

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)

全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析任晓松, 李昭睿 (1243)

京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)

太原市“十四五”规划大气污染防治政策的CO₂协同效益评估肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)

湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)

“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)

郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析王相男, 张喆, 刘方青 (1315)

天津市PM_{2.5}碳组分空间差异性来源解析武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)

贵阳市花溪城区大气PM_{2.5}中碳质气溶胶的变化特征及来源解析桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)

新乡市大气PM_{2.5}中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析刘桓嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)

2017~2018年冬季菏泽大气PM_{2.5}中金属元素特征及健康风险评估杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)

北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)

南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)

苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化吴也正, 张鑫, 顾韵, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)

长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张霖霖, 黄张根 (1402)

基于PCA-APCS-MLR模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)

重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)

长江流域微塑料污染特征及生态风险评估李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)

宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)

汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)

宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评估高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)

浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评估钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)

鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)

杭州湾南岸20a水质净化功能变化及预测王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)

不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)

长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)

富营养化湖泊藻华腐解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛 (1539)

紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平林涛, 苑宇杰 (1553)

再生水消毒副产物的检测、生成与控制廖雨枫, 王正, 潘昀, 李爱民 (1561)

3种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)

基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)

基于AWRSEI的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)

定量评估气候变化对长江中下游地区植被GPP_{GS}变化的影响徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志威, 郭振东 (1615)

基于Meta分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响李健明, 康雨欣, 蒋福祺, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)

连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)

4种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)

不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)

黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)

秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)

耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)

基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)

黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)

广西贺州市典型矿区周边耕层土壤Cd通量特征杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娟, 蔡贺清 (1739)

基于信息扩散模型的沔东新区土壤重金属潜在生态风险评估杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)

湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)

典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)

省级尺度土壤As迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)

谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉累积的效应易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)

EDDS对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)

叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒Cd、As和Pb累积的阻控效应肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)

民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)

宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)

养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)

玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)

不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响

宋宁宁¹, 李梦佳¹, 王学霞², 刘君¹, 王芳丽¹, 宗海英¹, 黄小丽³, 王斌⁴, 梁丽娜^{2*}

(1. 青岛农业大学资源与环境学院, 青岛 266109; 2. 北京市农林科学院植物营养与资源研究所, 北京 100097; 3. 青岛农业大学中心实验室, 青岛 266109; 4. 新疆农业科学院土壤肥料与农业节水研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 地膜和有机肥的大量投入已导致我国农田土壤微塑料污染日趋严重. 为研究调查山东德州花生农田微塑料污染状况, 分析了该区域不同覆膜年限(0、3、5 和 8 a)和有机肥施用对农田土壤中微塑料的丰度、粒径、颜色和形状等赋存特征的影响. 结果表明,覆膜 0、3、5 和 8 a 后花生耕层土壤微塑料丰度的平均值分别为 65.33、316.00、1 098.67 和 1 346.34 n·kg⁻¹. 随着土层深度的增加微塑料丰度降低,0~10、10~20 和 20~30 cm 耕层中的土壤微塑料丰度分别为 1 076.00、603.50 和 440.25 n·kg⁻¹, 并且增加覆膜年限和施加有机肥都显著增加了微塑料的丰度($P < 0.05$). 粒径 < 1 mm 微塑料占总量的 77.30%, 且随着覆膜年限的增加,小粒径(<1 mm)微塑料占比显著升高($P < 0.05$),随着土层深度的增加,其占比亦逐渐增加,施加有机肥对微塑料粒径没有显著影响. 微塑料颜色组成以透明(49.77%)为主,其次是黑色(16.35%)和白色(16.27%),覆膜年限和有机肥施加对土壤中微塑料的颜色影响不显著($P > 0.05$),但覆膜年限显著增加了透明微塑料的占比. 微塑料类型主要包括纤维类、薄膜类、碎片类、泡沫类和颗粒类,其占比分别为: 49.77%、25.41%、19.15%、3.26% 和 2.41%. 耕层土壤微塑料的主要聚合物类型包含聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS),分别占总量的 21.37%、18.57% 和 19.77%. 由此,山东德州花生田耕层土壤中普遍存在微塑料,且地膜和有机肥施用是其主要来源,这可为花生田耕层土壤微塑料污染物防控提供重要依据.

关键词: 农田; 微塑料; 赋存特征; 有机肥; 覆膜

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1684-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.202303214

Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field

SONG Ning-ning¹, LI Meng-jia¹, WANG Xue-xia², LIU Jun¹, WANG Fang-li¹, ZONG Hai-ying¹, HUANG Xiao-li³, WANG Bin⁴, LIANG Li-na^{2*}

(1. School of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 2. Institute of Plant Nutrition and Resources, Beijing Agricultural Forestry Academy Sciences, Beijing 100097, China; 3. Central Laboratory, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 4. Institute of Soil Fertilizer and Agricultural Water Saving, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: The large input of mulch film and organic fertilizer have led to increasingly serious microplastic pollution in farmland soil of China. In this study, the microplastic pollution of peanut farmland in Dezhou City, Shandong Province was investigated. The effects of different mulching years (0, 3, 5, and 8 years) and organic fertilizer application on the abundance, particle size, color, and shape of microplastics in farmland soil were analyzed. The results showed that the average abundances of microplastics in peanut soil were 65.33, 316.00, 1 098.67, and 1 346.34 n·kg⁻¹, respectively, after 0, 3, 5, and 8 years of film mulching. The abundance of microplastics decreased with the increase in soil depth. The abundance of microplastics in 0-10, 10-20, and 20-30 cm topsoil was 1 076.00, 603.5, and 440.25 n·kg⁻¹, respectively, and the abundance of microplastics increased significantly with increasing years of film mulching and organic fertilizer application ($P < 0.05$). The particle size of microplastics in the sample plot < 1 mm accounted for 77.30% of the total content, and with the increase in film mulching age, the proportion of microplastics with small particle size (<1 mm) increased significantly ($P < 0.05$). With the increase in soil depth, the proportion of microplastics with small particle size also gradually increased, whereas the application of organic fertilizer had no significant effect on the particle size of microplastics. The color of microplastics in the plot was mainly transparent (49.77%), followed by black (16.35%) and white (16.27%). The planting age and organic fertilizer application had no significant effect on the color of microplastics in the soil ($P > 0.05$), but the mulching age significantly increased the proportion of transparent microplastics. The abundance proportion of the five types of microplastics were 49.77%, 25.41%, 19.15%, 3.26%, and 2.41%, respectively. These field soil microplastics were mainly composed of polyethylene (PE), polypropylene (PP), and polystyrene (PS) polymers, accounting for 21.37%, 18.57%, and 19.77% of the total, respectively. Therefore, microplastics were widely present in the soil of the peanut field cultivated layer in Dezhou, Shandong, and the applications of mulch film and organic fertilizer were the main source. This study provides an important basis for the prevention and control of soil microplastic pollution in peanut fields.

Key words: farmland; microplastics; distribution characteristics; organic fertilizer; film-mulch

塑料因其重量轻、生产成本低和耐用性强在世界上被广泛应用^[1]. 由于塑料废物在环境中难以降

收稿日期: 2023-03-26; 修订日期: 2023-06-13

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2022MD050); 北京市产业经济与政策创新团队项目(BAIC11-2023); 山东省专业学位研究生教学案例库建设项目(SDYAL20183)

作者简介: 宋宁宁(1984~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为农业农村环境污染控制与生态修复, E-mail: snn05@163.com

* 通信作者, E-mail: lianglina@163.com

解, 逐渐累积, 成为一个全球性环境污染问题. 塑料废弃物在自然环境中逐渐破碎, 其中 <5 mm 的塑料颗粒或碎片被称为微塑料^[2,3]. 微塑料由于其体积小, 具有较大的比表面积, 可以作为其他污染物的载体, 并可被生物体取食, 最终在食物链中积累, 威胁人类健康^[4], 已被列为环境和生态学领域的第二大重要科学问题^[5,6]. 过去几年, 对微塑料的研究多集中在海洋系统, 而 2016 年的一项研究显示, 存在于土壤中的微塑料是海洋中微塑料丰度的 4 倍以上^[7]. 微塑料的存在会影响土壤结构和理化性质、降低土壤肥力和改变土壤中微生物群落的多样性, 影响作物生长及粮食产量, 影响动物生长、发育和繁殖^[5].

面对日益严峻的土壤微塑料污染问题, 农田土壤微塑料赋存特征及其来源研究已引起了广泛的关注. 吴亚梅等^[8]调查了北京市蔬菜地土壤微塑料的污染特征及潜在来源, 研究表明北京市设施土壤微塑料丰度为 $(1\,405.19 \pm 584.30) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 形状主要以碎片为主 (53.82%), 粒径大多为 0~1 mm (47.52%), 白色、透明和蓝色占比较大 (64.51%), 以聚丙烯 (PP) 聚合物类型为主 (30.04%). 宋佃星等^[9]研究了宝鸡地区辣椒地、玉米地和猕猴桃地这 3 种典型农田土壤中微塑料赋存特征及其对土壤环境的影响, 发现不同农田土壤中微塑料 41%~48% 为 <1 mm 粒径, 丰度范围为 1 974~3 656 $\text{n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其值随着土层深度的加深而减小; 薄膜碎片形状占比达 70.6%~85.7%, 黑色微塑料达 78%. 当前有关花生种植过程中耕层土壤微塑料赋存研究还比较少, 不能为花生土壤微塑料污染防控提供有效的支撑.

农田微塑料来源主要有地膜覆盖、有机肥使用、污水灌溉及大气沉降. 当前的研究表明, 地膜是土壤中微塑料的第一大主要来源. 地膜由于其具有保持水分和改善土壤温度等优点而被广泛使用, 但由于大部分地膜在作物季结束时未回收或回收机制不健全, 残膜在农田中不断累积^[10]和破碎化, 从而引起土壤微塑料污染. 王志超等^[11]的研究表明, 地膜覆盖年限是影响土壤微塑料丰度的主要原因之一. 其次, 施加有机肥也会导致土壤微塑料大量增加, 我国的农田土壤中, 每年由于有机肥施用带入的微塑料量为 52.4~26 400 t^[12]. 花生作为山东主要的经济作物, 种植过程普遍存在覆膜和施用有机肥的管理措施^[13], 因而, 探究覆膜和施用有机肥对耕层土壤微塑料的影响意义重大.

德州位于山东省西北部、黄河下游冲积平原, 是山东主要的农业生产和花生种植基地, 有必要对花

生种植过程中土壤微塑料的赋存特征及来源进行系统研究. 据此, 本文以山东德州花生田为研究区域, 系统地研究了不同覆膜年限 (0、3、5 和 8 a) 和施加有机肥对该区土壤微塑料的丰度、粒径、颜色和类型等赋存特征的影响, 并通过微塑料的聚合物解析, 探明耕层微塑料的主要来源; 从而明晰山东花生田耕地土壤微塑料分布现状, 以为微塑料污染的防治提供参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集于山东省西北部的德州农科院基地 ($37^{\circ}45'N$, $116^{\circ}30'E$). 德州市是我国地膜覆盖面积及覆盖强度较大的地区之一, 受季风影响显著, 四季分明, 冷热干湿界限明显, 市年平均气温 12.90°C , 年平均降水量为 547.50 mm, 具有显著的大陆性气候特征. 分别选取不同覆膜年限 (0、3、5 和 8 a) 及不同管理措施 (覆膜、覆膜+有机肥、不覆膜和不覆膜+有机肥) 长期种植花生的农田进行取样. 在每个选定的样地里, 选择 50 cm×50 cm 的样方, 取样深度主要为耕层 30 cm 土层, 分层取样, 即: 0~10、10~20 和 20~30 cm, 每层设置 5 个重复, 装入纸质的样品袋带回实验室, 置于避光处烘干备用. 共计采集土壤样品 120 个, 样地信息如表 1.

表 1 采样点信息
Table 1 Information of the sampling sites

样地	覆膜年限	商品有机肥
S1	8	施加
S2	8	不施加
S3	5	施加
S4	5	不施加
S5	3	施加
S6	3	不施加
S7	0	施加
S8	0	不施加

1.2 微塑料的提取和测定

土壤样品在实验室自然风干后, 采用密度浮选法^[11]进行分离. 将土壤样品进行风干, 过 5 mm 不锈钢筛; 称取 50 g 风干土置于 250 mL 三角瓶中, 加入 200 mL 饱和氯化钠溶液 ($\rho=1.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), 超声 10 min, 振荡 30 min, 离心 20 min, 收集上层清液, 重复上述密度分离过程 3 次; 收集的上层清液进行真空抽滤, 将 0.45 μm 滤膜 (Whatman, USA, WME WH GR ST ME25) 上的物质全部转移至 100 mL 的玻璃烧杯中; 向上述烧杯中加入 50 mL 30% 的双氧水溶液消解有机质, 置于电热板上于 60°C 消解 24 h; 消解完成后, 再次进行真空抽滤, 并将滤膜取下放入玻璃培养皿中,

室温干燥,之后进行镜检观察.

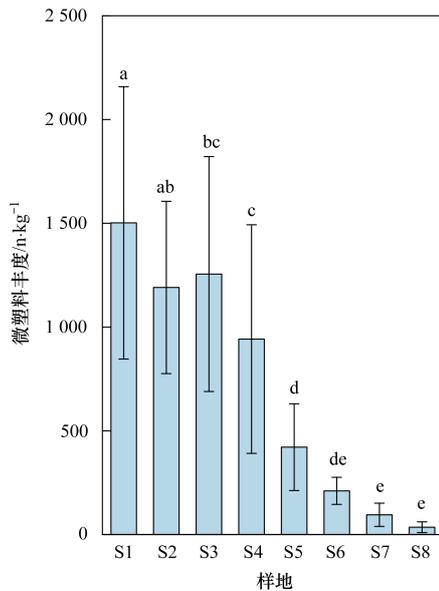
1.3 微塑料的定量及定性

基于 Zhang 等^[14]的方法,滤膜上的微塑料采用体式显微镜(日本 Olympus 公司, SZ61)观察,统计并记录每个样品中微塑料的数量、类型、大小和颜色.微塑料丰度值单位以“ $n \cdot kg^{-1}$ ”表示.

采用傅里叶红外变换光谱法(FTIR)^[15],利用塑料的特异性红外光谱对微塑料的聚合物组成进行鉴定.将样品的红外光谱图与标准品谱库进行对比,规定匹配度达 60% 及以上的谱图对应的样品为微塑料.

1.4 数据处理

本实验结果采用“平均值 \pm 标准偏差”表示,数据统计使用 Microsoft Excel 2019 完成,基于 SPSS 26,运用单因素方差分析进行各项指标之间的差异性分析,绘图采用 Origin 2021 软件进行.



误差条表示标准差,不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

图 1 德州市花生田耕层土壤样点中微塑料的丰度

Fig. 1 Abundance of microplastics in soil samples in peanut fields in Dezhou City

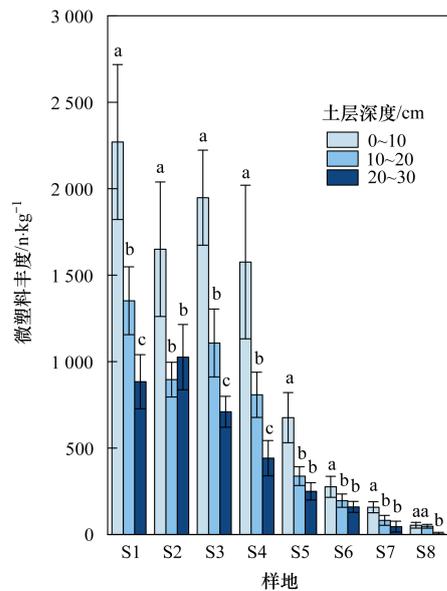
2.2 土壤微塑料粒径

各采样点微塑料粒径分布特性如图 2 所示.土壤微塑料粒径主要为 <1 mm,占总丰度的 77.30%.土壤微塑料粒径 <0.5 、 $0.5 \sim 1$ 、 $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 和 $4 \sim 5$ mm 的占比分别为 51.72%、25.46%、10.33%、6.19%、3.83%和 2.46%.所有采样点微塑料粒径遵循相同趋势,即粒径越大,占比越小.并且覆膜年限增加,小粒径(<1 mm)微塑料占比呈显著升高($P < 0.05$),其中覆膜 8 a 的土壤微塑料粒径 <1 、 $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 和 $4 \sim 5$ mm 的占比为 76.73%、9.92%、6.96%、4.56%和 1.82%,覆膜 3 a 的土壤微塑料粒

2 结果与分析

2.1 土壤微塑料丰度

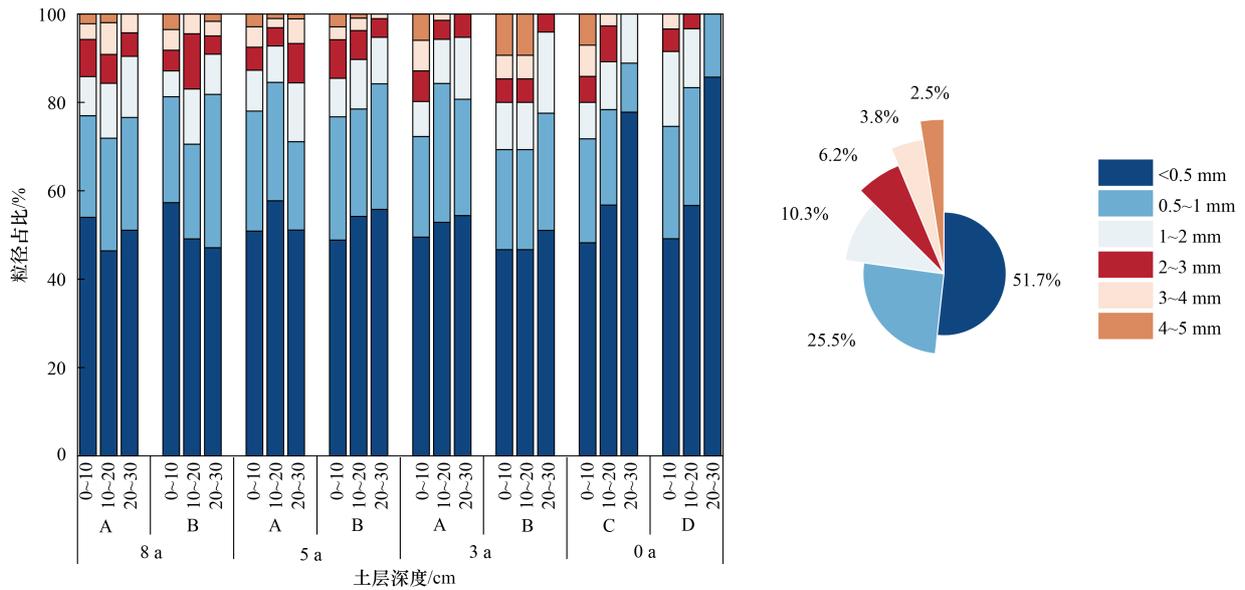
各采样点均检测到微塑料(图 1),且随覆膜年限的增加微塑料丰度呈显著增加的趋势($P < 0.05$).相同覆膜年限的样地,除对照组外,施加有机肥与不施加相比,也显著增加了微塑料丰度($P < 0.05$).覆膜 0、3、5 和 8 a 后土壤微塑料的平均丰度分别为 65.33、316.00、1 098.67 和 1 346.34 $n \cdot kg^{-1}$.最大的丰度值出现在覆膜 8 a 且施加有机肥的样地 S1,为 1 502.00 $n \cdot kg^{-1}$,比覆膜 8 a 不施加有机肥的 S2 样地多了 26.15%;比同样施加有机肥,覆膜 5、3 和 0 a 的分别增加了 19.65%、256.49%和 1 475.58%.而相同的覆膜年限和施肥措施下,不同深度土层微塑料丰度随着土层深度的增加而显著降低($P < 0.05$),并且随着覆膜年限的增加,0~10、10~20 和 20~30 cm 层的微塑料丰度占比逐渐接近.



径 <1 、 $1 \sim 2$ 、 $2 \sim 3$ 、 $3 \sim 4$ 和 $4 \sim 5$ mm 的占比为 74.94%、11.24%、5.39%、3.75%和 4.68%,小粒径微塑料的数量和在所有粒径中占比均有提高.而施加有机肥对微塑料粒径的占比没有显著影响($P > 0.05$).此外,采样点小粒径微塑料(<1 mm)在 20~30 cm 土层中的占比(79.31%)明显高于 0~10 cm 土层(76.27%)和 10~20 cm 土层(76.36%).粒径组成的差异表明,在深层土壤中,微塑料的崩解更为充分.

2.3 土壤微塑料颜色

土壤微塑料颜色主要有:透明、黑色、白色、蓝



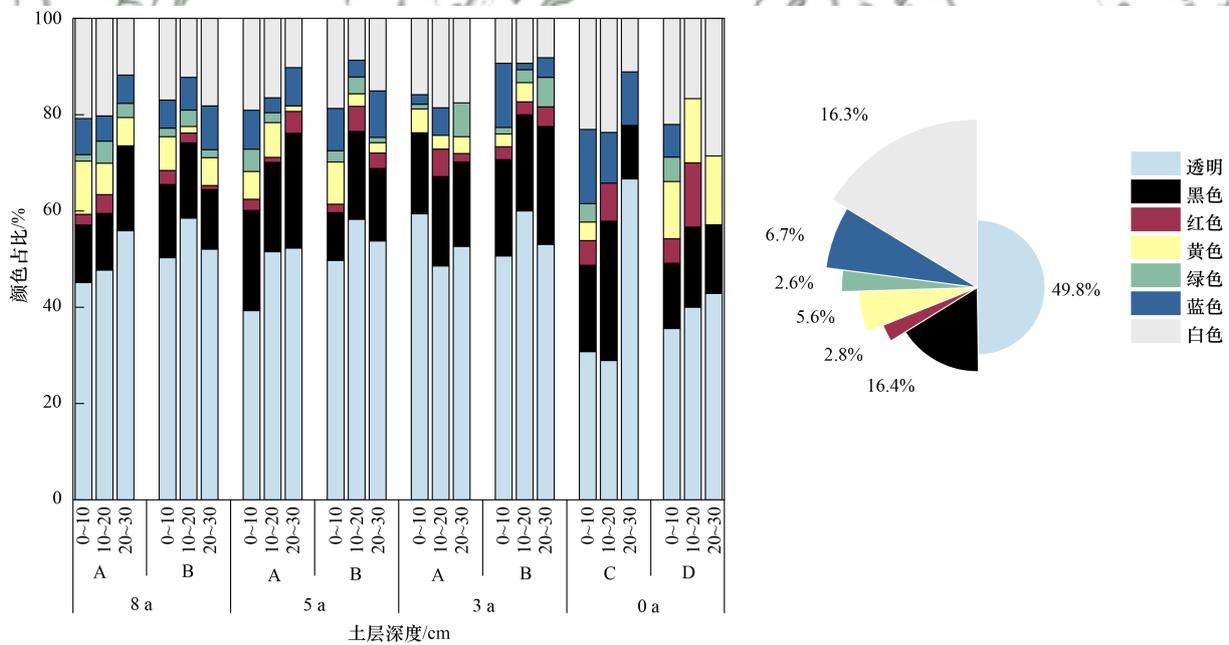
A: 有机肥+覆膜, B: 覆膜, C: 有机肥, D: 不覆膜

图 2 花生田耕层土壤中微塑料粒径占比

Fig. 2 Percentage of microplastic particle size in soil in peanut fields

色、黄色、绿色和红色, 占比分别为 49.77%、16.35%、16.27%、6.66%、5.60%、2.57% 和 2.78%, 主要以透明为主, 其次是黑色和白色(图 3)。覆膜年限对土壤中微塑料的颜色影响不显著 ($P>0.05$), 但相比于不覆膜的花生田土壤, 覆膜显著增加了透明微塑料的占比, 这与种植区主要覆盖透明农膜有关。

透明微塑料在 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层的占比分别为 45.92%、52.14% 和 53.70%, 白色微塑料在 3 层土壤中的占比分别为 18.50%、15.03% 和 13.80%, 黑色占比分别为 15.18%、17.10% 和 17.51%, 随着土壤深度的增加, 微塑料颜色的占比变化不大。



A: 有机肥+覆膜, B: 覆膜, C: 有机肥, D: 不覆膜

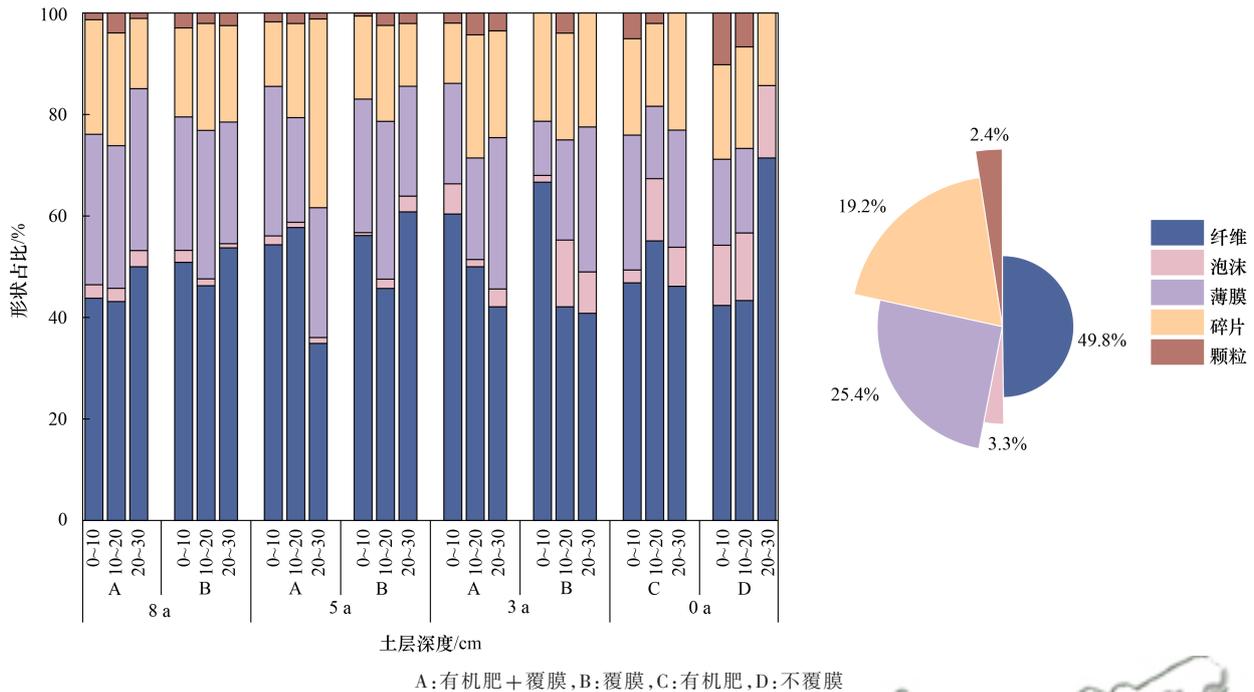
图 3 花生田耕层土壤中微塑料颜色占比

Fig. 3 Percentage of microplastic color in soil in peanut fields

2.4 土壤中微塑料形状

土壤中微塑料的类型主要包括纤维类、薄膜类、碎片类、泡沫类和颗粒类, 5 种类型微塑料的丰度占比分别为 49.77%、25.41%、19.15%、

3.25% 和 2.41% (图 4)。纤维类、薄膜类和碎片类占主导地位, 其中纤维类在 0~10、10~20 和 20~30 cm 土层中占比分别为 52.04%、47.33% 和 48.85%。其次是薄膜类, 在由浅到深的土层中占比



A: 有机肥+覆膜, B: 覆膜, C: 有机肥, D: 不覆膜

图 4 花生田耕层土壤中微塑料形状占比

Fig. 4 Percentage of microplastic shape in soil in peanut fields

分别为 25.31%、25.19% 和 25.95%。纤维和薄膜在农田土壤中普遍存在,这与已有研究的结果一致^[16]。

2.5 土壤中微塑料组分

拉曼光谱分析结果鉴定出土壤中的 16 种聚合物类型(图 5)。其中,聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)含量最多,分别占 21.37%、18.57% 和 19.77%。聚对苯二甲酸类塑料(PET)、聚丙烯腈(PAN)、聚丙烯酰胺(PAM)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚氨酯(PU)、脲-甲醛树脂(UF)、甲苯(PT)和环氧树脂(EP)等 13 类聚合物及其他(other)占 40.29%。覆膜年限和有机肥的施用都显著增加了 PE、PP 和 PS 的含量($P < 0.05$)。

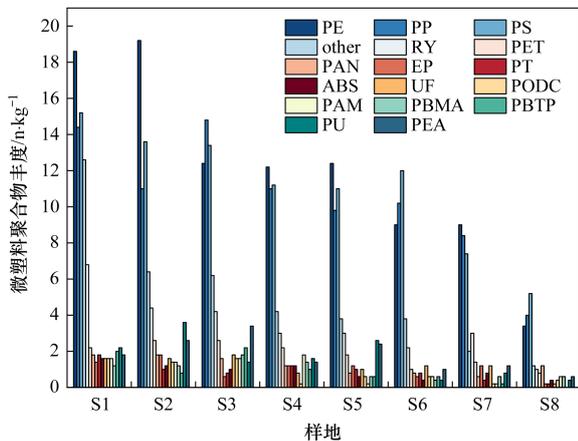


图 5 花生田耕层土壤中微塑料聚合物

Fig. 5 Percentage of microplastic polymer in soil in peanut fields

3 讨论

与其他研究区域相比,德州花生田耕层土壤微塑料的丰度处在一个较高的水平。Zhou 等^[17]调查了杭州湾的覆膜土壤和灌溉水土壤中微塑料赋存特征,发现两种土壤中的微塑料丰度平均分别为 $571 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $263 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于本研究覆膜 5 a 和 8 a 的土壤微塑料丰度。Liu 等^[18]对上海郊区的 20 个菜田土壤的微塑料丰度调查结果也低于本研究。Huang 等^[19]调查表明,连续覆膜 5、15 和 24 a 的农田土壤(0~40 cm)中微塑料的平均丰度分别为 (80.3 ± 49.3) 、 (308 ± 138.1) 和 $(1075.6 \pm 346.8) \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。但也存在很多微塑料丰度高于本研究的情况,譬如 Zhang 等^[20]调查的滇湖种植区和河岸森林缓冲区的土壤微塑料丰度介于 $7100 \sim 42960 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远高于本研究所测得花生田土壤微塑料丰度 ($65.33 \sim 1346.34 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$)。此外,Lang 等^[21]研究报道称青海省农业土壤中微塑料的丰度为 $240 \sim 3660 \text{ n} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。虽然不同的土壤大多来自农田,但在不同的研究区域中,微塑料丰度存在差异,且这种差异也体现在土壤微塑料的其他特征中。本研究发现德州覆膜农田土壤中微塑料的粒径主要在 1 mm 以下,占总丰度的 77.30%,颜色主要以透明为主,其次是黑色和白色,形状主要有纤维类(49.77%)、薄膜类(25.41%)和碎片类(19.15%),聚合物类型以聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)占主导。青海省农业土壤中微塑料尺寸 $< 0.5 \text{ mm}$ 的微塑料占多数(50%),主要形状为薄膜和纤维,分别占 67% 和

29%^[21]。吴亚梅等^[8]报告了北京市设施农业土壤微塑料粒径主要在 1 mm 以下(47.52%),微塑料形状以碎片为主(53.82%),颜色以白色、透明和蓝色为主(64.51%),聚合物类型以聚丙烯(PP)为主(30.04%)。不同的农田土壤微塑料赋存特征上存在差异的部分原因可能是土壤中有有机质等含量不同及微塑料提取和定量的方法不同^[22],土壤是固体(如有机质、黏土和矿物质等)和液体的混合物,土壤中的动植物等生物的残留物可以进一步代谢成相对稳定的物质,即腐殖质,土壤有机质和其他杂质可能会嵌入微塑料从而影响浮选和分离的有效性,并干扰红外光谱对微塑料的聚合物的鉴定^[23]。此外,微塑料的分离方法包括筛分-过滤法、密度分离法、加压流体萃取法、酸解法、碱解法和氧化法及酶消解法等,检测方法包括目视检测鉴定法、傅里叶红外光谱法、拉曼光谱法和气相质谱或色谱法等^[24],使用方法的的不同对实验结果的影响也存在差异。

在本研究中,覆膜和有机肥施用是影响土壤微塑料赋存特征的两大主要因素。由于塑料薄膜大量使用,而通常地膜的厚度仅为 8~50 μm ,有效从土壤中回收是很困难的,这就导致作物收获后有大量的农膜残留在农田中^[19,25],这些塑料残留物在耕作、紫外线辐射和微生物的作用下,缓慢分解成小碎片^[26]在土壤中累积。从对杭州湾某地土壤微塑料丰度的研究中可以看出,覆膜土壤微塑料丰度为 571 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$,而未覆膜土壤的微塑料丰度小于覆膜土壤的 1/2,为 263 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[17]。Feng 等^[27]在对青藏高原农田和草地土壤中微塑料调查中也发现覆膜农田土壤微塑料丰度最高,其次是温室,暴露耕地和草地微塑料丰度较低。这些都证明了覆膜是土壤中微塑料的一大主要来源。农膜大多采用聚乙烯等材料制成,具有相对稳定的化学性质,分解需要较长的时间,首先降解成为薄膜类和碎片类,所以花生田土壤微塑料薄膜类(25.41%)和碎片类(19.15%)占比较大。微塑料颜色主要以透明为主,其次是黑色和白色,这与德州农科院基地花生田主要覆盖透明农膜的实际情况相符。Zhang 等^[28]研究发现青藏高原东北土壤微塑料以透明色为主,而 Li 等^[29]调查发现白色微塑料占南京和无锡收集样本的 38%~70%;而青藏高原农田和草地浅层土壤中的微塑料多为透明(65.43%),其次为白色(17.65%)和黑色(11.37%);深层土壤中的大多数微塑料也是透明的(49.02%),黑色和白色分别占 16.18%和 15.19%,其他颜色占比较少^[27]。这与本研究所调查的结果大致相同,是由于透明和白色的农膜使用较多,近年来,黑色农膜也逐渐被使用,因此黑色微塑料也占到了 16.3%,与白色微塑料丰度相

近。在农膜加工过程中加入各种化合物以提高塑性产品的性能,一旦断裂和降解,就会形成含有不同聚合物类型的微塑料颗粒^[27]。调研样地农田土壤中 PE、PP 和 PS 占主导地位,主要是因为这几种聚合物是制造薄膜、包装材料和生活必需品的材料,占塑料年总产量的 25%^[19]。PE 和 PP 是国际上应用最广泛的聚合物,主要来源于农田中常用的物品,如水桶、挡水膜、塑料罐和温室薄膜等^[30]。Bläsing 等^[31]和 Zhang 等^[32]研究表明有机肥料也是农田土壤中重要的微塑料来源,Yang 等^[33]研究报道,与未施肥土壤相比,农业土壤中的微塑料显著富集,并证明施加有机肥会导致土壤中的微塑料污染增强。同时也有研究证实,有机肥中也含有大量的 PE 和 PP^[30]。这也解释了本研究德州花生田土壤中 PE 和 PP 聚合物类型含量高,且与同样覆膜年限的农田土壤相比,施加有机肥会显著增加土壤中微塑料的丰度的现象。

此外,覆膜年限也会对德州花生田土壤的微塑料的赋存特征产生影响。本研究的调查发现覆膜 0、3、5 和 8a 的 0~30 cm 耕层中微塑料平均丰度分别为 65.33、316.00、1 098.67 和 1 346.34 $\text{n}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。基于对我国多省土壤微塑料调查也表明农田土壤微塑料的丰度随覆膜年限增加而增加^[19]。并且随着覆膜年限的增加,1~10、10~20 和 20~30 cm 这 3 层的微塑料丰度占比逐渐接近,这可能是因为在种植花生的过程中农膜覆盖在表面,当作物收获后农膜残留在表面,逐渐分解成为土壤中微塑料的主要来源,因此在 0~10 cm 土层中检测到的微塑料居多。而随着覆膜年限的增加,每次种植作物前的土壤翻耕灌溉等管理措施会将一部分表层土壤中的微塑料带到深层土壤当中,耕作时间越长则微塑料垂直迁移量越大,从而减小了不同深度土层中的微塑料丰度差异值。另外,Rillig 等^[34]研究表明,蚯蚓是土壤中微塑料的重要迁移载体。由于微塑料的粒径很小,易附着在土壤动物(例如蚯蚓)和土壤微生物(如固氮菌和丛枝菌根真菌等)的身上,随着它们的活动向土壤深层迁移。同样,Kim 等^[35]研究发现微塑料具有弹尾虫可食用的尺寸[<(66.0 \pm 10.9) mm],这可能导致微塑料的迁移。微塑料粒径分布规律大致是随着土层深度和覆膜年限的增加,小粒径的微塑料的占比逐渐增加,0~10、10~20 和 20~30 cm 土层小粒径(<1 mm)微塑料的占比分别为 76.27%、76.36% 和 79.31%。主要原因可能是随着覆膜年限的增加,越来越多较大粒径的微塑料逐步分解,成为小粒径,微塑料的粒径越小,越容易随着翻耕、灌溉、雨水和土壤动物等垂直迁移,增加了深层土壤中小粒径的微塑料。此外,随着覆膜年限的增加黄色微塑料丰度也出现了上升的趋势,

这可能与微塑料的老化有关,因为白色塑料在老化后通常会变黄^[36]. 调查的德州覆膜花生农田并不是一个封闭的系统,土壤会经历地表径流、大气沉降等,还有其他的农业管理措施(如施加有机肥),故会检测出其他颜色的微塑料. 而调查区农田土壤中大量的纤维类微塑料可能是通过灌溉水和大气沉降带入到土壤中的. Zhang等^[20]研究报道西南地区土壤中92%的微塑料是纤维类,大量的纤维可能来自于居民排放的污水,其中洗涤水含有大量的合成纤维^[37]. 据报道,污水污泥中纤维的丰度(以干污泥计)平均值高达38 080粒·kg⁻¹^[36]. 含合成纤维的废水直接排入附近的小池塘,作为灌溉水源^[36]. 此外,广泛使用的遮荫网、肥料袋等农产品可能会在环境中分解成纤维.

4 结论

(1)施加有机肥和覆膜均显著增加了微塑料的丰度($P < 0.05$). 覆膜0、3、5和8 a后德州花生田土壤所含微塑料的平均丰度值分别为65.33、316.00、1 098.67和1 346.34 n·kg⁻¹. 随土层深度的增加微塑料丰度显著减少($P < 0.05$),并且随着覆膜年限的增加,1~10、10~20和20~30 cm土层的微塑料丰度占比逐渐接近;粒径<1 mm的土壤微塑料占总丰度的77.30%,随着土层深度的增加,小粒径微塑料的占比逐渐增加;微塑料颜色主要以透明为主(49.77%),其次是黑色和白色,占比分别为16.35%和16.27%;纤维类(49.77%)、薄膜类(25.41%)和碎片类(19.15%)微塑料占主导地位.

(2)鉴定出的16种聚合物类型,其中聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)和聚苯乙烯(PS)含量最多,分别占21.37%、18.57%和19.77%. PE、PP和PS是制造薄膜的重要材料,并且有机肥中含有大量PE和PP,进一步证明了覆膜和有机肥施用是影响土壤微塑料赋存特征的两大主要因素.

(3)不同研究所呈现的结果不同,可能是由于不同土壤中有机质等含量不同及微塑料提取和定量的方法不同,需要进一步对微塑料的提取和鉴定方法进行优化和规范. 覆膜和有机肥施用导致了土壤微塑料污染加剧,因此今后的研究应集中于制定控制农业土壤系统微塑料污染的策略. 特别是,必须严格控制肥料的原料和提倡可降解薄膜代替普通薄膜.

参考文献:

[1] Wang J D, Tan Z, Peng J P, *et al.* The behaviors of microplastics in the marine environment [J]. *Marine Environmental Research*, 2016, **113**: 7-17.
 [2] Thompson R C, Olsen Y, Mitchell R P, *et al.* Lost at sea: where is all the plastic? [J]. *Science*, 2004, **304**(5672), doi: 10.1126/

science.1094559.

- [3] 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.
 [4] 高田蕊,熊爽,雍彬,等. 微塑料对农业生产的危害与对策研究[J]. *新农业*, 2021, (12): 37-38.
 [5] 王菊英,林新珍. 应对塑料及微塑料污染的海洋治理体系浅析[J]. *太平洋学报*, 2018, **26**(4): 79-87.
 Wang J Y, Lin X Z. Global ocean governance in addressing plastic and microplastic pollution [J]. *Pacific Journal*, 2018, **26**(4): 79-87.
 [6] Luo Y M, Li L Z, Feng Y D, *et al.* 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.
 [7] Horton A A, Walton A, Spurgeon D J, *et al.* Microplastics in freshwater and terrestrial environments: evaluating the current understanding to identify the knowledge gaps and future research priorities [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 127-141.
 [8] 吴亚梅,王育鹏,王康,等. 北京市设施农业土壤微塑料的污染特征及潜在来源[J]. *生态毒理学报*, 2022, **17**(4): 333-344.
 Wu Y M, Wang Y P, Wang K, *et al.* Pollution characteristics and potential sources of microplastics in facility agricultural soil in Beijing [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2022, **17**(4): 333-344.
 [9] 宋佃星,马莉,王全九. 宝鸡地区典型农田土壤中微塑料赋存特征及其环境效应研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, **35**(2): 170-175.
 Song D X, Ma L, Wang Q J. Occurrence characteristics and environmental effects of microplastics in typical farmland soils in Baoji area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, **35**(2): 170-175.
 [10] Zhang D, Ng E L, Hu W L, *et al.* Plastic pollution in croplands threatens long-term food security [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(6): 3356-3367.
 [11] 王志超,孟青,于玲红,等. 内蒙古河套灌区农田土壤中微塑料的赋存特征[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(3): 204-209.
 Wang Z C, Meng Q, Yu L H, *et al.* Occurrence characteristics of microplastics in farmland soil of Hetao irrigation district, Inner Mongolia [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(3): 204-209.
 [12] 张佳佳,陈延华,王学霞,等. 土壤环境中微塑料的研究进展[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2021, **29**(6): 937-952.
 Zhang J J, Chen Y H, Wang X X, *et al.* A review of microplastics in the soil environment [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, **29**(6): 937-952.
 [13] 任英,杨桐珲,续延国,等. 吉林省西部花生覆膜栽培技术及种植效益提高途径[J]. *南方农业*, 2022, **16**(8): 13-15.
 [14] Zhang S L, Yang X M, Gertsen H, *et al.* A simple method for the extraction and identification of light density microplastics from soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 1056-1065.
 [15] 邓子昂. 微塑料污染的红外和拉曼光谱检测研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
 Deng Z A. Detection of micro plastic contamination by infrared and Raman spectroscopy [D]. Kunming: Yunnan Normal University,

- 2021.
- [16] Corradini F, Meza P, Eguiluz R, *et al.* Evidence of microplastic accumulation in agricultural soils from sewage sludge disposal[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **671**: 411-420.
- [17] Zhou B Y, Wang J Q, Zhang H B, *et al.* 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**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121814.
- [18] Liu M T, Lu S B, Song Y, *et al.* Microplastic and mesoplastic pollution in farmland soils in suburbs of Shanghai, China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **242**: 855-862.
- [19] Huang Y, Liu Q, Jia W Q, *et al.* Agricultural plastic mulching as a source of microplastics in the terrestrial environment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114096.
- [20] 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.
- [21] Lang M F, Wang G Y, Yang Y Y, *et al.* The occurrence and effect of altitude on microplastics distribution in agricultural soils of Qinghai Province, northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **810**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152174.
- [22] He D F, Luo Y M, Lu S B, *et al.* Microplastics in soils: analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2018, **109**: 163-172.
- [23] von Sperber C, Lewandowski H, Tamburini F, *et al.* Kinetics of enzyme-catalysed oxygen isotope exchange between phosphate and water revealed by Raman spectroscopy[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2017, **48**(3): 368-373.
- [24] 冉泰山, 廖洪凯, 龙健, 等. 微塑料在土壤环境中的分离和检测方法研究进展[J]. *塑料科技*, 2022, **50**(7): 101-104.
Ran T S, Liao H K, Long J, *et al.* Research progress on separation and detection methods of microplastics in soil environment[J]. *Plastics Science and Technology*, 2022, **50**(7): 101-104.
- [25] Sander M. Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **53**(5): 2304-2315.
- [26] Li J, Song Y, Cai Y B. Focus topics on microplastics in soil: analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113570.
- [27] Feng S S, Lu H W, Liu Y L. The occurrence of microplastics in farmland and grassland soils in the Qinghai-Tibet plateau: Different land use and mulching time in facility agriculture[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116939.
- [28] Zhang H X, Huang Y M, An S S, *et al.* Land-use patterns determine the distribution of soil microplastics in typical agricultural areas on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **426**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127806.
- [29] Li Q L, Wu J T, Zhao X P, *et al.* Separation and identification of microplastics from soil and sewage sludge[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113076.
- [30] Zhang S W, Li Y X, Chen X C, *et al.* Occurrence and distribution of microplastics in organic fertilizers in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **844**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157061.
- [31] Bläsing M, Amelung W. Plastics in soil: analytical methods and possible sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 422-435.
- [32] Zhang L S, Xie Y S, Liu J Y, *et al.* An overlooked entry pathway of microplastics into agricultural soils from application of sludge-based fertilizers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(7): 4248-4255.
- [33] Yang J, Li R J, Zhou Q, *et al.* Abundance and morphology of microplastics in an agricultural soil following long-term repeated application of pig manure[J]. *Environmental Pollution*, 2021, **272**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.116028.
- [34] Rillig M C, Ziersch L, Hempel S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 1362.
- [35] Kim S W, An Y J. Soil microplastics inhibit the movement of springtail species[J]. *Environment International*, 2019, **126**: 699-706.
- [36] Hanun J N, Hassan F, Jiang J J. Occurrence, fate, and sorption behavior of contaminants of emerging concern to microplastics: influence of the weathering/aging process[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, **9**(5), doi: 10.1016/j.jece.2021.106290.
- [37] Henry B, Laitala K, Klepp I G. Microfibres from apparel and home textiles: prospects for including microplastics in environmental sustainability assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **652**: 483-494.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-ru (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xixiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, HAN Ling, LIU Ming, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-liang, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pei, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)