沈丹,金路路,李瑞春,等.棉田土壤微塑料分布及其对土壤特性的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2025,45(5):18-26.
Shen D, Jin L L, Li R C,et al.The distribution of microplastics in cotton field soils and theirimpact on soil properties[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2025,45(5):18-26.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202507057

棉田土壤微塑料分布及其对土壤特性的影响

沈丹,金路路,李瑞春,李振,徐敏*

(辽宁省经济作物研究所 辽宁 辽阳 111000)

摘　要:[目的]本研究旨在准确评估土壤微塑料(microplastics,MPs)对耕层土壤特性的影响。[方法]选择棉花覆膜(FM)栽培和无膜(NM)栽培地块,分3个土层(上层:0~10 cm;中层:10~20 cm;底层:20~30 cm),检测各层次20~500 μm的MPs、全氮(TN)、有机碳(SOC)含量、5种生物酶,即脲酶(URE)、蔗糖酶(SUC)、纤维素水解酶(CBH)、碱性磷酸酶(ALP)、过氧化氢酶(CAT)活性,并进行耕层土壤特性指标与MPs点数的相关性分析。[结果]耕层土壤中共检测出26种MPs,以其中7种主要MPs为研究对象,发现:FM模式下随耕层深度增加,FR-MPs点数增加,PU、PE、ACR的MPs点数降低;NM模式下,PET-MPs点数增加、PP-MPs点数降低。上层、中层表现的PE-MPs点数、底层的FR-MPs点数表现FM模式显著或极显著高于NM模式;底层的ACR-MPs点数表现NM显著高于FM。在上层、中层的SOC含量表现FM模式显著或极显著高于NM模式,而PU-MPs和PE-MPs的点数与C/N呈显著正相关。上层和底层的CBH活性表现FM模式显著高于NM模式;中层的URE和CAT活性表现FM显著高于NM模式;底层的CAT活性表现FM显著低于NM;PP-MPs点数与CBH活性、SUC活性,ACR-MPs点数与CAT活性都呈显著正相关。[结论]棉田耕层土壤中共检测出26种直径在20~500 μm的MPs成分。7种主要MPs中,FM模式下各耕层的PE-MPs点数均高于NM模式,并且随耕层深度加深而降低。相关分析发现耕层土壤MPs的分布会影响SOC含量和生物酶活性,但是不同耕层的土壤特性及其与7种主要MPs的相关性都未呈现统一的规律。

关键词:微塑料MPs; 耕层土壤; 土壤有机碳SOC; 生物酶
中图分类号:S154.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2025)05-0018-09

The distribution of microplastics in cotton field soils and theirimpact on soil properties

Shen Dan, Jin Lulu, Li Ruichun, Li Zhen, Xu Min*

(*Industrial Crops Institute of Liaoning, Liaoyang 111000, China*)

Abstract: [Objective] This study aimed to accurately evaluate the impact of soil microplastics (MPs) on the properties of the plough layer soil. [Methods] Experimental plots under plastic film mulching (FM) and non-mulching (NM) cultivation were selected. Soil samples were collected from three depth layers: top layer (0~10 cm), middle layer (10~20 cm), and bottom layer (20~30 cm). The abundance of MPs (20~500 μm), along with total nitrogen (TN), soil organic carbon (SOC), and five soil enzyme activities (urease, URE; sucrase, SUC; Cellulase, CBH; Alkaline phosphatase, ALP; Catalase, CAT) were determined for each layer. Further more, a correlation analysis was conducted between the characteristic indicators of the plough layer soil and the number of MPs particles. [Results] A total of 26 types of MPs were detected in the plough layer soil. Analysis pf the seven predominant MPs revealed that under FM conditions, FR-MPs abundance increased with soil depth, while PU-, PE-, and ACR-MPs abundance decreased. The abundance of PET-MPs in the top and middle layers, and FR-MPs om the bottom layer, was significant or highly significantly higher under FM than under NM. Conversely, ACR-MPs abundance in

收稿日期:2025-07-30　　**修回日期**:2025-09-29
基金项目:棉花生物育种与综合利用全国重点实验室开放课题(CB2024A09);辽宁省农科院学科建设项目(2024XKIS5224)。
作者简介:沈丹(ORCID:0000-0004-1764-3029),助理研究员,研究方向:棉花资源与新品种选育,E-mail:22833033@qq.com。
*通信作者:徐敏(ORCID:0000-0002-5526-4367),研究员,E-mail:shumin690101@163.com。

the bottom layer was significantly higher under NM than under FM. SOC content in the top and middle layers was significantly or extremely significantly higher than under NM. PU-MPs and PE-MPs abundance showed a significant positive correlation with C/N ratio. CBH activity in the top and bottom layers was significantly higher under FM than under NM. In the middle layer, URE and CAT activities were significantly higher under FM than under NM. In contrast, CAT activity in the bottom layer was significantly lower under FM than under NM. PP-MPs abundance showed a significant positive correlation with both CBH and SUC activities. Similarly, ACR-MPs abundance was significantly positively correlated with CAT activity. [Conclusion] A total of 26 types of MPs, ranging from 20 to 500 μm in diameter, were detected in the plough layer of cotton fields. Among the seven major MPs analyzed, PE-MPs abundance was consistently higher under FM than under NM across all soil layers, while showing a decreasing trend with increasing soil depth. Correlation analysis revealed that MPs distribution affected both SOC content and soil enzyme activity. However, no consistent patterns were observed in soil properties across different plough layers or in their correlations with MPs.

Keywords: Microplastics(MPs), Plough layers, Soil organic carbon(SOC), Biological enzyme

微塑料(microplastics,MPs)的概念由Thompson等[1]2004年首次提出,是指尺寸小于5 mm的塑料颗粒、纤维或碎片,呈亚微米级分散态,具有半衰期极长、良好的疏水性及化学惰性等特性[2],广泛存在于土壤、海洋、空气和淡水等环境中。研究认为,MPs具有极强的流动性,能够通过各种介质广泛传播,并且颗粒越小、流动性越强[3]。

农田土壤是MPs主要集中的一个区域[4],其中农用地膜是MPs重要来源之一。农业地膜覆盖栽培技术具有显著的增温保墒作用,极大地促进了干旱半干旱和高海拔、高纬度地区的农业发展[5]。我国幅员广阔,气候和土壤条件多样,地膜覆盖栽培技术的应用范围越来越广,据统计,2021年我国塑料地膜覆盖面积为1730万hm^2,使用量为130万t,占全球使用量的75%[6]。在诸多塑料产品中,聚乙烯(PE)具有分子量大、性能稳定、难降解等特点,生产的塑料薄膜延展性好、成本低,在农业生产中被广泛使用[7]。然而,由于缺乏有效的回收机制和地膜厚度过薄等原因,农用地膜回收率不足60%,残留量60~90 kg/hm^2,而且会随着使用年限增加而增多[8-9],MPs的丰度值也随之显著上升[10]。以新疆棉花生产为例,20世纪80年代初开始引进应用地膜,至今为止,长期覆膜棉田耕层地膜残留量高达42~540 kg/hm^2[11],MPs丰度值可达4537个/kg干土[8]。

MPs具有更小的粒径(通常小于5 mm)、更大的比表面积、更为发达的孔结构和丰富的表面官能团[1],其进入土壤后会改变土壤孔隙度进而导致土壤致密化,降低土壤的透气性和持水能力,进而引起土壤pH变化,干扰必需营养素和重金属的生物利用。Mps直接影响土壤团聚体的直径和含量,降低其稳定性从而影响土壤结构和碳储存[12],影响土壤肥力。MPs还会对土壤酶和微生物活性,以及微生物群落结构产生影响[13]。农田土壤MPs的危害是多方面的:MPs极易吸附在植物种子及根表皮上,或进入植物的维管束内部[14],影响植物吸收土壤水分和养分;MPs可通过吸附有机污染物、联合重金属等方式[15],影响植物生长发育;MPs能够影响土壤中微生物的群落组成,选择性地富集周围环境中的病原物[16],提高植物病害的发生率;最后,MPs可经由植物随食物链向上逐级积累,对人体健康产生潜在危害[17]。

棉花生产是我国地膜覆盖栽培技术应用面积最大、应用时间最长的农作物之一。随着残膜污染对农业生产和生态环境的危害日益受到重视,国家棉花产业技术体系于2014年提出开展无膜棉花种植以从源头减少污染,响应棉花产业体系的号召,辽宁省经济作物研究所于同年开始进行无膜棉花栽培研究。经过多年试验示范,认为在辽河流域棉区,无膜栽培棉花于4月25日左右播种可以获得较理想的产量,且纤维品质不受影响(数据未发表)。无膜棉花栽培的关键环节在于春季出苗和保苗,气温和降雨直接影响耕层土壤的温度和适度,二者共同影响棉花出苗和幼苗生长(数据未发表)。耕层残膜含量会影响土壤理化性质,其中0~4 cm^2的残膜含量与土壤理化性质相关显著(数据待发表)。无膜栽培可有效降低耕层残膜污染,尤其可减少较大面积的残膜含量。

为追求更高的产量和效益,近年来,辽河流域棉区地膜覆盖栽培面积扩大明显,但对于残膜及MPs的相关研究却落后于其它地区。土壤MPs的差异受到地膜覆盖年限、使用和回收情况、土壤降

解能力、气象环境条件等因素的影响。本文从MPs入手,比较长期覆膜棉田经过无膜栽培后,耕层土壤MPs的含量和分布差异,及其对土壤有机碳(SOC)含量、土壤酶活性的影响,以期准确评估中高纬度地区地膜覆盖栽培的生态风险,为黑土地的保护和利用提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验于2023-2024年在辽宁省经济作物研究所(辽宁辽阳,41°15′43″N,123°8′26″E)进行。分别选择覆膜栽培(FM)和无膜栽培(NM)2种方式,FM地块从20世纪80年代起开始覆膜栽培棉花,累计使用年限超过40年;NM地块从2016年开始进行无膜棉花栽培,连续进行约8年。

试验采用大垄双行种植,垄宽110 cm,大行距70 cm、小行距40 cm,株距20 cm,种植密度为9万株/hm^2。播种前施用N∶P∶K=15∶15∶15的缓释复合肥600 kg/hm^2。试验进行期间,除地膜覆盖外,2个地块的栽培管理方式都按照当地的高产栽培技术规程[18]进行。

1.2 试验材料

试验所选用棉花品种为辽棉23号(辽审棉[2010]26号),为辽宁省经济作物研究所选育成功的常规陆地棉品种,生育期125 d,属特早熟抗病高产类型,适于在辽河流域特早熟棉区、黄河流域夏播棉区、西北内陆棉区等地推广应用。试验所用地膜为0.01 mm的聚乙烯(PE)吹塑农用地膜,幅宽110 mm。

1.3 试验方法

1.3.1 耕层土壤微塑料含量调查

选择地块平整、地力均匀且紧密相邻的长方形覆膜栽培(FM)和无膜栽培(NM)棉田,样方长15 m、宽40 m。每样方采取对角线3点取样法,分3层(上层:0~10 cm、中层:10~20 cm、底层:20~30 cm)采集土壤样本,2个处理共采集18份样本。注意采集、保存和运输过程中,严格避免使用塑料制品。

样本委托上海微谱检测科技集团股份有限公司,采用安捷伦8700 LDIR激光成像红外光谱仪进行检测[19]。具体操作步骤为:取20 g土壤样本,干燥至恒重,利用密度为1.7~1.8 kg/L的氯化锌($ZnCl_2$)溶液进行2次浮选;将两次浮选的上清液混合后,依次利用500 μL和13 μL的钢模进行真空抽滤;用30 mL的超纯水和30 mL的无水乙醇少量多次冲洗滤膜至无明显白色异物;将滤膜浸入无水乙醇中超声抽滤30 min,再用无水乙醇反复多次冲洗滤膜正反面,使滤膜上的微塑料尽可能分散在乙醇溶液中;将收集到的乙醇溶液置于红外线干燥箱中,浓缩至150 mL。最后,将所得到的溶液全部滴加至LDIR高反玻璃上,待乙醇完全挥发后,进行LDIR测试。

测试时以微塑料谱库为模板,采用颗粒分析模式进行自动测试,设置颗粒匹配度>0.65,直径20~500 μm。

1.3.2 耕层土壤有机碳(SOC)含量、全氮(TN)含量检测

在1.3.1选择的地块中,采取5点取样法,每层取3个样本,样本重约200 g。每层样本分别混合,去除杂质,烘干后过2 mm筛,每样本取20 g,用于测量土壤养分含量。其中全氮(TN)采用凯氏定氮法(高温消解后蒸馏滴定)测定,土壤有机碳(SOC)含量采用水合热重铬酸钾氧化-比色法测定,在此基础上,计算C/N比值。具体操作参考鲍士旦等方法[20]。

1.3.3 耕层土壤酶活性检测

在1.3.1选择的地块中,采用5点取样法,用10 mL无菌离心管,分3层(同1.3.1)采集土壤样本。冷藏于-80℃超低温冰箱中,再利用干冰冷冻转运至江苏酶免实业有限公司。利用该公司生产的ELISA试剂盒,采用双抗体一步夹心法酶联免疫吸附试验(ELISA),检测样本中的脲酶(Urease)、蔗糖酶(Sucrase)、纤维素水解酶(CBH)、碱性磷酸酶(ALP)、过氧化氢酶(CAT)活性,利用BCA蛋白(BCA)ELISA科研试剂盒进行矫正[21-22]。

检测前,先将样本取出,去除杂质,过2 mm筛。检测时,先往预先包被目标酶抗体的包被微孔中,依次加入标本、标准品、HRP标记的检测抗体,经过温育并彻底洗涤。用底物TMB显色,用酶标仪在450 nm波长下测定吸光度(OD值)。以标准品浓度为横坐标,对应OD值为纵坐标,绘制出标准品线性回归曲线,按曲线方程计算各样本浓度值。

1.4　统计分析

采用Excel 2021进行数据初步整理和统计;采用DPS 9.5数据处理系统[23],以Duncan's新复极差法进行显著性比较。

2　结果与分析

2.1　耕层土壤MPs的成分及分布

2.1.1　MPs的种类及出现频率

MPs的种类及出现频率结果见表1。

表1　耕层土壤微塑料(MPs)成分及出现频率

Table 1　The composition and occurrence frequency of MPs in the plough layer soil

序号 No.	MPs种类 Kinds of MPs	出现次数 Times	出现频率/% Frequency	平均点数/item Items
1	聚氨酯 Polyurethane PU	18	100.00	15.00
2	聚氯乙烯 Polyvinyl chloride PVC	17	94.44	6.35
3	氟橡胶 Fluororubber FR	17	94.44	9.35
4	聚乙烯 Polyethylene PE	16	88.89	5.69
5	聚对苯二甲酸乙二醇酯 Polyethylene Terephthalate PET	16	88.89	28.75
6	聚丙烯 Polypropylene PP	16	88.89	2.38
7	丙烯酸酯共聚物 Acrylate copolymer ACR	16	88.89	6.88
8	聚乳酸 Polylactic acid PLA	13	72.22	2.58
9	乙烯－丙烯酸共聚物 Ethylene－acrylic acid copolymer EAA	11	61.11	2.45
10	顺丁橡胶 Butadiene rubber BR	10	55.56	3.40
11	聚甲基丙烯酸甲酯 Polymethyl methacrylate PMMA	9	50.00	3.56
12	氟硅橡胶 Fluorosilicone rubber FSR	9	50.00	5.50
13	酚醛树脂 Phenolic resin PR	9	50.00	1.33
14	乙烯－醋酸乙烯酯共聚物 Ethylene－vinyl acetate copolymer EVA	9	50.00	3.25
15	丁苯橡胶 Styrene－butadiene rubber SBR	7	38.89	2.29
16	甲基丙烯酸甲酯－丁二烯－苯乙烯共聚物 Methyl methacrylate － butadiene － styrene copolymer MBS	5	27.78	1.20
17	酚醛环氧树脂 Phenolic epoxy resin PES	5	27.78	1.60
18	聚乙烯醇缩丁醛 Polyvinyl alcohol butyraldehyde PVB	4	22.22	1.50
19	聚四氟乙烯 Polytetrafluoroethylene PTFE	3	16.67	1.67
20	聚砜 Polysulfone PF	2	11.11	5.00
21	聚苯乙烯 Polystyrene PS	2	11.11	1.00
22	聚己内酯 Polycaprolactone PPL	2	11.11	1.00
23	聚酰亚胺 Polyimide PI	2	11.11	1.00
24	聚碳酸酯 Polycarbonate PC	1	5.56	1.00
25	丙烯腈－丁二烯－苯乙烯共聚物 Acrylonitrile－butadiene－styrene copolymer ABS	1	5.56	1.00
26	聚甲醛 Polyoxymethylene POM	1	5.56	1.00

由表1可见,耕层土壤中共检测出26种MPs成分。出现频率较高的MPs种类包括:聚氨酯(PU)在所有样品中出现,频率为100%;聚氯乙烯(PVC)、氟橡胶(FR)在17份样品中出现,频率为94.4%;聚乙烯(PE)、丙烯酸酯共聚物(ACR)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚丙烯(PP)在16份

样品中出现,频率为88.89%。结合本试验的取样方法可认为:以上7种化合物在2种栽培模式的3个耕层都有检出。

出现频率较低的化合物包括:3种仅在1份样品中出现,频率为5.56%,其中丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)和聚甲醛(POM)只存在于覆膜栽培底层,聚碳酸酯(PC)只存在于无膜栽培底层;4种仅在2份样品中出现,出现频率为11.11%,其中聚砜存在于无膜栽培的底层和覆膜栽培的顶层,聚苯乙烯(PS)出现于无膜栽培的顶层;聚己内酯和聚酰亚胺出现于覆膜栽培的顶层和中层;聚四氟乙烯(PTFE)在3份样品中出现,出现频率为16.67%,分别存在于无膜栽培的底层和覆膜栽培的顶层和底层。

26种化合物检出的平均点数为4.45 items,含量较多的3种分别是:PET,所有样品中出现的平均点数为28.75 items;PU平均点数为15.00 items;FR平均点数为9.35 items。含量较少的共6种,分别是聚苯乙烯(PS)、聚己内酯P(PPL)、聚酰亚胺(PI)、聚碳酸酯(PC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚甲醛(POM),都分别只检出了1 item。

2.1.2 主要MPs成分分布情况

由表2可见,NM模式下的PP、FM模式下的PU、PE、ACR的MPs点数表现随耕层深度增加而减少,NM模式下的PET和FM模式下的FR的MPs点数表现随耕层深度增加而增加。PE点数在3个耕层都表现FM高于NM,并且在上层差异显著、中层差异极显著。PET点数3个耕层都表现FM低于NM,但差异不显著。其余5种成分中,PU和ACR的点数表现上层、中层FM高于NM,底层NM高于FM,且ACR差异显著;PVC和PP的点数都表现上层、底层FM高于NM,中层NM高于FM;FR点数表现上层NM高于FM,中层、下层FM高于NM,并且底层差异显著。

表2 不同模式和耕层主要MPs成分分布

Table 2 Distribution of predominant MPs components across different plough modes and soil layers **item**

主要MPs成分 Main MPs components	0~10 cm		10~20 cm		20~30 cm	
	无膜 NM	覆膜 FM	无膜 NM	覆膜 FM	无膜 NM	覆膜 FM
聚氨酯 PU	5.67±1.20 aA	46.00±27.51 aA	4.67±0.33 aA	7.00±3.64 aA	16.67±6.69 aA	6.67±0.33 aA
聚氯乙烯 PVC	4.00±0.58 aA	8.67±1.20 aA	8.33±6.89 aA	2.00±0.58 aA	6.33±2.91 aA	6.67±3.67 aA
氟橡胶 FR	4.67±1.86 aA	2.00±1.15 aA	6.33±1.20 aA	15.00±4.04 aA	1.67±0.33 bA	23.33±3.84 aA
聚乙烯 PE	2.00±1.15 bA	11.00±0.58 aA	1.67±0.33 bB	7.00±0.58 aA	4.00±2.18 aA	4.67±4.18 aA
聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET	30.00±20.55 aA	4.00±0.57 aA	48.67±35.78 aA	2.33±0.67 aA	65.00±27.50 aA	3.33±1.20 aA
聚丙烯 PP	2.00±0.58 aA	3.67±1.45 aA	2.00±1.00 aA	1.67±0.33 aA	1.00±0.00 aA	2.33±2.33 aA
丙烯酸酯共聚物 ACR	6.33±5.84 aA	7.00±1.53 aA	4.67±2.03 aA	5.33±2.85 aA	10.00±0.58 aA	3.33±1.45 bA

注:同行不同小写字母表示相同耕层2种模式间主要MPs点数差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表差异极显著($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters within the same row denoted significant differences in the main MPs items between the two modes of the same plough layer at $P<0.05$, whereas different uppercase letters indicated highly significant differences at $P<0.01$.

2.2 不同栽培模式及耕层土壤营养元素含量

2.2.1 耕层土壤全氮(TN)和有机碳(SOC)含量

由表3可见,2种栽培模式的土壤TN含量分别随耕层深度增加而降低,SOC则表现中层含量较高。SOC含量在3个耕层都表现FM处理高于NM处理,且上层表现差异显著、中层表现差异极显著;TN含量在上层和底层表现FM高于NM,中层则相反,但差异不显著。C/N值来自于TN和SOC含量,其在2种栽培模式都表现中层比值最低,同时上层和中层表现FM高于NM、底层表现NM高于FM,但差异都不显著。

2.2.2 全氮(TN)和有机碳(SOC)含量与主要MPs相关分析

由表4可以看出,所检测的7种主要MPs中,PU、PE、PP的MPs点数与TN、SOC和C/N值都呈正相关,并且PU、PE的MPs点数与C/N值相关显著。PET的MPs点数与TN、SOC和C/N值都呈负相关,但相关不显著。其余3种MPs,包括PVC、FR和ACR与TN、SOC和C/N值的相关性表现不一致,且相关不显著。

表3　不同模式和耕层TN和SOC含量

Table 3　The contents of TN and SOC across different cultivation modes and soil layers

耕层深度 Layers	栽培方式 Plough modes	全氮/(g/kg) Total nitrogen	土壤有机碳/(g/kg) Soil organic carbon	碳氮比 C/N
0～10 cm	覆膜 FM	0.73±0.079 aA	28.64±1.24 aA	55.35±13.73 aA
	无膜 NM	0.69±0.042 aA	25.15±0.40 bA	37.98±1.81 aA
10～20 cm	覆膜 FM	0.64±0.088 aA	30.11±0.75 aA	42.62±9.52 aA
	无膜 NM	0.66±0.078 aA	25.82±0.79 bB	32.42±4.70 aA
20～30 cm	覆膜 FM	0.61±0.062 aA	24.97±1.13 aA	45.56±2.77 aA
	无膜 NM	0.54±0.048 aA	24.04±1.32 aA	45.73±3.00 aA

注:同列不同小写字母表示相同耕层2种模式间主要MPs点数差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表差异极显著($P<0.01$)。

Note:Different lowercase letters within the same row denoted significant differences in the main MPs items between the two modes of the same plough layer at $P<0.05$, whereas different uppercase letters indicated highly significant differences at ($P<0.01$).

表4　全氮、有机碳含量及C/N与MPs主要种类含量的相关分析

Table 4　Correlation analysis of TN, SOC contents, C/N and main MPs contents

土壤养分 Index	聚氨酯 PU	聚氯乙烯 PVC	氟橡胶 FR	聚乙烯 PE	聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET	聚丙烯 PP	丙烯酸酯共聚物 ACR
TN	0.424 6	0.152 0	−0.216 9	0.382 4	−0.510 3	0.807 6	−0.311 2
SOC	0.343 4	−0.309 2	0.101 3	0.705 6	−0.672 2	0.414 2	−0.202 8
C/N	0.841 4*	0.224 5	−0.064 9	0.880 7*	−0.452 7	0.541 0	0.323 1

注:同行* 表示相关显著($P<0.05$),** 表示相关极显著($P<0.01$)。

Note:* within the same line indicated significant correlation($P<0.05$),** indicated extremly significant correlation($P<0.01$).

2.3　不同栽培模式及耕层间酶含量

2.3.1　生物酶含量比较

由表5可见,所检测的5种酶中,FM模式下的纤维素水解酶(CBH)和蔗糖酶(SUC)活性表现随耕层深度增加而降低、NM模式下的脲酶(URE)活性表现为随耕层深度增加而升高。CBH活性在上层和下层、URE活性在中层都表现为FM显著高于NM;CAT活性在中层表现为FM极显著高于NM,下层表现为NM显著高于FM。

表5　不同栽培模式及耕层间生物酶含量比较

Table 5　Comparison of biochemical enzyme content across different cultivation modes and soil layers

耕层深度 Layers		纤维素水解酶 CBH	蔗糖酶 SUC	脲酶 URE	碱性磷酸酶 ALP	过氧化氢酶 CAT
0～10 cm	FM	0.687 4±0.012 6 aA	344.39±15.71 aA	5 294.42±313.12 aA	0.061 7±0.004 2 aA	598.37±31.30 aA
	NM	0.590 0±0.015 3 bA	324.64±30.33 aA	5 346.55±323.15 aA	0.062 9±0.002 7 aA	606.14±42.15 aA
10～20 cm	FM	0.626 9±0.004 0 aA	318.64±10.35 aA	5 920.72± 85.56 aA	0.006 5±0.003 4 aA	613.02±6.08 aA
	NM	0.629 8±0.045 6 aA	331.98±15.16 aA	5 467.25± 51.75 bB	0.060 2±0.003 6 aA	565.22±6.56 bB
20～30 cm	FM	0.622 6±0.006 6 aA	318.51±28.53 aA	5 328.75±294.92 aA	0.059 6±0.002 4 aA	560.12±11.16 bA
	NM	0.548 0±0.021 7 bA	307.49±21.10 aA	5 520.68±330.95 aA	0.062 3±0.002 1 aA	655.24±31.72 aA

注:同列不同小写字母表示相同耕层2种模式间主要MPs点数差异显著($P<0.05$),不同大写字母代表差异极显著($P<0.01$)。

Note:Different lowercase letters within the same row denoted significant differences in the main MPs items between the two modes of the same plough layer at $P<0.05$, whereas different uppercase letters indicated highly significant differences at $P<0.01$.

2.3.2　生物酶含量与主要MPs种类分布相关分析

由表6可见,5种生物酶活性与主要MPs之间的相关性比较复杂,正相关、负相关皆有出现。其中:PP-MPs点数与CBH活性和SUC活性、ACR-MPs点数与CAT活性呈显著正相关。

3　讨论

农田土壤MPs来源十分广泛。农业生产中广

表6 生物酶含量与主要MPs含量的相关分析

Table 6 Correlation analysis between biochemical enzyme content and main MPs contents

生物酶 Biological enzyme	聚氨酯 PU	聚氯乙烯 PVC	氟橡胶 FR	聚乙烯 PE	聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET	聚丙烯 PP	丙烯酸酯共聚物 ACR
纤维素水解酶 CBH	0.554 4	0.357 5	0.118 3	0.675 6	−0.709 7	0.899 6*	−0.476 1
蔗糖酶 SUC	0.592 4	0.513 0	−0.285 5	0.455 1	−0.384 1	0.891 4*	−0.259 7
脲酶 URE	−0.351 7	−0.703 8	0.208 6	0.054 0	−0.069 0	−0.528 5	0.022 0
碱性磷酸酶 ALP	0.240 4	0.740 6	−0.390 4	−0.269 5	0.439 3	0.234 2	0.208 3
过氧化氢酶 CAT	0.204 2	−0.353 2	−0.5483	0.117 7	0.432 3	−0.487 2	0.914 2*

注:同行* 表示相关显著($P<0.05$),** 表示相关极显著($P<0.01$)。

Note:* within the same line indicated significant correlation($P<0.05$),** indicated extremly significant correlation($P<0.01$).

泛应用的塑料制品,包括地膜、棚膜、包装袋等,聚合物类农用化学品(造粒剂、涂层)、农田灌溉、城市和工业活动,以及大气沉降等,均是MPs在农田土壤积累的重要途径。本文检测棉田耕层土壤中直径在20~500 μm的MPs颗粒,共发现了26种MPs成分,也佐证了其来源的多样性。选择其中出现频率较高、检出点数较多的7种MPs为研究对象,发现在2种栽培模式(FM和NM)、3个耕层(0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm)之间,MPs的分布并没有显示出统一的规律,这一点与姚兴柱等[24]的研究结果相一致,即土壤MPs丰度与耕层深度之间并没有统一的变化规律。

本文的初衷是围绕FM和NM模式下PE-MPs开展研究,但检测发现,2种处理下(覆膜与不覆膜)PE-MPs的含量都不是最高的,进一步佐证了农田MPs来源的复杂性。首先,3个耕层都表现FM处理的PE-MPs点数高于NM处理,说明PE地膜的使用会提高土壤中PE-MPs的含量,意味着人类活动确实会影响耕层土壤MPs的分布。其次,FM处理的PE-MPs点数随耕层深度下降而减少,NM处理表现上层和中层点数相近、底层点数较高并且与FM处理的检测结果相接近。胡春光等[25]研究认为,小粒径MPs(<2 mm)的丰度随着覆膜年限和土壤深度的增加而增加,且长期连续覆膜促使MPs向更深层土壤渗透。根据本文结果,FM处理的PE-MPs的点数表现随耕层深度下降而减少,NM处理则表现相反,推测其原因在于FM处理仍然不断有新的地膜残留并分解为MPs;同时残膜碎片分解为MPs的过程很缓慢、所以在NM处理的上层和中层至今仍然能检测到PE-MPs;另一方面MPs沉积的过程比较缓慢,所以2种处理间底层的PE-MPs点数仍然比较接近。

MPs能够通过吸附等过程发生胶结作用,提高或降低团聚体的稳定性[26],进而对土壤物理结构、酸碱度、水分和养分保持、土壤碳库保护等产生重要影响,进而引起土壤酶和微生物活性的变化[14]。本文比较耕层土壤TN、SOC、C/N值、5种生物酶的活性及其与MPs点数的相关性,发现MPs会对土壤SOC组分、土壤酶活性造成影响,这一点与范萍[13]的研究结果一致。同时发现,上述指标与不同种类的MPs点数的相关性结果表现十分丰富,这一点与前人的研究结果相符,即MPs对土壤性质的影响的结果(如方向和程度)因MPs种类、浓度[27]、土壤及土地使用类型[28]等条件的不同而存在较大差异。

农田土壤是一个复杂的生态系统,是农业生产的基础。随着人们对塑料污染认识的增加,耕层土壤MPs的存在及其对土壤特性的影响是近年来的研究热点。不同粒径等级的MPs对土壤特性以及植物生长的影响,比如其对土壤微生物群落变化、SOC的变化的影响机理尚不明确。本文仅针对20~500 μm的MPs开展研究,取值范围有限。下一步将扩大范围,尝试对不同粒径的MPs进行分级研究,以获得更全面的结论。

本文围绕FM和NM模式下PE-MPs开展研究,但检测发现PE-MPs并不是耕层土壤中最主要的MPs。进一步分析发现,只有PE-MPs在耕层的分布基本符合预期,其余6种主要MPs的分布及所有7种MPs对土壤特性的影响,都没有表现出统一的规律。刘书铭等[29]通过在人为添加PE-MPs的方法进行试验,发现不同粒径的PE-MPs对土壤特性的影响具有明确的方向,这一点与本文的研究结果不同。推测其原因与不同种类MPs之间的互作有关,这也是我们下一步的研究

方向。

4　结论

本研究棉田耕层土壤中共检测出26种直径20～500 μm的MPs成分。7种主要MPs中,FM模式下各耕层的PE-MPs点数随耕层深度加深而降低,并且分别高于NM模式。相关分析发现耕层土壤MPs的分布会影响SOC含量和生物酶活性,但不同耕层土壤特性及其与7种主要MPs的检出点数相关分析结果没有表现出统一的规律。

参　考　文　献

[1]Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, et al. Lost at sea: where is all the plastic[J]. Science, 2004,304(5672): 838.

[2]Mei W P, Chen G E, Bao J Q, et al. Interactions between microplastics and organic compounds in aquatic environments: a mini review[J]. Science of the Total Environment, 2020, 736: 139472.

[3]王聪聪. 微塑料的典型旱作农田土壤污染特征及其对作物的毒性效应研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.
Wang C C. Characterization of soil contamination of typical dry farmland with microplastics and its toxic effects on crops[D]. Shenyang: Shenyang University, 2022.

[4]杨帆,候梦宗,宋丽莎,等. 微/纳米塑料在农业土壤中的趋势和影响[J]. 中国塑料, 2025(39)4:52-58.
Yang F, Hou M Z, Song L S, et al. Fate and effects of MPs/NPs in agricultural soils[J]. China Plastics, 2025(39)4:52-58.

[5]潘渝,郭谨,李毅,等. 地膜覆盖条件下的土壤增温特性[J]. 水土保持研究, 2002(2):130-134.
Pan Y, Guo J, Li Y, et al. Characteristics of increasing temperature in soils with plastic mulching[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2002(2):130-134.

[6]Li J J, Zhang J R, Ren S Y, et al. Atmospheric deposition of microplastics in a rural region of North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2023, 877:162947.

[7]喻晨. 聚乙烯微塑料对豌豆生长及土壤特性的影响研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
Yu C. Effects of polyethylene microplastics on pea growth and soil properties[D]. Xian: Xi'an University of Technology, 2023.

[8]Ren S Y, Wang K, Zhang J R, et al. Potential sources and occurrence of macroplastics and micro-plastics pollution in farmland soils: a typical case of China[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2024, 54(7): 533-556.

[9]Zhang H X, Huang Y M, An S S, et al. A review of microplastics in soil: distribution within pedosphere compartments, environmental fate, and effects[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2022, 233:380.

[10]Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources[J]. Science of the Total Environment, 2018, 612: 422-435.

[11]赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017,48(6):1-14.
Zhao Y, Chen X G, Wen H J, et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(6):1-14.

[12]Lozano Y M, Lehnert T, Linck L T, et al. Microplastic shape, polymer type, and concentration affect soil properties and plant biomass[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 616645.

[13]范萍. 微塑料对土壤溶解性有机质组成和结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
Fan P. Effects of microplastics on composition and structure of dissolved organic matter in soil [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.

[14]陈广龙,王文静,王俊. 微塑料对陆生植物生长发育和根际环境影响研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2023,39(5): 625-633.
Chen G L, Wang W J, Wang J. Research progress on the effects of microplastics on the growth and development of terrestrial plants and rhizosphere environment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(5):625-633.

[15]卢灵慧, 王娟, 郑阳, 等. 微塑料对农作物生长影响的研究进展[J]. 河南化工, 2021,38(6):8-11.
Lu L H, Wang J, Zheng Y, et al. Research progress of the effect of microplastics on crop growth[J]. Henan Chemical Industry, 2021, 38(6): 8-11.

[16]蒋娟, 龙云川, 胡菁, 等. 垃圾堆周边土壤微塑料及潜在病原微生物特征[J]. 中国环境科学, 2023,43(7): 3592-3603.
Jiang J, Long Y C, Hu J, et al. Characteristics of microplastics and potential pathogenic microorganisms in the soil surrounding a rural garbage dump [J]. China Environmental Science, 2023,43(7): 3592-3603.

[17]杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染:来源、过程及风险[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 281-298.
Yang J, Li L Z, Zhou Q, et al. Microplastics contamination of soil environment: sources, processes and risks [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(2):281-298.

[18]王子胜, 徐敏, 韩晓军, 等. 辽河流域棉区棉花高产高效栽培技术规程[S]. 沈阳:辽宁省质量技术监督局, 2016.
Wang Z S, Xu M, Han X J. Technical regulation on high-yielding and effciency cultivation in cotton in Liaohe Basin[S]. Shenyang: The Quality and Technology Supervision Bureau of Liaoning Province, 2016.

[19]Liu D P, Yang Z M, Gong Y, et al. Occurrence and emission characteristics of microplastics in agricultural surface runoff under different natural rainfall and short-term fertilizer application [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 477: 135254.

[20]鲍士旦. 土壤农化分析 3版[M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 11-14.
Bao S D. Soil agrochemical analysis 3rd[M]. Beijing: China

Agriculture Press, 2000: 11-14.

[21]Xing Y J, Wang F C, Yu S R, et al. Enhancing Phyllostachys edulis seedling growth in phosphorus-deficient soil: complementing the role of phosphate-solubilizing microorganisms with arbuscular mycorrhizal fungi [J]. Plant and Soil, 2024, 497(1): 449-466.

[22]Li Q J, Wang X X, Zhang J Q, et al. Microplastics alter microbial structure and assembly processes in different soil types: driving effects of environmental factors [J]. Environmental Research, 2025, 278: 121672.

[23]唐启义. DPS数据处理系统——实验设计、统计分析及数据挖掘2版[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 87-88.
Tang Q Y. DPS data processing system: experimental design, statistical analysis and data mining 2nd[M]. Beijing: Science Press, 2010: 87-88.

[24]姚兴柱, 戢昕蕾, 唐祺超, 等. 覆膜年限和灌溉方式对蔬菜种植土壤微塑料特征的影响[J]. 西南农业学报, 2025, 38(7): 1384-1390.
Yao X Z, Ji X L, Tang Q C, et al. Effect of mulching years and irrigation methods on microplastics characteristics in vegetable field [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2025, 38(7): 1384-1390.

[25]胡春光, 卜嫣茹, 王学霞, 等. 覆膜年限对花生田土壤微塑料赋存特征的影响[J]. 中国环境科学, 2025, 45(5): 2839-2848.
Hu C G, Bu Y R, Wang X X, et al. Effect of film mulching age on the distribution characteristics of microplastics in the soil of peanut field soils[J]. China Environmental Science, 2025, 45(5): 2839-2848.

[26]陈锟. 微塑料对滨海湿地土壤有机碳矿化和温室气体排放的影响[D]. 青岛: 青岛大学, 2023.
Chen K. Effects of microplastics on soil organic carbon mineralization and greenhouse gas emissions in coastal wetlands [D]. Qingdao: Qingdao University, 2023.

[27]Boots B, Russell C W, Green D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: above and below ground [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(19): 11496-11506.

[28]邱名德, 谢福武, 葛成军, 等. 海南岛北部农业土壤微塑料赋存特征与分布状况[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(7): 1027-1037.
Qiu M D, Xie F W, Ge C J, et al. Occurrence characteristics and distribution of microplastics in agricultural soils in the northern part of Hainan Island[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(7): 1027-1037.

[29]刘书铭, 陈飞潼, 孔范龙, 等. 不同粒径聚乙烯微塑料对农田土壤特性的影响[J]. 土壤, 2025, 57(2): 387-397.
Liu S M, Chen F T, Kong F L, et al. Effects of polyethylene microplastics with different particle sizes on characteristics of agricultural soil[J]. Soils, 2025, 57(2): 387-397.

(编辑:马荣博)