भारतीय वैज्ञानिक एवं औद्योगिक अनुसंधान पत्रिका
वर्ष 34 अंक (1) जून 2026 पृ. 72-82
DOI: 10.56042/bvaap.v34i1.27779

मृदा में माइक्रोप्लास्टिक के व्यापक दुष्प्रभाव

स्वाति वर्मा[1,2], एकता गुप्ता[1], सम्पूर्णा नंद[1], रुचि चौहान[1], संध्या मिश्रा[1,3], वर्तिका सिंह[1,3], मनीष चौधरी[1,3], प्रिया दुबे[1], मारिया नसीम[1], अनीता गुप्ता[1], अंजू पटेल[1] एवं पंकज कुमार श्रीवास्तव[1]

[1]सीएसआईआर-राष्ट्रीय वनस्पति अनुसंधान संस्थान, लखनऊ- 226001 उत्तर प्रदेश (भारत)
[2]एकेडमी ऑफ सॉइंटिफिक एंड इनोवेटिव रिसर्च
[3]एन.बी.आर.आई.-एन्वॉयरॉन्मेंटल इन्फॉर्मेशन अवेयरनैस, कैपेसिटी बिल्डिंग एंड लाइवलीहुड प्रोग्राम सेन्टर
[ई-मेलः anju.patel.nbri@csir.res.in एवं pankaj.nbri@csir.res.in]

सारांशः बढ़ते प्लास्टिक उत्पादन और उसके कुप्रबंधन के कारण माइक्रोप्लास्टिक (MPs) और नैनोप्लास्टिक (NPs) पर्यावरण के लिए एक बड़ी चिंता बन गए हैं। आ. जकल प्लास्टिक का प्रयोग बहुत बढ़ गया है, जिससे हर साल 480 मिलियन टन से ज़्यादा प्लास्टिक का उत्पादन होता है। यह प्लास्टिक आसानी से विघटित नहीं होता है और पर्यावरण में संग्रहित होता रहता है, जो हर जगह माइक्रोप्लास्टिक के संदूषण का प्रमुख कारक है। पहले समुद्री/जलीय प्रदूषण पर ज़्यादा शोध किया गया, परन्तु कृषि योग्य मृदा भी माइक्रोप्लास्टिक प्रदूषण का एक बड़ा स्रोत है। कृषि क्षेत्रों में इन MPs/NPs का संदूषण मृदा स्वास्थ्य, फसलों की गुणवत्ता और मानव स्वास्थ्य के लिए गंभीर खतरा पैदा करता है। यह लेख कृषि योग्य मृदा में MPs/NPs के स्रोत, उनके द्वारा मृदा के भौतिक, रासायनिक और जैविक गुणों पर पड़ने वाले प्रभाव, पौधों पर उनके नकारात्मक प्रभाव, और अंततः खाद्य श्रृंखला पर उनके कुप्रभाव, इन सबका विस्तार से विश्लेषण करता है। इस लेख में समसामायिक शोधों के प्रमुख निष्कर्षों को प्रस्तुत किया गया है और उन आभाव क्षेत्रों की पहचान की गई है, जहाँ दीर्घकालिक अध्ययन आवश्यक हैं, विशेष रूप से मृदा की उर्वरता, फसलों में संदूषण एवं गुणवत्ता-उत्पादन और संभावित मानव स्वास्थ्य पर इनके दीर्घकालिक जोखिम एवं विषाक्तता प्रभाव। माइक्रोप्लास्टिक भारी धातुओं और दूसरे हानिकारक रसायनों को भी अपने साथ सह-संदूषकों की तरह अवशोषित कर सकता है, जिससे मृदा में प्रदूषण का स्तर और भी बढ़ जाता है। प्लास्टिक मल्चिंग, अपशिष्ट जल से सिंचाई, और बायोसॉलिड-खाद जैसी कृषि पद्धतियाँ माइक्रोप्लास्टिक के कृषि योग्य मृदा में संग्रहण एवं संदूषण का मुख्य कारण हैं। इन माइक्रोप्लास्टिक से मृदा की भौतिक संरचना में बदलाव, मृदा सूक्ष्मजीवों में असंतुलन, और पौधों के सामान्य विकास एवं उत्पादकता में ह्रास होने से यह सभी कृषि उत्पादन और खाद्य सुरक्षा के लिए एक जोखिम हैं।

मुख्य शब्दः माइक्रोप्लास्टिक; मृदा स्वास्थ्य; कृषि; फसल उत्पादन; पर्यावरणीय प्रदूषण

Widespread adverse effects of microplastics in soil

Swati Verma[1,2], Ekta Gupta[1], Sampurna Nand[1], Ruchi Chauhan[1], Sandhya Mishra[1,3], Vartika Singh[1,3], Manish Chaudhary[1,3] "Priya Dubey[1], Maria Naseem[1], Anita Gupta[1], Anju Patel[1] & Pankaj Kumar Srivastava[1]

[1]CSIR-National Botanical Research Institute, Lucknow- 226001 Uttar Pradesh (India)
[2]Academy of Scientific and Innovative Research
[3]NBRI-Environmental Information Awareness, Capacity Building and Livelihood Programme Center
[Email: anju.patel.nbri@csir.res.in & pankaj.nbri@csir.res.in]

Abstract

Increasing plastic production and its mismanagement have made microplastics (MPs) and nanoplastics (NPs) a major concern for the environment. Plastic use has increased dramatically nowadays, with over 480 million tonnes of plastic produced annually. This plastic does not decompose easily and accumulates in the environment, being a major factor in microplastic contamination everywhere. While marine/aquatic pollution was previously researched more, agricultural soils are also a major source of microplastic pollution. Contamination of these MPs and NPs in agricultural

areas poses serious threats to soil health, crop quality, and human health. This article analyzes in detail the sources of MPs/NPs in agricultural soils, their impact on the physical, chemical, and biological properties of the soil, their negative effects on plants, and ultimately their adverse effects on the food chain. The article presents key findings from contemporary research and identifies areas where long-term studies are necessary, particularly on soil fertility, contamination and quality-production in crops, and their long-term risks and toxicological effects on potential human health. Microplastics can also absorb heavy metals and other harmful chemicals as co-contaminants, further increasing the level of pollution in the soil. Agricultural practices such as plastic mulching, irrigation from wastewater, and biosolids-compost are the main causes of collection and contamination of microplastics in agricultural soils. These microplastics pose a risk to all agricultural production and food security due to changes in soil physical structure, imbalances in soil microorganisms, and reduced normal plant growth and productivity.

Keywords: Microplastics, Soil health, Pollution, Agricultural production

प्रस्तावना

प्लास्टिक आधुनिक मानव जीवन का एक अनिवार्य हिस्सा बन गया है, जिसका सालाना वैश्विक उत्पादन 480 मिलियन टन से अधिक है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)। हालाँकि, इस सुविधा की एक महत्वपूर्ण पर्यावरणीय कीमत है, क्योंकि अधिकांश प्लास्टिक आसानी से विघटित नहीं होते, जिससे प्राकृतिक आवासों में उनका निरंतर संचय होता है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)। ये अदृश्य प्लास्टिक कण, जिन्हें माइक्रोप्लास्टिक (आमतौर पर 5 मिमी (mm) से कम) और नैनोप्लास्टिक (100 नैनोमीटर (nm) से कम) के रूप में वर्गीकृत किया गया है, और ये सभी अब हवा, पानी और मृदा सहित विभिन्न पर्यावरणीय घटकों में सर्वव्यापी हैं (जाधव एवं मेदून्सका-जुरास्ज़ेक, 2024)। पहले समुद्री पारिस्थितिक तंत्र पर शोध को केंद्रित किया गया था, लेकिन अब यह स्पष्ट हो गया है कि स्थलीय पारिस्थितिकी तंत्र, विशेष रूप से कृषि योग्य मृदा, MPs/NPs के लिए एक महत्वपूर्ण ग़ार (सिंक) के रूप में कार्य करते हैं (बंसल एवं सिंह, 2022)।

कृषि मृदा में MPs/NPs की उपस्थिति एक उभरती हुई पर्यावरणीय चिंता है क्योंकि यह भारी धातुओं और कार्बनिक प्रदूषकों जैसे हानिकारक प्रदूषकों का मृदा में स्थानान्तरण का कारण है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)। ये दूषित पदार्थ MPs/NPs पर अवशोषित हो सकते हैं, जिससे स्थलीय पारिस्थितिक तंत्र में उनका व्यापक प्रसार संभव हो जाता है। यह स्थिति विशेष रूप से चिंताजनक है क्योंकि प्लास्टिक मल्चिंग, अपशिष्ट जल से सिंचाई, और बायोसॉलिड-खाद जैसी कृषि पद्धतियाँ के उपयोग जैसे स्रोत MPs/NPs संचय के प्रमुख कारण हैं (हसन एवं तरन्नुम, 2025; पेरेज़-रेवेरोन *et al*., 2022)।

2. माइक्रोप्लास्टिक्स के स्रोत (Sources of Microplastics)

कृषि मृदा में माइक्रोप्लास्टिक्स कई कारकों से प्रवेश करते हैं, जिनमें से कुछ सीधे कृषि गतिविधियों से संबंधित हैं और कुछ बाहरी स्रोतों से (जाधव एवं मेदून्सका-जुरास्ज़ेक, 2024; बंसल एवं सिंह, 2022) (चित्र 1)।

- **कृषि मल्चिंग फिल्म्स (Agricultural Mulching Films):** यह कृषि में माइक्रोप्लास्टिक्स का एक प्रमुख स्रोत है, विशेष रूप से पॉलीथीन (PE) से बनी फिल्में (पेरेज़-रेवेरोन *et al*., 2022)। इन फिल्मों का उपयोग खरपतवारों को दबाने, मृदा की नमी बनाए रखने और तापमान को नियंत्रित करने के लिए किया जाता है। समय के

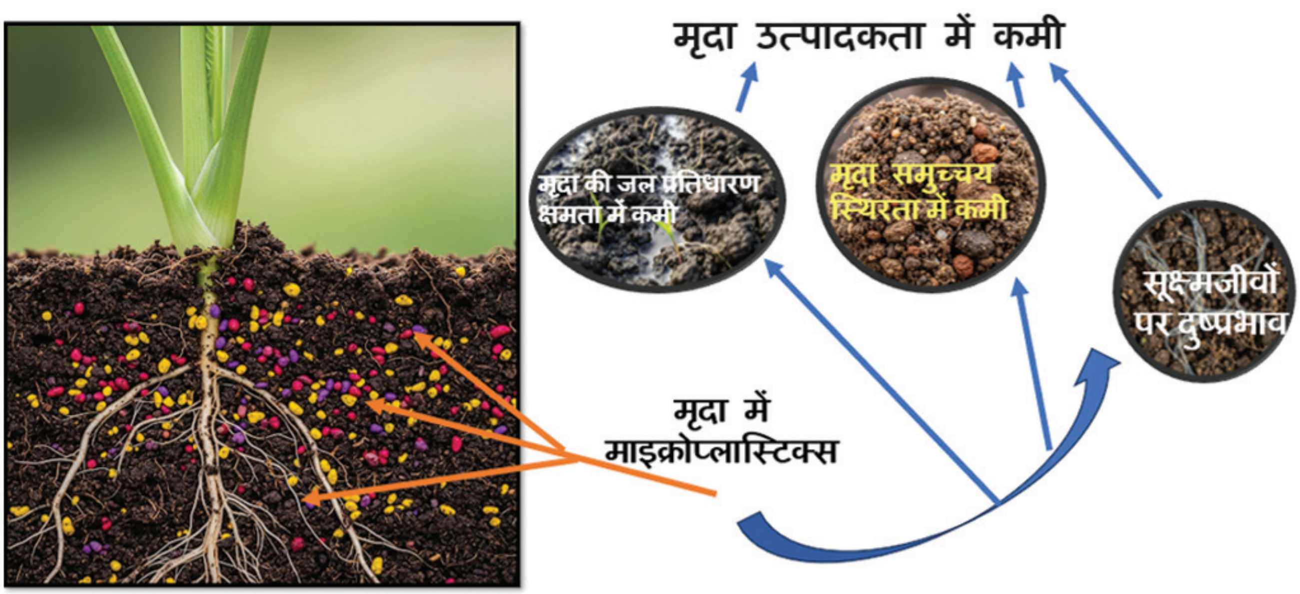
चित्र 1 — कृषि मृदा में माइक्रोप्लास्टिक के स्रोत

साथ, अल्ट्रा-वायलेट (UV) विकिरण, तापमान में उतार-चढ़ाव और यांत्रिक तनाव जैसे पर्यावरणीय कारक इन फिल्मों को माइक्रोप्लास्टिक्स में तोड़ने का कारण बनते हैं (पेरेज़-रेवेरोन *et al.*, 2022)। खेत जोतने पर ये टुकड़े मृदा में मिल जाते हैं (बंसल एवं सिंह, 2022)।

- **बायोसॉलिड-खाद (Biosolids/Sewage Sludge):** **बायोसॉलिड**-खाद औद्योगिक और घरेलू कचरे के शोधन-उपचार के बाद प्राप्त होती है जिसमें सिंथेटिक फाइबर और प्लास्टिक के टुकड़े सहित विविध मूल के मा. इक्रोप्लास्टिक्स होते हैं। इसे अक्सर मृदा में उपचारक खाद के रूप में कृषि क्षेत्रों में प्रयोग में लाया जाता है, जिससे सीधे तौर पर माइक्रोप्लास्टिक्स मृदा में प्रवेश करते हैं (बंसल एवं सिंह, 2022)।
- **सिंचाई का पानी (Irrigation Water):** अपशिष्ट निस्तारण स्थलों के निकट की नदियों, झीलों और जलाशयों से प्राप्त सिंचाई के पानी में माइक्रोप्लास्टिक्स के उच्च स्तर पाए गए हैं, जो अप्रत्यक्ष रूप से उन्हें कृषि मृदा में स्थानांतरित करते हैं (बंसल एवं सिंह, 2022)। कुछ विकासशील देशों में अपशिष्ट जल (सीवेज) के पानी का भी सिंचाई के लिए उपयोग किया जाता है, जिससे माइक्रोप्लास्टिक का खतरा अत्यंत बढ़ जाता है।
- **वायुमंडलीय जमाव (Atmospheric Deposition):** वायुमंडलीय हवा माइक्रोप्लास्टिक कणों और रेशों को परिवा. हित कर सकती है, जिससे वे खेत में निक्षेपित हो जाते हैं, जिसके कारण उनके मूल स्रोत से दूर-दराज के कृषि क्षेत्रों में भी माइक्रोप्लास्टिक पाया जा सकता है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)।
- **खाद और अन्य कार्बनिक उर्वरक (Compost and Other Organic Fertilizers):** घरेलू कचरे से उत्पादित खाद में प्लास्टिक के छोटे कण और माइक्रोप्लास्टिक दोनों पाए जा सकते हैं। इस तरह, यह खाद और अन्य कार्बनिक उर्वरक भी कृषि में माइक्रोप्लास्टिक का कारण बनते हैं।
- **कृषि उपकरण (Agricultural Equipment):** खेती में प्रयोग आने वाले प्लास्टिक-जनित उत्पाद, उपकरण एवं अन्य मशीनिरी के विघटन से भी माइक्रोप्लास्टिक्स बनते हैं, जैसे कि टायरों, और पाइपों के टुकड़े (हसन एवं तरन्नुम, 2025) जो कृषि में माइक्रोप्लास्टिक का कारण बनते हैं।
- **शहरी धूल (City Dust):** शहरों में परिवहन वाहनों के टायरों के घर्षण, नित-जीवन शैली में प्रयोग आने वाले सिंथेटिक उत्पादों से उत्पन्न वायुमंडलीय धूल में भी माइक्रोप्लास्टिक्स होते हैं, जो मृदा में जमा हो जाते हैं।

3. मृदा और सूक्ष्मजीवों पर प्रभाव (Effect on Soil and Microorganism)

माइक्रोप्लास्टिक्स कृषि मृदा के पारिस्थितिक तंत्र को बाधित कर सकते हैं, जिससे मृदा के स्वास्थ्य और उर्वरता पर नकारात्मक प्रभाव पड़ता है (तालिका 1)।



चित्र 2 — माइक्रोप्लास्टिक का मृदा पर प्रभाव

- **मृदा की संरचना में परिवर्तन (Alteration of Soil Structure):** माइक्रोप्लास्टिक्स कण मृदा के एकत्रीकरण स्थिरता (aggregate stability) को कम करके मृदा की संरचना को कमजोर कर सकते हैं (हान *et al.*, 2024)। अध्ययनों से पता चला है कि माइक्रोप्लास्टिक्स कण 0.5-1% सांद्रता पर मृदा के एकत्रीकरण स्थिरता को 20% तक कम कर सकते हैं, जिससे पानी और पोषक तत्वों को बनाए रखने की मृदा की क्षमता कम हो जाती है (चित्र 2 में यह दर्शाया गया है कि माइक्रो/नैनो-प्लास्टिक का मृदा पर क्या-क्या प्रभाव पड़ सकता हैं)।
- **मृदा के भौतिक गुणों पर प्रभाव (Effects on Soil Physical Properties):** माइक्रोप्लास्टिक्स कण मृदा के भौतिक गुणों को भी बदलते हैं, जिसमें मृदा सरंध्रता (porosity), स्थूल घनत्व (bulk density) और जल प्रतिधारण क्षमता (water retention capacity) प्रमुख हैं (चिया *et al.*, 2022)। अध्ययनों से पता चलता है की माइक्रोप्लास्टिक के कारण मृदा की सरंध्रता में 12% तक की कमी और स्थूल घनत्व में 5-10% की वृद्धि दर्ज की गई है, जो मृदा में जल के अंतर्ग्रहण और प्रतिधारण को बाधित कर सकता है, जिससे पौधों की वृद्धि और मृदा सूक्ष्मजीवों की गतिविधि पर नकारात्मक प्रभाव पड़ता है।
- **मृदा के कार्बनिक पदार्थों के अपघटन का कमजोर होना (Weakening of Soil Organic Matter Decomposition):** माइक्रोप्लास्टिक्स मृदा के कार्बनिक पदार्थ (SOM) से बंध सकते हैं, जिससे मृदा के कार्बनिक पदार्थ अपघटकों के लिए कम सुलभ हो जाता है, जिससे कार्बनिक पदार्थों के टूटने की गति धीमी हो जाती है (लिन *et al.*, 2025)। इससे पोषक तत्वों का चक्रण और मृदा की उर्वरता प्रभावित होती है।
- **सूक्ष्मजीव समुदायों का व्यवधान (Disruption of Microbial Communities):** माइक्रोप्लास्टिक्स का सबसे जटिल और महत्वपूर्ण जैव रासायनिक प्रभावों में से एक मृदा के सूक्ष्मजीव समुदायों पर उनका प्रभाव है, जो पोषक तत्वों के चक्रण, कार्बनिक पदार्थों के अपघटन और मृदा के स्वास्थ्य के लिए महत्वपूर्ण होते हैं। अध्ययनों से पता चला है कि माइक्रोप्लास्टिक्स कण 0.1-1% की सांद्रता पर सूक्ष्मजीवों के जैवभार (बायोमास) को 15% तक कम कर सकते हैं (शी *et al.*, 2023)। यह मृदा की कार्बनिक पदार्थों को विघटित करने और पौधों के लिए आवश्यक पोषक तत्वों को पुनःचक्रण (Recycle) करने की क्षमता को कम करता है (चित्र 2)।
- **सूक्ष्मजीव विविधता में गिरावट (Decline in Microbial Diversity):** माइक्रोप्लास्टिक्स कण न केवल सूक्ष्मजीवों के बायोमास को कम करते हैं, बल्कि मृदा में सूक्ष्मजीव विविधता को भी प्रभावित करते हैं, जैसे नाइट्रोजन स्थिरीकरण जैसी प्रमुख प्रक्रियाओं में शामिल लाभकारी जीवाणु (शी *et al.*, 2023)।
- **जैव-रासायनिक चक्रों में हस्तक्षेप (Interference with Biogeochemical Cycles):** माइक्रोप्लास्टिक्स कण नाइट्रोजन और फास्फोरस जैसे आवश्यक पोषक तत्वों को सोख कर पोषक तत्वों के चक्रण में हस्तक्षेप करते हैं, जिससे पौधों के लिए उनकी उपलब्धता 15-25% तक कम हो जाती है (जाधव एवं मेद्यून्सका-जुरास्ज़ेक, 2024)।
- **दूषित पदार्थों का परिवहन (Transport of Contaminants):** माइक्रोप्लास्टिक्स भारी धातुओं और कीटनाशकों जैसे प्रदूषकों के वाहक के रूप में कार्य करते हैं, जिससे मृदा में उनकी गतिशीलता बढ़ जाती है एवं पौधों में उनका संदूषण भी बढ़ जाता है (किनिगोपौलौ *et al.*, 2022)।

4. **पौधों पर प्रभाव (Impact on Plants)**

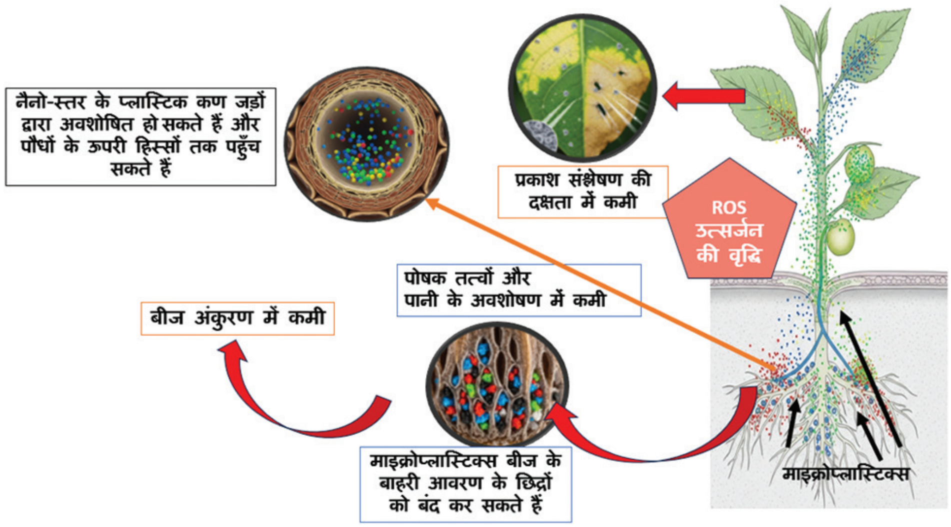
पर्यावरण में माइक्रोप्लास्टिक्स की व्यापक उपस्थिति पौधों के स्वास्थ्य, वृद्धि और खाद्य सुरक्षा के लिए एक महत्वपूर्ण खतरा पैदा करती है। इन कणों की कृषि मृदा में उपस्थिति, पौधों की वृद्धि, विकास और पादप शारीरिक क्रिया के लिए आवश्यक महत्वपूर्ण प्रक्रियाओं को बाधित करते हैं (तालिका 2)। चित्र 3 में दर्शाया गया है की माइक्रो/नैनो-प्लास्टिक का पौधों पर क्या प्रभाव पड़ सकता है।

- **बीज अंकुरण में कमीः** माइक्रोप्लास्टिक्स बीज के बाहरी आवरण के छिद्रों को बंद कर देते हैं, जिससे पानी का अवशोषण और उसके बीज के अंदरूनी हिस्सों तक पहुँचने की प्रक्रिया बाधित होती है, परिणामस्वरूप बीज अंकुरण दर कम हो जाती है (जिया *et al.*, 2023)।
- **जड़ों के कार्य में बाधाः** माइक्रोप्लास्टिक्स कण पादप जड़ों की प्रणालियों को प्रभावित करते हैं, जिससे जड़ों के बायोमास में कमी आती है और उनकी मूल-संरचना बिगड़ जाती है। अध्ययनों से पता चला है कि माइक्रोप्लास्टिक से दूषित मृदा में जड़ों के बायोमास में 20% तक की कमी हो सकती है, जिससे पौधों की पानी और पोषक तत्वों को सोखने की क्षमता सीधे तौर पर प्रभावित होती है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)।
- **प्रकाश संश्लेषण की दक्षता में कमीः** माइक्रोप्लास्टिक्स पौधों की पत्तियों में क्लोरोफिल की मात्र को कम करके प्रकाश संश्लेषण की प्रक्रिया को भी धीमा कर देते हैं। क्लोरोफिल, जो ऊर्जा निर्माण के लिए महत्वपूर्ण है, की मात्रा माइक्रोप्लास्टिक्स से संदूषित पौधों में 15% तक कम हो सकती है (हसन एवं तरन्नुम, 2025)।

तालिका 1 — मिट्टी और सूक्ष्मजीवों पर माइक्रोप्लास्टिक्स के प्रभाव

माइक्रोप्लास्टिक का प्रकार	आकार	मिट्टी पर प्रभाव	संदर्भ
पॉलीएस्टर माइक्रोफाइबर	30 माइक्रोमीटर	मिट्टी के समुच्चय के आकार को कम करके मिट्टी पर नकारात्मक प्रभाव	लेहमन *et al.*, 2020
पॉलीस्टीरीन और पालीटेट्राफ्लुओरोईथीलीन	0.1-1 माइक्रोमीटर और 10-100 माइक्रोमीटर	मृदा pH, मृदा एंजाइम गतिविधि (मिट्टी यूरीज़, प्रोटीज़, डिहाइड्रोजनेज़, एसिड फॉस्फेटेज़ और पेरोक्सीडेज़) में कमी, मृदा कार्बनिक पदार्थ (29.6%), उपलब्ध नाइट्रोजन (30.6:), उपलब्ध फास्फोरस (20.4%) और पोषक तत्वों की कमी	डाँग *et al.*, 2021
पॉलीएक्रिलिक फाइबर, पॉलीमाइड बीड्स, पॉलीएस्टर फाइबर, और पॉलीईथीलीन टुकड़े	15-20 माइक्रोमीटर; 5000 माइक्रोमीटर लंबाई और 8 माइक्रोमीटर व्यास; 3756 माइक्रोमीटर लंबाई, 18 माइक्रोमीटर व्यास; 643 माइक्रोमीटर	थोक घनत्व, जल धारण क्षमता जैसे मिट्टी के जैव-भौतिक मापदंडों में परिवर्तन, जल-स्थिर मिट्टी के समुच्चय और कम सूक्ष्मजीव गतिविधियां	डे सौज़ा माचाडो *et al.*, 2018
प्लास्टिक मल्च फिल्म	NA	मृदा pH में वृद्धि, कार्बनिक पदार्थ और नमी सामग्री में कमी	डाँग *et al.*, 2021
पॉलीईथीलीन, पॉलीविनायलक्लोराइड और पॉलीकार्बोनेट के टुकड़े और फाइबर	5 मिमी लंबाई और ~30 माइक्रोमीटर व्यास	मिट्टी के समुच्चय को कम करके और सूक्ष्मजीव गतिविधि को कम करके मिट्टी की स्थिरता को नकारात्मक रूप से प्रभावित करते हैं	लोज़ानो एवं रिल्लिग़, 2020
हाईडेंसिटीपॉलीईथीलीन, बायोडिग्रेडेबल पॉलीलैक्टिक एसिड, माइक्रोफाइबर	0.48-316 माइक्रोमीटर, 0.6-363 माइक्रोमीटर	मिट्टी के समुच्चय की स्थिरता और मृदा pH में परिवर्तन	बूट्स *et al.*, 2019
पॉलीएस्टर फाइबर	8 मिमी व्यास	जल-घुलनशील समुच्चय के अनुपात को बदलकर गैस उत्सर्जन को प्रभावित करता है और मिट्टी की संरचना को बदलता है	रिल्लिग़ *et al.*, 2021
पॉलीविनायलक्लोराइड फिल्म	20 मिमी × 20 मिमी	सूक्ष्मजीव विविधता, मृदा सूक्ष्मजीव कार्बन, नाइट्रोजन, एंजाइम गतिविधि में कमी, और थैलेट एसिड एस्टर (PAEs) में वृद्धि, जो मृदा सूक्ष्मजीव समुदाय के लिए कार्सिनोजेनिक और म्यूटाजेनिक है	वांग *et al.*, 2016
पॉलीईथीलीन	100 माइक्रोमीटर	मिट्टी के पोषक तत्वों के संतुलन (कुल नाइट्रोजन, कुल फास्फोरस) और भौतिक रासायनिक गुणों को बदलकर बाह्य कोशिकीय एंजाइम गतिविधि को कम किया	यू *et al.*, 2020
लोडेंसिटीपॉलीईथीलीन, पॉलीईथीलीनटरथैलेट	25.3 माइक्रोमीटर, औसत व्यास 56.3 माइक्रोमीटर	वन मृदा की सूक्ष्मजीव समुदाय संरचना को बदला, जीवाणु समुदाय की समृद्धि को कम किया, मृदा श्वसन दर में वृद्धि	नग़ *et al.*, 2021

- **पादप शारीरिक-क्रिया तनाव और ऑक्सीडेटिव क्षतिः** माइक्रोप्लास्टिक्स के संपर्क में आने पर पौधों में ऑक्सीडेटिव तनाव उत्पन्न होता है। इसका संकेत मैलोनडायल्डिहाइड (MDA) जैसे तनाव मार्करों (संकेतकों) में 25% तक की वृद्धि से मिलता है जो प्रतिक्रियाशील ऑक्सीजन प्रजातियों (ROS) के निराकरण की ऑक्सीकरणरोधी प्रतिक्रियाओं में सहायक होती है।
- **पोषक तत्वों और पानी के अवशोषण में कमीः** माइक्रोप्लास्टिक्स पादप जड़ों की प्रणालियों में भौतिक बाधा उत्पन्न करते हैं, जिससे पौधों की पानी और आवश्यक पोषक तत्वों को



चित्र 3 — माइक्रो/नैनो-प्लास्टिक का पौधों पर प्रभाव

अवशोषित करने की क्षमता घट जाती है (जाधव एवं मेद्य्न्सका-जुरास्ज़ेक, 2024)।

- **दूषित पदार्थों का अवशोषण और खाद्य सुरक्षा समस्याः** नैनो-स्तर के प्लास्टिक्स कण पौधों की जड़ों द्वारा अवशोषित हो सकते हैं और पौधे के ऊपरी हिस्सों तक पहुँच सकते हैं, जिससे खाद्य सुरक्षा संबंधी चिंताएँ बढ़ जाती हैं। खाद्य पौधों के हिस्सों में इन प्लास्टिक्स कणों की उपस्थिति से खाद्य श्रृंखला संदूषित होती हैं एवं मानव-स्वास्थ्य पर प्रतिकूल प्रभाव डालती है।

5. **मृदा में माइक्रोप्लास्टिक्स का भवितव्यता (Fate of Microplastics in Soil)**

मृदा और आस-पास के वातावरण में माइक्रोप्लास्टिक्स (MPs) का वितरण और संचलन जटिल परस्पर-क्रियाओं और परिवहन तंत्रों को शामिल करता है जो उनके पर्यावरण में उनके भविष्य को निर्धारित करते हैं (हुआंग *et al*., 2023)।

- **ऊर्ध्वाधर और क्षैतिज प्रवासन (Vertical and Horizontal Migration):** जब माइक्रोप्लास्टिक (MPs) कृषि मृदा में पहुँचते हैं, तो वे हवा और पानी के कटाव जैसे प्राकृतिक कारणों से, और इंसानों, पौधों तथा मृदा में रहने वाले जीवों की गतिविधियों के कारण ऊपर-नीचे एवं अगल-बगल फैल सकते हैं। यह फैलाव माइक्रोप्लास्टिक कणों के आकार, प्रकार और घनत्व पर निर्भर करता है और साथ ही मृदा के अपने गुणों पर भी निर्भर करता है।
- **सूक्ष्मजीवों के साथ परस्पर क्रिया (Interaction with Soil Organisms):** मृदा में रहने वाले जीव, जैसे केंचुआ और अन्य छोटे जीव, माइक्रोप्लास्टिक्स को उनके संपर्क में आने पर निगल लेते हैं। मृदा के सूक्ष्मजीव माइक्रोप्लास्टिक्स को बड़े से छोटे टुकड़ों में एवं नैनोप्लास्टिक्स में परिवर्तित कर देते हैं, जिससे उनकी सतह का क्षेत्रफल बढ़ जाता है और वे अन्य प्रदूषकों को आसानी से अपने में सोख लेते हैं।
- **क्षरण और विघटन (Weathering and Degradation):** मा. इक्रोप्लास्टिक्स मौसमीय कारकों और मृदा के सूक्ष्मजीवों के कारण नैनोप्लास्टिक्स के छोटे कणों में बदल जाते हैं। ये बहुत छोटे कण मृदा की गुणवत्ता एवं पर्यावरण के लिए और भी हानिकारक हो सकते हैं, क्योंकि ये आसानी से एक जगह से दूसरी जगह जा सकते हैं और जीवों तथा पादपों द्वारा अवशोषित हो सकते हैं ।

इस प्रकार प्लास्टिक से प्रायः जनित माइक्रोप्लास्टिक मृदा तथा पौधे को कई तरह से प्रभावित करते हैं जो की आगे चल की खाद श्रृंखला पर गंभीर दुष्परिणाम डाल सकते हैं ।

निष्कर्ष

कृषि में बढ़ते माइक्रोप्लास्टिक प्रदूषण की स्थिति चिंताजनक है। विभिन्न स्रोत, मृदा में सांद्रता, और मृदा स्वास्थ्य, फसल उत्पादन तथा खाद्य सुरक्षा समस्या पर माइक्रोप्लास्टिक्स के गंभीर प्रभावों का अध्ययन अति आवश्यक है। माइक्रोप्लास्टिक्स मृदा की संरचना को बाधित करते हैं, सूक्ष्मजीव समुदायों को प्रभावित करते हैं, और मृदा पोषक तत्वों की गतिशीलता को प्रभावित करते हैं। साथ ही, दूषित पदार्थों को अवशोषित और स्थानांतरित करने की इनकी क्षमता खाद्य सुरक्षा और मानव स्वास्थ्य के लिए अतिरिक्त जोखिम पैदा करती है। कृषि पारिस्थितिकी तंत्र पर माइक्रोप्लास्टिक्स के दीर्घकालिक प्रभाव अभी भी पूरी तरह से समझे नहीं गए हैं, जो मृदा और पौधों के साथ

तालिका 2 — स्थलीय पौधों पर माइक्रोप्लास्टिक्स के दुष्प्रभाव

प्लास्टिक का प्रकार	पौधे की प्रजाति का नाम	प्लास्टिक का आकार	पौधों पर प्रभाव	संदर्भ
हरे फ्लोरोसेंट प्लास्टिक कण	लेपिडियम सैटाईवम (Lepidium sativum)	50, 500 और 4800 नैनोमीटर	बीज अंकुरण दर कम हुई और जड़ के रेशों में माइक्रोप्लास्टिक कणों के जमा होने के कारण जड़ की वृद्धि कम हुई, बीज के छिद्रों को अवरुद्ध कर दिया	बोस्कर *et al.*, 2019
पॉलीस्टीरीन और पालीटेट्राफ्लुओरोईथीलीन	ओरिज़ा सैटाइवा (Oryza sativa)	10-100 माइक्रोमीटर और 0.1-1 माइक्रोमीटर	पोषक तत्वों की उपलब्धता में कमी, जड़ों की वृद्धि और प्रकाश संश्लेषण गतिविधि को प्रभावित करके पौधे का तनाव बढ़ाया, लिपिड पेरोक्सीडेशन, ऑक्सीडेटिव बर्स्ट और आर्सेनिक की उपस्थिति में प्रकाश संश्लेषण दर में वृद्धि	डॉंग *et al.*, 2021
पॉलीप्रोपायलीन, हाई-डेंसिटीपॉलीईथीलीन, लो-डेंसिटीपॉलीईथीलीन और पॉलीईथीलीनटरथैलेट	लाइकोपर्सिकॉन एस्कुलेंटम (Lycopersicon esculentum)	2.4-2.6 मिमी और 2 मिमी (PET)	फल उत्पादन में देरी और पोषक तत्वों की उपलब्धता में कमी, जिससे बायोमास कम हुआ	हेर्नान्देज़-एरेनास *et al.*, 2021
पॉलीविनायलक्लोराइड	लेपिडियम सैटाईवम (Lepidium sativum)	NA	ऑक्सीडेटिव तनाव और विलंबित अंकुरण दर हुई ऑक्सीडेटिव तनाव और विलंबित अंकुरण दर हुई	पिग्नात्तेल्ली *et al.*, 2020
पॉलीस्टीरीन माइक्रोबीड्स	लैक्टुका सैटाईवा (Lactuca sativa), रोसा (Rosa)	0.2 और 1.0 माइक्रोमीटर	जड़ कैप से माइक्रोबीड्स का अवशोषण और पत्तियों में स्थानांतरण, पत्तियों के क्लोरोफिल में कमी	ली *et al.*, 2019
पॉलीईथीलीन और पॉलीलैक्टिक एसिड	ज़िया मेस (Zea mays)	100-154 माइक्रोमीटर	मक्का बायोमास और पत्तियों के क्लोरोफिल में कमी	वांग *et al.*, 2020
पॉलीईथीलीन	लैक्टुका सैटाईवा वैराइटी रामोस होर्ट (Lactuca sativa) (var. ramose Hort)	-23 माइक्रोमीटर	जड़ों और पत्तियों की कोशिका भित्ति को क्षतिग्रस्त करके, जड़ की वृद्धि, पत्तियों की संख्या, टहनी/कोपल बायोमास, पौधे की ऊंचाई, प्रकाश संश्लेषण दर, रुबिस्को एंजाइम गतिविधि को बाधित किया और पौधे की एंटीऑक्सीडेंट रक्षा प्रणाली प्रभावित हुई	गाओ *et al.*, 2019
पॉलीस्टीरीन	विसिया फैबा (Vicia faba)	5 मिमी, 100 नैनोमीटर	एंजाइम गतिविधि कम हुई और ऑक्सीडेटिव क्षति और जीनोटॉक्सिक प्रभाव में वृद्धि हुई, कोशिका भित्ति के छिद्रों को अवरुद्ध करके पानी और पोषक तत्वों का संचारण कम किया	जिआंग *et al.*, 2019
पॉलीएमाइड, फिनॉल फॉर्मेल्डिहाइड, हाई-डेंसिटीपॉलीईथीलीन, पॉलीप्रोपायलीन	एलियम फिस्टुलोसम (Allium fistulosum)	15-20 माइक्रोमीटर	पौधे के बायोमास और जड़ के गुणों में परिवर्तन का कारण बना	de Souza Machado *et al.*, 2018

(क्रमशः ...)

तालिका 2 — स्थलीय पौधों पर माइक्रोप्लास्टिक्स के दुष्प्रभाव (क्रमशः ...)

प्लास्टिक का प्रकार	**पौधे की प्रजाति का नाम**	**प्लास्टिक का आकार**	**पौधों पर प्रभाव**	**संदर्भ**
पॉलीस्टीरीन नैनोप्लास्टिक	ट्रिटिकम एस्टिवम (Triticum aestivum)	100 नैनोमीटर	गेहूं के अंकुर के टहनी/कोपल से जड़ बायोमास अनुपात में कमी, पत्ती चयापचय और सूक्ष्म पोषक तत्व सामग्री में परिवर्तन, नैनोप्लास्टिक कण जड़ से ऊपर टहनी/कोपल भाग में स्थानांतरित हुए	लीआन *et al.*, 2020
पॉलीईथीलीनटरथैलेट, पॉलीब्यूटिलीन टरथेलेट	ट्रिटिकम एस्टिवम (Triticum aestivum)	1 मिमी, 500 माइक्रोमीटर, 250 माइक्रोमीटर, 50 माइक्रोमीटर	पौधे की ऊंचाई, पत्ती की सतह का क्षेत्रफल की और टहनी/कोपल बायोमास में कमी	*et al.*, 2018
लो-डेंसिटीपॉलीईथीलीन, बायोडिग्रेडेबल प्लास्टिक मल्च	ट्रिटिकम एस्टिवम (Triticum aestivum)	4-10 मिमी, 50 माइक्रोमीटर - 1 मिमी	गेहूं के ऊपरी भागों की ऊंचाई कम हुई और बायोमास कम हुआ, वाष्पशील पदार्थों का उत्पादन बढ़ाया	की *et al.*, 2020
पॉलीस्टीरीन बीड्स	ट्रिटिकम एस्टिवम (Triticum aestivum)	100 नैनोमीटर	जड़ से पत्ती की शिरा और टहनी/कोपल जाइलम में स्थानांतरित हुए	लिआन *et al.*, 2020
पॉलीस्टीरीन बीड्स	एलियम सेपा (Allium cepa)	50 नैनोमीटर	जड़ की एपिडर्मिस (रिक्तिकाएं और साइटोप्लाज्म) में जमा हुए	गिओर्गेत्ति *et al.*, 2020

इनकी परस्पर-क्रियाओं और इनके व्यापक पारिस्थितिक प्रभावों को समझने के लिए और अधिक अध्ययनों की आवश्यकता पर बल देते हैं।

इस जटिल समस्या के समाधान के लिए वैज्ञानिक अनुसंधान, नीति निर्माण और टिकाऊ कृषि पद्धतियों को एक साथ लाने वाले बहुआयामी दृष्टिकोण की आवश्यकता है। प्रमुख रणनीतियों में कृषि में प्लास्टिक के उपयोग को कम करना, रीसाइक्लिंग और अपशिष्ट प्रबंधन प्रणालियों में सुधार करना, और बायोडिग्रेडेबल सामग्रियों एवं उत्पादों को बढ़ावा देना शामिल होना चाहिए। माइक्रोप्लास्टिक प्रदूषण को इसके स्रोत पर कम करने के लिए कड़े नियम बनाना और अंतर्राष्ट्रीय सहयोग बढ़ाना महत्वपूर्ण होगा। इसके अलावा, कृषि मृदा से माइक्रोप्लास्टिक की निगरानी, रोकथाम और निराकरण के लिए प्रौद्योगिकियों को उन्नत करना मानव और पर्यावरणीय स्वास्थ्य दोनों की सुरक्षा के लिए आवश्यक होगा।

संदर्भ

1. Bansal, O. P., & Singh, A. (2022). *A Review on Microplastic in the* Soils and *their Impact on Soil Microbes*, Crops and Humans. International Journal of Research & GRANTHAALAYAH, 10(9), 245-273.
2. Boots, B., Russell, C. W., & Green, D. S. (2019). *Effects of microplastics in soil ecosystems*: *above and below ground*. Environ Sci Technol, 53(19), 1 1496-11506.
3. Bosker, T., Bouwman, L. J., Brun, N. R., Behrens, P., & Vijver, M. G. (2019). *Microplastics accumulate on pores in seed capsule and delay germination and root growth of the terrestrial vascular plant Lepidium sativum*. Chemosphere, 226, 774-781.
4. Chia, R. W., Lee, J.-Y., Jang, J., Kim, H., & Kwon, K. D. (2022). *Soil health and microplastics*: *a review of the impacts of microplastic contamination on soil properties*. Journal of Soils and Sediments, 22(8), 2690-2705.
5. Corradini, F., Bartholomeus, H., Lwanga, E. H., Gertsen, H., & Geissen, V. (2019a). *Predicting soil microplastic concentration using vis-NIR spectroscopy*. Sci Total Environ, 650, 922-932.
6. Corradini, F., Meza, P., Eguiluz, R., Casado, F., Huerta-Lwanga, E., & Geissen, V. (2019b). *Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils*

from sewage sludge disposal. Sci Total Environ, 671, 411-420.

7. de Souza Machado, A. A., Kloas, W., Zarfl, C., Hempel, S., & Rillig, M. C. (2018a). *Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems*. Glob Change Biol, 24(4), 1405-1416.
8. de Souza Machado, A. A., Lau, C. W., Till, J., Kloas, W., Lehmann, A., Becker, R., & Rillig, M. C. (2018b). *Impacts of microplastics on the soil biophysical environment*. Environ Sci Technol, 52(17), 9656-9665.
9. Dong, H. D., Liu, T., Han, Z. Q., Sun, Q. M., & Li, R. (2015). *Determining time limits of continuous film mulching and examining residual effects on cotton yield and soil properties*. J Environ Biol, 36, 677-684.
10. Dong, Y., Gao, M., Qiu, W., & Song, Z. (2021). *Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil*. Ecotoxicol Environ Saf, 211, 111899.
11. Dong, Y., Gao, M., Song, Z., & Qiu, W. (2020). *Microplastic particles increase arsenic toxicity to rice seedlings*. Environ Pollut, 259, 113892.
12. Fei, Y., Huang, S., Zhang, H., Tong, Y., Wen, D., Xia, X., & Barceló, D. (2020). *Response of soil enzyme activities and bacterial communities to the accumulation of microplastics in an acid cropped soil*. Sci Total Environ, 707, 135634.
13. Gao, M., Liu, Y., & Song, Z. (2019). *Effects of polyethylene microplastic on the phytotoxicity of di-n-butyl phthalate in lettuce (Lactuca sativa L. var. ramosa Hort*). Chemosphere, 237, 124482.
14. Giorgetti, L., Spanò, C., Muccifora, S., Bottega, S., Barbieri, F., Bellani, L., & Castiglione, M. R. (2020). *Exploring the interaction between polystyrene nanoplastics and Allium cepa during germination: Internalization in root cells, induction of toxicity and oxidative stress*. Plant Physiol Biochem, 149, 170-177.
15. Han, L., Chen, L., Feng, Y., Kuzyakov, Y., Chen, Q. A., Zhang, S., ... & Rillig, M. C. (2024). *Microplastics alter soil structure and microbial community composition*. Environment International,185, 108508.
16. Hasan, M. M., & Tarannum, M. N. (2025). *Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and crop health in agricultural systems*. Journal of Hazardous Materials Advances, 17, 100528.
17. Hernsndez-Arenas, R., Beltrsn-Sanahuja, A., Navarro-Quirant, P., & Sanz-Lazaro, C. (2021). *The effect of sewage sludge containing microplastics on growth and fruit development of tomato plants*. Environ Pollut, 268, 115779.
18. Huang, H., Mohamed, B. A., & Li, L. Y. (2023). Accumulation and fate of microplastics in soils after application of biosolids on land: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1745-1759.
19. Hüffer, T., Metzelder, F., Sigmund, G., Slawek, S., Schmidt, T. C., & Hofmann, T. (2019). *Polyethylene microplastics influence the transport of organic contaminants in soil*. Sci Total Environ, 657, 242-247.
20. Imran, M., & Naik, D. K. R. (2019). Co-*selection of multi-antibiotic resistance in bacterial pathogens in metal and microplastic contaminated environments: an emerging health threat*. Chemosphere, 215, 846-857.
21. Jadhav, B., & Medynska-Juraszek, A. (2024). *Microplastic and Nanoplastic in Crops: Possible Adverse Effects to Crop Production and Contaminant Transfer in the Food Chain*. Plants, 13(17), 2526.
22. Jiang, X., Chen, H., Liao, Y., Ye, Z., Li, M., & Klobucar, G. (2019). *Ecotoxicity and genotoxicity of polystyrene microplastics on higher plant Vicia faba*. Environ Pollut, 250, 831-838.
23. Jia, L., Liu, L., Zhang, Y., Fu, W., Liu, X., Wang, Q., Tanveer, M., & Huang, L. (2023). *Microplastic stress in plants: effects on plant growth and their remediations*. Frontiers in Plant Science, 14.
24. Kinigopoulou, V., Pashalidis, I., Kalderis, D., & Anastopoulos, I. (2022). *Microplastics as carriers of inorganic and organic contaminants in the environment: A review of recent progress*. Journal of Molecular Liquids, 350, 118580.
25. Lahive, E., Walton, A., Horton, A. A., Spurgeon, D. J., & Svendsen, C. (2019). *Microplastic particles reduce reproduction in the terrestrial worm Enchytraeus crypticus in a soil exposure*. Environ Pollut, 255, 113174.
26. Lehman, A., Han, L., Chen, L., Chen, S., Feng, Y., Sun, H., & Xue, L. (2020). *Polyester microplastic mitigated NH3 volatilization from a rice-wheat rotation system: does particle size or natural aging effect matter*?. ACS Sustainable Chemistry & Engineering.

27. Lei, L., Liu, M., Song, Y., Lu, S., Hu, J., Cao, C., & He, D. (2018). *Polystyrene (nano) microplastics cause size-dependent neurotoxicity, oxidative damage and other adverse effects in Caenorhabditis elegans-* Environ Sci Nano, 5(8), 2009-2020.

28. Li, L., Zhou, Q., Yin, N., Tu, C., & Luo, Y. (2019). *Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant*. Sci Bull, 64(9), 928-934.

29. Li, Z., Li, R., Li, Q., Zhou, J., & Wang, G. (2020d). *Physiological response of cucumber (Cucumis sativus L.) leaves to polystyrene nanoplastics pollution*. Chemosphere, 255, 127041.

30. Lian, J., Wu, J., Xiong, H., Zeb, A., Yang, T., Su, X., & Liu, W. (2020). *Impact of polystyrene nanoplastics (PSNPs) on seed germination and seedling growth of wheat (Triticum aestivum L.)*. J Hazard Mater, 385, 121620.

31. Lin, D., Yang, G., Dou, P., Qian, S., Zhao, L., Yang, Y., & Fanin, N. (2020). *Microplastics negatively affect soil fauna but stimulate microbial activity: insights from a field-based microplastic addition experiment*. Proc R Soc B, 287(1934), 20201268.

32. Lin, J., Chen, B., Dong, H., Zhang, W., Kumar, A., Hui, D., ... & Zhu, B. (2025). *Effects of soil moisture fluctuation and microplastics types on soil organic matter decomposition and carbon dynamics*. Soil Biology and Biochemistry, 205, 109781.

33. Liu, E. K., He, W. Q., & Yan, C. R. (2014). *'White revolution' to 'white pollution' agricultural plastic film mulch in China*. Environ Res Lett, 9(9), 091001.

34. Liu, H., Yang, X., Liu, G., Liang, C., Xue, S., Chen, H., & Geissen, V. (2017). *Response of soil dissolved organic matter to microplastic addition in Chinese loess soil.* Chemosphere, 185, 907-917.

35. Liu, S., Wang, J., Zhu, J., Wang, J., Wang, H., & Zhan, X. (2021a). *The joint toxicity of polyethylene microplastic and phenanthrene to wheat seedlings*. Chemosphere, 130967.

36. Lozano, Y. M., & Rillig, M. C. (2020). *Effects of microplastic fibers and drought on plant communities*. Environ Sci Technol, 54(10), 6166-6173.

37. Ng, E. L., Lin, S. Y., Dungan, A. M., Colwell, J. M., Ede, S., Lwanga, E. H., & Chen, D. (2021). *Microplastic pollution alters forest soil microbiome*. J Hazard Mater, 409, 124606.

38. Perez-Reverón, R., Aklvarez-Mendez, S, J., Kropp, R. M., Perdomo-Gonzalez, A., Hernsndez-Borges, J., & Díaz-Peña, F. J. (2022). *Microplastics in Agricultural Systems: Analytical Methodologies and Effects on Soil Quality and Crop Yield*. Agriculture, 12(8), 1162.

39. Pignattelli, S., Broccoli, A., & Renzi, M. (2020). *Physiological responses of garden cress (L. sativum) to different types of microplastics*. Sci Total Environ, 727, 138609.

40. Qi, Y., Yang, X., Pelaez, A. M., Lwanga, E. H., Beriot, N., Gertsen, H., & Geissen, V. (2018). *Macro- and micro-plastics in soil-plant system: effects of plastic mulch film residues on wheat (Triticum aestivum) growth*. Sci Total Environ, 645, 1048-1056.

41. Qi, Y., Beriot, N., Gort, G., Lwanga, E. H., Gooren, H., Yang, X., & Geissen, V. (2020a). *Impact of plastic mulch film debris on soil physicochemical and hydrological properties*. Environ Pollut, 266, 115097.

42. Qi, Y., Ossowicki, A., Yang, X., Lwanga, E. H., Dini-Andreote, F., Geissen, V., & Garbeva, P. (2020b). *Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties*. J Hazard Mater, 387, 121711.

43. Rillig, M. C., Hoffmann, M., Lehmann, A., Liang, Y., Lück, M., & Augustin, J. (2021). *Microplastic fibers affect dynamics and intensity of CO2 and N2O fluxes from soil differently*. Microplast Nanoplast, 1(1), 1-11.

44. Rillig, M. C., Lehmann, A., de Souza Machado, A. A., & Yang, G. (2019). *Microplastic effects on plants*. New Phytologist, 223(2), 1066-1070.

45. Shi, J., Wang, Z., Peng, Y., Zhang, Z., Fan, Z., Wang, J., & Wang, X. (2023). *Microbes drive metabolism, community diversity, and interactions in response to microplastic-induced nutrient imbalance*. Science of the Total Environment, 877, 162885.

46. Wang, J., Lv, S., Zhang, M., Chen, G., Zhu, T., Zhang, S., & Luo, Y. (2016). *Effects of plastic film residues on occurrence of phthalates and microbial activity in soils*. Chemosphere, 151, 171-177.

47. Wang, F., Zhang, X., Zhang, S., Zhang, S., & Sun, Y. (2020). *Interactions of microplastics and cadmium on plant growth and arbuscular mycorrhizal fungal communities in an agricultural soil*. Chemosphere, 254, 126791.

48. Yadav, S., Gupta, E., Patel, A., Srivastava, S., Mishra, V. K., Singh, P. C., Srivastava, P. K., & Barik, S. K. (2022). *Unravelling the emerging threats of*

microplastics to agroecosystems. Rev Environ Sci Biotechnol, 21(3), 771-798.

49. Yu, H., Fan, P., Hou, J., Dang, Q., Cui, D., Xi, B., & Tan, W. (2020). *Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: an investigation at the aggregate-fraction level*. Environ Pollut, 267, 115544.
50. Zhang, G. S., & Liu, Y. F. (2018). *The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China*. Sci Total Environ, 642, 12-20.
51. Zhang, F. X., Li, X. T., & Zhang, G. S. (2019). *Effects of polyester microfibers on soil physical properties: perception from a field and a pot experiment*. Sci Total Environ, 670, 1-7.
52. Zhang, F. X., & Zhang, G. S. (2020). *Variations in aggregate-associated organic carbon and polyester microfibers resulting from polyester microfibers addition in a clayey soil*. Environ Pollut, 258, 113716.