

微塑料对土壤持水性能的影响

周 薇¹, 石 磊², 许明祥^{1,3}

(1.西北农林科技大学林学院,陕西 杨凌 712100;2.陕西省耕地质量与农业环境保护工作站,
西安 712100;3.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究微塑料对土壤持水性能的影响,选用粒径为 1 mm 和 25 μm 的聚乙烯微塑料(PE—MPs)颗粒进行土培处理后,采用高速离心机法测得不同处理下的土壤水分特征曲线,并使用 Gardner 模型进行拟合分析。结果表明:(1)土壤中累积少量的 PE—MPs(0~5.00 g/kg)能增强土壤持水性,但当累积量超过一定阈值(5.00~50.00 g/kg)会导致土壤持水能力显著降低。(2)1 mm 大粒径 PE—MPs 大量积累对土壤持水性的降低效应更显著;25 μm 小粒径 PE—MPs 少量积累对土壤持水性的提升效应更显著。(3)1 mm 大粒径 PE—MPs 进入土壤后主要影响大孔隙与有效孔隙,对土壤有效含水率的影响较大;25 μm 小粒径 PE—MPs 进入土壤后主要影响微小孔隙,对萎焉系数影响较大。该研究可为高农膜残留地区水分迁移模拟和农业生态风险评价提供理论依据。

关键词:微塑料;土壤持水性;水分特征曲线;孔隙分布;水分常数

中图分类号:X53

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)06-0258-06

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.06.035

Influence of Microplastics on Soil Water Retention

ZHOU Wei¹, SHI Lei², XU Mingxiang^{1,3}

(1.College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Cropland Quality and Agricultural Environmental Protection Workstation of Shaanxi Province, Xi'an 712100; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to explore the impact of microplastics on soil water retention, 1 mm and 25 μm polyethylene microplastics (PE—MPs) were selected. After the soil culture, the soil moisture characteristic curves under different treatments were measured by the high-speed centrifuge method, and the Gardner model was used for fitting analysis. The results showed that: (1) A small amount of PE—MPs (0~5.00 g/kg) accumulated in the soil could enhance the soil water holding capacity, but when the cumulative amount exceeded a certain threshold (5.00~50.00 g/kg), it would lead to a significant reduction in soil water holding capacity. (2) The large accumulation of 1 mm PE—MPs had a more significant reduction effect on soil water holding capacity; a small amount of 25 μm PE—MPs had a more significant increase effect on soil water holding capacity. (3) After invading into soil, the 1mm PE—MPs mainly affected the macropores and effective pores, and had a greater impact on the effective soil moisture content; while 25 μm PE—MPs mainly affected the micro pores and had a greater impact on the wilting coefficient. This study can provide a theoretical basis for water migration simulation and agricultural ecological risk assessment in areas with high agricultural film residues.

Keywords: microplastics; soil water retention; moisture characteristic curve; pore distribution; moisture constant

微塑料通常被定义为 $<5\text{ mm}$ 的塑料^[1],主要来自于塑料产品的磨损及其在环境中的老化^[2]。土壤中的微塑料主要来源于地膜覆盖^[3-4],其次为堆肥、污水灌溉^[5]和气载迁移^[6]等。当前我国耕地土壤地膜平均残留量达 60 kg/hm^2 ^[7],这些塑料碎片经过物理、化学风化

作用会进一步裂解成更小的颗粒,并在土壤中不断富集^[8]。有研究^[9]表明,一个粒径为 200 mm 的塑料碎片可逐步碎裂成 $62\ 500$ 个粒径约为 0.8 mm 的微塑料。在我国农田中,微塑料丰度平均值为 $(4\ 496\pm1\ 082)$ 个/ kg ^[4]。一项调研^[10]发现,陕西省大多数农业土壤都含有

收稿日期:2021-05-21

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0506503)

第一作者:周薇(1995—),女,在读硕士研究生,主要从事微塑料的生态学效应研究。E-mail:zhouweiwei@nwsuaf.edu.cn

通信作者:许明祥(1972—),男,博士,研究员,主要从事流域生态系统健康评价研究。E-mail:xumx@nwsuaf.edu.cn

微塑料,浓度范围为1 430~3 410 个/kg。

微塑料具有高表面积、强污染物吸附性、表面疏水性、粒径小、密度轻与难分解^[11-12]等特性,与土壤本身的颗粒有质的差别,进入土壤后将改变土壤理化性质,影响土壤功能和生物多样性^[13],继而影响土壤生态系统健康^[14-15],威胁人类健康^[16-17],已经引起管理者和科学家的普遍关注^[18]。

微塑料的疏水性、表面电荷、表面功能化以及粒径特征,可能会影响土壤水分的存在形态^[19]。已有研究^[20-21]表明,微塑料进入土壤后,土壤容重、水稳性团聚体、水力传导率、持水性、颗粒黏结和孔隙结构产生显著变化,而这些特性的改变将影响土壤持水和供水性能,进而对土壤生产力和土壤健康产生影响。相关研究^[22]表明,4 cm²的正方形塑料残膜会增加大孔隙比例,进而降低土壤持水能力。聚酯纤维微塑料可提高土壤持水能力^[20],但目前有关微塑料积累量、微塑料粒径对土壤持水能力影响的认识还非常有限。

鉴于微塑料在土壤中分布的广泛性及其对土壤持水能力的潜在影响,针对微塑料影响土壤持水特征这一科学问题,本研究通过向土壤中添加不同粒径以及浓度的微塑料,探究了微塑料对土壤持水性能的影响,以期为高农膜残留条件下土壤水分运移研究提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

土壤取自陕西杨凌卜村的农田耕层,土壤类型为壤土(土垫早耕人为土),壤质黏土。土壤样品过 0.5 cm 筛,风干备用。土壤理化性质为:有机质含量 9.00 g/kg,总氮含量 0.82 g/kg,总磷含量 1.32 g/kg,总钾含量 20.13 g/kg,碱解氮含量 51.22 mg/kg,速效磷含量 7.61 mg/kg,速效钾含量 150.06 mg/kg,pH 7.58,容重 1.13 g/cm³,黏粒 36.5%,粉粒 61.1%,砂粒 2.4%。

试验所用聚乙烯微塑料(PE-MPs)购自中国石油化工股份有限公司茂名分公司,分别为 1 mm 近似球形颗粒和 25 μm 粉末状颗粒。

1.2 试验设计

试验于 2020 年 5 月 19 日至 7 月 19 日在西北农林科技大学水土保持研究所试验场进行。设置 10 个处理(5 种微塑料浓度:0.05,0.20,0.50,5.00,50.00 g/kg 与 2 种微塑料粒径:1 mm,25 μm),1 mm,25 μm 粒径下随着浓度增加,分别用 T1、T2、T3、T4、T5 和 D1、D2、D3、D4、D5 表示不同处理,并设置 1 个空白对照,用 CK 表示,每个处理重复 3 次。将微塑料与 5.00 kg 土壤混合均匀后,分层以相同容重填装在 1 个直径 20 cm、高 20 cm 的圆柱形容器,保持土壤含水量在田间持水量的 60%,在遮雨棚下放置 5 周,使得微

塑料在土壤中更接近自然存在状态,平均气温约 34 ℃。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤水分特征曲线 使用离心机配套环刀采集原状土壤样品,蒸馏水中浸泡至土壤饱和后,采用高速离心机(日本日立公司,Hima-CR21G 型高速冷冻离心机)测定土壤水分特征曲线。

1.3.2 土壤水分特征曲线 Gardner 模型 Gardner 模型表达式为: $\theta = E \cdot S_0^{-F}$ 。式中: θ 为土壤体积含水量(cm³/cm³); S_0 为负压(cm);参数 E 表示土壤持水能力的大小;参数 F 表示土壤含水量随着土壤水吸力变化的快慢。

1.3.3 土壤当量孔径 当量孔径是与一定水吸力相对应的孔隙直径。室温条件下可简化为 $d = 300/S$ 。式中: d 为当量孔径(mm); S 为土壤水吸力(Pa)^[23]。

1.3.4 土壤水分常数及水分有效性 将土壤水势用 pF 表示,即土壤水势取 cm 水柱作为单位,并取其绝对值的对数值。依据前人^[24]研究结果,一般以 pF 为 1.8 时的土壤含水率为田间持水量, pF 为 4.2 时的土壤含水率为永久萎蔫系数,据此可计算土壤有效含水率。

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,并用方差分析(ANOVA)进行统计处理, $P < 0.05$ 时,表示处理组与对照组间存在显著差异。采用 Origin Lab 2018 软件绘图。

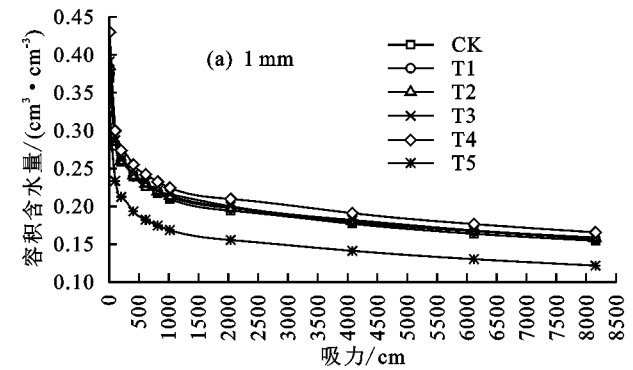
2 结果与分析

2.1 PE-MPs 对土壤水分特征曲线的影响

PE-MPs 积累量对土壤水分特征曲线有显著影响(图 1)。添加 1 mm PE-MPs,各处理土壤持水性表现为 $T_4 > T_3, T_2, T_1, CK > T_5$ 。添加量为 5.00 g/kg,土壤持水能力显著强于 CK。但是土壤中 PE-MPs 达到 50.00 g/kg 时,土壤持水能力显著低于 CK。添加 25 μm PE-MPs,土壤持水性表现为 $D_3 > D_2 > D_4, D_1, CK > D_5$ 。添加量 0~0.50 g/kg 范围内,在同一吸力条件下,土壤中 PE-MPs 积累量越大,土壤持水能力越强。但是土壤中 PE-MPs 达到 5.00 g/kg 时,土壤持水能力与 CK 相近,土壤中 PE-MPs 达到 50.00 g/kg 时,土壤持水能力显著低于 CK。

PE-MPs 粒径对土壤水分特征曲线的影响因 PE-MPs 在土壤中累积量而异(图 1)。极低浓度下(0.05 g/kg),T1、D1 与 CK 基本一致,无显著差异。低浓度下(0.20,0.50 g/kg),土壤持水性为 $D_2 > T_2 > CK, D_3 > T_3 > CK$ 。当吸力为 2 039 cm 时,D2 与 T2 分别为 CK 的 107.30%,99.90%;D3 与 T3 分别为 CK 的 120.76%,102.98%。中等浓度下(5.00 g/kg),土

壤持水性为 $T4>CK$, 而 $D4$ 与 CK 无显著差异。当吸力为 $2\ 039\text{ cm}$ 时, $T4$ 为 CK 的 109.25% 。高浓度下(50.00



用 Gardner 模型拟合水分特征曲线, 求得参数 E 、 F , 分别表示土壤持水能力和土壤含水量随土壤水吸力变化的快慢(表 1)。添加 1 mm PE-MPs, E 值表现为 $T4>T3>T2>T1$ 、 $CK>T5$ 。添加 $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs, E 值表现为 $D3>CK>D5$ 。参数 E 总体呈现出随 PE-MPs 浓度增加先增加后减小的趋势。 E 与 F 呈线性关系 $E=3.955F$, $R^2=0.988\ 1$, 而 E 、 F 与微塑料积累量 $x(\text{g/kg})$ 没有很好的函数关系。

综上, PE-MPs 浓度与粒径对土壤持水性均有显著影响。土壤中累积少量的 PE-MPs 能增强土壤持水性, 但当累积量超过一定浓度时, 显著降低土壤持水性。相对而言, 大量积累量下, 1 mm 大粒径 PE-MPs 对土壤持水性的降低效应更加显著。少量积累量下, $25\text{ }\mu\text{m}$ 小粒径 PE-MPs 对土壤持水性的提升效应更显著。

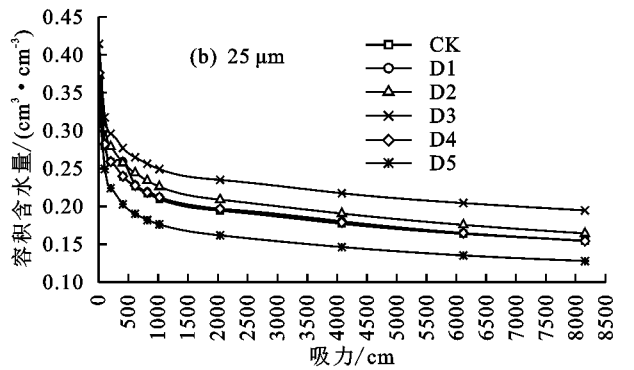
表 1 PE-MPs 对 Gardner 模型参数的影响				
微塑料 粒径	处理	拟合系数	E	F
1 mm	CK	0.9965	0.4979d	0.1248e
	T1	0.9978	0.5024d	0.1247e
	T2	0.9983	0.5179c	0.1282d
	T3	0.9981	0.5284b	0.1301c
	T4	0.9952	0.5853a	0.1382b
	T5	0.9989	0.4479e	0.1406a
25 μm	CK	0.9965	0.4979bc	0.1248bc
	D1	0.9943	0.4963c	0.1230c
	D2	0.9838	0.5019bc	0.1155d
	D3	0.9983	0.5327a	0.1095e
	D4	0.9969	0.5076b	0.1267b
	D5	0.9993	0.4832d	0.1451a

注: 表中数据后不同字母表示处理组与对照组间存在显著差异 ($P<0.05$)。

2.2 PE-MPs 对土壤孔隙分布的影响

不同处理下土壤当量孔径以大孔隙($>9\text{ }\mu\text{m}$)为主, 其次是有效孔隙($0.2\sim9\text{ }\mu\text{m}$)和微小孔隙($<0.2\text{ }\mu\text{m}$)(图 2)。添加 1 mm PE-MPs, 各孔隙均表现为

g/kg), 土壤持水性为 $CK>D5>T5$ 。当吸力为 $2\ 039\text{ cm}$ 时, $D5$ 与 $T5$ 分别为 CK 的 83.09% 、 79.96% 。



$T4>T3>T2>CK$ 、 $T1>T5$ 。添加 $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs, 大孔隙为 $D5>CK>D2$, $D5$ 与 $D2$ 分别为 CK 的 104.22% 、 96.79% 。有效孔隙为 $D3>CK>D5$, $D3$ 与 $D5$ 分别为 CK 的 105.39% 、 96.81% 。微小孔隙 $D3>D2>CK>D5$, $D2$ 、 $D3$ 与 $D5$ 分别为 CK 的 104.72% 、 113.58% 、 87.72% 。

1 mm PE-MPs 对大孔隙与有效孔隙影响程度高于 $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs。 $T4$ 大孔隙、有效孔隙分别为 CK 的 123.53% 、 106.28% , 而 $D5$ 大孔隙为 CK 的 104.22% , $D3$ 有效孔隙为 CK 的 113.58% ; $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs 对微小孔隙的影响程度高于 1 mm PE-MPs。 $T4$ 微小孔隙为 CK 的 110.20% , 而 $D3$ 微小孔隙为 CK 的 113.58% 。

1 mm PE-MPs 对于土壤总孔隙度的影响变化范围为 $90.43\%\sim118.16\%$, $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs 对于土壤总孔隙度的影响变化范围为 $97.53\%\sim105.16\%$ 。

综上, 1 mm 大粒径 PE-MPs 进入土壤后主要影响大孔隙与有效孔隙, $25\text{ }\mu\text{m}$ 小粒径 PE-MPs 进入土壤后主要影响微小孔隙。相比之下, 1 mm 大粒径 PE-MPs 对于土壤总孔隙度的影响程度更大。

2.3 PE-MPs 对土壤水分常数及水分有效性的影响

PE-MPs 的积累使得土壤水分常数及水分有效性发生显著变化(图 3、表 2)。添加 1 mm PE-MPs 田间持水量表现为 $T4>T3>T2>T1>CK>T5$, 其中 $T4$ 、 $T5$ 分别为 CK 的 111.17% 与 84.23% 。添加 $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs 田间持水量表现为 $D3>D2>CK$ 、 $D4$ 、 $D1>D5$, $D2$ 与 $D3$ 分别为 CK 的 104.74% 与 113.56% , $D5$ 显著低于 CK , 为 CK 的 89.21% 。

添加 1 mm PE-MPs 萎焉系数为 $T4>T1>CK>T5$, 其中 $T4$ 、 $T5$ 分别为 CK 的 103.27% 与 77.22% 。添加 $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs, 萎焉系数为 $D3>D2>D1>CK$ 、 $D4>D5$ 。 $D3$ 显著高于 CK , 为 CK 的 123.94% , 而 $D5$ 显著低于 CK , 仅为 CK 的 79.83% 。可见, $25\text{ }\mu\text{m}$ PE-MPs 积累量的改变对土壤萎焉系数影响更大。

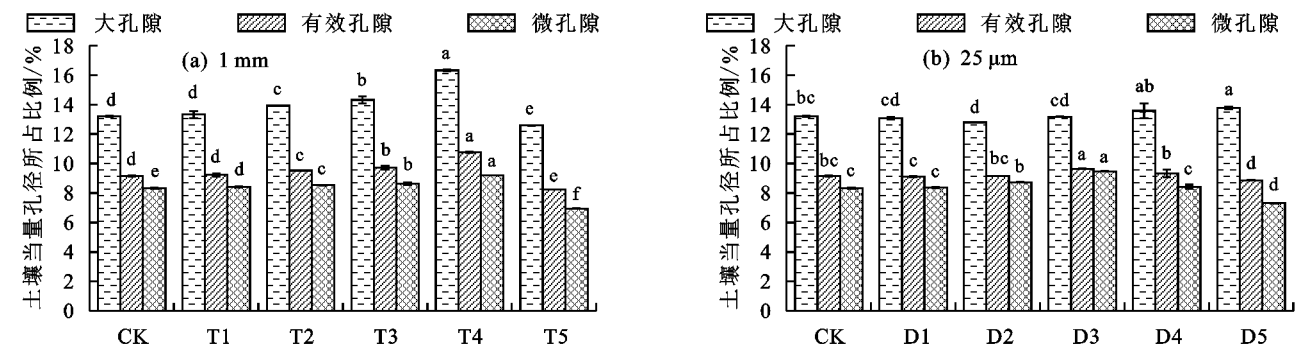


图 2 PE-MPs 对土壤当量孔径分布比例的影响

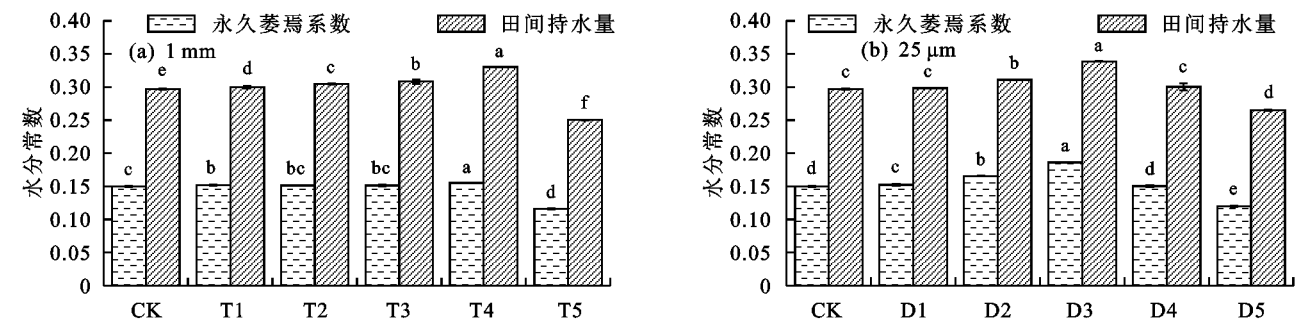


图 3 PE-MPs 对土壤水分常数的影响

添加 1 mm PE-MPs 土壤有效含水率表现为 T4>T3>T2>T1、CK>T5(表 2),其中 T4、T5 分别为 CK 的 119.23%与 91.14%。添加 25 μm PE-MPs 土壤有效含水率表现为 D3>CK>D5,D3 与 D5 分别为 CK 的 103.83%与 98.79%。可见,1 mm PE-MPs 积累量的改变对土壤有效含水率的影响更大。

表 2 PE-MPs 对土壤有效含水率的影响

微塑料 粒径	处理	土壤有效 含水率/%	标准差/%	
1 mm	CK	14.69	0.03	d
	T1	14.82	0.20	d
	T2	15.35	0.01	c
	T3	15.70	0.23	b
	T4	17.52	0.04	a
	T5	13.43	0	e
25 μm	CK	14.69	0.03	bc
	D1	14.61	0.03	c
	D2	14.57	0.07	c
	D3	15.25	0	a
	D4	15.02	0.01	ab
	D5	14.52	0.46	c

综上,1 mm 大粒径 PE-MPs 对土壤有效含水率的影响较大;25 μm 小粒径 PE-MPs 对土壤萎焉系数影响较大。

3 讨论

土壤水分是维持农业可持续发展和土壤生产力的关键因素。土壤水分特征曲线反映了土壤含水率与吸力之间的关系,不仅表征土壤的持水能力,也间接反映土壤中孔隙的分布,是模拟土壤水分运动和溶

质运移的重要参数,对研究土壤水分的有效性、土壤水分运动与溶质运移等具有重要意义^[23]。当水分进入土体时,受到土壤颗粒分子引力、毛管力和重力等共同作用,沿着土壤孔隙浸透、移动并被保持在土壤之中^[25]。土壤表面积和土壤孔隙直接决定土壤水分的保持,其中土壤表面积又主要取决于土壤颗粒的大小、形状以及矿物的组成;土壤孔隙主要取决于土壤容重^[26]。有机质含量、土壤粒度分布、温度、阳离子交换量、碳酸盐含量等对土壤水分的保持也有一定的影响^[27]。有研究^[19]表明,土壤中存在大量的微塑料,而微塑料的疏水性、表面电荷、表面功能化以及粒径特征等,可能影响土壤水分的存在形态。但目前有关微塑料积累量、粒径大小对土壤持水能力影响的认识还非常有限。

本研究发现,PE-MPs 的积累对土壤水分特征曲线产生显著影响,随着土壤中 PE-MPs 积累量增多,土壤持水能力呈现先增后减趋势。可能是少量 PE-MPs(0~5.00 g/kg)提高土壤颗粒的比表面积与土壤孔隙度,所以随着土壤中 PE-MPs 量增多,土壤持水能力呈上升趋势。但是当土壤中 PE-MPs 积累达到一定阈值(5~50 g/kg,由于 PE-MPs 自身表面特性与疏水性^[28],且大量 PE-MPs 进入土壤降低土壤孔隙度,使得土壤持水能力显著下降。PE-MPs 的积累对土壤孔隙度产生显著影响,1 mm 大粒径 PE-MPs 进入土壤后,主要影响大孔隙与有效孔隙;而 25 μm 小粒径 PE-MPs 进入土壤后,主要影响微小孔隙(图 2)。这在一定程度上也可以解

释 25 μm 小粒径 PE—MPs 对萎焉系数的影响程度高于 1 mm PE—MPs 及 1 mm 大粒径 PE—MPs 对土壤有效含水率的影响程度高于 25 μm PE—MPs。

值得注意的是,低浓度(0.20 g/kg)处理下,土壤持水性表现为 $D2 > T3 > CK$, $D2$ 曲线明显位于前两者之上,表明土壤的持水能力对于 25 μm 小粒径 PE—MPs 的敏感性高于 1 mm 大粒径 PE—MPs。本研究中,对于土壤持水性提高最强的处理是 $D3$,故推测适量 25 μm 小粒径 PE—MPs 对土壤持水性能提升能力强于 1 mm 大粒径 PE—MPs。高浓度 PE—MPs 添加下(50 g/kg),2 种 PE—MPs 均使得土壤持水能力显著降低,但 1 mm 大粒径 PE—MPs 使得这种变化更剧烈。推测大粒径 PE—MPs 的添加使得土壤持水性能下降程度更大。前文结果表明,该添加量下,1 mm 大粒径 PE—MPs 添加下土壤总孔隙度为 CK 的 90.43%,25 μm 小粒径 PE—MPs 添加下土壤总孔隙度为 CK 的 97.53%,1 mm 大粒径 PE—MPs 对于土壤总孔隙度的影响程度更大。由于微塑料本身的特性与试验方法的限制,本研究结果中的土壤孔隙变化,不能完全代表土壤透气性的改变。

类似研究将平均尺寸为 643 μm 的高密度聚乙烯碎片,按照 0.25%,0.50%,1.00%和 2.00%与壤质砂土混合,各处理土壤持水能力无明显差异^[20]。本研究结果表明,PE—MPs 对土壤持水性影响显著,这可能与 2 项研究的方法不同有关。前者通过恒压头导流法,获取的土壤持水特征参数有限,不足以较全面评价微塑料对土壤持水性能的影响。本研究采用高速离心机法,测定土壤水分特征曲线,可较好反映微塑料对土壤持水性能的影响。此外,前者的试验设计中无高浓度微塑料添加处理,无法判断在高浓度下土壤持水性是否下降。Wang 等^[22]将农膜制成面积为 4 cm^2 的正方形,按照不同的残膜量将农膜与土壤混合均匀,测定土壤水分特征曲线发现,随着土壤中残膜量增多,土壤持水能力呈现降低趋势。这是因为残膜表面光滑度大于土壤表面,随着外界吸力增大导致垂直分布的残膜与土壤界面形成优势流现象。随着残膜在土壤中累积,原有土壤孔隙被破坏,导致土壤结构改变。本文结果与之不同,可能在于微塑料颗粒在一定程度上增加土壤颗粒比表面积与土壤孔隙度,且不存在垂直分布的残膜与土壤界面优势流现象。

当前我国农田微塑料丰度为 2 783~6 366 个/kg,且超过 80%的颗粒粒径 <1 mm,粒径在 0.02~0.2 mm 的比例最大^[4,29]。结合本文研究结果推测,当前农田中残留的微塑料丰度处于较低水平,故其在

一定程度上提高了土壤的持水性能。但是,微塑料丰度随连续覆盖时间的增加(5~30 年)显著增加,而颗粒大小随连续覆盖时间的增加而减小^[30],应及时采取有效预防措施,防止微塑料对土壤健康造成危害。

微塑料在土壤中不仅与土壤颗粒之间物理粘连,同时还存在生物化学分解过程^[31]。随着微塑料在土壤中存在时间的延长,它与土壤颗粒之间的胶结作用必将加强^[32]。同时,在耕作管理过程中,微塑料还会进入土壤团聚体^[33],进而发生更为复杂的生物物理化学作用,最终影响土壤基质吸力和孔隙状况。此外,微塑料种类、分布与迁移、老化等也会直接或间接影响土壤理化性质^[31,33-35],进而影响土壤持水性。因此,关于微塑料对土壤持水性的影响及其作用机理还需要深入研究。

4 结论

(1)微塑料的积累量与粒径大小对土壤持水能力影响显著。少量的 PE—MPs(0~5.00 g/kg)能增强土壤持水能力,但过量(5.00~50.00 g/kg)会导致土壤持水能力显著降低。高浓度(50.00 g/kg)处理下,1 mm 大粒径 PE—MPs 对土壤持水性的降低效应更显著;而低浓度(0~0.50 g/kg)处理下小粒径 PE—MPs 对土壤持水性的提升效应更显著。

(2)1 mm 大粒径 PE—MPs 主要影响土壤大孔隙与有效孔隙,对土壤田间持水量与有效含水率影响较大;25 μm 小粒径 PE—MPs 主要影响土壤微小孔隙,对萎焉系数影响较大。1 mm 大粒径 PE—MPs 对于土壤总孔隙度的影响程度更大。

参考文献:

- [1] Rillig M C, Ingraffia R, de Souza Machado A A. Microplastic incorporation into soil in agroecosystems [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: e1805.
- [2] Prata J C, Da C J, Lopes I, et al. Effects of microplastics on microalgae populations: A critical review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 665: 400-405.
- [3] 任欣伟,唐景春,于宸,等.土壤微塑料污染及生态效应研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(6): 1045-1058.
- [4] Wang J, Li J Y, Liu S T, et al. Distinct microplastic distributions in soils of different land-use types: A case study of Chinese farmlands [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 269: e116199.
- [5] 白濛雨,赵世焯,彭谷雨,等.城市污水处理过程中微塑料赋存特征 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1734-1743.
- [6] 周帅,李伟轩,唐振平,等.气载微塑料的赋存特征、迁移规律与毒性效应研究进展 [J]. *中国环境科学*, 2020, 40(11): 5027-5037.

- [7] 汪军,杨杉,陈刚才,等.我国设施农业农膜使用的环境问题刍议[J].土壤,2016,48(5):863-867.
- [8] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, et al. Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. Science of the Total Environment, 2016, 550: 690-705.
- [9] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250000 tons afloat at sea [J]. PLoS One, 2014, 9(12): e111913.
- [10] Ding L, Zhang S Y, Wang X Y, et al. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China [J]. Science of the Total Environment, 2020, 720: e137525.
- [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.
- [12] de Souza M A, Kloas W, Zarfl C, et al. Microplastics as an emerging threat to terrestrial ecosystems [J]. Global Change Biology, 2018, 24(4): 1405-1416.
- [13] Rillig M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(12): 6453-6454.
- [14] 朱永官,朱冬,许通,等.(微)塑料污染对土壤生态系统的影响:进展与思考[J].农业环境科学学报,2019,38(1):1-6.
- [15] Kumar M, Xiong X N, He M J, et al. Microplastics as pollutants in agricultural soils [J]. Environmental Pollution, 2020, 265: e114980.
- [16] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: A micro issue? [J]. Environmental Science and Technology, 2017, 51(12): 6634-6647.
- [17] Karbalaie S, Hanachi P, Walker T R, et al. Occurrence, sources, human health impacts and mitigation of microplastic pollution [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(36): 36046-36063.
- [18] Law K L, Thompson R C. Microplastics in the seas [J]. Science, 2014, 345(6193): 144-145.
- [19] Gong J, Xie P. Research progress in sources, analytical methods, eco-environmental effects, and control measures of microplastics [J]. Chemosphere, 2020, 254: e126790.
- [20] de Souza Machado A A, Lau C W, Till J, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment [J]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(17): 9656-9665.
- [21] Yang X, Bento C P M, Chen H, et al. Influence of microplastic addition on glyphosate decay and soil microbial activities in Chinese loess soil [J]. Environmental Pollution, 2018, 242: 338-347.
- [22] Wang Z C, Li X Y, Shi H B, et al. Estimating the water characteristic curve for soil containing residual plastic film based on an improved pore-size distribution [J]. Geoderma, 2020, 370: e114341.
- [23] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [24] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.不同施肥土壤水分特征曲线空间变异[J].农业机械学报,2014,45(6):161-165,176.
- [25] 王冬梅.农地水土保持[M].北京:中国林业出版社,2002.
- [26] 易湘生,李国胜,尹衍雨,等.黄河源区草地退化对土壤持水性影响的初步研究[J].自然资源学报,2012,27(10):1708-1719.
- [27] 于洋,卫伟,陈利顶,等.黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J].生态学报,2018,38(18):6511-6520.
- [28] Kwon J H, Chang S, Sang H H, et al. Microplastics as a vector of hydrophobic contaminants: Importance of hydrophobic additives [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2017, 13(3): 494-499.
- [29] 程万莉,樊廷录,王淑英,等.我国西北覆膜农田土壤微塑料数量及分布特征[J].农业环境科学学报,2020,39(11):2561-2568.
- [30] Li W, Wufuer R, Duo J, et al. Microplastics in agricultural soils: Extraction and characterization after different periods of polythene film mulching in an arid region [J]. Science of the Total Environment, 2020, 749: e141420.
- [31] Bizmark N, Schneider J, Priestly R D, et al. Multi-scale dynamics of colloidal deposition and erosion in porous media [J/OL]. Science Advances, 2020, 13(6). DOI: 10.1126/sciadv.abc2530.
- [32] 马思睿,李舒行,郭学涛.微塑料的老化特性、机制及其对污染物吸附影响的研究进展[J].中国环境科学,2020,40(9):3992-4003.
- [33] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 642: 12-20.
- [34] 骆永明,周倩,章海波,等.重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J].中国科学院院刊,2018,33(10):1021-1030.
- [35] 周倩,章海波,周阳,等.滨海潮滩土壤中微塑料的分离及其表面微观特征[J].科学通报,2016,61(14):1604-1611.