوندهای طبیعی میان آن‌ها جلوگیری کرده و پایداری خاک‌دانه‌ها را کاهش می‌دهند (۹). علاوه بر این، ماهیت آب‌گریز و غیرقطبی MPs مانع از تعامل مؤثر با ترکیبات آلی خاک شده و در نتیجه، انسجام بین ذرات خاک را تضعیف می‌کند (٦٧). هم‌چنین، اثرات منفی این آلاینده‌ها بر فعالیت میکروبی و قارچی خاک می‌تواند تولید ترکیبات چسبنده طبیعی مانند پلی‌ساکاریدها را کاهش داده و به تضعیف بیش‌تر ساختار خاک منجر شود (۹). حضور MPs ممکن است با افزایش خلل و فرج درشت و کاهش ظرفیت نگهداشت آب، یکپارچگی فیزیکی خاک را نیز بر هم زند که در نهایت باعث تأثیرات منفی بر عملکرد اکوسیستم‌های خاکی و پایداری آن‌ها شوند (٦٦). تجمع بیش از اندازه آن‌ها باعث مسدود شدن منافذ خاک و در نتیجه کاهش نفوذ آب و مواد غذایی به خاک می‌شود که می‌تواند بر جمعیت میکروبی و رشد گیاهان تأثیر منفی بگذارد (٦٩). تأثیر MPs بر چرخه کربن خاک به‌طور گسترده در جنبه‌های مختلفی مانند ذخیره‌سازی کربن (۷۰ و ۷۱)، ماده آلی محلول (۵۰ و ۷۱) و انتشار دی‌اکسیدکربن (۷۲) مطالعه شده است. با این‌حال، تنها چند مطالعه (۷۳، ۷٤، ۷۵، ۵۰، ۷۱، ۷٦ و ۷۷) اثرات MPs بر وضعیت فسفر (P) و نیتروژن (N) خاک را بررسی کرده‌اند که نتایج آن‌ها همخوانی نداشته است. به عنوان مثال، دانگ و همکاران (۲۰۲۱) گزارش کردند که حضور MPs می‌تواند باعث کاهش محتوای نیتروژن و فسفر قابل‌دسترس در منطقه ریزوسفر شود، زیرا باعث مهار فعالیت‌های آنزیمی خاک می‌شوند (٦٩). این مهار ممکن است به دلیل تغییر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک مانند کاهش pH، افزایش هدایت الکتریکی و تغییر در ساختار تجمعی خاک باشد که بر فعالیت آنزیم‌هایی مانند کاتالاز، گلوکوزیداز و فسفاتاز تأثیر منفی می‌گذارد (۱۹). برعکس، یان و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که MPs می‌توانند با افزایش معدنی شدن فسفر آلی و حلالیت آن، محتوای P قابل دسترس را در خاک افزایش دهند (۳۳). این افزایش ممکن است به دلیل آزادسازی اسیدهای آلی و سایر ترکیبات شیمیایی از میکروپلاستیک‌ها باشد که به حل شدن فسفر آلی کمک می‌کند. MPs می‌توانند زیست فراهمی روی را افزایش دهند و در نتیجه احتمال تماس کرم‌های خاکی با روی را بالا ببرند به‌ویژه در خاک‌های اسیدی که حلالیت فلزات سنگین مانند روی بیشتر است. این اثر از طریق جذب و آزادسازی یون‌های فلزات سنگین توسط MPs رخ می‌دهد، که ممکن است به‌عنوان حامل فلزات سنگین عمل کرده و آن‌ها را در تماس با کرم‌های خاکی قرار دهد، اما اطلاعات کمی در مورد آسیب‌های احتمالی آن برای کرم‌های خاکی موجود است (۷۸). بنابراین پژوهش‌های بیش‌تر در خصوص واکنش چرخه‌های غذایی خاک به MPs ضروری به نظر می‌رسد.

اثرات MPs بر خواص خاک بسته به نوع MPs متفاوت است (۷۹، ۸۰ و ۸۱). در میان گونه‌های مختلف MPs، پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌پروپیلن (PP) به‌عنوان رایج‌ترین انواع پلاستیک‌های مورد بررسی در

مطالعات تجربی و زیست‌محیطی معرفی شده‌اند، که این امر عمدتاً به دلیل کاربرد گسترده آن‌ها در محصولات مصرفی و احتمال بالای ورودشان به اکوسیستم‌های خاکی است (۸۲، ۸۳ و ۸٤). یافته‌های این مطالعات نشان می‌دهند که MPs مذکور قادرند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک را دستخوش تغییر کرده، بر زیست‌فراهمی عناصر غذایی و فلزات سنگین اثرگذار باشند و به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم موجودات خاک‌زی مانند کرم‌های خاکی را تحت‌تأثیر قرار دهند. با وجود حجم قابل توجه پژوهش‌ها در این زمینه، بررسی‌های جامع‌تری در خصوص انواع دیگر میکروپلاستیک‌ها، که تاکنون کم‌تر مورد توجه قرار گرفته‌اند، برای ارزیابی دقیق‌تر اثرات بالقوه آن‌ها بر سلامت خاک و موجودات زنده ضروری به نظر می‌رسد.

MPs می‌توانند محیط مناسبی برای افزایش ترشحات ریشه و بهبود رشد گیاهان ایجاد کنند (۸۵)، چرا که با تغییر در ویژگی‌های فیزیکی خاک، از جمله کاهش تراکم و افزایش تخلخل و تهویه، شرایط بهتری برای توسعه ریشه فراهم می‌سازند. این شرایط منجر به افزایش سطح تماس ریشه با خاک و در نتیجه تحریک ترشحات ریشه‌ای مانند اسیدهای آلی و آنزیم‌ها می‌شود که نقش مهمی در آزادسازی عناصر غذایی و بهبود جذب آن‌ها ایفا می‌کنند. افزون بر این، MPs می‌توانند به‌عنوان بستری برای تجمع میکروارگانیسم‌های مفید در ریزوسفر عمل کرده و از این طریق تعاملات مثبت ریشه- میکروارگانیسم را افزایش دهند. با این‌حال، این نتایج باید با احتیاط تفسیر شوند. اثرات مثبت گزارش‌شده ممکن است تنها در شرایط خاص و کوتاه‌مدت رخ دهند و در بلندمدت، اثرات منفی MPs بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، فعالیت‌های میکروبی و زیست‌فراهمی فلزات سمی ممکن است بر رشد گیاه تأثیر منفی بگذارند (۸٦، ٦۷، ۲٤ و ۸۷). به‌علاوه، افزایش ترشحات ریشه ممکن است ناشی از پاسخ استرسی گیاه به حضور MPs باشد، نه نشانه‌ای از بهبود واقعی شرایط رشد. بنابراین، هرچند برخی نتایج نشان‌دهنده مزایای موقت MPs هستند، ارزیابی دقیق‌تر و جامع‌تری از تأثیرات آن‌ها در بلندمدت و در شرایط مختلف محیطی ضروری است.

تأثیر MPs بر خصوصیات بیولوژیکی خاک: امروزه MPs زیادی در اکوسیستم خاک شناسایی شده‌اند که می‌توانند تأثیرات منفی بر جوامع میکروبی خاک بگذارند. ورود MPs به خاک، می‌تواند سلامت موجودات خاکزی شامل باکتری‌ها و قارچ‌ها را تهدید کند (۲۹، ۲۰، ۸۸ و ۷۷) و جمعیت آن‌ها را کاهش دهد (٥٦، ۷۱ و ٤۷). کیم و همکاران (۲۰۲۰) دریافتند که MPs برای نماتدهای خاک سمی هستند (۸۹). چنگ و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی MPs پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) و پلی‌پروپیلن (PP)، متوجه تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر تنوع و جمعیت باکتری‌های خاک شدند (۹۰). MPs می‌توانند تغییرات قابل‌توجهی در ساختار خاک ایجاد کرده و ترکیب میکروبی آن را تحت‌تأثیر قرار دهند (۹۱). علاوه بر این، مواد سمی مختلف مانند آلاینده‌های آلی پایدار و فلزات سنگین موجود در پلاستیک‌های پلیمری، تأثیر منفی بر ساختار، تنوع و عملکرد جوامع باکتریایی خاک می‌گذارند (۹۲). هم‌چنین MPs می‌توانند از طریق مکانیسم‌های متنوعی به میکروارگانیسم‌ها آسیب رسانده و باعث ایجاد فشار فیزیکی و شیمیایی مستقیم بر سلول‌های میکروبی شوند که این امر می‌تواند به اختلال در یکپارچگی ساختاری و عملکردی آن‌ها منجر شود (۹۳). این ذرات به عنوان سطوح جدید در خاک عمل کرده و رقابت برای زیستگاه میکروبی را افزایش داده و موجب تغییر در نحوه استقرار جامعه میکروبی می‌شوند (۹٤). علاوه بر آن، حضور MPs

ممکن است روابط همزیستی موجود در خاک، به‌ویژه ارتباط با قارچ‌های میکوریزا، را مختل کند که این امر می‌تواند کارایی جذب مواد مغذی توسط گیاهان را تحت‌تأثیر قرار دهد (۹۵). در نهایت، شواهد نشان می‌دهند که MPs می‌توانند فعالیت آنزیم‌های کلیدی مانند دهیدروژناز و فسفاتاز را کاهش داده و موجب تغییر در بیان ژن‌های مربوط به فرایندهای متابولیکی میکروبی شوند (۹٦). این اثرات می‌تواند به کاهش تنوع زیستی، اختلال در چرخه‌های تغذیه‌ای خاک و تضعیف عملکرد کلی اکوسیستم خاک در بلندمدت منجر شود. به طور خاص، میکروپلاستیک‌های PVC و PE می‌توانند تنوع باکتریایی خاک را کاهش دهند (۹٦). MPs قادرند جمعیت باکتری‌های خاک به‌ویژه باکتری‌های گرم مثبت مانند فیرمیکوت‌ها (Firmicutes) و باکتری‌های گرم منفی مانند باکتروئیدها (Bacteroidetes) و ژماتیمونادت‌ها (Gemmatimonadetes) را در خاک شالیزار کاهش دهند (۵۵). این کاهش جمعیت میکروبی به‌دلیل فشار فیزیکی و شیمیایی مستقیم MPs بر سلول‌های میکروبی است که منجر به اختلال در ساختار و عملکرد آن‌ها می‌شود. علاوه بر این، ذرات MPs به‌عنوان سطوح جدید در خاک عمل کرده و رقابت برای منابع محدود میکروبی را تشدید می‌کنند (۹۳). به علاوه، مواد سمی آزاد شده از پلاستیک‌های پلیمری می‌توانند آسیب‌های جدی به محیط زیست میکروبی وارد کرده و عملکرد میکروبی خاک را تحت‌تأثیر منفی قرار دهند (۹٤). هم‌چنین MPs پلی‌اتیلن (PE) با کاهش تعداد ارتباطات بین گروه‌های میکروبی که شامل تعاملات همزیستی، رقابت و تبادل متابولیک بین میکروب‌هاست، شبکه‌های باکتریایی ساده‌تری ایجاد کرده و در نتیجه پایداری جوامع میکروبی را کاهش می‌دهند (۹۷). MPs به ویژه در غلظت ۲٪، می‌توانند با ایجاد فشار فیزیکی و شیمیایی بر سلول‌های میکروبی، رقابت برای منابع، و تغییر در ساختار خاک، زیستگاه طبیعی باکتری‌ها را مختل کنند. این عوامل منجر به حذف برخی گونه‌های حساس و کاهش تنوع و تعداد کل گونه‌ها در جوامع میکروبی می‌شوند (۷٤ و ٤٦). افزایش غلظت MPs می‌تواند تأثیرات منفی بیش‌تری بر اکوسیستم‌های میکروبی بگذارد، به‌طوری‌که تنها برای گونه‌های مقاوم قابل‌تحمل باشد و این خود به محدود شدن تنوع زیستی منجر می‌شود (۹۸). در واقع، شرایط تغییر یافته در حضور MPs ممکن است باعث کاهش دسترسی میکروارگانیسم‌ها به منابع غذایی شده و فعالیت‌های متابولیکی آن‌ها را مختل کند. این تأثیرات می‌تواند به کاهش شدیدتر نرخ تنفس میکروبی و تغییر در عملکرد، جمعیت و تنوع میکروبی خاک منجر شود (۹۹ و ۱۰۰) جودی و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند که افزودن میکروپلاستیک‌ها باعث کاهش قابل‌توجه نرخ تنفس میکروبی شده است (۹۹) که می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در عملکرد، جمعیت و تنوع میکروبی خاک باشد (۱٦). با توجه به وسعت آلایندگی و پایداری MPs، ضروری است که پیامدهای بالقوه حضور آن‌ها در خاک به ویژه برای میکروبیوتای خاک را بیش‌تر مورد بررسی قرار گیرد (۱۰۰).

سون و همکاران (۲۰۲۲ ب) مشاهده کردند که تأثیر پلی‌اتیلن (PE) و پلی‌استایرن (PS) بر تنوع گونه‌ای میکروارگانیسم‌ها بیش‌تر از تأثیر بر عملکرد آن‌ها است (۱۰۱). در پژوهشی دیگر، نشان داده شد که افزودن اسید پلی‌لاکتیک (PLA) و پلی‌بوتیلن سوکینات (PBS) می‌تواند عملکرد چندگانه اکوسیستم خاک شامل فرآیندهای بیوژئوشیمیایی مانند تجزیه مواد آلی، چرخه مواد مغذی و حفظ ساختار خاک را افزایش دهد (۱۰۱). با این‌حال، مقایسه اثر این پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر PLA و PBS با پلیمرهای پایداری

مانند PE و PS به‌دلیل تفاوت‌های عمده در تجزیه‌پذیری و ماندگاری در محیط، باید با احتیاط انجام شود. در حالی‌که PLA و PBS به‌طور طبیعی در محیط تجزیه می‌شوند و اثرات منفی کم‌تری بر تنوع میکروبی دارند، PE و PS به دلیل ماندگاری طولانی‌مدت خود می‌توانند باعث تجمع و ایجاد فشارهای شیمیایی و فیزیکی بر میکروارگانیسم‌ها شوند که در نهایت به کاهش تنوع و عملکرد اکوسیستم‌ها منجر می‌شود (۱۰۲). هم‌چنین، شیا و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که MPs می‌توانند با ایجاد تغییر در جمعیت باکتریایی در شالیزارها، فرآیند معدنی شدن کربن آلی را افزایش دهند (۱۰۳). این یافته‌ها تأثیرات متنوع MPs بر جوامع میکروبی خاک‌ها را که تحت‌تأثیر نوع زباله‌های MPs و اکوسیستم‌های مرتبط قرار دارند، تأکید می‌کنند. در مجموع MPs به‌طور عمده بر ویژگی‌های زیستی خاک تأثیرات منفی می‌گذارند. این ذرات می‌توانند تنوع میکروبی خاک را کاهش داده، عملکرد میکروارگانیسم‌ها را مختل کرده و بر سلول‌های میکروبی فشار فیزیکی و شیمیایی وارد کنند. هم‌چنین، مواد سمی موجود در پلاستیک‌ها می‌توانند به اکوسیستم میکروبی آسیب رسانده و فرآیندهای متابولیکی خاک را دچار اختلال کنند. در حالی‌که پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر مانند PLA و PBS تأثیرات کم‌تری بر خاک دارند، پلیمرهای با پایداری بیش‌تر مثل PE و PS به دلیل ماندگاری طولانی‌مدت، اثرات منفی چشم‌گیرتری بر عملکرد اکوسیستم‌های خاک دارند.

تأثیر MPs بر عملکرد اکولوژیکی خاک‌های کشاورزی: آلودگی MPs در خاک‌های کشاورزی باعث انسداد ریشه‌ها و کاهش جذب آب و مواد غذایی و در نتیجه کاهش عملکرد و حاصلخیزی خاک می‌شود (۱۰٤ و ۱۰۵). MPs هم‌چنین باعث استرس اکسیداتیو در گیاهان می‌شوند که به سلول‌های آن‌ها آسیب می‌زند و کیفیت محصولات را کاهش می‌دهد (۱۰٦). این آلودگی تهدیدی برای امنیت غذایی و سلامت انسان در سطح جهانی است. جدول ۱ تعدادی از مطالعات صورت گرفته در خصوص تأثیر MPs بر اکوسیستم‌های خاکی را نشان می‌دهد.

تأثیر MPs بر رشد گیاهان زراعی: MPs بر محصولات مختلف زراعی، به ویژه محصولات اصلی مانند گندم، ذرت و برنج اثرات قابل‌توجهی دارند که شامل تغییر در خصوصیات ریشه مانند طول ریشه، قطر میانگین، کل سطح ریشه و تراکم بافت ریشه است. جوانه‌زنی و زیست‌توده اندام‌های هوایی نیز تحت‌تأثیر MPs قرار گرفته‌اند که در محصولات مختلف، متفاوت بوده است (۱۱۰). به عنوان مثال، در مطالعه صورت گرفته بر تأثیر MPs بر نهال برنج، مشخص شد که MPs به دلیل خاصیت آبگریزی روی سطح ریشه جذب می‌شوند و این امر موجب کاهش تعرق و مهار فعالیت ریشه می‌گردد (۱۱۱).

در مورد محصولات اقتصادی مانند سبزیجات و میوه‌ها شامل کاهو، گوجه‌فرنگی، لوبیا، پیاز، خیار و تربچه، مطالعات متنوعی انجام شده است (جدول ۳). نتایج مطالعات انجام شده نشان داده است که پاسخ‌های فیزیولوژیکی این گیاهان به MPs بسیار متفاوت است. به‌عنوان مثال کاهو (*Lactuca sativa* L.) واکنش‌های متفاوتی به اندازه ذرات مختلف PVC و غلظت‌های مختلف آن نشان داده است. هم‌چنین، تحت تیمار پلی‌آمید (PA)، بیوماس ساقه پیاز به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت، اما تحت تیمار میکروفیبرهای پلی‌اتر سولفون (PES) تقریباً دو برابر شد (۱۰۵). در محصولاتی مانند باقلا و گوجه‌فرنگی، کاهش و تأخیر در تشکیل میوه مشاهده شده است (۸۰). با توجه به این‌که غلظت‌های MPs استفاده شده در برخی آزمایش‌ها بالاتر از مقادیر واقعی در محیط‌های کشاورزی بوده، در مطالعات آتی غلظت‌های واقعی‌تر باید در نظر گرفته شوند (۲۵).

جدول ۲- نحوه تأثیر MPs بر خاک و نوع MPs مورد مطالعه.

Table 2. How microplastics affect soil and the type of microplastics studies.

نوع MPs Type of microplastics	نحوه تأثیر MPs بر خاک How microplastics affect soil	منابع مرتبط Related references
پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن Polyethylene (PE), Polypropylene (PP)	تخریب خاکدانه‌ها و کاهش پایداری ساختاری خاک Destruction of soil aggregates and reduction of soil structural stability	(۹، ۷٦ و ۱٦) (16, 76, 9)
پلی‌اتیلن سبک، پلی‌استایرن Low-density polyethylene (LDPE), Polystyrene (PS)	کاهش ظرفیت نگهداشت رطوبت و نفوذپذیری خاک در اثر تجمع میکروپلاستیک‌ها در منافذ خاک Reduction in soil moisture retention capacity and permeability due to the accumulation of microplastics in soil pores	(۹، ٦٦ و ۱۰۷) (107, 66,9)
پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن Polyethylene (PE), Polystyrene (PS)	افزایش نرخ تنفس میکروبی و انتشار CO_2 از خاک به دلیل تعاملات با میکروپلاستیک‌ها و در نهایت تأثیر بر چرخه کربن خاک و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای Increased microbial respiration rates and CO_2 release from soil due to interactions with microplastics, ultimately affecting the soil carbon cycle and increasing greenhouse gas emissions	(۷۰، ۱۰۸ و ۲۳) (23, 108, 70)
پلی‌پروپیلن، نایلون Polypropylene (PP), Nylon	کاهش دسترسی به نیتروژن و فسفر در خاک به علت مهار فعالیت آنزیم‌های خاک و اختلال در چرخه نیتروژن و فسفر خاک Reduced availability of nitrogen and phosphorus in the soil due to inhibition of soil enzyme activity and disruption of the soil nitrogen and phosphorus cycle	(٦۹، ۱۰۷، ۷۷ و ۷٤) (74, 77, 107,69)
پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌وینیل کلراید Polyethylene Terphethalate (PET), Polyvinil Choloride (PVC)	انتقال آلاینده‌های شیمیایی مانند فلزات سنگین و دیوکسین‌ها به خاک از طریق میکروپلاستیک‌ها Transfer of chemical pollutants such as heavy metals and dioxins to soil through microplastics	(۳۷، ۳٦، ۱۰۹ و ۱۰۰) (100, 109, 36, 37)
پلی‌اتیلن، پلی‌استایرن Polyethylene (PE), Polystyrene (PS)	کاهش تنوع زیستی میکروارگانیسم‌ها و تغییر در ساختار جوامع میکروبی خاک Reduction in the biodiversity of microorganisms and changes in the structure of soil microbial communities	(۲۹، ۹۰ و ۱٦) (16, 90, 29)
پلی‌استایرن، پلی‌وینیل کلراید Polystyrene (PS), Polyvinil Choloride (PVC)	افزایش زیست‌فراهمی آلاینده‌ها و آسیب به میکروارگانیسم‌ها Increasing the bioavailability of pollutants and damage to microorganisms	(۹٦ و ۱۱۰) (110, 96)
پلی‌اتیلن سنگین، پلی‌پروپیلن High-density polyethylene (HDPE), Polypropylene (PP)	تأثیرات منفی بر تنوع و عملکرد باکتری‌های خاک Negative impacts on soil bacterial diversity and function	(۸۹، ۹۲ و ۹۰) (90, 92, 89)
پلی‌بوتیلن آدیپات ترفتالات، پلی‌اتیلن ترفتالات Pollybutylene Adipate Terephthalate (PBAT), Polyethylene Terphethalate (PET)	افزایش قابلیت جذب آلاینده‌ها توسط سطح میکروپلاستیک‌ها Increasing the ability of microplastic surfaces to absorb pollutants	(۱۰۹، ۳٦ و ۱٦) (16, 36, 109)
پلی‌وینیل کلراید، پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن ترفتالات Polyvinil Choloride (PVC), Polystyrene (PS), Polyethylene Terphethalate (PET)	اثرات چندجانبه بر ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک از جمله تغییر ساختار و افزایش تنش‌های اکوسیستمی Multifaceted effects on soil physicochemical properties, including structural changes and increased ecosystem stresses	(٥٦، ۲۸ و ٥۰) (50, 28, 56)
پلی‌استایرن، پلی‌اتیلن ترفتالات Polystyrene (PS), Polyethylene Terphethalate (PET)	تغییر فعالیت‌های میکروبی در نتیجه تماس با آلاینده‌های موجود در میکروپلاستیک‌ها Changes in microbial activity as a result of contact with contaminants in microplastics	(۳۰ و ۳۱) (31, 30)
پلی‌استایرن، پلی‌پروپیلن Polystyrene (PS), Polypropylene (PP)	کاهش حاصلخیزی و ایجاد تنش اکسیداتیو در گیاهان به دلیل تجمع میکروپلاستیک‌ها در خاک کشاورزی Reduced fertility and oxidative stress in plants due to the accumulation of microplastics in agricultural soil	(۱۰٤ و ۱) (1, 104)

جدول ۳- تعدادی از مطالعات انجام شده در خصوص تأثیر MPs بر گیاهان خوراکی.

Table 3. Some studies on the effects of microplastics on edible plants.

نوع میکروپلاستیک Type of Microplastic	غلظت میکروپلاستیک Microplastic Concentration (% w/w)	نوع گیاه Plant Type	اثرات میکروپلاستیک بر گیاه Effects of Microplastic on Plant	پاسخ فیزیولوژیک گیاه Plant Physiological Response	منبع Reference
پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)	0.5-1	توت‌فرنگی Strawberry	کاهش رشد ریشه، اختلال در جذب آب Reduced root growth, impaired water uptake	کاهش فعالیت آنتی‌اکسیدانی (کاتالاز و آسکوربات پراکسیداز)، تغییر متابولیسم کربوهیدرات‌ها Decreased antioxidant activity (catalase and ascorbate peroxidase), altered carbohydrate metabolism	(۱۱۲) (112)
پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)	0.1	کاهو Lettuce	کاهش زیست‌توده، اختلال در رشد Reduced biomass, impaired growth	افزایش مالون‌دی‌آلدهید (MDA)، تغییر فعالیت سوپراکسید دیسموتاز (SOD) Increased malondialdehyde (MDA), altered superoxide dismutase (SOD) activity	(۱۱۳) (113)
پلی‌استایرن Polystyrene (PS)	0.1-0.5	تنباکو Tobacco	کاهش رشد ریشه و ساقه، کاهش کلروفیل Reduced root and stem growth, decreased chlorophyll	افزایش پراکسید هیدروژن (H_2O_2)، افزایش فعالیت SOD و POD Increased hydrogen peroxide (H_2O_2), increased SOD and POD activity	(۱۱٤) (114)
پلی‌استایرن مثبت Polystyrene (+PS)	0.25	کاهو Lettuce	کاهش شدید رشد، سمیت سلولی Severe growth reduction, cellular toxicity	اختلال در فتوسنتز، تغییر بیان ژن‌های مرتبط با استرس، اختلال در متابولیسم آمینواسیدها Impaired photosynthesis, altered expression of stress-related genes, disrupted amino acid metabolism	(۱۱۵) (115)
پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)	0.2	ذرت Maize	کاهش رشد در شرایط ترکیبی (با نمک) Growth reduction under combined stress (with salt)	افزایش MDA، کاهش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدان Increased MDA, decreased antioxidant enzyme activity	(۱۱٦) (116)
پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)	5	کدو Pumpkin	کاهش رشد، کاهش کلروفیل Reduced growth, decreased chlorophyll	کاهش جذب عناصر (N, P, K, Mg)، اختلال در فتوسنتز Reduced nutrient uptake (N, P, K, Mg), impaired photosynthesis	(۱۱۷) (117)
مخلوط (PS, PE, PP) Mixture (PS, PE, PP)	0.05	خیار Cucumber	کاهش طول ریشه، کاهش زیست‌توده Reduced root length, reduced biomass	افزایش SOD و POD، کاهش محتوای کلروفیل Increased SOD and POD, decreased chlorophyll content	(۱۱۸) (118)
پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)	0.1	گندم‌سیاه Buckwheat	کاهش رشد، کاهش فتوسنتز Reduced growth, decreased photosynthesis	افزایش ROS، تغییر بیان ژن‌های مرتبط با استرس Increased ROS, altered stress-related gene expression	(۱۱۹) (119)
پلی‌استایرن Polystyrene (PS)	0.1	برنج Rice	کاهش ارتفاع گیاه، کاهش زیست‌توده Reduced plant height, decreased biomass	اختلال در متابولیسم کربوهیدرات‌ها و اسیدهای آلی Altered carbohydrate and organic acid metabolism	(۱۲۰) (120)

ادامه جدول ۳-

Continue Table 3.

Reference	پاسخ فیزیولوژیک گیاه Plant Physiological Response	اثرات میکروپلاستیک بر گیاه Effects of Microplastic on Plant	نوع گیاه Plant Type	غلظت میکروپلاستیک Microplastic Concentration (% w/w)	نوع میکروپلاستیک Type of Microplastic
(۱۲۱) (121)	تغییر فعالیت نیترات ردوکتاز، کاهش جذب نیترات Altered nitrate reductase activity, reduced nitrate uptake	کاهش رشد، کاهش محتوای نیتروژن Reduced growth, decreased nitrogen content	ذرت Maize	1-5	پلی‌وینیل‌کلراید Polyvinyl Chloride (PVC)
(۱۲۲) (122)	تغییر فعالیت آنزیم‌های خاک، تغییر تنفس میکروبی Changed soil enzyme activities, altered microbial respiration	کاهش فتوسنتز، تغییر میکروب‌های ریزوسفر Reduced photosynthesis, altered rhizosphere microbes	کلم چینی Chinese cabbage		نانو/ میکروپلاستیک‌ها Nano/ Microplastics
(۱۲۳) (123)	افزایش پرولین، افزایش فعالیت SOD و CAT Increased proline, increased SOD and CAT activity	کاهش رشد ساقه، کاهش کلروفیل Reduced stem growth, decreased chlorophyll	توت‌سفید White mulberry	0.1-0.5	پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)
(۱۲٤) (124)	اختلال در هومئوستازی ردوکس، تغییر متابولیسم کربوهیدرات‌ها، اختلال در شبکه هورمونی Disrupted redox homeostasis, altered carbohydrate metabolism, impaired hormonal network	کاهش رشد، استرس اکسیداتیو Reduced growth, oxidative stress	جو Barley	0.1	پلی‌استایرن Polystyrene (PS)
(۱۲٥) (125)	کاهش ROS، کاهش آسیب فتوسیستم II Reduced ROS, decreased photosystem II damage	کاهش سمیت فلورفنیکل (اثر ترکیبی) Reduced florfenicol toxicity (combined effect)	برنج Rice	0.05	پلی‌استایرن Polystyrene (PS)
(۱۲٦) (126)	افزایش MDA، کاهش SOD/CAT، آسیب غشای سلولی Increased MDA, decreased SOD/CAT, cell membrane damage	کاهش رشد برگ، کلروز Reduced leaf growth, chlorosis	خیار Cucumber	0.01	پلی‌استایرن نانوذرات (۱۰۰ nm) Polystyrene nanoparticles (100 nm)
(۱۲۷) (127)	تغییر بیان ژن‌های مرتبط با استرس، اختلال در جذب عناصر Altered stress-related gene expression, impaired nutrient uptake	کاهش رشد ریشه، کاهش عملکرد دانه Reduced root growth, decreased grain yield	برنج Rice	0.5	پلی‌اتیلن (PE) و زیست‌تجزیه‌پذیر Polyethylene (PE) and biodegradable
(۱۲۸) (128)	کاهش Fv/Fm، تخریب پیگمان‌های فتوسنتزی Decreased Fv/Fm, degradation of photosynthetic pigments	کاهش شدید فتوسنتز در شرایط ترکیبی Severe photosynthesis reduction under combined stress	خیار Cucumber	0.05	مخلوط (PS + DnOP) Mixture (PS + DnOP)
(۱۲۹) (129)	کاهش محتوای آب برگ، افزایش نفوذپذیری غشا Decreased leaf water content, increased membrane permeability	کاهش رشد، تغییر خصوصیات خاک Reduced growth, altered soil properties	پنبه Cotton	1-5	پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)
(۱۳۰) (130)	مهار فعالیت آنزیم‌های نیترات ردوکتاز (NR) و گلوتامین سنتتاز (GS)، اختلال در متابولیسم نیتروژن Inhibition of nitrate reductase (NR) and glutamine synthetase (GS), disrupted nitrogen metabolism	کاهش جذب نیترات، کاهش رشد Reduced nitrate uptake, reduced growth	گندم Wheat	0.1-1	پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)

تأثیر MPs بر ذخیره کربن و چرخه نیتروژن: MPs مانند پلی‌استایرن و پلی‌اتیلن که دارای بیش از ۸۰٪ کربن هستند (۷۰)، می‌توانند بر چرخه کربن خاک تأثیرگذار باشند (۱۶). اگرچه این پلیمرها دارای محتوای بالای ربن هستند، اما به دلیل ساختار پلیمری پایدار و سرعت تجزیه بسیار پایین، کربن موجود در آن‌ها مستقیماً وارد چرخه زیستی خاک نمی‌شود و برای میکروارگانیسم‌ها کم‌تر قابل استفاده است؛ در نتیجه، نقش آن‌ها در چرخه کربن عمدتاً غیرمستقیم بوده و از طریق تأثیر بر زیست‌توده میکروبی، تنفس خاک و فعالیت آنزیمی اعمال می‌شود (۱۰۰ و ۷۰).

برخی پژوهش‌ها بیان کرده‌اند که MPs با ایجاد سطوح متخلخل، امکان استقرار بیش‌تر میکروب‌ها را فراهم کرده و ممکن است نرخ تنفس میکروبی را افزایش دهند (۱۳۲)، اما مطالعاتی دیگر کاهش قابل‌توجه این نرخ را گزارش کرده‌اند که می‌تواند ناشی از اختلال در فعالیت، ساختار و تنوع میکروبی در اثر حضور میکروپلاستیک‌ها باشد (۹۹ و ۱۶). این تفاوت‌ها احتمالاً به نوع پلیمر، غلظت مصرفی، مدت زمان قرارگیری در خاک و شرایط فیزیکی و شیمیایی محیط بستگی دارد که جهت و شدت اثر MPs را بر فرندها زیستی خاک تعیین می‌کند.

مطالعات نشان داده که MPs می‌توانند انتشار CO_2 از خاک را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهند که در نهایت باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای از خاک می‌شوند (جدول ۳). در پژوهشی نشان داده شد که انتشار CO_2 از خاک تیمار شده با LDPE، به میزان هفت تا هشت برابر بیش‌تر از خاک شاهد بوده است (۱۳۳). این افزایش عمدتاً ناشی از تغییر در ترکیب و فعالیت جوامع میکروبی خاک است؛ به‌گونه‌ای که وجود MPs باعث تحریک رشد برخی میکروارگانیسم‌ها و افزایش تجزیه مواد آلی می‌شود. هم‌چنین LDPE با تغییر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، از جمله افزایش هدایت الکتریکی و تغییر در pH و دسترسی مواد مغذی، شرایط مناسبی برای فعالیت‌های میکروبی فراهم می‌کند که در نهایت به افزایش نرخ تنفس میکروبی و تولید CO_2 منجر می‌گردد (۱۳۳). MPs هم‌چنین می‌توانند بر ژنوم میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده کربن تأثیر بگذارند و اثرات مختلفی را براساس نوع پلاستیک نشان دهند. مثلاً LDPE بر تجزیه سلولز تأثیر دارد در حالی‌که بر روی پلی‌استر چنین اثری ندارد (۱۳٤، ۹٤ و ۱۱۰).

تغییر شرایط زیست‌محیطی خاک، اختلال در میکروبیوم و انتقال آلاینده‌ها توسط MPs می‌تواند بر فرایندهای کلیدی چرخه نیتروژن مانند نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون تأثیر منفی بگذارد (جدول ۳). این اثرات ممکن است منجر به کاهش کارایی چرخه نیتروژن و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شوند (۱۳۵). تجمع MPs در خاک ممکن است باعث ایجاد شرایط تهویه‌ای نامناسب شود که با تأثیر بر میکروارگانیسم‌های دنیتریفیکاسیون، راندمان این فرایند را کاهش داده و تولید گازهای گلخانه‌ای مانند N_2O را افزایش می‌دهد (۱۰۷) (Gao et al., 2021). تجمع MPs در خاک، با ایجاد اختلال در ساختار فیزیکی و کاهش تهویه، شرایط زیستی نامطلوبی برای میکروارگانیسم‌های دنیتریفیکاسیون فراهم می‌کند و این امر موجب کاهش راندمان این فرایند و افزایش تولید گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه نیتروس‌اکسید (N_2O) می‌شود (۱۰۷).

MPs با تشدید دنیتریفیکاسیون ناقص، سهم گازهای مضری مانند N_2O را در خروجی افزایش می‌دهند، در حالی‌که در دنیتریفیکاسیون کامل، نیترات به گاز بی‌ضرر N_2 تبدیل می‌شود (۱۳٦ و ۱۳۷). بنابراین، حضور MPs می‌تواند به‌طور مستقیم بر چرخه نیتروژن و شدت تغییرات اقلیمی تأثیرگذار باشد (۱۳۸). هم‌چنین MPs می‌توانند از طریق ایجاد شرایط نامساعد فیزیکی در خاک و محدود کردن شرایط رشدی باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک، فرآیند نیتریفیکاسیون

را کند کنند (۱۰۷). برای کاهش این اثرات، مدیریت آلایندگی MPs در خاک و آب ضروری است. از جمله راهکارهای مدیریتی می‌توان به کاهش ورودی پلاستیک‌ها به خاک از طریق محدود کردن استفاده از کودهای آلی آلوده (Ng et al., 2020)، به‌کارگیری فیلم‌های زیست‌تخریب‌پذیر در کشاورزی (۱۳۹)، بهبود فرایندهای تصفیه فاضلاب جهت حذف MPs (۱٤۰)، و ارتقای سیستم‌های بازیافت پسماندهای پلاستیکی در مزارع اشاره کرد. هم‌چنین پایش منظم میزان آلودگی MPs در خاک‌های کشاورزی و آموزش کشاورزان درباره پیامدهای زیست‌محیطی این آلاینده‌ها می‌تواند نقش مهمی در کاهش خطرات ناشی از آن‌ها ایفا کند (۹۱).

جدول ٤- تعدادی از مطالعات انجام شده درباره تأثیر MPs بر ذخیره کربن و چرخه نیتروژن.

Table 4. A number of studies on the effect of microplastics on carbon storage and nitrogen cycle.

منبع Reference	عنوان مقاله Article Title	تأثیرات Effects	غلظت Concentration	نوع میکروپلاستیک Type of Microplastic
(۱٤۲) (142)	Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage	افزایش انتشار CO_2 و کاهش پایداری کربن در خاک Increased CO_2 emissions and reduced carbon stability in soil Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage	1% w/w	پلی‌اتیلن Polyethylene (PE)
(۱۱۰) (110)	Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil	کاهش تشکیل تجمعات خاک و تخریب چرخه کربن Reduced soil aggregate formation and disruption of the carbon cycle	0.5%	پلی‌استایرن Polystyrene (PS)
(۱٤۳) (143)	Can microplastics mediate soil properties, plant growth and carbon/nitrogen turnover in the terrestrial ecosystem?	افزایش کربن فعال خاک و فعالیت میکروبی Increased active soil carbon and microbial activity	2%	پلیمرهای زیست‌تخریب‌پذیر Biodegradable polymers
(۱٤٤) (144)	Effects of microplastics on denitrification and associated N_2O emission in estuarine and coastal sediments: insights from interactions between sulfate reducers and denitrifies	کاهش کارایی تثبیت نیتروژن Reduced nitrogen fixation efficiency	5%	پلی‌پروپیلن Polypropylene (PP)
(۱٤٥) (145)	Microplastic presence significantly alters soil nitrogen transformation and decreases nitrogen bioavailability under contrasting temperatures	تغییر در pH خاک و کاهش فعالیت‌های بیوشیمیایی Changes in soil pH and decreased biochemical activities	3%	الیاف تایر Tire fibers
(۱٤٦) (146)	Interactive effects of microplastics, biochar, and earthworms on CO_2 and N_2O emissions and microbial functional genes in vegetable-growing soil	تغییر در ساختار خاک و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای Altered soil structure and increased greenhouse gas emissions	1%	پلاستیک ترکیبی Mixed plastics
(۱٤۷) (147)	New insights into the photo-degraded polystyrene microplastic: Effect on the release of volatile organic compounds	کاهش نرخ تجزیه مواد آلی و تأثیرات منفی بر تثبیت نیتروژن Reduced organic matter decomposition rate and negative effects on nitrogen fixation	0.2%	پلی‌وینیل کلراید Polyvinyl chloride (PVC)
(۱٤۸) (148)	Effects of microplastics and carbon nanotubes on soil geochemical properties and bacterial communities	افزایش فعالیت میکروبی و کاهش نیتروژن معدنی Increased microbial activity and reduced mineral nitrogen	1%	پلی‌لاکتیک‌اسید Polylactic acid (PLA)

ادامه جدول ٤-

Continue Table 4.

نوع میکروپلاستیک Type of Microplastic	غلظت Concentration	تأثیرات Effects	عنوان مقاله Article Title	منبع Reference
پلی‌اتیلن گلیکول Polyethylene glycol (PEG)	0.5%	تغییر در تنوع زیستی خاک و کاهش کربن آلی Changes in soil biodiversity and reduced organic carbon	Ecotoxicological effects of different size ranges of industrial-grade polyethylene and polypropylene microplastics on earthworms Eisenia fetida	(۱۲٤) (124)
پلی‌کربنات Polycarbonate (PC)	3%	افزایش ناپایداری خاک و کاهش ذخیره کربن Increased soil instability and reduced carbon storage	Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a function of microplastic shape, polymer type, and exposure time	(۱٤۹) (149)
پلی‌پروپیلن Polypropylene (PP)	7-28%	افزایش مواد آلی محلول و تشکیل ترکیبات آروماتیک Increased dissolved organic matter and formation of aromatic compounds	Plant Cadmium Toxicity and Biomarkers Are Differentially Modulated by Degradable and Nondegradable Microplastics in Soil	(۱۵۰) (150)
پلی‌استایرن Polystyrene (PS)	1%	تغییر ترکیب مواد آلی محلول (DOM) و افزایش فراهمی آن Altered dissolved organic matter (DOM) composition and increased availability	The photo-redox of chromium regulated by microplastics (MPs) and MPs-derived dissolved organic matter (MPs-DOM) and the CO_2 emission of MPs-DOM	(۱۵۱) (151)
پلی‌لاکتیک‌اسید Polylactic acid (PLA)	0.5-1%	تغییر فعالیت میکروبی و بهبود قابلیت دسترسی مواد آلی Modified microbial activity and improved organic matter availability	Biodegradable microplastics enhance soil microbial network complexity and ecological stochasticity	(۱۰۲) (102)
پلی‌اتیلن سبک Low-density polyethylene (LDPE)	0.01-1%	کاهش محتوای کربن آلی خاک (SOC) و تأثیر بر ساختار تجمعات خاک Reduced soil organic carbon (SOC) and effects on soil aggregate structure	Fate of plastic film residues in agro-ecosystem and its effects on aggregate-associated soil carbon and nitrogen stocks	(۱۵۲) (152)
PBAT	5-10%	افزایش آروماتیک‌بودن و تغییر در وزن مولکولی DOM Increased aromaticity and changes in DOM molecular weight	Addition of biodegradable microplastics alters the quantity and chemodiversity of dissolved organic matter in latosol	(۱۵۳) (153)
پلی‌وینیل کلراید Polyvinyl chloride (PVC)	0.2%	کاهش تشکیل تجمعات خاک و افزایش انتشار CO_2 Reduced soil aggregation and increased CO_2 emissions	Critical effect of biodegradation on long-term microplastic weathering in sediment environments: a systematic review	(۱۵٤) (154)
میکروپلاستیک‌های ترکیبی Mixed microplastics	3%	تغییرات ساختاری خاک و کاهش توان تثبیت نیتروژن Structural soil changes and reduced nitrogen fixation capacity	Effects of microplastics on soil carbon mineralization: the crucial role of oxygen dynamics and electron transfer	(۱۰۳) (103)
الیاف پلاستیک Plastic fibers	0.05-0.1%	تأثیر منفی بر فعالیت میکروبی و کاهش نیتروژن معدنی Negative effects on microbial activity and reduced mineral nitrogen	Effects of microplastics on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in the context of straw incorporation: a comparison with different types of soil	(۱۵۵) (155)
پلی‌لاکتیک‌اسید و پلی‌بوتیلن سوکسینات Polylactic acid (PLA) Polybutylene Succinate (PBS)	0.1-10%	افزایش MBC و SOC در خاک Increased microbial biomass carbon (MBC) and soil organic carbon (SOC)	Effect of polylactic acid microplastics on soil properties, soil microbials and plant growth	(۱۵٦) (156)

مالچ‌های بیوپلاستیک: اخیراً بیوپلاستیک‌ها (BP) که برای نخستین بار در دهه ۱۹۷۰ سنتز شدند به عنوان یک جایگزین مناسب برای مالچ‌های پلاستیکی پلی‌اتیلن در نظر گرفته شده‌اند (۱۵۷، ۱۵۸ و ۱۵۹). انجمن مواد و آزمون آمریکا (ASTM) در سال ۲۰۱۲ بیوپلاستیک را به عنوان ماده‌ای طبیعی تعریف کرد که می‌تواند توسط میکروارگانیسم‌ها تجزیه شده و به دی‌اکسید کربن (CO_2)، آب (H_2O) و زیست‌توده در شرایط هوازی تبدیل شود (۱٦۰). تقاضا برای استفاده از بیوپلاستیک‌ها در صنعت بسته‌بندی و کشاورزی در حال افزایش است. بیوپلاستیک‌ها (مانند پلی‌هیدروکسی بوتیرات (PHB)، پلی‌بوتیلن ساکنات، پلی‌کاپرولاکتون (PCL)، پلی‌هیدروکسی الکانوات (PHA)، پلی‌بوتیلن آدیپات-کوتره‌فتالات (PBAT)، اسید پلی‌لاکتیک (PLA)، پلی‌گلیکولید و ترکیب‌های پایه نشاسته حدود ۱٪ از ۳۵۹ میلیون تن مواد پلاستیکی تولید شده در هر سال را تشکیل می‌دهند (۱٦۱). پیش‌بینی شده بود که تا سال ۲۰۲٤ تولید بیوپلاستیک‌ها به حدود ۲/٤۷ میلیون تن در سطح جهانی افزایش یابد (۱٦۲). بسیاری از انواع بیوپلاستیک‌ها در شرایط مناسب تجزیه می‌شوند؛ با این حال، تجزیه ۱۰۰٪ فقط در حضور کمپوست‌های مصنوعی امکان‌پذیر است. تجزیه بیوپلاستیک‌ها معمولاً ناقص است و منجر به تولید مقدار قابل‌توجهی MPs در محیط طبیعی می‌شود (۱٦۳). در پژوهشی اثر فیلم‌های بیوپلاستیک که نوعی از پلاستیک‌های نازک و انعطاف‌پذیر هستند که از منابع زیست پایه (مانند نشاسته، ذرت، نیشکر یا سیب زمینی) یا مواد زیست‌تخریب‌پذیر ساخته می‌شوند بر ویژگی‌های خاک و محصولات در طول فصل رشد مورد مطالعه قرار گرفته است (۱۵۷). نتایج نشان داده که فرایند تجزیه فیلم‌های بیوپلاستیک به اندازه‌ای سریع است که نمی‌تواند در اواخر فصل رشد تأثیر بگذارد (۷۳ و ۱٦٤). با این‌حال پژوهش‌گران گزارش داده‌اند که در طول دوره کاربرد مالچ‌های بیوپلاستیک، استرهای فتالات که در تولید پلاستیک به عنوان نرم‌کننده استفاده می‌شوند (۱٦۵)، به‌طور مداوم آزاد می‌شوند و باعث آلایندگی خاک شده که این امر تهدیدی برای محیط خاک و امنیت غذایی به وجود می‌آورد (۱٦٦ و ۱٦۷).

استفاده از مواد زیست‌تجزیه‌پذیر که موجب کاهش استحکام کششی فیلم‌ها می‌شود یکی از ایراداتی است که در توسعه فناوری فیلم‌های کشاورزی بیوپلاستیک وجود دارد (۱٦۸). MPs زیست‌تجزیه‌پذیر دارای ویژگی‌هایی مانند خاصیت آبگریز قوی و تحرک بالا هستند؛ بنابراین قادرند با مواد شیمیایی آلی مانند PCBs، PAHs، دی‌پنیل اترهای پلی‌برمینه و نونیل‌فنول اتیوکسیله پیوند تشکیل دهند (۱٦۹، ۱۷۰، ۱۷۱ و ۱۷۲). شروتی و همکاران (۲۰۱۹) دریافتند که ظرفیت‌های جذب و دفع پلی‌بوتیلن آدیپات-کوتره فتالات (PBAT) بیش‌تر از سایر انواع میکروپلاستیک‌ها است (۱۰۹). این پژوهش‌گران هم‌چنین دریافتند که MPs زیست‌تجزیه‌پذیر در مقایسه با MPs معمولی غیرزیست‌تجزیه‌پذیر، به‌عنوان ناقل برای ماده شیمیایی فنانترن عمل می‌کنند (۱۰۹). مطالعات سم‌شناسی نشان داده‌اند که هم بیوپلاستیک‌ها و هم MPs معمولی تأثیرات سمی مشابهی بر روی موجودات دارند (۱۷۳).

نتیجه‌گیری

امروزه MPs به‌عنوان آلاینده‌های جدید و پایدار شناخته شده‌اند که توجه جهانی را به آلودگی خاک جلب کرده‌اند. فعالیت‌های متعدد انسانی، از جمله دفع لجن‌های فاضلاب، مالچ‌پاشی پلاستیکی، زباله‌های خانگی و صنعتی، بارندگی و کوددهی مبتنی بر کمپوست، منابع مهمی هستند که منجر به آلودگی MPs در محیط‌های خاکی می‌شوند. MPs می‌توانند

از طریق مکانیزم‌های بیولوژیکی و فیزیکی در خاک منتقل شده و حرکت آن‌ها تحت‌تأثیر عواملی مانند ویژگی‌های خود MPs، خصوصیات اکوسیستم خاک و فعالیت‌های کشاورزی قرار دارد. MPs اثرات مستقیم و غیرمستقیم در جوامع میکروبی و ویژگی‌های خاک‌های کشاورزی دارند. آن‌ها به‌عنوان حامل میکروآلاینده‌ها (مانند فلزات سنگین، بقایای داروها و آنتی بیوتیک‌ها، مواد شیمیایی حاصل از آفت‌کش‌ها و علف‌کش‌ها) عمل کرده و انتقال آن‌ها به بیوتای خاک را تسهیل می‌کنند و این امر باعث به خطر افتادن اکوسیستم‌های خاک می‌شود. با توجه به نقش حیاتی سیستم‌های کشاورزی در تولید غذا، بررسی پیامدهای زیست‌محیطی میکروپلاستیک‌ها در مزارع ضروری است. این ارزیابی‌ها برای درک هر گونه تأثیر منفی بالقوه که می‌تواند رفاه و پایداری نسل‌های آینده را به خطر بیندازد، دارای اهمیت است. در این میان، چالش‌های قابل‌توجهی باقی‌مانده است که ادامه پژوهش‌ها و همکاری‌های جهانی برای کاهش تأثیرات MPs بر محیط‌زیست و سلامت انسان را ضروری می‌سازد.

منابع

1. Le, V. G., Nguyen, M. K., Lin, C., Nguyen, H. L., Nguyen, T. Q. H., Hue, N. K., Truong, Q. M., Chang, S. W., Nguyen, X. H., & Nguyen, D. D. (2024). Review on personal protective equipment: Emerging concerns in micro (nano) plastic pollution and strategies for addressing environmental challenges. *Environmental Research*, 119345. **doi.org/10.1016/j.envres.2024.119345.**
2. Walker, T. R., & Fequet, L. (2023). Current trends of unsustainable plastic production and micro (nano) plastic pollution. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 160, 116984. **doi.org/10.1016/j.trac.2023.116984.**
3. Lamichhane, G., Acharya, A., Marahatha, R., Modi, B., Paudel, R., Adhikari, A., Raut, B., Aryal, S., & Parajuli, N. (2023). Microplastics in environment: global concern, challenges, and controlling measures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(4), 4673-4694. **doi.org/10.1007/s13762-022-04261-1.**
4. Nguyen, M. K., Rakib, M. R. J., Lin, C., Hung, N. T. Q., Le, V. G., Nguyen, H. L., Malafaia, G., & Idris, A. M. (2023). A comprehensive review on ecological effects of microplastic pollution: An interaction with pollutants in the ecosystems and future perspectives. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 117294. **doi.org/10.1016/j.trac.2023.117294.**
5. Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and Human Health: A Micro Issue? *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6634-6647. **doi.org/10.1021/acs.est.7b00423.**
6. Carpenter, E. J., & Smith Jr, K. L. (1972). Plastics on the Sargasso Sea surface. *Science*, 175(4027), 1240-1241.
7. Okeke, E. S., Okoye, C. O., Atakpa, E. O., Ita, R. E., Nyaruaba, R., Mgbechidinma, C. L., & Akan, O. D. (2022). Microplastics in agroecosystems-impacts on ecosystem functions and food chain. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105961. **doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105961.**
8. Tran, H. T., Lin, C., Bui, X. T., Nguyen, M. K., Cao, N. D. T., Mukhtar, H., Hoang, H. G., Varjani, S., Ngo, H. H., & Nghiem, L. D. (2022). Phthalates in the environment: characteristics, fate and transport, and advanced wastewater treatment technologies. *Bioresource Technology*, 344, 126249. **doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126249.**
9. de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018). Impacts of

microplastics on the soil biophysical environment. *Environmental Science & Technology*, 52(17), 9656-9665. **doi.org/ 10.1021/acs.est.8b02212.**

10. Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. *Science*, 347(6223), 768-771. **DOI: 10.1126/science.1260352.**
11. Ky, T. N., Van-Re, L. M., & Zhu, J. (2023). Occurrence, distribution, and characteristics of microplastics in agricultural soil around a solid waste treatment center in southeast China. *Journal of Soils and Sediments*, 23(2), 936-946. **doi.org/10.1007/s11368-022-03341-6.**
12. Arkatkar, A., Arutchelvi, J., Bhaduri, S., Uppara, P. V., & Doble, M. (2009). Degradation of unpretreated and thermally pretreated polypropylene by soil consortia. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(8), 1069-1074. **doi.org/10.1016/j. ibiod.2009.09.001.**
13. Ali, M. I., Ahmed, S., & Khan, F. (2014). Isolation and molecular characterization of polyvinyl chloride (PVC) plastic degrading fungal isolates. *Journal of Basic Microbiology*, 54(1), 18-27. **doi.org/10.1002/jobm. 201200477.**
14. Santana, J. H. P., Souza, A. A. U., & D'Avila, M. A. (2012). Biodegradation of a polylactic acid/polyvinyl chloride blend in soil. *Polymer Degradation and Stability*, 97(9), 1360-1365. **doi.org/10. 1016/j.polymdegradstab.2012.05.006.**
15. Otake, Y., Kobayashi, T., Asabe, H., Murakami, N., & Ono, K. (1995). Biodegradation of low-density polyethylene, polystyrene, polyvinyl chloride, and urea formaldehyde resin buried under soil for over 32 years. *Journal of Applied Polymer Science*, 56(13), 1789-1796. **doi.org/10.1002/app. 1995.070561309.**
16. Hoang, V. H., Nguyen, M. K., Hoang, T. D., Ha, M. C., Huyen, N. T. T., Bui, V. K. H., Pham, M. T., Nguyen, C. M., Chang, S. W., & Nguyen, D. D. (2024). Sources, environmental fate, and impacts of microplastic contamination in agricultural soils: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 950, 175276. **doi.org/10.1016/j.scitotenv. 2024.175276IFIS Collections.**
17. Zhu YongGuan, Z. Y., Zhu Dong, Z. D., Xu Tong, X. T., & Ma Jun, M. J. (2019). Impacts of (micro) plastics on soil ecosystem: progress and perspective. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(1), 1-6. [In Chinese]
18. Büks, F., & Kaupenjohann, M. (2020). Global concentrations of microplastic in soils, a review. *Soil Discussions*, 2020, 1-26. **doi.org/10.5194/soil-6-649-2020, 2020.**
19. Liu, Y., Shao, H., Liu, J., Cao, R., Shang, E., Liu, S., & Li, Y. (2021). Transport and transformation of microplastics and nanoplastics in the soil environment: A critical review. *Soil use and management*, 37(2), 224-242. **Doi. org. 10.1111/sum.12709.**
20. Li, H. Z., Zhu, D., Lindhardt, J. H., Lin, S. M., Ke, X., & Cui, L. (2021). Long-term fertilization history alters effects of microplastics on soil properties, microbial communities, and functions in diverse farmland ecosystem. *Environmental Science & Technology*, 55(8), 4658-4668. **doi.org/10.1021/acs.est.0c04849.**
21. Nizzetto, L., Bussi, G., Futter, M. N., Butterfield, D., & Whitehead, P. G. (2016). A theoretical assessment of microplastic transport in river catchments and their retention by soils and river sediments. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 18(8), 1050-1059. **doi.org/10.1039/C6EM00206D.**
22. Huang, Y., Liu, Q., Jia, W., Yan, C., & Wang, J. (2019). Microplastic pollution: A threat to ecosystem functioning and services. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 50(22), 2211-2247. **Doi.org.10.1080/ 10643389.2019.1694821.**

23. Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., Deng, J., Luo, Y., Wen, X., & Zhang, Y. (2021). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 405, 124187. **doi.org/10.1016/j.jhazmat. 2020.124187.**
24. Zhang, G., & Liu, Y. (2018). The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China. *Science of the Total Environment*, 642, 12-20. 22. **Doi.Org. 10.1016/j.scitotenv.2018.06.004.**
25. Jin, T., Tang, J., Lyu, H., Wang, L., Gillmore, A. B., & Schaeffer, S. M. (2022). Activities of microplastics (MPs) in agricultural soil: a review of MPs pollution from the perspective of agricultural ecosystems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 70(14), 4182-4201. **Doi.org.10.1021/ acs.jafc.1c07849.**
26. Chukwuemeka, I. S., Li, G., Mo, Y., & Jacques, K. J. (2024). Impacts of microplastics and urbanization on soil health: an urgent concern for sustainable development. *Green Analytical Chemistry*, 100095. **Doi.org.10.1016/j.greeac.2024. 100095 (Early access).**
27. Song, Y. K., Hong, S. H., Jang, M., Han, G. M., Jung, S. W., & Shim, W. J. (2017). Combined effects of UV exposure duration and mechanical abrasion on microplastic fragmentation by polymer type. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4368-4376. **Doi.org.10.1021/acs.est.6b06155.**
28. Bolan, N. S., Kirkham, M. B., Halsband, C., Nugegoda, D., & Ok, Y. S. (2020). Particulate plastics in terrestrial and aquatic environments. CRC Press.
29. Bolan, N., & Bradney, L. (2019). Particulate plastics in soils. Chemistry in Australia, 18-20.
30. Gaylor, M. O., Harvey, E., & Hale, R. C. (2013). Polybrominated diphenyl ether (PBDE) accumulation by earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to biosolids-, polyurethane foam microparticle-, and penta-BDE-amended soils. *Environmental Science & Technology*, 47(23), 13831-13839. **Doi.org.10.1021/es403640a.**
31. Oliviero, M., Tato, T., Schiavo, S., Fernández, V., Manzo, S., & Beiras, R. (2019). Leachates of micronized plastic toys provoke embryotoxic effects upon sea urchin Paracentrotus lividus. *Environmental Pollution*, 247, 706-715. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2019.02.037.**
32. Wei, W., Huang, Q. S., Sun, J., Wang, J. Y., Wu, S. L., & Ni, B. J. (2019). Polyvinyl chloride microplastics affect methane production from the anaerobic digestion of waste activated sludge through leaching toxic bisphenol-A. *Environmental Science & Technology*, 53(5), 2509-2517. **Doi.org.10.1021/ acs.est.8b06043.**
33. Yan, M., Nie, H., Xu, K., He, Y., Hu, Y., Huang, Y., & Wang, J. (2020). Microplastics in the surface sediments from the Beijiang River littoral zone: Composition, abundance, and source identification. *Science of the Total Environment*, 711, 134979. **Doi.org.10. 1016/j.scitotenv.2019.134979.**
34. Kumar, M., Kumar, M., Pandey, A., & Thakur, I. S. (2019). Genomic analysis of carbon dioxide sequestering bacterium for exopolysaccharides production. *Scientific reports*, 9(1), 4270. **Doi. org. 10.1038/s41598-019-40833-x.**
35. Kumar, R. (2020). HDPE microplastics reduce nutrient uptake in tea plants. *Tea Science and Research*, 23, 89-100.
36. Zhang, S., Wang, J., Liu, X., Qu, F., Wang, X., Wang, X., Li, Y., & Sun, Y. (2019). Microplastics in the environment: A review of analytical methods, distribution, and biological effects. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 111, 62-72. **Doi.org.10.1016/j.trac.2018. 12.002.**
37. Avio, C. G., Gorbi, S., Milan, M., Benedetti, M., Fattorini, D., d'Errico, G., Pauletto, M., Bargelloni, L., & Regoli,

F. (2015). Pollutants bioavailability and toxicological risk from microplastics to marine mussels. *Environmental Pollution*, 198, 211-222. **Doi.org.10.1016/j.envpol. 2014.07.026.**

38. Chua, E. M., Shimeta, J., Nugegoda, D., Morrison, P. D., & Clarke, B. O. (2014). Assimilation of polybrominated diphenyl ethers from microplastics by the marine amphipod, Allorchestes compressa. *Environmental Science & Technology*, 48(14), 8127-8134. **Doi.org.10.1021/es5013852.**
39. He, D., Luo, Y., Lu, S., Liu, M., Song, Y., & Lei, L. (2018). Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 109, 163-172. **Doi.org.10.1016/j.trac. 2018.07.029.**
40. Karbalaei, S., Hanachi, P., Walker, T. R., & Cole, M. (2018). Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution. *Environmental science and pollution research*, 25, 36046-36063. **Doi.org.10. 1007/s11356-018-3508-7.**
41. Paul, A., Wander, L., Becker, R., Goedecke, C., & Braun, U. (2019). High-throughput NIR spectroscopic (NIRS) detection of microplastics in soil. *Environmental science and pollution research*, 26, 7364-7374. **Doi. org. 10.1007/s11356-018-2590-1.**
42. Rillig, M. C., Ingraffia, R., & de Souza Machado, A. A. (2017). Microplastic incorporation into soil in agroecosystems. *Frontiers in plant science*, 8, 1805. **Doi.org.10.3389/fpls.2017.01805.**
43. Liu, C., Li, J., Zhang, Y., Wang, L., Deng, J., Gao, Y., Yu, L., Zhang, J., & Sun, H. (2019). Widespread distribution of PET and PC microplastics in dust in urban China and their estimated human exposure. *Environment international*, 128, 116-124. **Doi.org.10.1016/j.envint. 2019.05.021.**
44. Maaß, S., Daphi, D., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2017). Transport of microplastics by two collembolan species. *Environmental Pollution*, 225, 456-459. **Doi.org.10.1016/j.envpol. 2017.03.009.**
45. Waldschläger, K., Lechthaler, S., Stauch, G., & Schüttrumpf, H. (2020). The way of microplastic through the environment–Application of the source-pathway-receptor model. *Science of the Total Environment*, 713, 136584. **Doi. org.10.1016/j.scitotenv.2020.136584.**
46. Wang, T., Wang, L., Chen, Q., Kalogerakis, N., Ji, R., & Ma, Y. (2020). Interactions between microplastics and organic pollutants: Effects on toxicity, bioaccumulation, degradation, and transport. *Science of the Total Environment*, 748, 142427. **Doi.org.10. 1016/j.scitotenv.2020.142427.**
47. Zhang, L., Xie, Y., Liu, J., Zhong, S., Qian, Y., & Gao, P. (2020). An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers. *Environmental Science & Technology*, 54(7), 4248-4255. **Doi.org.10.1021/acs. est.9b07905.**
48. Li, J., Zhang, K., & Zhang, H. (2018). *Environmental Pollution*, 237, 460-467.
49. Shen, M., Zeng, Z., Wen, X., Ren, X., Zeng, G., Zhang, Y., & Tang, W. (2019). Presence of microplastics in agricultural soils and their potential threat to food safety. *Soil Systems*, 3(2), 33. **Doi.org.10.3390/soilsystems 3020033.**
50. Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2017). Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil. *Chemosphere*, 185, 907-917. **Doi.org.10. 1016/j.chemosphere.2017.07.064.**
51. Zhou, Q., Zhang, H., Fu, C., Zhou, Y., Dai, Z., Li, Y., Tu, C., & Luo, Y. (2020). The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Geoderma*, 361, 114097. **Doi.org.10. 1016/j.geoderma.2019.114097.**

52.Li, J., Song, Y., & Cai, Y. (2020). Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks. *Environmental Pollution*, 257, 113570. **Doi.org.10.1016/j.envpol. 2019.113570.**

53.Gabet, E. J., Reichman, O., & Seabloom, E. W. (2003). The effects of bioturbation on soil processes and sediment transport. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 31(1), 249-273. **Doi.org.10. 1146/annurev.earth.31.100901.141314.**

54.Huerta Lwanga, E., Gertsen, H., Gooren, H., Peters, P., Salánki, T., Van Der Ploeg, M., Besseling, E., Koelmans, A. A., & Geissen, V. (2016). Microplastics in the terrestrial ecosystem: implications for Lumbricus terrestris (Oligochaeta, Lumbricidae). *Environmental Science & Technology*, 50(5), 2685-2691. **Doi.org. 10.1021/acs.est.5b05478.**

55.Liu, X., Zhang, Q., & Zhang, W. (2021). Impact of microplastics on soil enzyme activities and microbial communities: A review. *Environmental Pollution*, 274, 115921. **Doi.org.10.1016/j.envpol. 2020.115921.**

56.Chae, Y., & An, Y. J. (2018). Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review. *Environmental Pollution*, 240, 387-395. **Doi.org.10. 1016/j.envpol.2018.05.008.**

57.Tian, L., Chen, Q., Jiang, W., Wang, L., Xie, H., Kalogerakis, N., Ma, Y., & Ji, R. (2019). A carbon-14 radiotracer-based study on the phototransformation of polystyrene nanoplastics in water versus in air. *Environmental Science: Nano*, 6(9), 2907-2917. **Doi.org.10. 1039/C9EN00551J.**

58.Lambert, S., & Wagner, M. (2016). Characterisation of nanoplastics during the degradation of polystyrene. *Chemosphere*, 145, 265-268. **Doi.org. 10.1016/j.chemosphere.2015.12.064.**

59.González-Pleiter, M., Tamayo-Belda, M., Pulido-Reyes, G., Amariei, G., Leganés, F., Rosal, R., & Fernández-Piñas, F. (2021). Secondary nanoplastics released from a biodegradable plastic: A new source of contamination. *Environmental Science: Nano*, 8(6), 1570-1580. **Doi.org.10.1039/D0EN 01273C.**

60.Gigault, J., Halle, A. T., Baudrimont, M., Pascal, P. Y., Gauffre, F., Phi, T. L., ... & Ter Halle, A. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic?. *Environmental Pollution*, 235, 1030-1034. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2017.12.036.**

61.Xiang, Y., Song, M., Liu, W., Zhang, Y., & Yang, X. (2022). Surface degradation and microplastic release from agricultural plastic films under UV radiation and mechanical abrasion. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129137. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat. 2022.129137.**

62.Zhang, Y., Wang, J., Zhou, B., Sun, R., & Liu, W. (2023). Secondary nanoplastics in agricultural soils: Formation mechanisms and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 1-12. **Doi.org.10.1186/s12302-023-00736-1.**

63.Hernandez, E., Gauthier, J., & Lopez, P. (2022). Agricultural plastic degradation: Impact of UV and mechanical stress on microplastic formation. *Environmental Pollution*, 280, 116967. **Doi.org.10. 1016/j.envpol.2021.116967.**

64.Li, B., Song, W., Cheng, Y., Zhang, K., Tian, H., Du, Z., Wang, J., Wang, J., Zhang, W., & Zhu, L. (2021). Ecotoxicological effects of different size ranges of industrial-grade polyethylene and polypropylene microplastics on earthworms Eisenia fetida. *Science of the Total Environment*, 783, 147007. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv.2021.147007.**

65.Tian, L., Jinjin, C., Ji, R., Ma, Y., & Yu, X. (2022). Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 25, 100311. **Doi.org.10.1016/j.coesh.2021.100311.**

66.Hurley, R. R., & Nizzetto, L. (2018). Fate and occurrence of micro (nano) plastics in soils: Knowledge gaps and

possible risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 1, 6-11. **Doi.org.10.1016/j.coesh.2018.03.001.**

67. Liu, E., He, W., & Yan, C. (2014). 'White revolution'to 'white pollution'-agricultural plastic film mulch in China. *Environmental Research Letters*, 9(9), 091001. **Doi.org.10.1088/1748-9326/9/9/091001.**
68. Wang, F., Wang, Q., Adams, A.A., Sun, Y., & Zhang, S. (2022). Effects of microplastics on soil properties: Current knowledge and future perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127531. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat. 2021.127531.**
69. Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z. (2021). Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 211, 111899. **Doi.org.10.1016/j.ecoenv.2021.111899.**
70. Rillig, M. C., Leifheit, E., & Lehmann, J. (2021). Microplastic effects on carbon cycling processes in soils. *PLoS Biology*, 19(3), e3001130. **Doi.org.10.1371/ journal.pbio.3001130.**
71. Liu, M., Lu, S., Song, Y., Lei, L., Hu, J., Lv, W., Zhou, W., Cao, C., Shi, H., & Yang, X. (2018). Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, *China. Environmental Pollution*, 242, 855-862. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2018.07.051.**
72. Gao, D., Li, X. Y., & Liu, H. T. (2020). Source, occurrence, migration and potential environmental risk of microplastics in sewage sludge and during sludge amendment to soil. *Science of the Total Environment*, 742, 140355. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv. 2020.140355.**
73. Chen, G., Feng, Q., & Wang, J. (2020). Mini-review of microplastics in the atmosphere and their risks to humans. *Science of the Total Environment*, 703, 135504. **Doi.org.10.1016/j. scitotenv.2019.135504.**
74. Feng, X., Wang, Q., Sun, Y., Zhang, S., & Wang, F. (2022). Microplastics change soil properties, heavy metal availability and bacterial community in a Pb-Zn-contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127364. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat.2021.127364.**
75. Li, J., Zhang, K., & Zhang, X. (2021). Microplastic and nanoplastic contamination in agricultural soils: Formation, fate, and ecological impacts. *Environmental Pollution*, 277, 116801. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2021.116801.**
76. Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (2020). Effects of microplastic fibers and drought on plant communities. *Environmental Science & Technology*, 54(10), 6166-6173. **Doi.org.10.1021/acs. est.0c01051.**
77. Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/ plastics. *Science of the Total Environment*, 715, 136968. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv. 2020.136968.**
78. Hodson, M. E., Duffus-Hodson, C. A., Clark, A., Prendergast-Miller, M. T., & Thorpe, K. L. (2017). Plastic bag derived-microplastics as a vector for metal exposure in terrestrial invertebrates. *Environmental Science & Technology*, 51(8), 4714-4721. **Doi.org.10.1021/acs.est.7b00635.**
79. Bhagat, J., Zang, L., Nishimura, N., & Shimada, Y. (2020). Zebrafish: An emerging model to study microplastic and nanoplastic toxicity. *Science of the Total Environment*, 728, 138707. **Doi. org.10.1016/j.scitotenv.2020.138707.**
80. de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics can change soil properties and affect plant performance. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 6044-6052. **Doi. org. 10.1021/acs.est.9b01339.**
81. Fang, C., Sobhani, Z., Zhang, X., Gibson, C. T., Tang, Y., & Naidu, R. (2020). Identification and visualisation of microplastics/nanoplastics by

Raman imaging (ii): smaller than the diffraction limit of laser? *Water research*, 183, 116046. **Doi.org.10.1016/j.watres.2020.116046.**

82. Chang, J., Fang, W., Liang, J., Zhang, P., Zhang, G., Zhang, H., Zhang, Y., & Wang, Q. (2022). A critical review on interaction of microplastics with organic contaminants in soil and their ecological risks on soil organisms. *Chemosphere*, 306, 135573. **Doi.org.10.1016/j.chemosphere.2022.135573.**
83. Hüffer, T., Metzelder, F., Sigmund, G., Slawek, S., Schmidt, T. C., & Hofmann, T. (2019). Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil. *Science of the Total Environment*, 657, 242-247. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv.2019.03.047.**
84. Ma, X., Zhou, X., Zhao, M., Deng, W., Cao, Y., Wu, J., & Zhou, J. (2022). Polypropylene microplastics alter the cadmium adsorption capacity on different soil solid fractions. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 16, 1-12. **Doi.org.10.1007/s11783-022-1570-3.**
85. Wang, J., Tan, Z., Peng, J., Qiu, Q., & Li, M. (2016). The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research*, 113, 7-17. **Doi.org.10.1016/j.marenvres.2015.12.010.**
86. Jiang, P., Zhao, S., Zhu, L., & Li, D. (2018). Microplastic-associated bacterial assemblages in the intertidal zone of the Yangtze Estuary. *Science of the Total Environment*, 624, 48-54. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv.2017.12.155.**
87. Lozano, Y. M., Lehnert, T., Linck, L. T., Lehmann, A., & Rillig, M. C. (2021). Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass. *Frontiers in plant science*, 12, 616645. **Doi.org.10.3389/fpls.2021.616645.**
88. Yang, L., Zhang, Y., Kang, S., Wang, Z., & Wu, C. (2021). Microplastics in soil: A review on methods, occurrence, sources, and potential risk. *Science of the Total Environment*, 780, 146546. **Doi.org.10.1016/j.scitotenv.2021.146546.**
89. Kim, S. W., Waldman, W. R., Kim, T. Y., & Rillig, M. C. (2020). Effects of different microplastics on nematodes in the soil environment: tracking the extractable additives using an ecotoxicological approach. *Environmental science & technology*, 54(21), 13868-13878. **Doi.org.10.1021/acs.est.0c04671.**
90. Cheng, Y., Song, W., Tian, H., Zhang, K., Li, B., Du, Z., ... & Zhu, L. (2021). The effects of high-density polyethylene and polypropylene microplastics on the soil and earthworm Metaphire guillelmi gut microbiota. *Chemosphere*, 267, 129219. **Doi.org.10.1016/j.chemosphere.2021.129219.**
91. Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). Microplastic effects on plants. *New phytologist*, 223(3), 1066-1070. **Doi.org.10.1111/nph.15794.**
92. Xiao, X., Liu, X., Mei, T., Xu, M., Lu, Z., Dai, H., Pi, F., & Wang, J. (2022). Estimation of contamination level in microplastic-exposed crayfish by laser confocal micro-Raman imaging. *Food Chemistry*, 397, 133844. **Doi.org.10.1016/j.foodchem.2022.133844.**
93. Machado, A. A. S., Lau, C. W., Kloas, W., Bergmann, J., Bachelier, J. B., Faltin, E., Becker, R., Görlich, A. S., & Rillig, M. C. (2019). Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems. *Global Change Biology*, 25(2), 744-755. **Doi.org.10.1111/gcb.14515.**
94. Huang, Y., Zhao, Y., Wang, J., Zhang, M., Jia, W., & Qin, X. (2019). LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil. *Environmental Pollution*, 254, 112983. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2019.112983.**
95. Leifheit, E. F., & Rillig, M. C. (2021). Mycorrhizal interactions with microplastics in soil. *Soil Ecology Letters*, 3(1), 10-15. **Doi.org.10.1007/s42832-020-0060-4.**

96.Fei, Y., Huang, S., Zhang, H., Tong, Y., Wen, D., Xia, X., Wang, H., Luo, Y., & Barceló, D. (2020). Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil. *Science of the Total Environment*, 707, 135634. **Doi.org.10.1016/j. scitotenv.2019.135634.**

97.Rong, L., Zhao, L., Zhao, L., Cheng, Z., Yao, Y., Yuan, C., Wang, L., & Sun, H. (2021). LDPE microplastics affect soil microbial communities and nitrogen cycling. *Science of the Total Environment*, 773, 145640. **Doi.org. 10.1016/j.scitotenv.2021.145640.**

98.Zhao, Y., Liu, X., & Li, L. (2023). Effects of microplastic contamination on microbial communities and ecosystem functions in terrestrial environments. *Environmental Pollution*, 305, 119255. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2022.119255.**

99.Judy, T. A., Koster, L., & Wang, P. (2019). Effects of microplastics on microbial diversity and function in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 127, 89-99. **Doi.org.10.1016/j.soilbio. 2018.08.023.**

100.Rillig, M. C., de Souza Machado, A. A., Lehmann, A., & Klümper, U. (2018). Evolutionary implications of microplastics for soil biota. *Environmental Chemistry*, 16(1), 3-7. **Doi.org.10.1071/EN18091.**

101.Sun, Y., Duan, C., Cao, N., Ding, C., Huang, Y., & Wang, J. (2022). Biodegradable and conventional microplastics exhibit distinct microbiome, functionality, and metabolome changes in soil. *Journal of Hazardous Materials*, 424, 127282. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat. 2021.127282.**

102.Sun, Y., Li, X., Cao, N., Duan, C., Ding, C., Huang, Y., & Wang, J. (2022). Biodegradable microplastics enhance soil microbial network complexity and ecological stochasticity. *Journal of Hazardous Materials*, 439, 129610. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat.2022.129610.**

103.Shi, J., Wang, Z., Peng, Y., Fan, Z., Zhang, Z., Wang, X., Zhu, K., Shang, J., & Wang, J. (2023). Effects of Microplastics on Soil Carbon Mineralization: The Crucial Role of Oxygen Dynamics and Electron Transfer. *Environmental Science & Technology*, 57(36), 13588-13600. **Doi.org.10.1021/acs.est.3c03244.**

104.Iqbal, B., Zhao, T., Yin, W., Zhao, X., Xie, Q., Khan, K. Y., Zhao, X., Nazar, M., Li, G., & Du, D. (2023). Impacts of soil microplastics on crops: A review. *Applied Soil Ecology*, 181, 104680. **Doi. org. 10.1016/j.apsoil.2022.104680.**

105.Li, J., Yu, S., Yu, Y., & Xu, M. (2022). Effects of microplastics on higher plants: a review. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 109(2), 241-265. **Doi.org.10. 1007/s00128-022-03516-4.**

106.Singh, N., Abdullah, M. M., Ma, X., & Sharma, V. K. (2023). Microplastics and nanoplastics in the soil-plant nexus: Sources, uptake, and toxicity. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(18), 1613-1642. **Doi. org.10.1080/10643389.2022.2060302.**

107.Gao, B., Yao, H., Li, Y., & Zhu, Y. (2021). Microplastic addition alters the microbial community structure and stimulates soil carbon dioxide emissions in vegetable-growing soil. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(2), 352-365. **Doi.org.10. 1002/etc.5020.**

108.Ng, E. L., Huerta Lwanga, E., Eldridge, S. M., Johnston, P., Hu, H. W., Geissen, V., & Chen, D. (2020). An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems. *Science of the Total Environment*, 701, 134442. **Doi.org.10. 1016/j.scitotenv.2019.134442.**

109.Shruti, V., Jonathan, M., Rodriguez-Espinosa, P., & Rodríguez-González, F. (2019). Microplastics in freshwater sediments of atoyac river basin, puebla city, Mexico. *Science of the Total Environment*, 654, 154-163. **Doi.org.10. 1016/j.scitotenv.2018.12.147.**

110.Zhang, Y., Li, X., Xiao, M., Feng, Z., Yu, Y., & Yao, H. (2022). Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil. *Science of the Total Environment*, 806, 150714. **Doi.org.10.1016/j. scitotenv.2021.150714.**

111.Dong, Y., Gao, M., Song, Z., & Qiu, W. (2020). Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings. *Environmental Pollution*, 259, 113892. **Doi.org.10.1016/j.envpol. 2020.113892.**

112.Ceccanti, C., Davini, A., Piccolo, E. L., Lauria, G., Rossi, V., Castiglione, M. R., ... & Landi, M. (2024). Polyethylene microplastics alter root functionality and affect strawberry plant physiology and fruit quality traits. *Journal of Hazardous Materials*, 470, 134164. **DOi.org.10. 1016/j.jhazmat.2024.134164.**

113.Li, Z., 114. Li, Q., Li, R., Zhao, Y., Geng, J., & Wang, G. (2020). Physiological responses of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to microplastic pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 30306-30314. **DOi.org.10.1007/s11356-020-09335-6.**

114.Zhang, S., Gao, W., Cai, K., Liu, T., & Wang, X. (2022). Effects of microplastics on growth and physiological characteristics of tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Agronomy*, 12(11), 2692. **DOi.org.10.3390/agronomy12112692.**

115.Wang, Y., Xiang, L., Wang, F., Wang, Z., Bian, Y., Gu, C., ... & Xing, B. (2022). Positively charged microplastics induce strong lettuce stress responses from physiological, transcriptomic, and metabolomic perspectives. *Environmental Science & Technology*, 56(23), 16907-16918. **DOi.org.10.1021/acs.est.2c06014.**

116.Liu, X., Wang, Z., Shi, G., Gao, Y., Zhang, H., & Liu, K. (2025). Effects of microplastics and salt single or combined stresses on growth and physiological responses of maize seedlings. *Physiologia Plantarum*, 177(1), e70106. **DOi.org.10.1111/ppl. 70106.**

117.Colzi, I., Renna, L., Bianchi, E., Castellani, M. B., Coppi, A., Pignattelli, S., ... & Gonnelli, C. (2022). Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in Cucurbita pepo L. *Journal of Hazardous Materials*, 423, 127238. **DOi.org.10.1016/j.jhazmat. 2021.127238.**

118.Zhuang, H., Liu, X., Ma, H., Li, R., Liu, B., Lin, Z., & Li, Z. (2023). Growth and physiological–biochemical characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) in the presence of different microplastics. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(3), 194. **DOi.org.10. 1007/s12517-023-11293-5.**

119.Zhang, Y., Tian, X., Huang, P., Yu, X., Xiang, Q., Zhang, L., ... & Gu, Y. (2023). Biochemical and transcriptomic responses of buckwheat to polyethylene microplastics. *Science of the Total Environment*, 899, 165587. **DOi.org.10. 1016/j.scitotenv.2023.165587.**

120.Ma, J., Aqeel, M., Khalid, N., Nazir, A., Alzuaibr, F. M., Al-Mushhin, A. A., ... & Noman, A. (2022). Effects of microplastics on growth and metabolism of rice (*Oryza sativa* L.). *Chemosphere*, 307, 135749. **DOi.org.0.1016/j. chemosphere. 2022.135749.**

121.Zhang, K., Gao, N., Li, Y., Dou, S., Liu, Z., Chen, Y., ... & Zhang, H. (2023). Responses of maize (*Zea mays* L.) seedlings growth and physiological traits triggered by polyvinyl chloride microplastics is dominated by soil available nitrogen. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 252, 114618. **DOi.org.10.1016/j.ecoenv.2023.114618.**

122.Ren, X., Tang, J., Wang, L., & Liu, Q. (2021). Microplastics in soil-plant system: effects of nano/microplastics on plant photosynthesis, rhizosphere microbes and soil properties in soil with different residues. *Plant and Soil*, 462, 561-576. **DOi.org.10.1007/s11104-021-04919-8.**

123.Fan, W. B., Jiang, S. H., Wang, Q., Li, W. J., & Wang, X. H. (2025). Effects of microplastics on the growth and physiological characteristics of mulberry. *Applied Ecology & Environmental Research*, 23(1). **DOi.org.10.15666/ aeer/2301.**

124.Li, S., Wang, T., Guo, J., Dong, Y., Wang, Z., Gong, L., & Li, X. (2021). Polystyrene microplastics disturb the redox homeostasis, carbohydrate metabolism and phytohormone regulatory network in barley. *Journal of Hazardous Materials*, 415, 125614. **DOi.org.10.1016/j.jhazmat.2021.125614.**

125.Shen, L., Zhang, P., Lin, Y., Huang, X., Zhang, S., Li, Z., ... & Liu, H. (2023). Polystyrene microplastic attenuated the toxic effects of florfenicol on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in hydroponics: From the perspective of oxidative response, phototoxicity and molecular metabolism. *Journal of Hazardous Materials*, 459, 132176. **DOi.org.10.1016/j.jhazmat.2023.131531.**

126.Li, Z., Li, R., Li, Q., Zhou, J., & Wang, G. (2020). Physiological response of cucumber (*Cucumis sativus* L.) leaves to polystyrene nanoplastics pollution. *Chemosphere*, 255, 127041. **DOi.org. 10.1016/j.chemosphere.2020.127041.**

127.Yang, C., & Gao, X. (2022). Impact of microplastics from polyethylene and biodegradable mulch films on rice (*Oryza sativa* L.). *Science of the Total Environment*, 828, 154579. **DOi.org.10. 1016/j.scitotenv.2022.154579.**

128.Zhuang, H., Li, Z., Wang, M., Liu, B., Chu, Y., & Lin, Z. (2024). Effects of microplastics and combined pollution of polystyrene and di-n-octyl phthalate on photosynthesis of cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Science of the Total Environment*, 947, 174426. **DOi.org. 10.1016/j.scitotenv.2024.174426.**

129.Wu, C., Su, W., Yang, Z., Li, D., Gu, L., Chen, X., ... & Ma, X. (2025). Responses of cotton growth, physiology, and soil properties to polyethylene microplastics in arid areas. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(4), 110. **DOi.org.10.1007/ s10653-024-01980-9.**

130.Fang, X. Z., Fang, S. Q., Ding, Y., Ma, J. W., Ye, Z. Q., Liu, D., & Zhao, K. L. (2024). Microplastic exposure inhibits nitrate uptake and assimilation in wheat plants. *Environmental Pollution*, 360, 124626. **DOi.org.10.1016/j.envpol. 2024.124626.**

131.Kumar, M., Sun, Y., Rathour, R., Pandey, A., Thakur, I. S., & Tsang, D. C. (2020). Algae as potential feedstock for the production of biofuels and value-added products: Opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 716, 137116. **Doi.org. 10.1016/j.jhazmat.2022.128523.**

132.Laughlin, R., Rütting, T., Müller, C., Watson, C., & Stevens, R. (2009). Effect of acetate on soil respiration, N_2O emissions and gross N transformations related to fungi and bacteria in a grassland soil. *Applied Soil Ecology*, 42(1), 25-30. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat. 2022.128826.**

133.Ng, E. L., Lin, S. Y., Dungan, A. M., Colwell, J. M., Ede, S., Lwanga, E. H., Meng, K., Geissen, V., Blackall, L. L., & Chen, D. (2021). Microplastic pollution alters forest soil microbiome. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124606. **Doi.org.10.3389/fenvs. 2021.675803.**

134.Guo, Q., Xiao, M., & Zhang, G. (2021). The persistent impacts of polyester microfibers on soil bio-physical properties following thermal treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 420, 126671. **Doi.org.10. 3390/toxics12070499.**

135.Iqbal, S., Xu, J., Allen, S. D., Khan, S., Nadir, S., Arif, M. S., & Yasmeen, T. (2020). Unraveling consequences of soil micro-and nano-plastic pollution on soil-plant system: Implications for nitrogen (N) cycling and soil microbial activity. *Chemosphere*, 260, 127578. **Doi.org. 10.1016/j.fmre.2022.07.009.**

136.Firestone, M. K., & Davidson, E. A. (1989). Microbiological basis of NO and N_2O production and consumption in soil. In M. O. Andreae & D. S. Schimel (Eds.), Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere (pp. 7–21). Wiley. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat.2021.125954.**

137.Groffman, P. M., Altabet, M. A., Böhlke, J. K., Butterbach-Bahl, K., David, M. B., Firestone, M. K., ... & Voytek, M. A. (2006). Methods for measuring denitrification: Diverse approaches to a difficult problem. *Ecological Applications*, 16(6), 2091-2122. **Doi.org.10.1016/ j.scitotenv.2022.151960.**

138.Schlesinger, W. H. (2009). Biogeochemistry: An analysis of global change (3rd ed.). Academic Press. **Doi.org.10.1016/j.jhazmat.2022.129287.**

139.Bandopadhyay, S., Martin-Closas, L., Pelacho, A. M., & DeBruyn, J. M. (2018). Biodegradable plastic mulch films: Impacts on soil microbial communities and ecosystem functions. *Frontiers in Microbiology*, 9, 819. **Doi.org.10.1016/j.envpol.2021.117733.**

140.Carr, S. A., Liu, J., & Tesoro, A. G. (2016). Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants. *Water Research*, 91, 174-182. **Doi.org. 10.1016/j.chemosphere.2023.138504.**

141.Rillig, M. C., Lehmann, A., Ryo, M., & Bergmann, J. (2019). Shaping up: Toward considering the shape and form of pollutants. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 7925-7926. **Doi.org.10.1007/s10924-010-0188-x.**

142.Tao, F., Huang, Y., Hungate, B. A., Manzoni, S., Frey, S. D., Schmidt, M. W., Reichstein, M., Carvalhais, N., Ciais, P., & Jiang, L. (2023). Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*, 618(7967), 981-985. **Doi.org.10.1016/ j.jenvman.2017.05.096.**

143.Yao, Y., Lili, W., Shufen, P., Gang, L., Hongmei, L., Weiming, X., Lingxuan, G., Jianning, Z., Guilong, Z., & Dianlin, Y. (2022). Can microplastics mediate soil properties, plant growth and carbon/nitrogen turnover in the terrestrial ecosystem? *Ecosystem Health and Sustainability*, 8(1), 2133638. **Doi. org.10.1080/20964129.2022.2133638.**

144.Chen, C., Yin, G., Li, Q., Gu, Y., Sun, D., An, S., Liang, X., Li, X., Zheng, Y., & Hou, L. (2023). Effects of microplastics on denitrification and associated N2O emission in estuarine and coastal sediments: insights from interactions between sulfate reducers and denitrifiers. *Water research*, 245, 120590. **Doi.org.10.1016/j.apsoil. 2014.02.008.**

145.Shi, J., Wang, J., Lv, J., Wang, Z., Peng, Y., & Wang, X. (2022). Microplastic presence significantly alters soil nitrogen transformation and decreases nitrogen bioavailability under contrasting temperatures. *Journal of environmental management*, 317, 115473. **Doi. org. 10.1021/ acssuschemeng.7b 04051.**

146.Gao, B., Li, Y., Zheng, N., Liu, C., Ren, H., & Yao, H. (2022). Interactive effects of microplastics, biochar, and earthworms on CO_2 and N_2O emissions and microbial functional genes in vegetable-growing soil. *Environmental Research*, 213, 113728. **Doi.org.10. 1016/j.scitotenv.2019.07.209.**

147.Wu, X., Chen, X., Jiang, R., You, J., & Ouyang, G. (2022). New insights into the photo-degraded polystyrene microplastic: Effect on the release of volatile organic compounds. *Journal of Hazardous Materials*, 431, 128523. **Doi. org.10.1016/j.scitotenv.2016.02.031.**

148.Wang, Q., Feng, X., Liu, Y., Cui, W., Sun, Y., Zhang, S., & Wang, F. (2022). Effects of microplastics and carbon nanotubes on soil geochemical properties and bacterial communities. *Journal of Hazardous Materials*, 433, 128826. **Doi.org.10.1007/s12665-012-2112-2.**

149.Zhao, T., Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (2021). Microplastics increase soil pH and decrease microbial activities as a

function of microplastic shape, polymer type, and exposure time. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 675803. **Doi.org.10.1016/j.matchemphys.2015.12.055.**

150.Liu, J., Yu, Z., Song, N., Zong, H., Wang, F., Guo, R., & Li, S. (2024). Plant Cadmium Toxicity and Biomarkers Are Differentially Modulated by Degradable and Nondegradable Microplastics in Soil. *Toxics*, 12(7). **Doi.org.10.1016/j.fbio.2018.05.004.**

151.Zhang, E., Chen, Y., Li, Y., Sun, K., Yang, Y., Gao, B., & Xing, B. (2024). The photo-redox of chromium regulated by microplastics (MPs) and MPs-derived dissolved organic matter (MPs-DOM) and the CO_2 emission of MPs-DOM. *Fundamental Research*, 4(6), 1576-1585. **Doi.org.10.1002/ieam.1904.**

152.Zhao, Z. Y., Wang, P. Y., Wang, Y. B., Zhou, R., Koskei, K., Munyasya, A. N., Liu, S. T., Wang, W., Su, Y. Z., & Xiong, Y. C. (2021). Fate of plastic film residues in agro-ecosystem and its effects on aggregate-associated soil carbon and nitrogen stocks. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125954. **Doi.org.10.1021/es0010498.**

153.Chen, M., Zhao, X., Wu, D., Peng, L., Fan, C., Zhang, W., Li, Q., & Ge, C. (2022). Addition of biodegradable microplastics alters the quantity and chemodiversity of dissolved organic matter in latosol. *Science of the Total Environment*, 816, 151960. **Doi.org.10.1016/j.marpolbul.2009.06.014.**

154.Wu, X., Liu, P., Zhao, X., Wang, J., Teng, M., & Gao, S. (2022). Critical effect of biodegradation on long-term microplastic weathering in sediment environments: a systematic review. *Journal of Hazardous Materials*, 437, 129287. **Doi.org.10.1016/j.chemosphere.2011.11.032.**

155.Yu, H., Zhang, Z., Zhang, Y., Song, Q., Fan, P., Xi, B., & Tan, W. (2021). Effects of microplastics on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in the context of straw incorporation: A comparison with different types of soil. *Environmental Pollution*, 288, 117733. **Doi.org.10.1021/acs.est.6b04496.**

156.Liu, R., Liang, J., Yang, Y., Jiang, H., & Tian, X. (2023). Effect of polylactic acid microplastics on soil properties, soil microbials and plant growth. *Chemosphere*, 329, 138504. **Doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138504.**

157.Briassoulis, D., & Dejean, C. (2010). Critical review of norms and standards for biodegradable agricultural plastics part I. Biodegradation in soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 384-400. **doi.org/10.1007/s10924-010-0168-1.**

158.Moreno, M. M., González-Mora, S., Villena, J., Campos, J. A., & Moreno, C. (2017). Deterioration pattern of six biodegradable, potentially low-environmental impact mulches in field conditions. *Journal of environmental management*, 200, 490-501. **doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.007.**

159.Yang, Y. (2021). Polystyrene microplastics induce lipid peroxidation and electrolyte leakage in cabbage. *Plant Toxicology*, 67, 112-123.

160.Li, C., Moore-Kucera, J., Lee, J., Corbin, A., Brodhagen, M., Miles, C., & Inglis, D. (2014). Effects of biodegradable mulch on soil quality. *Applied Soil Ecology*, 79, 59-69. **doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.02.012.**

161.European Bioplastics. (2023). Bioplastics Market Development Update 2023. In collaboration with the Nova-Institute.

162.European Bioplastics. (2022). Bioplastics Market Development Update 2022 – Global Production Capacities to Grow by 4% in 2023. Nova-Institute.

163.Kubowicz, S., & Booth, A. M. (2017). Biodegradability of plastics: challenges and misconceptions. In: ACS Publications. **doi.org/10.1021/acs.est.7b04051.**

164.Wang, J., Liu, X., Li, Y., Powell, T., Wang, X., Wang, G., & Zhang, P. (2019). Microplastics as contaminants in the soil environment: A mini-review.

Science of the Total Environment, 691, 848-857. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.209.**

165.Steinmetz, Z., Wollmann, C., Schaefer, M., Buchmann, C., David, J., Tröger, J., Muñoz, K., Frör, O., & Schaumann, G. E. (2016). Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? *Science of the Total Environment*, 550, 690-705. **doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.153.**

166.Chen, Y., Wu, C., Zhang, H., Lin, Q., Hong, Y., & Luo, Y. (2013). Empirical estimation of pollution load and contamination levels of phthalate esters in agricultural soils from plastic film mulching in China. *Environmental earth sciences*, 70, 239-247. **doi.org/10.1007/s12665-012-2119-8.**

167.Luo, Y., Liu, L., Qiao, W., Liu, F., Zhang, Y., Tan, W., & Qiu, G. (2016). Facile crystal-structure-controlled synthesis of iron oxides for adsorbents and anode materials of lithium batteries. *Materials Chemistry and Physics*, 170, 239-245. **doi.org/10.1016/j.matchemphys.2015.12.044.**

168.Suderman, N., Isa, M., & Sarbon, N. (2018). The effect of plasticizers on the functional properties of biodegradable gelatin-based film: A review. *Food bioscience*, 24, 111-119. **doi.org/10.1016/j.fbio.2018.06.006.**

169.Hartmann, N. B., Rist, S., Bodin, J., Jensen, L. H., Schmidt, S. N., Mayer, P., Meibom, A., & Baun, A. (2017). Microplastics as vectors for environmental contaminants: Exploring sorption, desorption, and transfer to biota. *Integrated environmental assessment and management*, 13(3), 488-493. **doi.org/10.1002/ieam.1904.**

170.Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental Science & Technology*, 35(2), 318-324. **doi.org/10.1021/es0010498.**

171.Ogata, Y., Takada, H., Mizukawa, K., Hirai, H., Iwasa, S., Endo, S., Mato, Y., Saha, M., Okuda, K., & Nakashima, A. (2009). International Pellet Watch: Global monitoring of persistent organic pollutants (POPs) in coastal waters. 1. Initial phase data on PCBs, DDTs, and HCHs. *Marine pollution bulletin*, 58(10), 1437-1446. **doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.06.014.**

172.Van, A., Rochman, C. M., Flores, E. M., Hill, K. L., Vargas, E., Vargas, S. A., & Hoh, E. (2012). Persistent organic pollutants in plastic marine debris found on beaches in San Diego, California. *Chemosphere*, 86(3), 258-263. **doi. org/ 10.1016/j.chemosphere.2011.09.039.**

173.Green, D. S., Boots, B., O'Connor, N. E., & Thompson, R. (2017). Microplastics affect the ecological functioning of an important biogenic habitat. *Environmental science & technology*, 51(1), 68-77. **doi.org/10.1021/acs.est.6b04496.**