



谢福武, 吴思怡, 田毓婷, 杨大顺, 刘建卓, 王晟, 何书海. 海南儋州农用地土壤微塑料赋存含量与分布特征[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(05): 159-170.
XIE Fuwu, WU Siyi, TIAN Yuting, YANG Dashun, LIU Jianzhuo, WANG Sheng, HE Shuhai. Research on storage capacity and distribution characteristics of soil microplastics with Danzhou farmland, Hainan[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(05): 159-170.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.05.15

海南儋州农用地土壤微塑料赋存含量与分布特征

谢福武 吴思怡 田毓婷 杨大顺 刘建卓 王晟 何书海*

(海南省生态环境监测中心, 海口 571126)

摘要 为掌握海南农用地土壤微塑料赋存含量与分布特征, 以农用地不同农业种植区的土壤微塑料为研究对象, 采用现场监测和实验室分析相结合的研究方法, 探究不同区域表层土壤和不同深度剖面土壤中微塑料丰度含量与分布特征。结果表明: 农用地表层土壤微塑料丰度范围为 200.00~3 900.00 个/kg, 平均丰度为 933.33±767.04 个/kg; 土壤微塑料的成分主要为聚乙烯, 覆膜地块丰度明显高于未覆膜地块, 且与地块作物种植方式存在较强关联性; 整个表层土壤均以偏小粒径(0.5~2.0 mm)微塑料为主, 覆膜地块以白色颗粒、黑色薄膜、蓝色薄膜、半透明纤维塑料居多, 未覆膜地块则以半透明的纤维塑料占主导; 此外, 纵向剖面土壤微塑料数量和丰度均随土层深度增加呈明显下降趋势, 尤其是黑色、蓝色农膜塑料(聚乙烯)下降明显, 均存在显著负相关性($P<0.05$), 而小粒径(<0.5 mm, 0.5~1.0 mm)微塑料丰度所占比例明显升高, 呈小型化的变化趋势, 微塑料更易向深层土壤迁移和转化。综上, 与国内外农田区域相比, 海南儋州农用地土壤微塑料丰度整体处于偏高水平。

关键词 微塑料; 农用地; 赋存含量; 分布特征; 海南儋州

中图分类号 X82

文章编号 1007-4333(2024)05-0159-12

文献标志码 A

Research on storage capacity and distribution characteristics of soil microplastics with Danzhou farmland, Hainan

XIE Fuwu, WU Siyi, TIAN Yuting, YANG Dashun, LIU Jianzhuo, WANG Sheng, HE Shuhai*

(Hainan Ecological Environmental Monitoring Center, Haikou 571126, China)

Abstract To master storage capacity and distribution characteristics of soil microplastics with farmland. Research on soil microplastics in different agricultural planting areas of farmland: a combination of field monitoring and laboratory analysis. And explored the microplastics abundance and distribution of topsoil with different areas and profile soil with different depths. Results revealed that microplastics abundance of topsoil in farmland were ranged from 200.00 ind/kg to 3 900.00 ind/kg, with the mean were 933.33±767.04 ind/kg. Components of soil microplastics were mainly dominated by polyethylene (PE), its abundance of film-covered land were significantly higher than non-film covered land, which was closely related to crop planting methods of land. And microplastics of the whole topsoil were mainly composed of size range of 0.5~2.0 mm, the majority of film-covered land were white particles, black film, blue film and translucent fiber plastics, while non-film covered land were dominated by translucent fiber plastics. Moreover, number and abundance of microplastics in vertical profile soil decreased significantly with depth of soil layers, especially black and blue film plastics (polyethylene) decreased significantly, with a significant negative correlation ($P<0.05$). Abundance proportion of microplastics with smaller particle sizes (<0.5 mm, 0.5~1.0 mm) showed a

收稿日期: 2023-12-03

基金项目: 海南省自然科学基金青年基金项目(321QN0960); 海南省自然科学基金高层次人才基金项目(420RC755)

第一作者: 谢福武(ORCID:0009-0008-5035-0451), 工程师, 主要从事海洋环境与生态环境学研究, E-mail: xfw1021900977@163.com

通讯作者: 何书海(ORCID:0009-0008-5920-5541), 研究员, 主要从事生态环境污染研究分析研究, E-mail: heshuhai1981@163.com

noticeable increased, indicated a trend towards miniature sizes, and microplastics were more prone to migrate and transform into deeper layers of soil. In conclusion, microplastics abundance in Danzhou farmland of Hainan were generally at a higher level, when compared with domestic and foreign farmland.

Keywords microplastics; farmland; storage capacity; distribution characteristics; Hainan Danzhou

微塑料作为一种新型污染物,主要指环境中粒径结构<5 mm的塑料类污染物,包括碎片、纤维、薄膜、颗粒、泡沫等类型,其所带来的生态负效应和健康风险成为近年来国际生态与环境科学的研究热点,并受到广泛关注^[1-4]。微塑料作为高分子有机聚合物,具有粒径小、密度轻、疏水性、持久性和难降解性等特性,从土壤中提取微塑料十分困难^[3,5]。土壤作为微塑料最为重要的“汇”,微塑料极易在土壤中累积、赋存和迁移,严重影响着土壤的理化性质,对土壤动植物及地下水产生直接或间接影响^[6-7]。国内外已陆续开展了土壤中微塑料赋存含量和污染特征的相关研究,在不同尺度、不同地区、不同土地利用类型等方面获得了丰富的调查监测数据^[8-9],但目前缺少统一的、适用性强的土壤微塑料监测技术规范及评价方法。海南省作为农业大省,冬季瓜菜生产、种植过程中均会消耗大量农膜塑料,消耗量达万吨以上;加上海南常年气温偏高,农膜塑料极易老化、破碎,形成微塑料迁移至土壤中,无法做到完全回收利用。然而,关于海南农用地土壤微塑料赋存和污染特征研究也鲜有报道。为推动《进一步加强塑料污染治理的意见》(发改环

资[2020]80号)、《新污染物治理行动方案》(国办发[2022]15号)等政策法规落地见效,推进农田残留地膜监测力度和清理整治工作,加强微塑料等生态环境危害机理研究,夯实新型污染治理基础。本研究拟以海南儋州农用地不同农业种植区作为研究对象,采用现场监测和实验室分析相结合的研究方法,分析不同作物种植区表层土壤及不同深度剖面土壤微塑料赋存含量和分布特征,评估海南省农用地的微塑料污染现状,以期海南省农膜微塑料污染治理和管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区域

采用系统布点与分层(分块)布点相结合的采样方法,对海南省儋州市的农用地块的表层土壤(0~20 cm)和纵向剖面土壤微塑料的分布状况开展监测调查,共采集了35个表层土壤样品,以及1个纵向剖面土壤样品(5#,采样层次分别为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm),监测点位详见图1。微塑料样品采集与分析按照目前制定的《土壤微塑料测试技术方法(试行)》《农用地土壤微塑

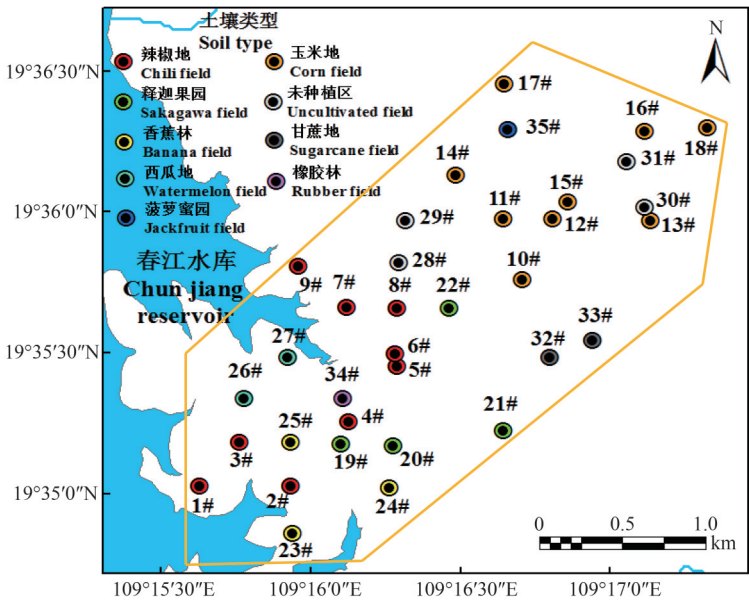


图1 海南儋州土壤微塑料采样点位

Fig. 1 Sampling sites of soil microplastics in Hainan Danzhou

料监测技术规程(试行)》中规定方法进行。

1.2 样品采集

1)根据所选定的农用地土壤断面,到达目标采集点位后,采样位置应用GPS核实,以目标点位为中心,优先选择符合要求的采样土壤,采样人员应于现场填写土壤样品采集现场记录表。

2)采用对角线5点混合采样。采样点位确定后,一般设定100 m×100 m的采样区域,在设定的采样区域内,采用对角线5点采样法采集表层土壤样品(0~20 cm)和纵向剖面土壤样品(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~100 cm),并按照混合采样法采集分点样品,预先用5 mm不锈钢网筛移除土壤样品中较大的草根、茎秆和石块等杂质,将通过不锈钢网筛的5点土壤样品等量均匀混合成一份样品,然后采用四分法选择1/4的土壤样品进行分装。

3)土壤样品采用铁锹和金属铲进行采集,将采集并匀化混合的2.0 kg土壤样品分装入2.5 L铝箔袋中保存。5点土壤的采样量应基本一致,且土壤样品采样量应不少于1.5 kg。需要采集平行样品的点位,采样总量应不少于2.5 kg。当土壤中砂石、草根等杂质较多或含水量较高时,可视情况增加样品采样量。

4)样品分装完毕后,将标签贴于铝箔袋上,于常温条件下避光保存。

1.3 样品处理

1)浮选分离:称取30 g土壤样品至250 mL高型烧杯中,加入1.5 g/mL碘化钠溶液(NaI)没过底部样品,土壤样品和碘化钠溶液的固液体积比为1:6~1:10(注:碘化钠加入量根据土壤取样量等情况进行调整)。手动或机械充分搅拌4~6 min,自然静置24 h,使微塑料与土壤充分分离。

2)筛网过滤:将0.05 mm孔径的不锈钢筛网叠加于烧杯口上,将浮选上清液倒入不锈钢筛网中,并用浮选液少量多次冲洗烧杯内壁,收集冲洗液一并转入不锈钢筛网中。再收集冲洗液将0.05 mm的不锈钢筛网上的截留物冲洗入干净的250 mL高型烧杯中,用锡箔纸覆盖烧杯口,锡箔纸表面扎若干小孔便于水分蒸发,并将烧杯置于55℃恒温干燥箱烘干。

3)消解处理:往干燥后的待测样品中依次添加20 mL的0.05 mol/L硫酸亚铁溶液和20 mL体积

分数为30%过氧化氢溶液,锡纸密封烧杯口进行消解处理,消解后若仍有生物体残留,重复上述操作(再次加入20 mL 30%过氧化氢溶液),直至生物体完全消解。

4)密度分离:消解后的样品通过0.05 mm的不锈钢筛网过滤掉多余的消解液,纯水反复冲洗不锈钢筛网筛网,用1.5 g/mL碘化钠溶液将筛网中的截留物质清洗并全部转移至分液漏斗中浮选分离,锡纸密封漏斗口,静置24 h后,打开漏斗下端阀门除去下层沉淀物(用镊子挑拣疑似微塑料沉淀物至干净玻璃培养皿中保存),保留含有微塑料物质浮选液。

5)真空抽滤:于滤器中放入不锈钢滤膜(10 μm),将漏斗中留存的浮选液倒入滤器中,用纯水反复冲洗漏斗,将残留物质全部冲洗至滤器中进行真空抽滤,抽滤完成后,滤膜转移至干净培养皿,贴好标签,55℃下烘干,留待后续的显微镜镜检和傅里叶变换显微红外光谱仪分析。

1.4 样品分析

1)滤膜置于体视显微镜(Seize)下进行观察,挑拣出疑似微塑料的物质,对其形态、粒径、颜色等物理特征进行测量和记录。

2)选用傅里叶变换红外光谱仪对挑拣的疑似塑料物质进行化学成分鉴定分析,选择光谱采集范围为400~4 000 cm⁻¹,设置单次光谱采集扫描16次用时3 s,取样品图谱和相应红外光谱谱图库进行一致性比对分析(匹配度≥75%),确定被测物质成分。

1.5 数据分析

土壤样品微塑料丰度根据《土壤微塑料测试技术方法(试行)》《农用地土壤微塑料监测技术规程(试行)》中规定方法进行计算,计算公式如下:

$$A = \frac{N}{M_0 \times W_{dm}} \times 1000$$

式中:A为土壤样品中微塑料丰度,个/kg;N为土壤试样中微塑料总数,个; M_0 为土壤样品质量,g; W_{dm} 为土壤样品干物质含量,%。

本研究采样站位图、微塑料丰度图等均采用Arcgis 10.3软件绘制,微塑料成分、粒径等参数采用SigmaPlot 10.0软件绘制。相似性聚类分析和Pearson相关性分析分别采用Primer 5.0和Spss 19.0软件进行处理分析。

2 结果与分析

2.1 儋州农用地表层土壤微塑料污染特征

儋州农用地表层土壤微塑料丰度含量与分布结果如图2、图3所示。由图2可知,农用地各点位的表层土壤微塑料丰度范围为200.00~3 900.00个/kg,平均丰度为933.33±767.04个/kg。其中:以辣椒地中的丰度居高,分别为7#点3 900.00个/kg和5#点2 200.00个/kg;24#香蕉林和34#菠萝蜜园也有着较高的丰度值,均为2 133.33个/kg;15#玉米地的微塑料

丰度水平最低,仅为200.00个/kg。由图3可知,不同作物种植区的土壤微塑料丰度存在较明显区域空间差异性,长期覆盖农膜地块比无覆膜地块具有更高丰度值。高丰度区主包含了辣椒地、释迦果园、香蕉林、西瓜地、菠萝蜜园等覆膜地块,丰度范围为1 125.00~1 311.00个/kg。低丰度区则出现于部分玉米地(12#、13#、15#、16#、18#)、甘蔗地(32#)、未种植区(28#、29#、30#)和橡胶林(34#)等未覆膜地块,丰度范围为200.00~433.33个/kg。微塑料丰度含量、分布与该地块作物种植方式存在较强关联性。

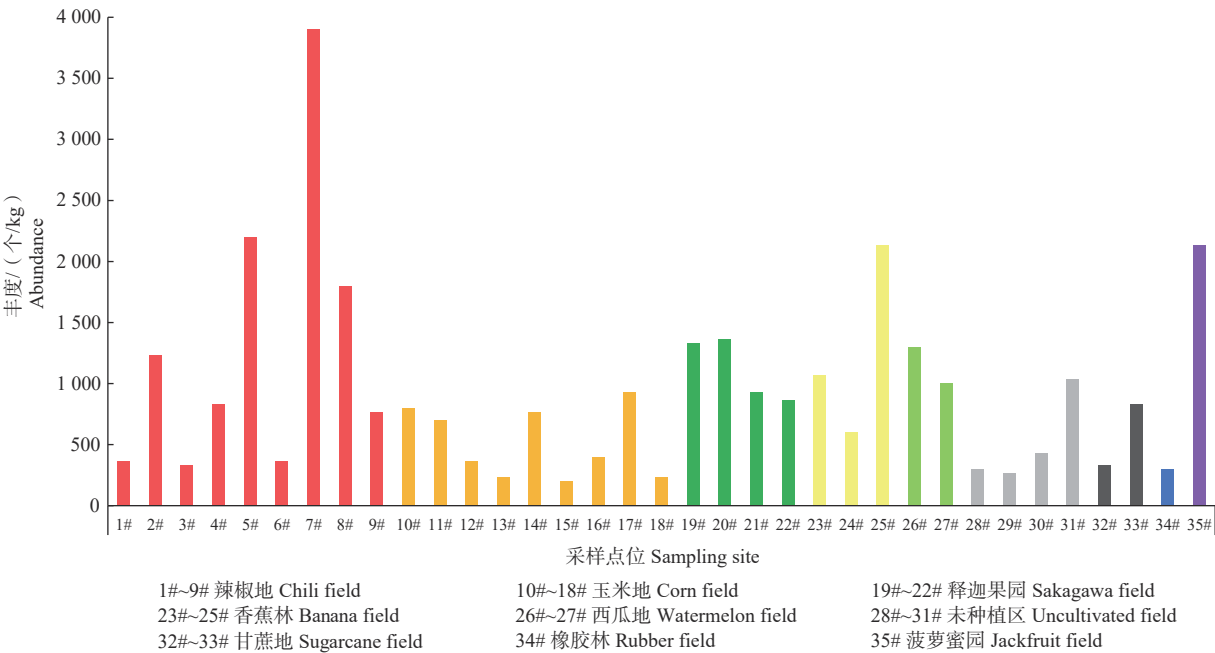


图2 各站位的表层土壤微塑料丰度组成

Fig. 2 Composition of microplastics abundance in topsoil of each station

微塑料成分、粒径、形状和颜色分布结果如图4所示,由图4(a)可知,农用地表层土壤共鉴定了8种不同类型微塑料,分别为聚乙烯(PE)、聚酯纤维(PES)、人造丝(RY)、乙烯-丙烯共聚物(PE-PP)、聚丙烯(PP)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、丙烯酸(AC)、尼龙(NY)。不同种植地块均以聚乙烯塑料的丰度所占比例居高。其中,各覆膜地块(辣椒地、释迦果园、香蕉林、西瓜地、菠萝蜜园)的PE丰度所占比例为46%~75%,而未覆膜地块(玉米地、甘蔗地、橡胶林、未种植区)的PE丰度所占比例为6%~55%,相对较低些。此外,各种种植地块的聚酯纤维和人造丝塑料的丰度所占比例也较高,以未覆膜地块的土壤最为明显。其他类型的微塑料丰度

所占比例均较低。

由图4(b)可知,各种种植地块主要以粒径为0.5~1.0 mm的微塑料丰度所占比例居高,覆膜地块的丰度所占比例为20%~45%,以辣椒地和香蕉林最突出,未覆膜地块的丰度所占比例为11%~45%,以橡胶林最为明显。粒径为1.0~2.0 mm范围的丰度所占比例也较高,覆膜地块的丰度所占比例为17%~33%,而未覆膜地块的丰度所占比例为11%~44%,以甘蔗地和未种植区的所占比例居高。其他粒径范围的微塑料丰度所占比例均较低,整个农用地表层土壤微塑料粒径结构组成趋向于小型化。

由图4(c)可知,覆膜地块的形状结构以薄膜状微塑料的丰度最高,丰度所占比例为10%~75%,

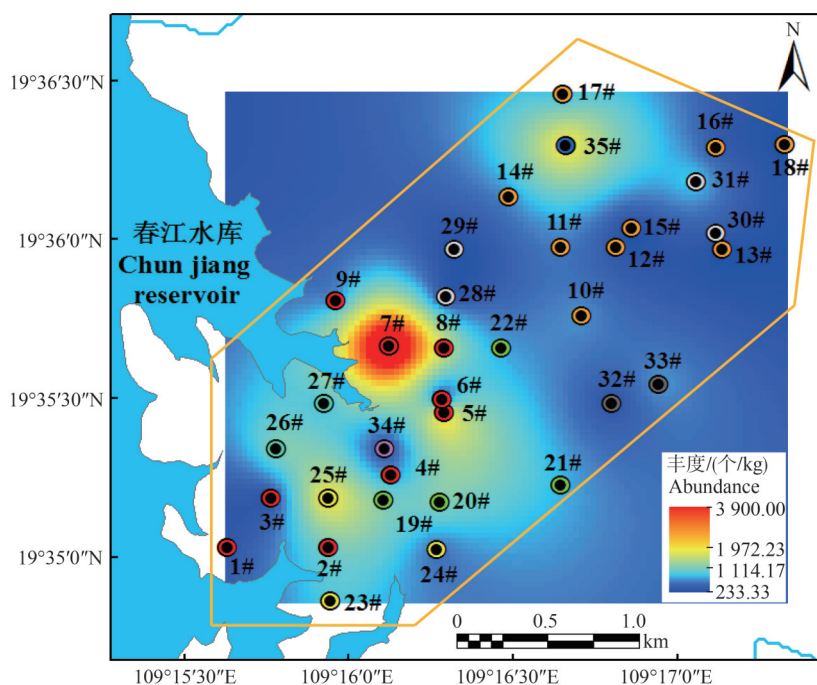


图3 表层土壤的微塑料丰度分布

Fig. 3 Distribution of microplastics abundance in topsoil

以菠萝蜜果园和西瓜地的所占比例最突出,未覆膜地块整体则以纤维塑料占主导,丰度所占比例为44%~79%,以未种植区最明显。此外,颗粒状微塑料丰度所占比例也较高,以辣椒地、香蕉林和橡胶林最明显。其他形状类型的丰度所占比例均较低(图4c)。

由图4(d)可知,各种植地块的颜色类型均以半透明和白色微塑料占优势,其中,覆膜地块(辣椒地、香蕉林、释迦果园)的白色微塑料丰度要高于未覆膜地块,丰度所占比例为31%~46%。反之,未覆膜地块的半透明微塑料丰度则高于覆膜地块,丰度所占比例为44%~90%。此外,土壤中蓝色、黑色微塑料的丰度所占比例也较高,覆膜地块的丰度所占比例整体要高于未覆膜地块。其他颜色类型的微塑料丰度所占比例均较低。

2.2 儋州农用地剖面土壤微塑料污染特征

儋州农用地剖面土壤微塑料丰度含量与分布结果如图5所示。由图5可知,各采样深度的剖面土壤微塑料丰度范围为266.67~2 200.00个/kg,平均丰度为933.33个/kg。丰度以0~20 cm的表层土壤微塑料丰度最高,为2 200.00个/kg,土壤深度为20~40 cm的微塑料丰度居次高值(1 366.67个/kg),深度为40~60 cm的土壤也具有较高丰度值(700个/

kg),而60~100 cm的最深层次的土壤微塑料丰度最低,仅为266.67个/kg。随土壤采样深度增加,微塑料数量和丰度呈现明显下降趋势,各采样深度的剖面土壤存在明显的纵向分布差异性。

微塑料成分、粒径、形状和颜色结果如图6所示,由图6(a)可知,剖面土壤中共鉴定了7种不同类型微塑料,分别为PE、PES、PE-PP、RY、PP、聚氯乙烯(PVC)和聚苯乙烯(PS)。土壤深度为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm的微塑料成分组成较为接近,均以PE占主导优势,所占比例为67%~90%。而深度为60~100 cm土壤中的微塑料数量虽明显减少,但成分类型相较于前3个土壤深度整体较为丰富,以少量PE和PE-PP为主。

由图6(b)可知,各采样深度土壤主要以粒径为0.5~1.0 mm的微塑料丰度居高,丰度所占比例为18%~50%,随土壤采样深度增加,0.5~1.0 mm的小粒径范围微塑料所占比例呈明显上升趋势,以60~100 cm的土壤深度变化最为明显。粒径为1.0~2.0 mm范围的微塑料丰度也较高,丰度所占比例为13%~33%,随土壤采样深度增加,该粒径范围的微塑料所占比例呈明显下降趋势。整个剖面土壤微塑料粒径结构随采样深度增加而呈小型化的变化趋势,其他粒径范围的丰度所占比例均

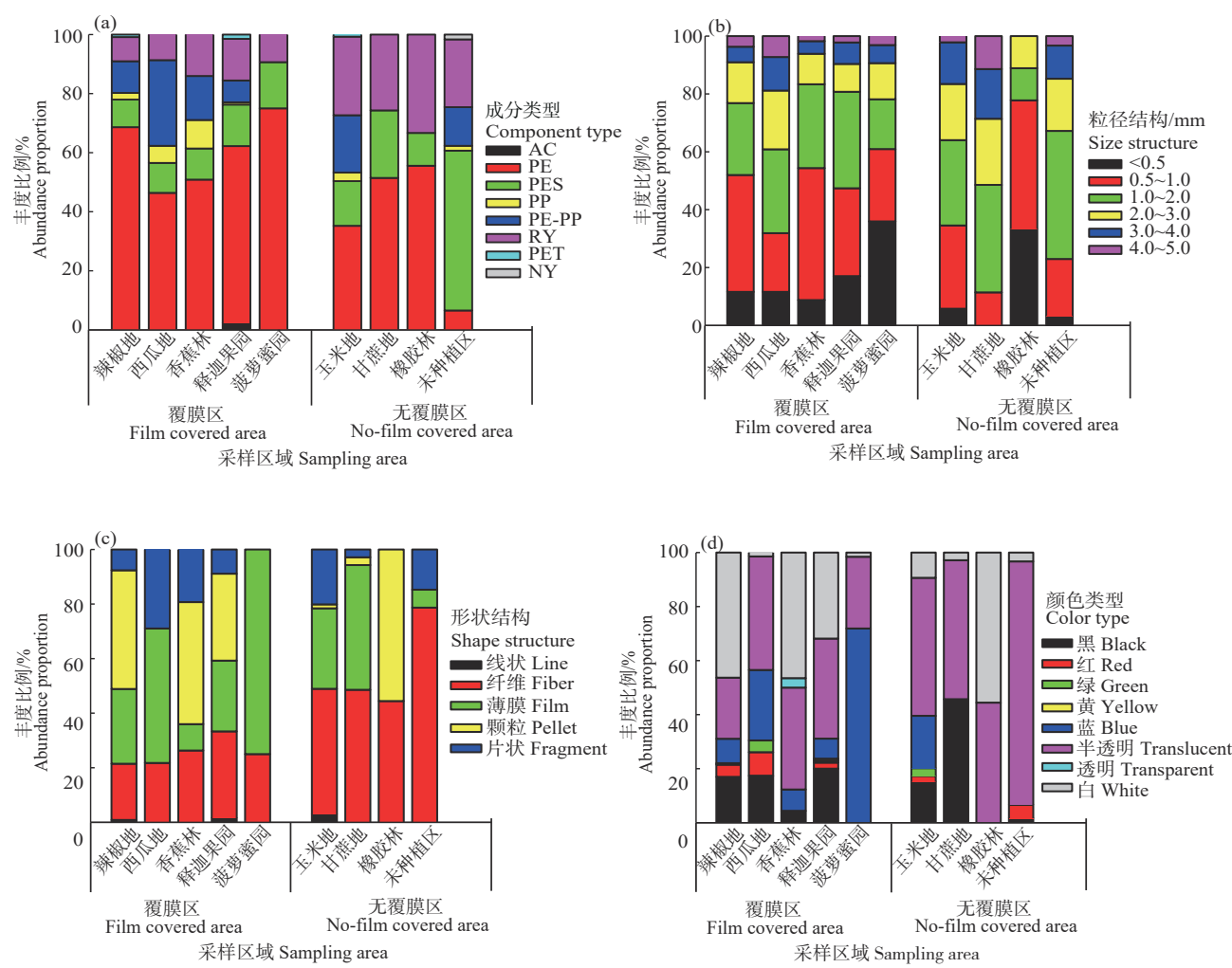


图4 表层土壤微塑料成分(a)、粒径(b)、形状(c)和颜色(d)组成百分比

Fig. 4 Percentage of microplastics components (a), sizes (b), shapes (c) and colors (d) in topsoil

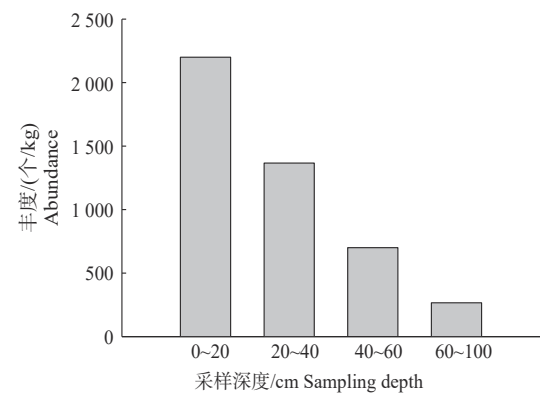


图5 不同土壤深度的微塑料丰度组成

Fig. 5 Composition of microplastics abundance in different soil depths

较低。

由图6(c)可知,各采样深度土壤的形状结构以

薄膜状微塑料占主导,并占重要组分,土壤深度为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm的薄膜状微塑料丰度均较高,丰度所占比例为72%~100%。而60~100 cm的最深层土壤微塑料数量虽明显减少,但相较于前3个土壤深度整体较为丰富,包含了片状、薄膜、颗粒和泡沫等形状的微塑料。随采样深度增加,各采样深度的剖面土壤微塑料形状也呈现明显的纵向差异性。

由图6(d)可知,各采样深度土壤的颜色类型以黑色、蓝色微塑料为主,随采样深度增加,黑色、蓝色微塑料丰度所占比例呈先上升后下降的变化趋势。而60~100 cm的最深层土壤的微塑料颜色类型却有所区别,以白色和半透明微塑料占主导。

2.3 不同农业种植区的微塑料聚类分析

儋州农用地不同农业种植区的表层土壤微塑

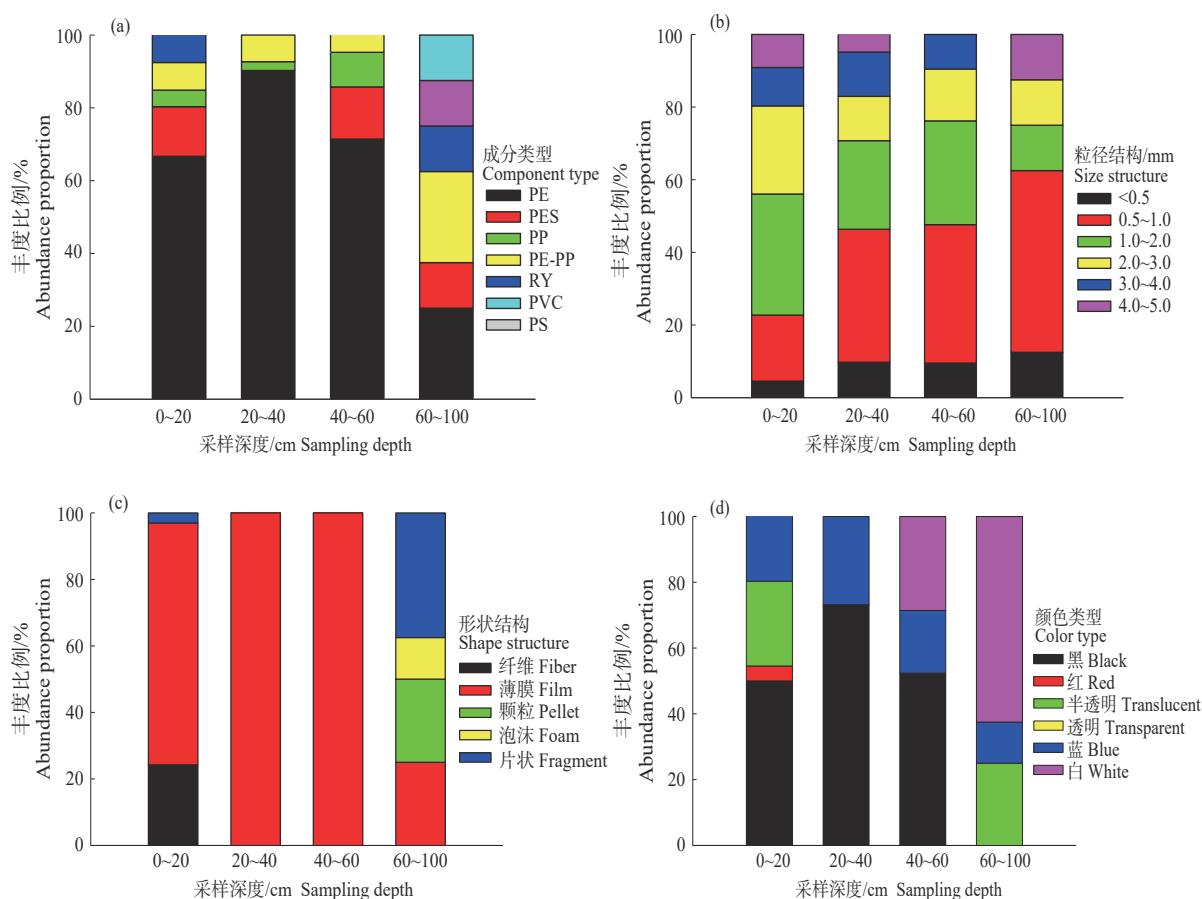


图6 不同土壤深度的微塑料成分(a)、粒径(b)、形状(c)和颜色(d)组成百分比

Fig. 6 Percentage of microplastics components (a), sizes (b), shapes (c) and colors (d) in different soil depths

料聚类分析结果如图7所示。由图7(a)可知,微塑料成分可划分为3个类群,类群C-I(仅未种植区)以高丰度的PES和RY所组成,而区别于其他2个类群。类群C-II(橡胶林、甘蔗地、菠萝蜜园)主要以PE和RY塑料为主。类群C-III(香蕉林、西瓜地、玉米地、释迦果园、辣椒地)则以高丰度的PE农膜塑料占主导,且该类群均为覆膜地块,微塑料丰度水平较高。

由图7(b)可知,微塑料粒径也可划分为3个类群,类群P-I(仅橡胶林)以粒径<0.5和0.5~1.0 mm的微塑料占优势,且粒径在3.0 mm的范围以内。类群P-II(仅甘蔗地)以粒径为1.0~2.0 mm、2.0~3.0 mm的丰度所占比例居高,从而区别于其他类群。类群P-III(其余地块)则主要以0.5~1.0 mm、1.0~2.0 mm的微塑料占主导。

由图7(c)可知,微塑料形状结构可划分为4个类群,类群S-I(仅橡胶林)以颗粒状和纤维状塑料为主。类群S-II(释迦果园、辣椒地、香蕉林)则以颗

粒、纤维和薄膜状微塑料所占比例居高。类群S-III(仅未种植区)以纤维状塑料占主导优势。类群S-IV(甘蔗地、玉米地、西瓜地、菠萝蜜园)以薄膜状和纤维状塑料的丰度所占比例居高。

由图7(d)可知,微塑料颜色类型也可划分为4个类群,类群Y-I(菠萝蜜园)以蓝色和半透明微塑料占主导。类群Y-II(未种植区、甘蔗地)则以半透明的微塑料丰度居高。类群Y-III(橡胶林)以高丰度的白色和半透明微塑料为主。类群Y-IV(其余地块)除了高丰度的白色和半透明微塑料外,还包含了其余部分颜色的微塑料,从而区别于其他类群。

总体上,儋州农用地不同农业种植区的表层土壤微塑料成分、粒径、形态和颜色,除少部分地块存在差异性外,其余各种种植地块间的成分、粒径、形态和颜色组成整体较为接近,相似度为70%~80%。农用地的微塑料成分以聚乙烯塑占主导,覆膜地块的PE丰度值明显高于未覆膜地块。各种种植区整体以小粒径(0.5~2.0 mm)的微塑料为主,覆膜地块

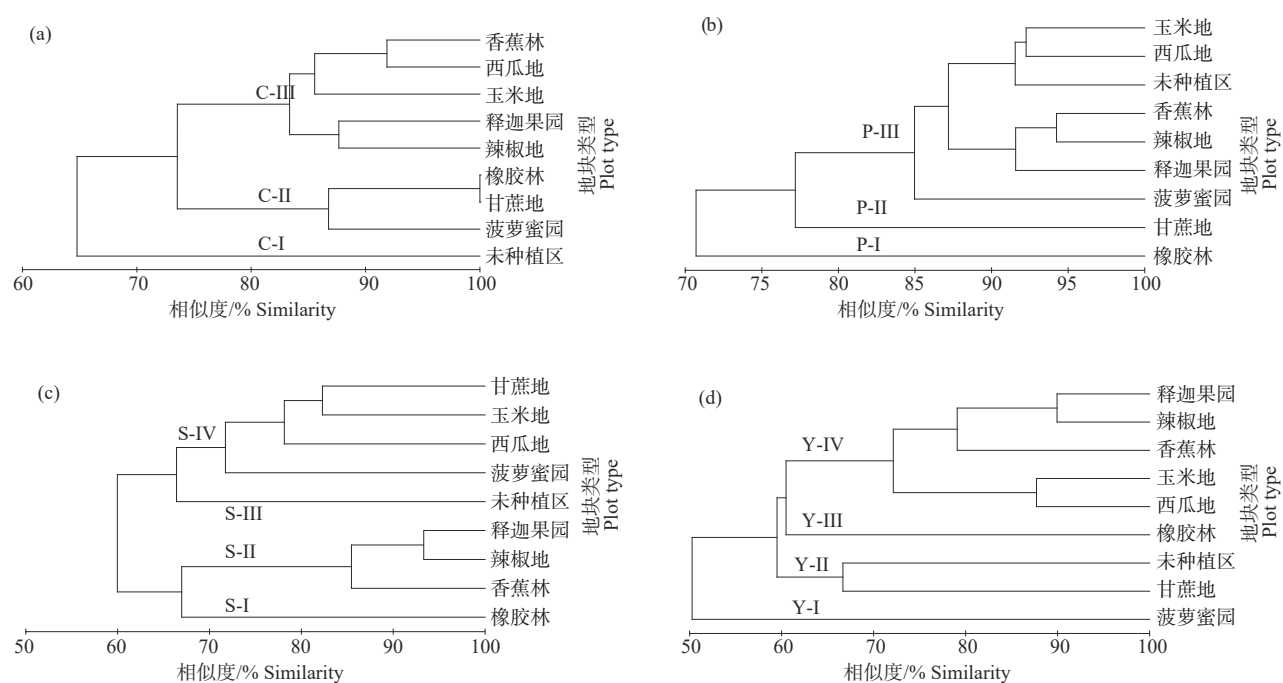


图7 表层土壤微塑料成分(a)、粒径(b)、形状(c)和颜色(d)聚类分析

Fig. 7 Cluster analysis of microplastics components (a), sizes (b), shapes (c) and colors (d) in topsoil

整体以白色颗粒、黑色薄膜、蓝色薄膜、半透明纤维塑料为主,未覆膜地块则以半透明的纤维塑料占主导。

2.4 不同采样深度的微塑料相关性分析

儋州农用地不同采样深度的剖面土壤微塑料 Pearson 相关性分析结果如表 1 所示。由表 1 可知,不同采样深度土壤与微塑料成分、粒径、形状、颜色存在明显相关性。随着采样深度增加,土壤中黑色和蓝色薄膜状微塑料(成分为 PE)呈明显下降趋势,具有显著负相关性($P<0.05$)。粒径为 3.0~4.0 mm 的微塑料也随采样深度增加而呈显著负相关性($-0.973, P<0.05$)。总体而言,随土壤采样深度增加,不同深度的剖面土壤微塑料(成分为 PE 的农膜塑料)数量和丰度虽下降明显,但微塑料粒径则呈小型化的变化趋势,具有显著负相关关系,易向更深层次的土壤中迁移和转化,对土壤生态系统和地下水环境产生危害。

3 讨论

3.1 海南儋州农用地土壤微塑料赋存及分布现状

根据本研究的分析结果,海南儋州农用地土壤微塑料的丰度为 200.00~3 900.00 个/kg,平均丰度为 933.33 个/kg。不同种植区土壤微塑料丰

度存在明显空间分布差异,长期覆膜耕作地块的微塑料丰度要高于无覆膜地块,微塑料丰度水平与地块作物种植方式息息相关。与国内研究相比,本研究的表层土壤微塑料的平均丰度(933.33 个/kg)除稍低于新疆农田^[10](1 075.60 个/kg)外,整体要高于宁夏固原^[7](730.87 个/kg)、哈尔滨^[11](485.80 个/kg)、上海^[12](78.00 个/kg)、杭州湾^[13](571.20 个/kg)等区域,甚至远高于全国农田区的平均水平(358.37 个/kg);而微塑料最高丰度值方面,海南儋州农用地的最高丰度值(3 900.00 个/kg,覆膜区)除稍高于陕西^[14]农田的最高值(3 410.00 个/kg)外,整体要低于湖北武汉^[15](12 560.00 个/kg)和云南^[16](42 960.00 个/kg)等农田区域,尤其是云南农田区微塑料最高丰度是海南儋州农用地的 11 倍左右;相较于国外研究,儋州农用地土壤微塑料平均丰度值稍低于西班牙^[18]农田区域(960.00 个/kg),而微塑料最高丰度值也要明显低于韩国^[19](7 630.00 个/kg)、丹麦^[20](23 600.00 个/kg)等发达国家农田区,尤其是儋州最高丰度值仅为丹麦农田区的 16.5%。而相对于加拿大^[21](298.00 个/kg)、瑞士^[22](593.00 个/kg)等区域,儋州农用地的微塑料的最高丰度(覆膜地块)整体较高,是这些区域的 6~13 倍左右。综上

表 1 微塑料成分、粒径、形状、颜色与土壤深度的 Pearson 相关性

Table 1 Pearson correlation between microplastics components, sizes, shapes and colors and soil depths

指标 Index	类别 Category	相关系数 Correlation coefficient
成分 Component	PE	-0.969 *
	PES	-0.617
	PP	-0.832
	PE-PP	-0.714
	RY	-0.533
	PVC	0.878
	PS	0.878
粒径/mm Size	<0.5	-0.832
	0.5~1.0	-0.866
	1.0~2.0	-0.921
	2.0~3.0	-0.837
	3.0~4.0	-0.973 *
形状 Shape	4.0~5.0	-0.724
	纤维	-0.683
	薄膜	-0.987 *
	颗粒	0.878
	泡沫	0.878
颜色 Color	片状	0.423
	白	0.777
	半透明	-0.599
	黑	-0.962 *
	蓝	-0.954 *
	红	-0.683

注：“*”和“**”分别表示显著相关($P<0.05$)和极显著相关($P<0.01$)。

Note: * and ** represent significant ($P<0.05$) and extremely significant ($P<0.01$) correlations, respectively.

研究结果,海南儋州农用地表层土壤微塑料丰度与我国西北、东北、华东、华中、西南、全国农业区域乃至丹麦、西班牙等国外发达国家的农田区域相比,整体处于偏高含量水平。

3.2 土壤微塑的来源及潜在生态效应

农用地(农田)土壤中的微塑料来源可分为直接来源和间接来源。直接来源包含了农膜塑料、农药和化肥塑料包装及农村塑料类生活垃圾的破碎和裂解、轮胎磨损等;间接来源则包括有机肥料施用、污泥农用、农业灌溉以及大气沉降等过程^[23]。研究资料表明,农用地土壤中微塑料污染现象主要

与人类农业生产活动密切相关^[24]。据调查资料显示,我国覆膜面积密集地区的农田土壤均有着不同程度的农膜塑料残留,且其残留量随覆膜年限的延长而显著增加^[25]。通过研究不同覆膜年限对土壤微塑料的影响,结果表明,连续覆膜 5、15 和 24 年的农田土壤(0~40 cm)中微塑料平均丰度分别为(80.30±49.30)、(308.00±138.10)、(1 075.60±346.80)个/kg,土壤中的微塑料赋存含量呈明显上升趋势,且微塑料化学成分与农膜塑料成分一致^[10]。Li 等^[26]的研究结果也表明,连续覆膜 32 年的农田土壤(0~10 cm)中以薄膜塑料的丰度居高,平均丰度为(4 033±472)个/kg,且化学成分与农膜塑料成分一致。而本研究的结果均表明,表层和纵向剖面土壤微塑料主要以黑色、蓝色薄膜微塑料(成分为聚乙烯)占主导,现覆膜地块和未覆膜地块均有 PE 农膜塑料的检出,受到不同程度的微塑料污染,存在污染分布的空间差异性,但辣椒地、西瓜地、香蕉林等覆膜土壤的丰度水平明显高于玉米、未种植区等未覆膜土壤。据了解,海南儋州农用地种植面积达约 466.67 hm²,当前覆膜土壤面积将近约 333.33 hm²,约占土壤总面积的 79.2%,用于辣椒、西瓜、香蕉和释迦果等作物种植,种植地块临靠春江水库,充足农用水灌溉保证了作物茁壮生长。当前农用地块种植年限已有 25 年,且每年进行作物轮换种植,覆膜土壤面积逐年上升。这也说明了农用地前期耕种过程中已有部分微塑料残留在土壤中。综上结果,可推测海南儋州农用地土壤微塑料主要来源于老化破碎的农膜塑料(成分为聚乙烯),长时间覆膜地块的土壤微塑料丰度值高于未覆膜土壤,且土壤微塑料丰度与农膜的覆膜规模、年限及种类密切相关。此外,农业生产过程中所丢弃的化肥和农药等农资塑料废弃物也会破碎、裂解形成微塑料而转移至土壤当中^[27],加上农用水灌溉和大气沉降等过程也会带来少部分的微塑料^[9]。因此,这也是本研究的覆膜地块除了检出农膜塑料外,还检出少部分碎片和颗粒状微塑料,未覆膜地块则检出纤维塑料的重要原因。

与此同时,农业生产过程所产生的微塑料进入农用地的土壤环境后,在风化、紫外照射、和微生物降解等作用下极易发生老化、破碎和迁移。本研究也表明,不管是表层土壤还是纵向剖面土壤中微塑料整体均以偏小粒径(0.5~2.0 mm)的微塑料占

表2 国内外不同地区的微塑料赋存含量特征

Table 2 Storage capacity characteristic of microplastics in different regions at domestic and foreign farmland

研究区域		土壤类型	采样深度/cm	丰度/(个/kg)
Research area		Soil type	Sampling depth	Abundance
国内 Domestic area	新疆 ^[10]	农田	0~40	1 075.60±346.80
	宁夏固原 ^[7]	农田	0~20	730.87±128.61
	陕西 ^[14]	农田	0~10	1 430~3 410
	哈尔滨 ^[11]	农田	0~30	485.80
	上海 ^[12]	农田	0~3	78.00±12.91
	杭州湾 ^[13]	农田	0~10	571.20
	湖北武汉 ^[15]	农田	0~5	320~12 560
	云南 ^[16]	菜田/粮田	0~10	7 100~42 960
	全国 ^[17]	农田	0~15	25.56~2 067.78, 358.37(均值)
国外 Foreign area	西班牙 ^[18]	农田	0~30	960±420
	韩国 ^[19]	农田	0~5	0~7 630
	丹麦 ^[20]	农田	0~10	82 000~236 000
	加拿大 ^[21]	农田	0~15	18~298
	瑞士 ^[22]	农田	0~5	0~593

主导,尤其微塑料与土壤深度的相关性结果(表1)显示,纵向剖面土壤微塑料粒径结构更趋向于小型化,小粒径微塑料(<0.5 mm、0.5~1.0 mm)的占比随土壤深度的增加而有所上升。一方面,粒径小型化的微塑料会被土壤动物(蚯蚓、变形虫、纤毛虫和鞭毛虫等)摄食并在生物体内积累,对生物体的组织造成损伤、降低生长率和繁殖率、提高死亡率以及其他炎症反应、免疫反应、氧化损伤、神经毒性以及肠道微生物群落结构与多样性变化等的影响^[23]。通过食物链(如土壤-蚯蚓-鸡)传递,从而对不同营养级的动物产生影响,甚至能够威胁人体健康^[28]。此外,亚微米或纳米塑料可被植物根系吸收并在植物体内积累,其还可利用根和茎的维管系统的蒸腾拉力转移至植物的地上部分,进而对食物链构成潜在威胁^[29]。另一方面,微塑料在农田土壤中的迁移行为受土壤类型、微塑料结构与性质(密度、粒径、形状、表面电荷等)以及土壤环境条件[离子强度、阳离子类型、pH、溶解性有机质(DOM)、土壤矿物质等]等多种因素的影响^[30-31],粒径越小的微塑料越容易在土壤中迁移,密度较大的微塑料越容易向土壤深层迁移,且与颗粒状和泡沫状微塑料相比,纤维状和薄膜状微塑料更易流向径流水体,深层土壤和地下水环境构成潜在风险^[30-33]。

4 结 论

本研究探讨了海南儋州不同农业种植区的土壤微塑料赋存含量与分布特征,为海南省典型农用地的微塑料污染治理和管理提供了科学依据,主要结论如下:

- 1) 儋州农用地表层土壤微塑料丰度范围200.00~3 900.00个/kg,平均丰度为933.33个/kg。成分类型以聚乙烯微塑料占主导,覆膜地块的PE丰度明显高于未覆膜地块,微塑料丰度与地块作物种植方式存在较强关联性。
- 2) 农用地土壤整体以偏小粒径(0.5~2.0 mm)的微塑料为主。覆膜地块以白色颗粒、黑色薄膜、蓝色薄膜、半透明纤维塑料物质居多,未覆膜地块则多以半透明的纤维塑料占主导。
- 3) 纵向剖面土壤微塑料数量和丰度均随土层深度增加呈明显下降趋势,土壤中黑色、蓝色农膜塑料(聚乙烯)均明显下降,具有显著负相关性($P<0.05$)。另外,微塑料向更深层土壤破碎、迁移和赋存过程中,小粒径微塑料呈明显升高趋势,整个纵向剖面微塑料粒径也趋向于小型化。

参考文献 References

[1] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, Davis A, Rowland S J, John A

- W G, McGonigle D, Russell A E. Lost at sea: Where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 838
- [2] Wright S L, Kelly F J. Plastic and human health: A micro issue? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(12): 6634-6647
- [3] 程万莉, 樊廷录, 王淑英, 李尚中, 张建军, 赵刚, 王磊, 党翼. 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
- Cheng W L, Fan T L, Wang S Y, Li S Z, Zhang J J, Zhao G, Wang L, Dang Y. Quantity and distribution of microplastics in film mulching farmland soil of Northwest China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(11): 2561-2568 (in Chinese)
- [4] 时馨竹, 孙丽娜, 李珍, 吕良禾. 沈阳周边农田土壤中微塑料组成与分布[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1498-1508
- Shi X Z, Sun L N, Li Z, Lv L H. Composition and distribution of microplastics in farmland soil around Shenyang [J]. *Journal of AgroEnvironment Science*, 2021, 40(7): 1498-1508 (in Chinese)
- [5] Zarfl C, Matthies M. Are marine plastic particles transport vectors for organic pollutants to the arctic? [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(10): 1810-1814
- [6] 侯军华, 檀文炳, 余红, 党秋玲, 李任飞, 席北斗. 土壤环境中微塑料的污染现状及其影响研究进展[J]. 环境工程, 2020, 38(2): 16-27
- Hou J H, Tan W B, Yu H, Dang Q L, Li R F, Xi B D. Microplastics in soil ecosystem: a review on sources fate and ecological impact [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(2): 16-27 (in Chinese)
- [7] 马贵, 丁家富, 周悦, 周炎炎, 廖彩云, 海金涛, 王欢等. 固原市农田土壤微塑料的分布特征及风险评估[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 5055-5062
- Ma G, Ding J F, Zhou Y, Zhou Y Y, Liao C Y, Hai J T, Wang H. Distribution characteristics and risk assessment of microplastics in farmland soil in Guyuan [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(9): 5055-5062 (in Chinese)
- [8] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3591-3598
- [9] 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩. 农田土壤微塑料分布、来源和行为特征[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2375-2383
- Bo J L, Li B, Zhang K, Ma R H, Li Y, Wang Y Q, Sun B, Liu Y Y. Distribution, sources, and behavioral characteristics of microplastics in farmland soil [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(4): 2375-2383 (in Chinese)
- [10] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, Yan C R, Wang J. Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114096
- [11] 于庆鑫, 刘硕, 马丽娜, 门志远, 李陶陶, 蔡露瑶, 孙萌. 哈尔滨农田土壤中微塑料的赋存特征及影响因素分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 793-799
- Yu Q X, Liu D, Ma L N, Men Z Y, Li T T, Cai L Y, Sun M. Analysis on the occurrence characteristics and influencing factors of microplastics in Harbin agricultural soils [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(2): 793-799 (in Chinese)
- [12] Liu M T, Lu S B, Song Y, Lei L L, Hu J N, Lv W W, Zhou W Z, Cao C J, Shi H H, Yang X F, He D F. Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242(Pt A): 855-862
- [13] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, Shi H H, Fei Y F, Huang S Y, Tong Y Z, Wen D S, Luo Y M, Barceló D. Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, East China: Multiple sources other than plastic mulching film [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 121814
- [14] Ding L, Zhang S Y, Wang X Y, Yang X M, Zhang C T, Qi Y B, Guo X T. The occurrence and distribution characteristics of microplastics in the agricultural soils of Shaanxi Province, in north-western China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 720: 137525
- [15] Chen Y L, Leng Y F, Liu X N, Wang J. Microplastic pollution in vegetable farmlands of suburb Wuhan, central China [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 257: 113449
- [16] Zhang G S, Liu Y F. The distribution of microplastics in soil aggregate fractions in southwestern China [J]. *The Science of the Total Environment*, 2018, 642: 12-20
- [17] Hu J N, He D F, Zhang X T, Li X Y, Chen Y X, Wei G, Zhang Y L, Ok Y S, Luo Y M. National-scale distribution of micro(meso)plastics in farmland soils across China: Implications for environmental impacts [J]. *Journal of hazardous materials*, 2022, 424(Pt A): 127283
- [18] Van den Berg P, Huerta-Iwanga E, Corradini F, Geissen V. Sewage sludge application as a vehicle for microplastics in eastern Spanish agricultural soils [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114198
- [19] Kim S K, Kim J S, Lee H, Lee H J. Abundance and characteristics of microplastics in soils with different agricultural practices: importance of sources with internal origin and environmental fate [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403, doi:10.1016/j.jhazmat. 2020.123997
- [20] Vollertsen J, Hansen A. Microplastic in danish wastewater: sources, occurrences and fate [R]. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2017, 35: 23-33
- [21] Crossman J, Hurley R R, Futter M, Nizzetto L. Transfer and transport of microplastics from biosolids to agricultural soils and the wider environment [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 724, 138334
- [22] Scheurer M, Bigalke M. Microplastics in Swiss floodplain soils [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(6): 3591-3598
- [23] 王金花, 李冰, 侯宇晴, 王兰君, 王军, 朱鲁生. 农田土壤中微塑料的赋存、迁移及生态效应研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(5): 951-965
- Wang J H, Li B, Hou Y Q, Wang L J, Wang J, Zhu L S. Research process on the occurrence, migration, and ecological effects of microplastics in farmland soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(5): 951-965 (in Chinese)
- [24] Jin T Y, Tang J C, Lyu H H, Wang L, Gillmore A B, Schaeffer S M. Activities of microplastics (MPs) in agricultural soil: A review of MPs pollution from the perspective of agricultural ecosystems [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(14): 4182-4201
- [25] Qi R M, Jones D L, Li Z, Liu Q, Yan C R. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 703: 134722
- [26] Li S T, Ding F, Flury M, Wang Z, Xu L, Li S Y, Jones D L, Wang J K. Macro- and microplastic accumulation in soil after 32 years of plastic film mulching [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 300: 118945
- [27] 李鹏飞, 侯德义, 王刘炜, 吴唯民, 潘仕镇. 农田中的(微)塑料污染: 来源、迁移、环境生态效应及防治措施[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 314-330
- Li P F, Hou D Y, Wang L W, Wu W M, Pan S Z. (Micro) plastics pollution in agricultural soils: sources, transportation, ecological effects and preventive strategies [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 314-330 (in Chinese)
- [28] Huerta Lwanga E, Mendoza Vega J, Ku Quej V, de los Angeles Chi J, Sanchez del Cid L, Chi C, Escalona Segura G, Gertsen H, Salánki T,

- van der Ploeg M, Koelmans A A, Geissen V. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 14071
- [29] Luo Y M, Li L Z, Feng Y D, Li R J, Yang J, Peijnenburg W J G M, Tu C. Quantitative tracing of uptake and transport of submicrometre plastics in crop plants using lanthanide chelates as a dual-functional tracer [J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, 17(4): 424-431
- [30] 董姝楠, 夏继红, 王为木, 刘慧, 盛丽婷. 土壤-地下水中微塑料迁移的影响因素及机制研究进展[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 1-8.
Dong S N, Xia J H, Wang W M, Liu H, Sheng L T. Review on impact factors and mechanisms of microplastic transport in soil and groundwater [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(14): 1-8 (in Chinese)
- [31] De Souza Machado A A, Lau C W, Kloas W, Bergmann J, Bachelier J B, Faltin E, Becker R, Görlich A S, Rillig M C. Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10): 6044-6052
- [32] Torres F G, Dioses-salinas D C, Pizarro-ortega C I, De-la-Torre G E. Sorption of chemical contaminants on degradable and non-degradable microplastics: Recent progress and research trends [J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143875
- [33] Mei W P, Chen G E, Bao J Q, Song M K, Li Y T, Luo C L. Interactions between microplastics and organic compounds in aquatic environments: A mini review [J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 736: 139472

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 谢福武, 工程师, 现任职于海南省生态环境监测中心分析测试中心。主要从事新污染物环境监测与技术、新污染物对生态环境影响与评价、海洋浮游生态和水生态学等研究。主持海南省自然科学基金青年基金项目1项, 参与国家自然科学基金面上项目和海南省自然科学基金项目各1项。主持发布的海南省地方标准1项, 参与编制的国家环境保护标准1项, 内容涉及土壤(农用地)微塑料监测技术规程及傅立叶变换显微红外光谱法对微塑料的测定。参与编写著作《营养物质对海湾生态环境影响的过程与机理》。以第一作者及通讯作者发表学术论文共9篇, SCI论文1篇, 中文核心6篇, 会议论文1篇, 内容涉及微塑料污染分布、海洋浮游动物、浮游生物群落代谢等。



通讯作者简介: 何书第, 研究员, 硕士生导师。现任海南省生态环境监测中心分析测试中心主任、国家生态环境监测“一流专家”。主要从事有机污染物环境监测与技术、新污染物的环境行为、质量管理等研究。主持国家环境监测标准、海南省自然科学基金等8项国家级、省部级科研项目; 在期刊上发表论文30余篇, 其中: SCI收录8篇, 申请专利5项, 主持发布国家环境保护标准1项、地方标准1项。