

塑料污染对农田土壤团聚体稳定性的影响

孙贝雯, 公玮, 李月芬, 刘兆顺, 刘毅

引用本文:

孙贝雯, 公玮, 李月芬, 刘兆顺, 刘毅. 塑料污染对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1051–1060.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0898>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆还田与浅埋滴灌对玉米耕层土壤水稳性团聚体及其碳含量的影响

张明伟, 杨恒山, 邵继承, 范秀艳, 葛选良, 张雨珊, 徐晓

农业环境科学学报. 2022, 41(5): 999–1013-1 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1281>

黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

王杨扬, 赵中秋, 原野, 陈路明, 郭安宁

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 966–973 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1481>

香蕉秆及其生物炭对双季水稻土团聚体及碳库管理的影响

王超, 邱竞驰, 李建华, 卢瑛, 李博, 唐贤, 董玉清, 胡家帅

农业环境科学学报. 2022, 41(3): 537–546 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0766>

膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响

王润珑, 徐应明, 李然, 罗文文, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2701–2710 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0104>

晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 马章怀, 杨凯齐

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 137–143 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0567>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

孙贝雯, 公玮, 李月芬, 等. 塑料污染对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 1051–1060.

SUN B W, GONG W, LI Y F, et al. Impacts of plastic pollution on the stability of farmland soil aggregates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 1051–1060.

塑料污染对农田土壤团聚体稳定性的影响

孙贝雯¹, 公玮^{2,3}, 李月芬¹, 刘兆顺^{1*}, 刘毅^{2*}

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 中国科学院武汉植物园水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为探究塑料污染对农田土壤团聚体的影响,本研究在全国范围内,针对被塑料污染的土壤和未被塑料污染的土壤进行配对采样,经干筛法和湿筛法测定团聚体组成,利用土壤团聚体稳定性指标[团聚体破坏率(Percentage of aggregate destruction, *PAD*)、平均重量直径(Mean weight diameter, *MWD*)、几何平均直径(Geometric mean diameter, *GMD*)和标准化平均重量直径(Normalized mean weight diameter, *NMWD*)]体系的差异,研究了塑料污染对农田土壤团聚体稳定性的影响。结果表明:从团聚体组成来看,农田土壤塑料输入增加了>5 mm机械稳定性大团聚体比例,降低了<0.25 mm机械稳定性团聚体比例;塑料输入降低了>2 mm水稳性大团聚体比例,增加了<0.053 mm土壤颗粒的比例。农田土壤塑料污染显著增加了机械稳定性团聚体的*MWD*和*GMD*,但对水稳性团聚体直径无影响。农田土壤塑料污染显著增加了团聚体的*PAD*,降低了土壤结构的稳定性。研究表明,农田土壤塑料污染会明显增加土壤大团聚体的机械稳定性,略降低团聚体的水稳定性。

关键词:塑料污染;土壤团聚体;团聚体稳定性;团聚体直径

中图分类号:X53;S152 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)05-1051-10 doi:10.11654/jaes.2022-0898

Impacts of plastic pollution on the stability of farmland soil aggregates

SUN Beiwen¹, GONG Wei^{2,3}, LI Yuefen¹, LIU Zhaoshun^{1*}, LIU Yi^{2*}

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Key Laboratory of Aquatic Botanical and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: To explore the effects of plastic pollution on soil aggregates in farmlands, this study was based on large-scale sampling of plastic-contaminated soil and non-plastic-contaminated soil in pairs across China. The aggregate composition of the non-plastic-contaminated soil was measured using both dry and wet sieving methods. The effects of plastic pollution on the stability of farmland soil aggregates were investigated based on the differences in the soil aggregates stability index systems[percentage of aggregate destruction (*PAD*), mean weight diameter (*MWD*), geometric mean diameter (*GMD*) and normalized mean weight diameter (*NMWD*)]. The results showed that, in terms of aggregate composition, the proportion of >5 mm large mechanically stable aggregates in farmland soil increased, the proportion of <0.25 mm mechanically stable aggregates was reduced, and the proportion of >2 mm large water-stable aggregates was reduced by plastic input, which increased the proportion of <0.053 mm soil particles. Soil plastic pollution significantly increased the *MWD* and *GMD* of mechanically stable aggregates, but did not affect the diameter of water-stable aggregates. Soil plastic pollution in farmland significantly increased the *PAD* of aggregates and reduced the stability of soil structures. The results indicate that the plastic pollution of farmland soil significantly increased the mechanical stability and slightly decreased the water stability of soil macro aggregates.

Keywords: plastic pollution; soil aggregates; soil aggregate stability; soil aggregate diameter

收稿日期:2022-09-07 录用日期:2023-01-07

作者简介:孙贝雯(1999—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事农田塑料污染方面的研究。E-mail:1043871037@qq.com

*通信作者:刘兆顺 E-mail:zhaoshun@jlu.edu.cn;刘毅 E-mail:liuyi@wbgeas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(31971532,32171648)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(31971532,32171648)

土壤是保障农业可持续发展的重要自然资源,也是陆地生态系统遭受强烈污染压力的重要组成部分,土壤污染是造成当前全球土壤功能退化的主要威胁之一^[1]。其中,土壤白色污染已经对全球各国的环境和经济造成了严重威胁。土壤中的塑料逐年积累,导致土壤质量下降,进而对粮食的生产安全和质量安全构成挑战。农田地膜残留问题是我国特有的塑料污染问题^[2],我国地膜的使用量约占全球的75%,且回收率不足60%^[3]。废旧地膜破碎并残留在土壤中难以降解,从而导致大量塑料碎片存在于土壤中,对耕地健康造成严重威胁^[4]。因此,农田土壤塑料污染防治问题目前已成为亟需解决的重大环境问题。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,控制着土壤水、肥、气、热的保持和运移,与土壤生态系统物质循环过程紧密关联^[5]。土壤团聚体的结构稳定性会影响土壤侵蚀过程中的入渗、结皮和剥离等相关过程,是预测土壤水分流失和土壤侵蚀能力的重要指标^[6-7]。进入土壤中的塑料降解后会形成微塑料,微塑料与土壤颗粒的团聚化对于认识土壤塑料污染和环境行为至关重要^[8]。团聚体作为土壤物质循环的关键节点^[9],同时也是包括微塑料在内众多污染物质的主要固定场所^[10]。已有研究表明,进入土壤的微塑料中,仅28%的塑料是以分散的自由颗粒形式存在,而绝大部分(约占72%)会与土壤团聚体结合,且不同团聚体中微塑料的数量和形状差异显著^[11]。此外,由于团聚体对塑料污染物的物理保护作用而使塑料难以降解^[11],从而形成长期的污染风险。因此,针对土壤塑料污染,有必要在团聚体尺度下开展更加深入的研究。

塑料污染会影响土壤持水性、容重、微生物活性,其中部分效应可能与塑料物理性质有关(如形状、大小和毒性)^[12]。随着检测方法的进步,塑料在土壤生态系统中的环境效应是未来重要的研究领域,当前的挑战是塑料的行为对于土壤团聚体的形成和稳定性产生怎样的影响。因此,有必要深入研究土壤团聚体与微塑料的互作及效应。本文以土壤团聚体为研究对象,探究塑料污染对土壤团聚体稳定性的影响,以期对塑料污染过程、效应与调控理论做出贡献。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

采样点分布如表1所示,本研究于2021年10—11月在全国范围内开展不同类型土壤样品的取样调查,采用五点取样法进行配对采样,将采样点按照我国经

济社会发展程度以及典型的土壤类型进行划分,分为东北、西北、华北、华中、东南、西南6个区域,共设置了34个采样点。在确定的样点范围内针对受塑料污染土壤和未被塑料污染土壤进行配对采样,有塑料输入和无塑料输入的土壤分别采集1.5 kg,采样深度为0~20 cm,共收集土壤样本68个。有塑料输入的土样

表1 采样点分布

Table 1 Distribution of sampling points

序号 Number	采样点 Sampling point	经度 Longitude/ (°)	纬度 Latitude/ (°)	高程 Altitude/m
S1	黑龙江双鸭山市宝清县	132.437	46.192	153
S2	吉林省松原市前郭尔罗斯蒙古族自治县	124.861	45.018	161
S3	吉林省长春市南关区	125.415	43.808	252
S4	辽宁省大连市庄河市	122.752	39.777	196
S5	内蒙古自治区赤峰市喀喇沁旗	119.306	41.908	692
S6	新疆维吾尔自治区塔城地区沙湾市	85.859	44.302	752
S7	新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州阜康市	87.871	44.338	686
S8	宁夏回族自治区固原市泾源县	106.292	35.641	1 584
S9	甘肃省兰州市榆中县三角城乡	104.179	35.910	2 143
S10	山东省德州市武城县	116.160	37.271	30
S11	山东省滨州市博兴县	118.337	37.055	148
S12	山东省菏泽市定陶区	115.519	35.094	54
S13	山东省潍坊市昌乐县	119.066	36.540	122
S14	山西省朔州市山阴县	112.783	39.388	1 378
S15	河南省开封市杞县	114.761	34.416	73
S16	河南省郑州市登封市	113.046	34.455	271
S17	陕西省咸阳市长武县	107.680	35.240	1 176
S18	河南省南阳市淅川县	111.231	33.072	191
S19	湖北省襄阳市枣阳市	112.954	31.936	181
S20	安徽省亳州市利辛县	116.134	33.195	31
S21	湖北省武汉市洪山区	114.525	30.493	109
S22	湖北省恩施土家族苗族自治州利川市	108.697	30.264	685
S23	湖南省娄底市新化县	111.325	27.743	314
S24	湖南省长沙市望城区	112.823	28.273	111
S25	江西宜春市高安市	115.495	28.461	88
S26	江苏省镇江市句容市	119.261	32.104	10
S27	浙江省嘉兴市海宁市	120.796	30.390	54
S28	福建省福州市仓山区	119.228	26.084	213
S29	广东省广州市天河区	113.380	23.189	151
S30	重庆市巴南区	106.458	29.375	478
S31	四川省广元市昭化区	105.889	32.180	892
S32	西藏自治区林芝市巴宜区	94.737	29.766	4 193
S33	西藏自治区拉萨市堆龙德庆区	90.719	29.928	4 948
S34	云南省昭通市镇雄县	105.298	27.672	1 251

选取的是长期覆盖地膜的农用地,无塑料输入的土壤为距离已采的有塑料输入的土样附近1 km²范围内未覆膜且远离道路无塑料垃圾堆积的土壤。采集后的土样用自封袋装好,在快递箱中装满泡沫膜和空气包避免土样受到挤压和碰撞,防止团聚体被破坏。土样在干净密闭的环境下自然风干,其基本理化性质见表2。在实验室筛分土壤团聚体后,计算团聚体的稳定性指标。

1.2 团聚体筛分及稳定性指标体系

1.2.1 干湿筛法

本研究采用干筛法与湿筛法相结合的方式筛分团聚体^[13]。设置干筛的筛分粒级为>5、2~5、1~2、0.25~1 mm和<0.25 mm 5个粒级团聚体,仔细剔除风干土样中的石砾和根、叶、虫体后,充分混匀铺成正方形,用四分法选取500 g的样品放在筛孔直径为5、2、1、0.25 mm的土壤筛中,摇晃15 min左右,分离出>5、2~5、1~2、0.25~1 mm和<0.25 mm 5个粒级团聚体,然后对各粒径团聚体进行称量。设置湿筛的筛分粒级为>2、1~2、0.25~1、0.053~0.25 mm和<0.053 mm 5个粒级团聚体,用四分法取100 g原样土置于浸泡在去离子水中的孔径为2 mm的分样筛中,手动进行小幅度的振荡,直至筛子上方混合物液体变得不再浑浊,将过2 mm筛后的混合物再以同样操作依次通过孔径为1、0.5、0.25、0.053 mm的筛子,筛分完后将保留在筛中的样品在40℃下烘干收集,烘干后的土样即为相应粒径的水稳性团聚体。

1.2.2 稳定性指标计算

对于土壤团聚体周转动态及稳定性分析,利用平均重量直径(Mean weight diameter, *MWD*)、几何平均直径(Geometric mean diameter, *GMD*)、标准化平均重量直径(Normalized mean weight diameter, *NMWD*)和团聚体破坏率(Percentage of aggregate destruction, *PAD*)等常用的团聚体稳定性指标体系进行评价^[14],基于这些指标的差异来确定塑料污染对土壤团聚体

稳定性的影响。指标计算方法参考相关的文献^[15-18]。

*MWD*计算公式:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为土壤各粒径的平均直径,mm; w_i 为土壤各粒径的质量百分比,%。

*GMD*计算公式:

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i \right) \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_i$ 为土壤各粒径的平均直径,mm; w_i 为土壤各粒径的质量百分比,%。

*NMWD*计算公式:

$$NMWD = \frac{MWD}{r_{\max-j} - r_{\min}} \quad (3)$$

式中: $r_{\max-j}$ 为第 j 个筛子的最大孔径,mm; $r_{\min}$ 为筛子的最小孔径,mm。

*PAD*计算公式:

$$PAD = \frac{DR_{>0.25} - WR_{>0.25}}{DR_{>0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $DR_{>0.25}$ 为干筛获得的>0.25 mm团聚体的含量,%; $WR_{>0.25}$ 为湿筛获得的>0.25 mm团聚体的含量,%。

1.3 统计分析

采用Excel 2021和SPSS 26进行数据的整理与分析,采用Origin 2022绘图。对各地区间及各地区内部受塑料污染和未被塑料污染土壤间各粒级团聚体进行方差分析,对受塑料污染和未被塑料污染土壤间团聚体直径和稳定性差异采用配对样品 t 检验进行分析。采用Pearson相关系数对直径参数和团聚体组成进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体组成分析

受塑料污染土壤和未被塑料污染土壤的团聚体

表2 土壤主要理化性质

Table 2 Main physical and chemical properties of soil

指标 Indicator	污染土壤 Soil contaminated with plastic			未污染土壤 Soil not contaminated with plastic		
	平均值 Mean	范围 Range	变异系数 Coefficient variation/%	平均值 Mean	范围 Range	变异系数 Coefficient variation/%
pH	6.5	4.9~8.2	15.1	6.4	4.8~8.4	16.9
土壤有机质/(g·kg ⁻¹)	35.9	10.5~116.9	57.1	37.5	11.4~80.5	44.3
总氮/(g·kg ⁻¹)	0.7	0.3~1.0	26.4	0.7	0.3~0.9	23.4
黏粒/%	16.4	3.5~86.3	129.9	23.4	4.3~82.4	97.1
粉粒/%	43.4	7.6~85.4	41.0	41.3	5.8~72.2	38.7
砂粒/%	40.2	2.3~73.4	51.6	35.3	2.0~68.0	57.8

组成均呈正态分布且满足方差齐性检验,各区域内部无显著差异,不同地区在 >5 mm机械稳定性大团聚体($P<0.05$)含量以及 $0.25\sim 1$ mm($P=0.004$)、 $0.053\sim 0.25$ mm($P=0.005$)、 <0.053 mm($P=0.017$)水稳性团聚体含量上存在显著差异。从机械稳定性团聚体组成来看(图1),农田土壤塑料输入增加了 >5 mm机械稳定性大团聚体的比例,而降低了 <0.25 mm机械稳定性团聚体的比例,塑料污染对 $2\sim 5$ 、 $1\sim 2$ mm和 $0.25\sim 1$ mm等粒级的机械稳性团聚体影响不明显。从水稳性团聚体组成来看(图2),大多数农田中以 <0.25 mm微团聚体占主导,占比在70%以上,而水稳性大团聚体的含量相对较低。此外塑料输入降低了 >2 mm农田土壤水稳性大团聚体比例,增加了 <0.053 mm土壤颗粒的比例,而塑料污染对 $1\sim 2$ 、 $0.25\sim 1$ mm和 $0.053\sim 0.25$ mm等粒级的水稳性团聚体影响并不明显。从不同

区域来看,我国西北、华北和华中地区地膜的使用量大、使用年限长,土壤团聚体受塑料的影响明显大于其他地区(图3),特别是机械稳定性团聚体组成。

2.2 土壤团聚体直径分析

本研究采用MWD、GMD以及NMWD对有无塑料污染条件下的土壤团聚体直径进行分析(图4、图5)。对于干筛机械稳定性团聚体,未受塑料污染的土壤团聚体MWD和GMD的平均值分别为3.50 mm(0.49~5.36 mm)和2.10 mm(0.18~4.76 mm),而受塑料污染的土壤团聚体MWD和GMD的平均值分别为4.28 mm(1.73~6.66 mm)和2.77 mm(0.40~5.76 mm),统计分析表明,土壤机械稳定性团聚体MWD($P=0.001$)和GMD($P=0.002$)在有无塑料污染条件下差异显著。对于湿筛水稳性团聚体,未受塑料污染的土壤团聚体MWD和GMD的平均值分别为0.55 mm(0.06~1.45

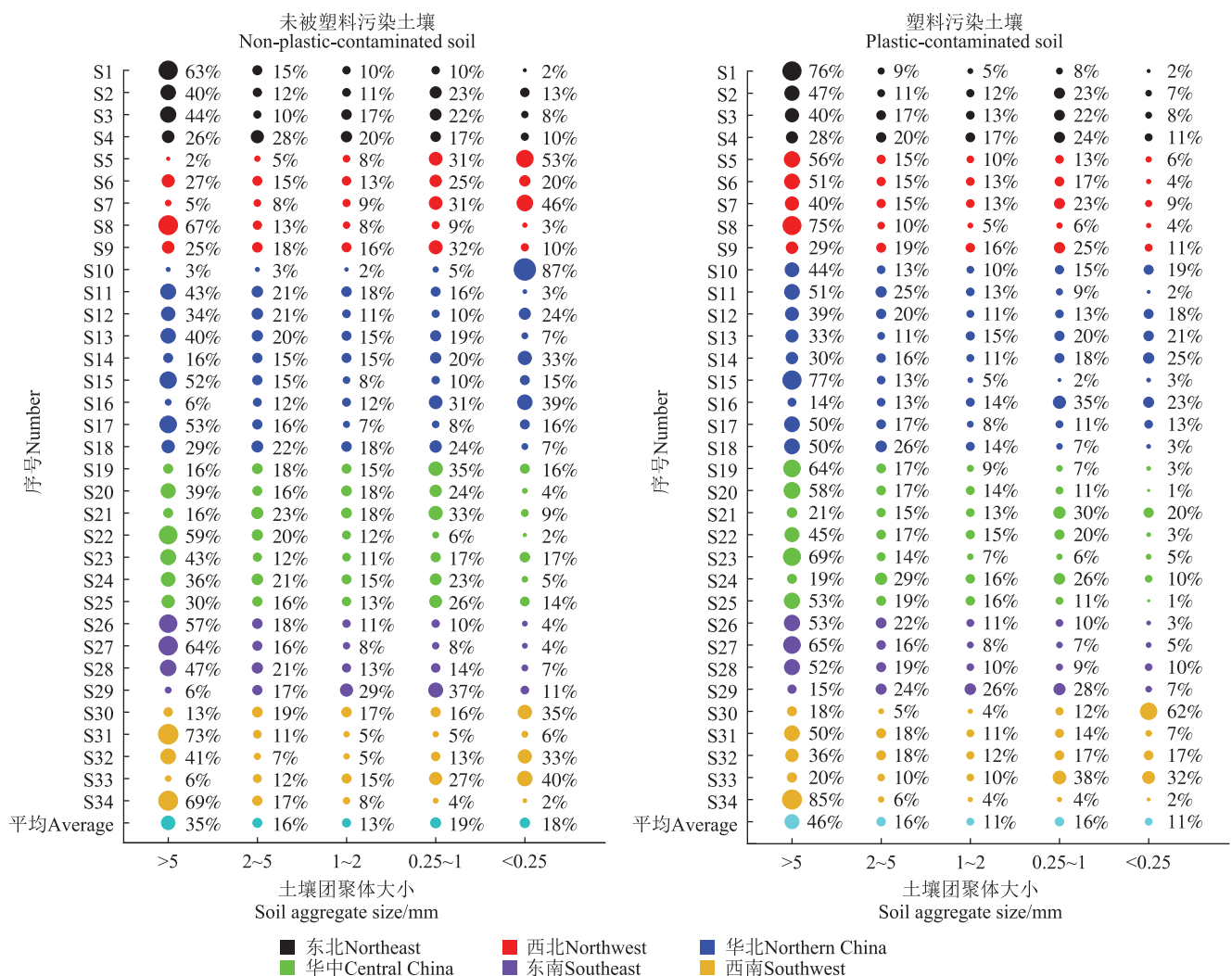


图1 有无塑料污染条件下土壤机械稳定性团聚体组成

Figure 1 Composition of soil mechanically stable aggregates with or without plastic pollution

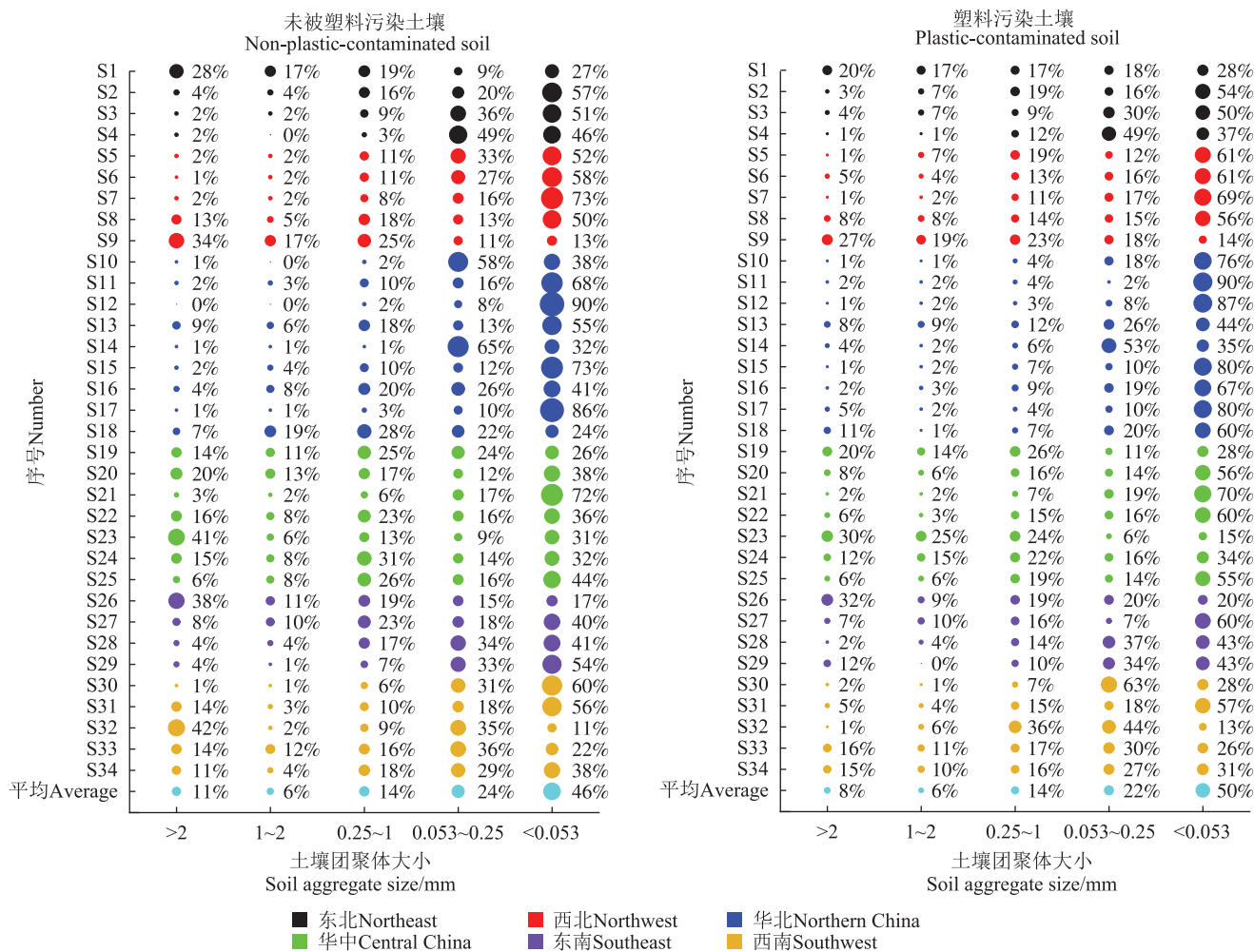
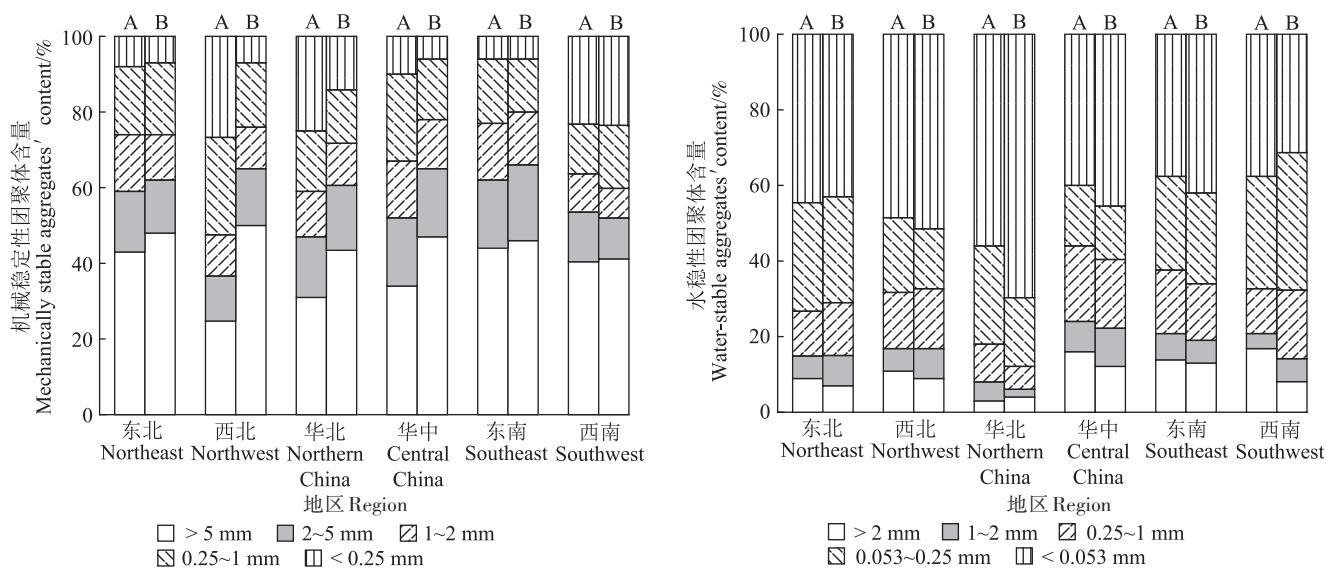


图2 有无塑料污染条件下土壤水稳性团聚体组成

Figure 2 Composition of soil water-stable aggregates with or without plastic pollution

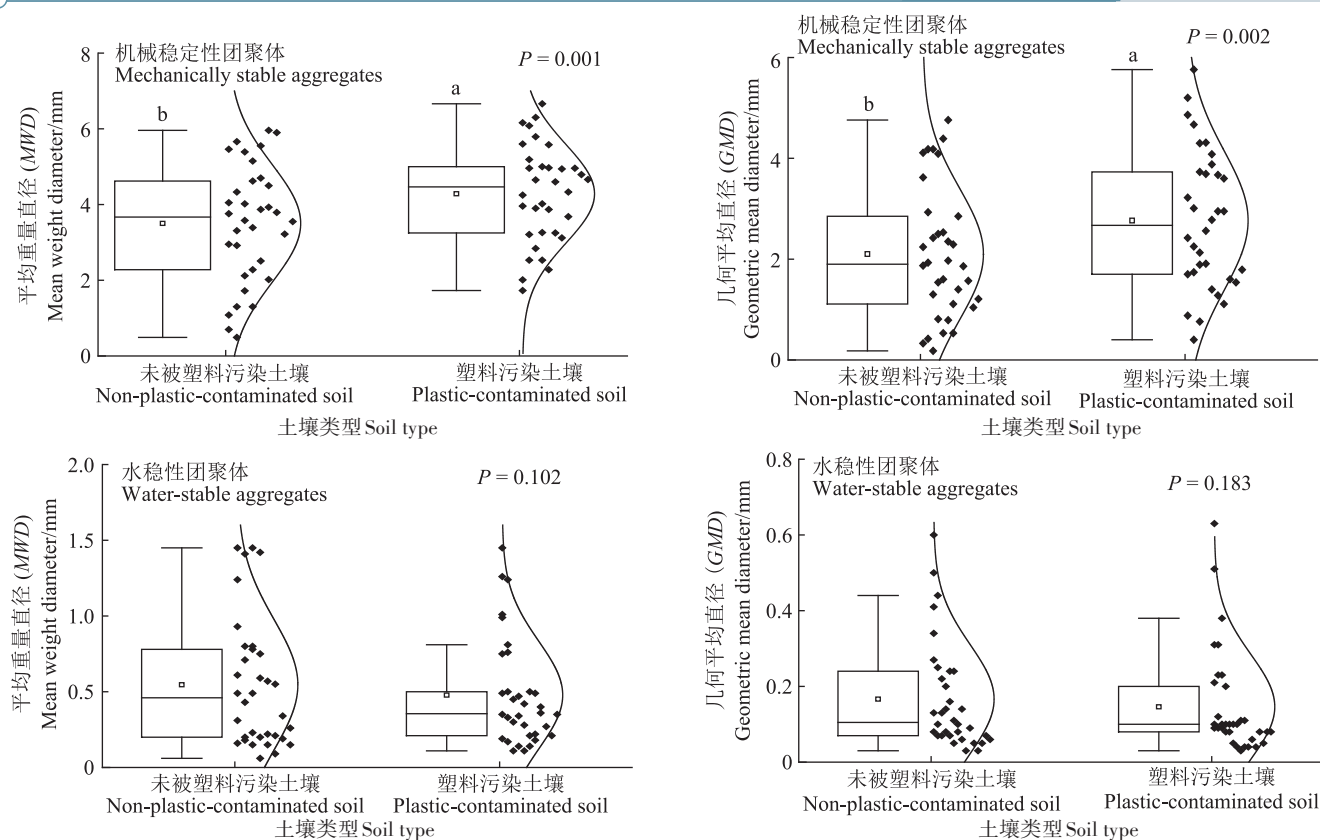


A为未被塑料污染土壤,B为被塑料污染土壤。

A indicates non-plastic-contaminated soil, and B indicates plastic-contaminated soil.

图3 不同区域有无塑料污染条件下土壤团聚体组成

Figure 3 Composition of soil aggregates in different regions with or without plastic pollution



不同字母表明被塑料污染和未被塑料污染的土壤间差异显著($P<0.05$)。下同。

Different alphabets indicate significant differences between plastic-contaminated and non-plastic-contaminated soils ($P<0.05$). The same below.

图4 有无塑料污染条件下土壤团聚体的平均重量直径和几何平均直径

Figure 4 Geometric weight diameter and mean diameter of soil aggregates with or without plastic contamination

mm)和0.17 mm(0.03~0.60 mm),而受塑料污染的土壤团聚体MWD和GMD的平均值分别为0.48 mm(0.11~1.45 mm)和0.15 mm(0.03~0.63 mm),土壤水稳性团聚体MWD($P=0.102$)和GMD($P=0.183$)在有无塑料污染条件下差异不显著。

NMWD的数值大小随团聚体粒级的增大而减小,不同尺寸团聚体NMWD之间的差异越小^[18],土壤团聚体稳定性越弱。本研究分别计算了机械稳定性团聚体2~5、1~2 mm和0.25~1 mm的NMWD,以及水稳性团聚体1~2、0.25~1、0.053~0.25 mm的NMWD。未被塑料污染土壤的机械稳定性团聚体2~5、1~2 mm和0.25~1 mm的NMWD分别为0.74、2.00 mm和4.67 mm,而有塑料污染土壤对应的NMWD分别为0.90、2.45 mm和5.71 mm,统计分析表明,土壤机械稳定性团聚体NMWD在有塑料污染土壤中的差异显著高于无塑料污染土壤($P=0.001$)。对于水稳性团聚体,无塑料污染条件下1~2、0.25~1 mm、0.053~0.25 mm团聚体的NMWD分别为0.28、0.58 mm和2.78 mm,而有塑料污染土壤对应的NMWD分别为0.25、0.50 mm和

2.42 mm,塑料污染并未显著改变土壤水稳性团聚体NMWD在各粒级间的差异($P=0.102$)。以上结果说明,农田土壤塑料污染显著增加了机械稳定性团聚体直径,但对水稳性团聚体直径无显著影响。

2.3 土壤团聚体稳定性分析

PAD的数值大小与土壤结构的稳定程度呈反比,其数值越小,团聚体越稳定^[16]。本研究分别计算了>2、>1 mm和>0.25 mm的PAD(图6),在有无塑料污染条件下,>2 mm的PAD平均分别为86%和77%,>1 mm的PAD平均分别为80%和73%,>0.25 mm的PAD平均分别为68%和63%,塑料污染过的农田土壤各粒级PAD均显著高于未被塑料污染过的农田土壤($P<0.05$)。

2.4 土壤团聚体组成各参数间的相关性分析

相关性结果表明,对机械稳定性土壤团聚体(表3),在土壤无塑料输入的情况下,土壤团聚体MWD和GMD与>5、0.25~1 mm和<0.25 mm粒级团聚体含量具有显著的相关性,正负关系以2 mm为界,与>5 mm团聚体呈正相关,而与0.25~1 mm和<0.25 mm团聚体呈负相关。而在有塑料输入的土壤中,土壤团聚体

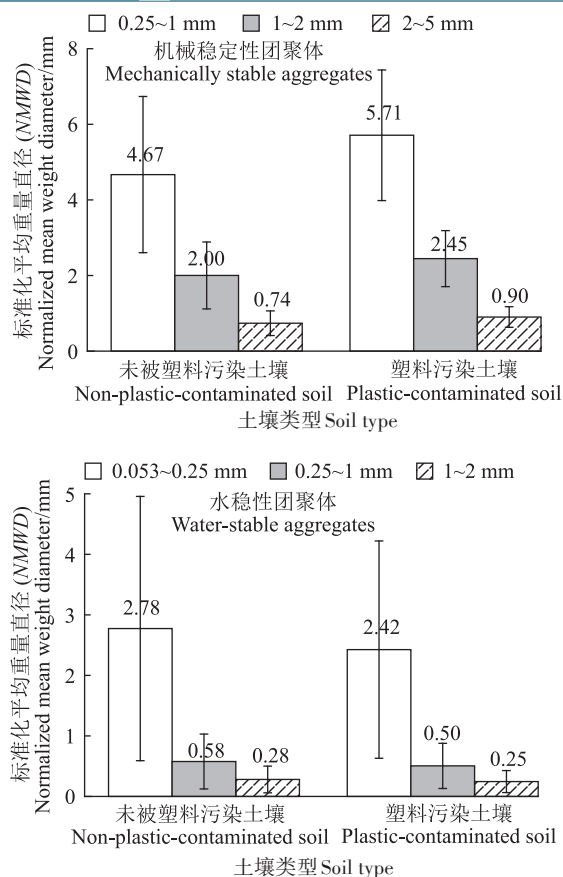


图5 有无塑料污染条件下土壤团聚体的标准化平均重量直径
Figure 5 Normalized mean weight diameter of soil aggregates with or without plastic contamination

MWD 和 *GMD* 与 >5、1~2、0.25~1 mm 和 <0.25 mm 粒级团聚体含量具有显著的相关性,正负关系以 5 mm 为界,与 >5 mm 团聚体呈正相关,而与 1~2、0.25~1 mm 和 <0.25 mm 团聚体呈负相关。对水稳性土壤团聚体 (表4),无论有无塑料污染情况,土壤团聚体 *MWD* 和 *GMD* 均与 >2、1~2 mm 和 0.25~1 mm 粒径团聚体占比呈显著正相关,而与 <0.053 mm 粒径团聚体占比呈显著负相关。无塑料污染的土壤 *MWD* 与 0.053~0.25 mm 团聚体呈现弱负相关。以上结果说明塑料污染增加了 1~2 mm 的机械稳定性团聚体对其平均直径的贡献,而塑料污染并未改变水稳性土壤团聚体组成对其平均直径的贡献。

有机质在土壤团聚体的形成和周转中发挥着重要的胶结作用,本研究发现,无论有无塑料输入,各粒级机械稳定性土壤团聚体含量与土壤有机质含量均无相关性。对于水稳性土壤团聚体,在土壤无塑料输入的情况下,土壤有机质与 1~2 mm 粒径团聚体呈显著正相关、与 0.25~1 mm 粒径团聚体呈正相关,而与

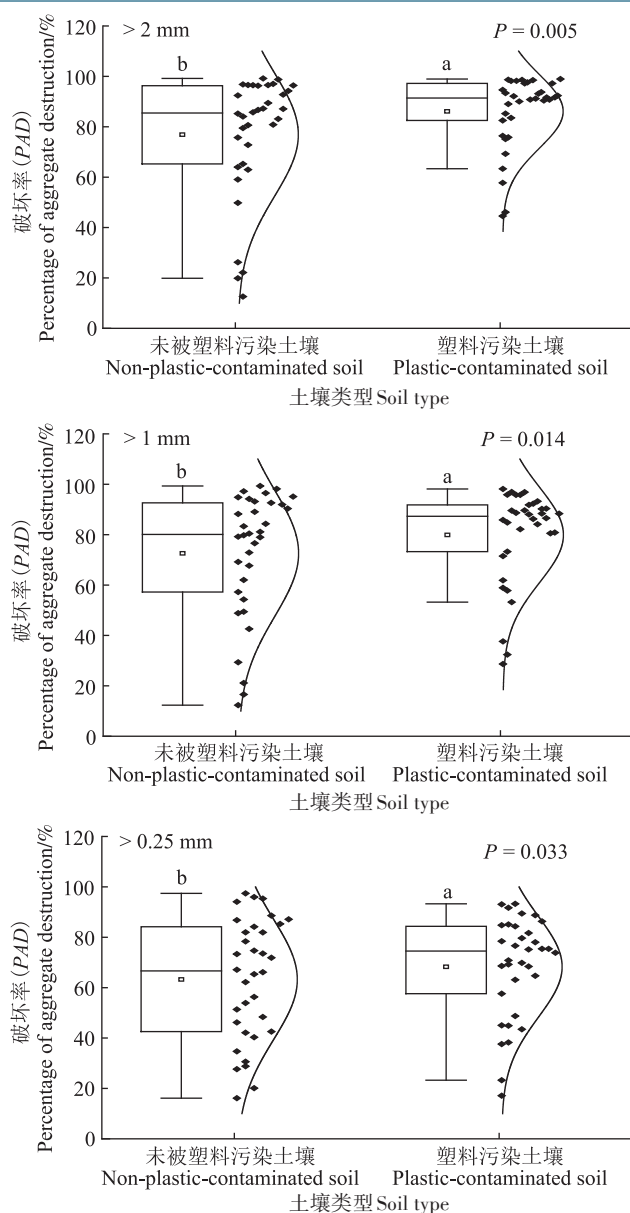


图6 有无塑料污染条件下土壤团聚体的稳定性
Figure 6 Stability of soil aggregates with or without plastic contamination

<0.053 mm 粒径团聚体呈显著负相关,而在有塑料输入的土壤中,土壤有机质与 1~2、0.25~1 mm 粒径团聚体呈显著正相关,而与 <0.053 mm 粒径团聚体呈显著负相关。以上说明有机质含量主要对土壤的水稳性团聚体存在影响。

3 讨论

土壤团聚体形成与周转的过程一般包括形成、稳定和崩解 3 个阶段^[19],在土壤团聚体形成阶段,土壤生物 (包括土壤动物和微生物) 通过吞食、排泄和分解

活动,可将土壤中的有机碎屑、真菌菌丝体和土壤颗粒等物质结合在一起形成大团聚体^[6]。同时,土壤有机质作为团聚体的主要胶结剂,在团聚体稳定和崩解阶段起决定性作用^[20]。塑料制品作为人工合成的含碳化合物,输入土壤后可能同样对团聚体周转及其稳定起重要作用。

塑料污染可能通过吸附和缠绕作用促进团聚体的形成与稳定。本研究结果表明,塑料污染会使土壤>5 mm的机械稳定性大团聚体含量增加,但会降低<0.25 mm的团聚体含量,这与胡旭凯等^[21]的研究结果一致;塑料污染会使土壤>2 mm的水稳性团聚体含量减少,但会增加>0.053 mm的团聚体含量,这与马文倩等^[22]的研究结果相似。*MWD*、*GMD*和*NMWD*的值越大,说明团聚体越稳定^[18,23]。塑料污染土壤机械稳定性团聚体直径指数*MWD*、*GMD*和*NMWD*均显著大于无污染土壤,原因可能是塑料破碎后形成微塑料,由于其具有化学结构稳定、比表面积大和吸附性强等特点^[24],可能有利于土壤颗粒的聚合,进而促进团聚体的形成。而对于水稳性团聚体,在有无塑料污染条件下土壤团聚体组成和直径指标均无显著差异,塑料污染土壤*NMWD*略小于无污染土壤,塑料污染存

在降低水稳性团聚体直径的趋势^[25],其原因可能是塑料污染对土壤动物和微生物造成了不利影响^[26]。以上说明在塑料介导下形成的大团聚体,其作用力可能只是物理吸附作用,并未形成稳定的胶结作用。

塑料污染对土壤团聚体稳定性的影响并不明确。当前,对塑料污染引起团聚体稳定性的潜在变化研究仍处在初级阶段^[11,27]。土壤中塑料污染物的形状、聚合物类型和浓度大小都会影响土壤团聚体的稳定性^[28]。一方面,塑料可通过黏附和缠绕等形式促进土壤团聚体的稳定性^[12,28],这种效应可能取决于塑料的形状^[29],如纤维状的塑料能更有效地缠结土壤颗粒,降低土壤团聚体的崩解发生,也有利于土壤团聚体固碳、抵御土壤侵蚀和通气性。但另一方面,塑料风化破碎后会形成微塑料,微塑料对土壤生物产生毒害性,并通过食物网传递,危害生物健康^[30],间接影响土壤团聚体的稳定性,而且塑料粒径越小越容易被土壤动物取食^[31],表明团聚体的稳定性可能也与微塑料的大小关联^[32]。受塑料污染土壤各粒级*PAD*均显著高于未被塑料污染过的土壤,可见农田土壤塑料污染增加了机械稳定性大团聚体经过湿筛后的破坏率,这也进一步证明了农田土壤塑料污染增加的土壤大团聚

表3 土壤机械稳定性团聚体与直径参数间相关性分析

Table 3 Correlation analysis between diameter parameters and soil mechanically stable aggregates

土壤类型 Soil type	指标参数 Indicator parameters	土壤机械稳定性团聚体 Soil mechanically stable aggregates				
		>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	<0.25 mm
无塑料污染	<i>MWD</i>	0.988**	0.319	-0.250	-0.680**	-0.787**
	<i>GMD</i>	0.947**	0.288	-0.239	-0.668**	-0.741**
	有机质	0.002	-0.057	-0.006	-0.013	0.021
有塑料污染	<i>MWD</i>	0.987**	-0.101	-0.517**	-0.834**	-0.735**
	<i>GMD</i>	0.959**	-0.081	-0.478**	-0.804**	-0.735**
	有机质	-0.03	-0.019	-0.029	0.187	-0.032

注:** 在 0.01 级别相关性显著。* 在 0.05 级别相关性显著。下同。
Note: ** At the 0.01 level, the relevance is significant. * At level 0.05, the relevance is significant. The same below.

表4 土壤水稳性团聚体与直径参数间相关性分析

Table 4 Correlation analysis of diameter parameters and soil water-stable aggregates

土壤类型 Soil type	指标参数 Indicator parameters	土壤水稳性团聚体 Soil water-stable aggregates				
		>2 mm	1~2 mm	0.25~1 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm
无塑料污染	<i>MWD</i>	0.971**	0.690**	0.559**	-0.348*	-0.780**
	<i>GMD</i>	0.907**	0.722**	0.522**	-0.244	-0.807**
	有机质	0.29	0.363*	0.328	-0.06	-0.374*
有塑料污染	<i>MWD</i>	0.972**	0.889**	0.620**	-0.171	-0.744**
	<i>GMD</i>	0.888**	0.875**	0.636**	-0.063	-0.782**
	有机质	0.131	0.385*	0.739**	0.079	-0.467**

体并不具有水稳定性。

相关性分析结果表明,机械稳定性土壤团聚体 *MWD* 和 *GMD* 与各粒径团聚体含量皆呈线性关系(除与 2~5 mm 粒径相关性不显著,以及与未被塑料污染土壤中 1~2 mm 粒径相关性不显著外,其余均达显著水平),其中无塑料污染土壤团聚体正负相关性以 2 mm 为界,有塑料污染土壤团聚体正负相关性以 5 mm 为界,说明塑料输入增加了 >5 mm 粒级对土壤团聚体直径的贡献。对于水稳性团聚体,其 *MWD* 和 *GMD* 均与各粒径团聚体含量呈线性关系(除无塑料污染土壤 *GMD* 值以及有塑料污染土壤 *MWD* 和 *GMD* 值与 0.053~0.25 mm 粒径相关性不显著外,其余均达显著水平),*MWD* 和 *GMD* 与各粒径团聚体含量的正负相关性以 0.25 mm 为界,这与姜敏等^[33]的研究结果基本类似。本研究结果进一步确认了 0.25 mm 是水稳性团聚体周转较为关键的临界点。

本研究探索了塑料污染对团聚体稳定性的影响,当前对塑料污染引起团聚体稳定性的潜在变化研究仍处在初级阶段,多注重于调查研究^[11,27],而在受控条件下微塑料影响团聚体周转及其稳定性的定量研究报道相对较少,特别是不同形状微塑料对团聚体影响的差异性研究资料更加缺乏。后续研究还需进一步探讨塑料形状和大小对土壤团聚体的影响,了解塑料与土壤颗粒团聚化机制,从土壤团聚体的尺度上理解塑料的环境效应及其与此相关的土壤生态过程,从而更好地防治土壤塑料污染,积极探索新型、科学、可持续的农业发展方式,保障我国粮食安全。

4 结论

(1)从团聚体组成来看,农田土壤塑料输入增加了 >5 mm 机械稳定性大团聚体比例,农田土壤塑料输入显著增加了机械稳定性团聚体直径指数 *MWD* 和 *GMD*,但对水稳性团聚体直径无显著影响。塑料污染过的农田土壤的 *PAD* 显著高于未被塑料污染过的农田土壤,证明农田土壤塑料污染增加的土壤大团聚体仅具有机械稳定性而不具有水稳定性。

(2)相关性分析结果表明,有、无塑料输入的机械稳定性土壤团聚体和水稳性土壤团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 与各粒径团聚体含量都存在相关性。对于机械稳定性团聚体,无塑料污染土壤团聚体正负相关性以 2 mm 为界,有塑料污染土壤团聚体正负相关性以 5 mm 为界,证明塑料输入增加了 >5 mm 粒级对土壤团聚体直径的贡献。对于水稳性团聚体,在有无塑料污

染条件下 0.25 mm 均是水稳性团聚体重要的临界点。

参考文献:

- [1] 汤庆峰,高峡,李琴梅,等.农田土壤微塑料污染研究现状与问题思考[J].安徽农业科学,2021,49(15):72-78,84. TANG Q F, GAO X, LI Q M, et al. Research status and existing problems of microplastic pollution in farmland soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(15):72-78,84.
- [2] 丁凡,严昌荣,汪景宽.黑土地保护中不容忽视的一个问题:地膜残留及其污染[J].土壤通报,2022,53(1):234-240. DING F, YAN C R, WANG J K. An overlooked issue in black soil protection: plastic film accumulation and pollution[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1):234-240.
- [3] 靳拓,薛颖昊,张明明,等.国内外农用地膜使用政策、执行标准与回收状况[J].生态环境学报,2020,29(2):411-420. JIN T, XUE Y H, ZHANG M M, et al. Research advances in regulations, standards and recovery of mulch film[J]. *Ecology and Environmental Sciences* 2020, 29(2):411-420.
- [4] 胡晓杰.我国全链条治理塑料污染[J].生态经济,2021,37(11):9-12. HU X J. China's whole chain to control plastic pollution[J]. *Ecological Economy*, 2021, 37(11):9-12.
- [5] 戚瑞敏.中国典型覆膜农区土壤微塑料特征及生态效应[D].北京:中国农业科学院,2021:15-16. QI R M. Characteristics and ecological effects of soil microplastic in typical agricultural region with plastic film mulching in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021:15-16.
- [6] SIX J, PAUSTIAN K. Aggregate-associated soil organic matter as an ecosystem property and a measurement tool[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 68:A4-A9.
- [7] ZHANG G S, CHAN K Y, OATES A, et al. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 92(1/2):122-128.
- [8] LIU Y, LIU W Z, YANG X M, et al. Microplastics are a hotspot for antibiotic resistance genes: progress and perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 773:145643.
- [9] YUDINA A, KUZUYAKOV Y. Saving the face of soil aggregates[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11):3574-3577.
- [10] JIANG Y J, LIU M Q, ZHANG J B, et al. Nematode grazing promotes bacterial community dynamics in soil at the aggregate level[J]. *Isme Journal*, 2017, 11(12):2705-2717.
- [11] 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.
- [12] MACHADO A A D, LAU C W, TILL J, et al. Impacts of microplastics on the soil biophysical environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(17):9656-9665.
- [13] 陈清山,蒋加棣.紫色土上种植金银花的效益研究[J].亚热带水土保持,2013,25(4):19-22,35. CHEN Q S, JIANG J D. Study on the benefit of honeysuckle plantation on the purple soil[J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2013, 25(4):19-22,35.

- [14] MARQUEZ C O, GARCIA V J, CAMBARDELLA C A, et al. Aggregate-size stability distribution and soil stability[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3):725-735.
- [15] 陈静, 陈海, 朱大运, 等. 石漠化地区林草复合治理对土壤团聚体稳定性和可蚀性的影响[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4):1-7. CHEN J, CHEN H, ZHU D Y, et al. Effects of combined governance using forest and grass on stability and erosibility of soil aggregates in rock desertification area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(4):1-7.
- [16] 刘文利, 吴景贵, 傅民杰, 等. 种植年限对果园土壤团聚体分布与稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1):129-135. LIU W L, WU J G, FU M J, et al. Effect of different cultivation years on composition and stability of soil aggregate fractions in orchard[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1):129-135.
- [17] 邱莉萍, 张兴昌, 张晋爱. 黄土高原长期培肥土壤团聚体中养分和酶的分布[J]. 生态学报, 2006, 26(2):364-372. QIU L P, ZHANG X C, ZHANG J A. Distribution of nutrients and enzymes in Loess Plateau soil aggregates after longterm fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2):364-372.
- [18] ZHANG B, HORN R. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2):123-145.
- [19] RILLIG M C, MULLER L A H, LEHMANN A. Soil aggregates as massively concurrent evolutionary incubators[J]. *Isme Journal*, 2017, 11(9):1943-1948.
- [20] ATERE C T, GUNINA A, ZHU Z K, et al. Organic matter stabilization in aggregates and density fractions in paddy soil depending on long-term fertilization: tracing of pathways by C-13 natural abundance[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2020, 149:107931.
- [21] 胡旭凯, 桑成琛, 曹萌萌, 等. 聚乙烯微塑料对土壤团聚体及其有机碳的影响[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2021, 39(4):476-480. HU X K, SANG C C, CAO M M, et al. Effects of polyethylene microplastics on soil aggregate and its organic carbon[J]. *Journal of Hubei MinZu University (Natural Sciences Edition)*, 2021, 39(4):476-480.
- [22] 马文倩, 许美玲, 郭红岩. 野外农田系统中聚乙烯微塑料对土壤-小麦系统的影响[J]. 南京大学学报(自然科学), 2021, 57(3):393-400. MA W Q, XU M L, GUO H Y. Effects of polyethylene microplastic on soil-wheat system in field[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2021, 57(3):393-400.
- [23] 张旭冉, 张卫青. 土壤团聚体研究进展[J]. 北方园艺, 2020, 44(21):131-137. ZHANG X R, ZHANG W Q. Research progress of soil aggregates[J]. *Northern Horticulture*, 2020, 44(21):131-137.
- [24] 杨婧婧, 徐笠, 陆安祥, 等. 环境中微(纳米)塑料的来源及毒理学研究进展[J]. 环境化学, 2018, 37(3):383-396. YANG J J, XU L, LU A X, et al. Research progress on the sources and toxicology of micro(nano) plastics in environment[J]. *Environmental Chemistry*, 2018, 37(3):383-396.
- [25] LI H X, LIU L, XU Y, et al. Microplastic effects on soil system parameters: a Meta-analysis study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8):11027-11038.
- [26] LEHMANN A, ZHENG W S, RILLIG M C. Soil biota contributions to soil aggregation[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(12):1828-1835.
- [27] HOU J H, XU X J, YU H, et al. Comparing the long-term responses of soil microbial structures and diversities to polyethylene microplastics in different aggregate fractions[J]. *Environment International*, 2021, 149:106398.
- [28] 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, 12:714541.
- [29] NG E L, LIN S Y, DUNGAN A M, et al. Microplastic pollution alters forest soil microbiome[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 409:124606.
- [30] NG E L, LWANGA E H, ELDRIDGE S M, et al. An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627:1377-1388.
- [31] WANG J, COFFIN S, SUN C L, et al. Negligible effects of microplastics on animal fitness and HOC bioaccumulation in earthworm *Eisenia fetida* in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:776-784.
- [32] RILLIG M C, LEHMANN A. Microplastic in terrestrial ecosystems[J]. *Science*, 2020, 368(6498):1430-1431.
- [33] 姜敏, 刘毅, 刘闯, 等. 丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6):265-270. JIANG M, LIU Y, LIU C, et al. Study on the stability and fractal characteristics of soil aggregates under different land use patterns in the Danjiangkou Reservoir[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(6):265-270.