

土壤中微塑料污染及处理技术综述

陈占¹, 杨旅¹, 刘海龙², 王洪涛³, 李天鹏¹, 崔红标⁴

(1. 枣庄学院城市与建筑工程学院, 山东枣庄 277160; 2. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏扬州 225127; 3. 河南大学地理与环境学院, 河南开封 475004; 4. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001)

摘要 微塑料作为一种小尺寸的塑料废弃物,其直径普遍小于5 mm,并且在自然界中极难被降解。针对土壤中的微塑料污染及处理方法展开讨论,从微塑料的来源和污染现状入手,对土壤环境的微塑料来源的复杂性和污染的严重性做了详细阐述。探讨了土壤中的微塑料对土壤中动植物、微生物的潜在影响,如对土壤动植物的生长代谢、微生物的活性以及生物多样性产生不良影响。总结了土壤中微塑料的治理技术及优缺点,并对土壤中微塑料的处理技术面临的挑战及未来研究方向进行了展望,为土壤生态系统的可持续发展贡献力量。

关键词 土壤污染;微塑料;生态影响;处理方法;未来展望

中图分类号 X 705 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2024)23-0016-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2024.23.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Review of Microplastic Pollution and Its Treatment Technology in Soil

CHEN Zhan¹, YANG Lü¹, LIU Hai-long² et al (1. School of City and Architecture Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong 277160; 2. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127)

Abstract As a small-sized plastic waste, microplastics are generally less than 5 mm in diameter and are extremely difficult to degrade in nature. In this paper, microplastic pollution in soil and its treatment methods were discussed. Starting from the source and pollution status of microplastics, the complexity of the source of microplastics in soil environment and the severity of pollution were elaborated. The potential effects of microplastics in soil on plants, animals and microorganisms in soil were discussed, such as adverse effects on the growth and metabolism of soil plants and animals, microbial activity and biodiversity. The paper summarized the treatment technologies of microplastics in soil, their advantages and disadvantages, and prospected the challenges and future research directions of the treatment technologies of microplastics in soil, so as to contribute to the sustainable development of soil ecosystem.

Key words Soil pollution; Microplastics; Ecological impact; Treatment method; Future outlook

塑料在过去几十年里成为全球工业和日常生活中不可或缺的材料,工业化和城市化的加速推动了塑料需求的迅速增长。与此同时,各种各样被称为“微塑料”的超小且不易分解的塑料残骸也随之大量产生,散布在地球的每一个角落。这种经历时间堆积而形成的微塑料污染已经引发了全球范围内的广泛关注,甚至可以说是一种新的环境危机^[1]。尤其在土地开发频繁的农村地区,大量且精细的塑料垃圾被随机填埋,严重破坏了生态平衡和人类生存环境。

1 微塑料的来源与污染现状

微塑料作为一种小尺寸的塑料废弃物,其直径普遍小于5 mm,并且在自然界中极难被降解^[2]。关于微塑料的研究主要集中在海水、淡水和近海水体中,而关于陆地生态系统中微塑料的研究相对较少^[3]。

陆地生态系统中微塑料主要来源于工业排放^[4-5]、农业使用^[6]、城市生活垃圾填埋场^[7]。工业排放方面,塑料制品的生产和加工过程中,难免产生一定量的微塑料颗粒。农业使用方面,农田中的塑料薄膜和地膜等农用塑料制品在土壤中的残留,农作物残渣中的塑料颗粒等成为微塑料的重要来源。城市生活垃圾中,塑料袋、塑料包装等废弃物经过风吹、雨淋等自然作用,破碎成微塑料颗粒,进入土壤环境。此外,地表径流和农田灌溉^[8]、悬浮颗粒的大气沉降^[9]、废水污泥和堆肥的有机肥料^[10-11]等也存在一定含量的微塑料。大量

的微塑料进入土壤后,会与土壤颗粒、微生物等相互作用,改变土壤结构、理化性质,导致污染物在土壤中迁移和积累,进而破坏土壤生态系统^[8,12-13]。

土壤中微塑料形态以纤维、颗粒、碎片和薄膜为主,其组成主要以聚丙烯、聚乙烯、聚苯乙烯为主^[14]。全球受微塑料污染的土壤类型以农田土壤、污泥灌溉土壤以及薄膜种植土壤等为主,其中施用污泥和温室种植土壤微塑料的丰度较高且尺寸较小。工业区土壤中微塑料丰度较高,这是因为生产塑料或塑料加工过程中释放小粒径颗粒及碎片沉降。Scheurer等^[15]报道瑞士土壤中微塑料丰度低于398个/kg。Kim等^[16]指出,韩国温室种植土壤均已检测到聚苯乙烯、聚乙烯2种微塑料聚合物,形态有碎片、薄膜和纤维,温室内0~5 cm表层土壤中丰度为(1 880±1 563)片/kg。Huerta等^[3]对墨西哥郊区的花园土壤调查研究中检测到微塑料平均丰度为870个/kg,粒径为0.01~1.00 mm。Vollertsen等^[17]研究了丹麦污水污泥施用对农业土壤中微塑料的影响,结果发现施用污泥的土壤中微塑料的丰度为82 000(0~165 000)个/kg。在我国,不同地区、不同类型的土壤都具有不同程度的微塑料污染,粒径和丰度大小随土壤深度变化而变化。土壤中微塑料的丰度总体上呈现出不均衡、区域性强等特点。例如:在中部地区,土壤中微塑料的丰度为 $2.2 \times 10^4 \sim 6.9 \times 10^5$ 个/kg^[18];在东部沿岸,土壤微塑料的浓度为 $1.3 \sim 14\,712.5$ 个/kg^[19];在东北,辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度范围在(13.33±11.55)~(886.67±133.17)个/kg^[20];在西北地区,Yu等^[21]调查了77个农用地膜覆盖农田的微塑料丰度,以薄膜、碎片状微塑料为主,平均丰度为12 589片/kg,

基金项目 山东省自然科学基金青年项目(ZR2021QE271)。

作者简介 陈占(1989—),男,山东滕州人,讲师,博士,从事城镇固体废物处理及资源化研究。

收稿日期 2024-01-12

低于 0.5 mm 的微塑料占比 93.3%。由此可见,微塑料污染已经遍布我国各地区,涉及各种类型的土壤,土壤微塑料污染问题已迫在眉睫,亟待解决。

2 土壤中微塑料的潜在影响

与水环境和大气环境相比,土壤中物质的转移更为缓慢,微塑料在土壤环境中更容易积累。随着时间的推移,微塑料会不可避免地会对土壤物理、化学和生物学特性产生影响,从而打破土壤环境原有的生态平衡,对土壤生态功能产生影响^[22]。微塑料对土壤生态系统的影响是一个复杂而多层次的过程,微塑料对土壤和生物的长期活动带来了显著影响,可能造成水源问题甚至对动植物、微生物以及人类的健康产生深远影响。

2.1 土壤中微塑料对动植物的影响

2.1.1 土壤中微塑料对植物的影响。植物作为土壤生态系统的重要组成部分,其根系与土壤紧密交互。植物根系可能吸收土壤中的微塑料颗粒,从而导致植物体内微塑料的积累。

目前已有研究报道了微塑料对小麦^[23]、玉米^[24]、黑麦草^[25]、大豆^[26]、豌豆^[27]等陆生植物的作用,表明土壤微塑料的存在可以延缓植物种子的发芽时间、降低发芽率及幼苗成活率,并能显著改变植物的生物量及根系性状。李连祯等^[28]报道了食用蔬菜能够吸收和积累微塑料。土壤中的微塑料会破坏土壤结构,阻碍植物吸收水分和养分,造成土壤表面干燥开裂,从而影响植物的生长和产量^[8]。安菁等^[26]通过盆栽试验研究了土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响,结果表明微塑料残留量较高时,会一定程度上阻碍大豆幼苗的生长,影响植株的叶面积、株高、根系活力等各项生理生化指标。有些植物可能对微塑料更为敏感,而其他植物可能表现出一定的耐受性。De Souza Machado 等^[29]研究表明,存在高密度聚乙烯的情况下,植物根部的生物量更大。可见,微塑料对植物的影响是复杂的、多样的^[30]。

2.1.2 土壤中微塑料对土壤动物的影响。微塑料的表面特性和疏水性使其可以作为有机物和重金属的优良载体,吸附了有机物或重金属的微塑料在进入动物体内后会发生脱附而被其吸收,甚至可能发生作用机制和毒性效应的改变^[31-32]。

土壤中微塑料对动物生态毒理效应的研究主要集中在蚯蚓、线虫以及小鼠^[33],其中蚯蚓是土壤生态系统中最常见的大型土壤动物之一,同时也是目前研究土壤微塑料污染生态效应最常用的模式生物^[34]。Browne 等^[35]发现聚氯乙烯微塑料可携带有机污染物转移入蚯蚓肠道组织,并引发蚯蚓对病菌的抵抗力下降、炎症、死亡等毒理效应。Rillig 等^[36]发现,进入土壤中的微塑料可以被蚯蚓摄取,将微塑料颗粒从表层土壤迁移到深层土壤,并在生物体内富集,进一步促进了微塑料在土壤环境中的迁移转化和降解。线虫是土壤中最具代表性的小型土壤动物之一,微塑料还可以穿透线虫的肠道壁被运输到其他组织和细胞,引起氧化应激反应,并影

响某些基因的表达。Lei 等^[37]将线虫暴露于浓度 1 mg/L、粒径 0.1~5.0 μm 聚苯乙烯微塑料的液体培养基中 3 d,发现线虫的存活率、体长以及繁殖率显著下降,且粒径越小的微塑料毒性越强。

2.2 土壤中微塑料对土壤微生物的影响 微生物群落结构和丰度的改变,可以直接表现在土壤酶活性的变化上。塑料膜残留物会显著影响土壤中的酶活性和微生物功能多样性。同样地,微生物及酶活性等的变化也将反过来加剧土壤理化性质的变化,进而影响土壤重要的生态学功能^[13]。

2.2.1 微塑料对土壤微生物的直接影响。土壤中微生物是土壤生态系统中的关键组成部分,参与有机物分解、养分循环等关键生态过程。微塑料的存在可能改变微生物群落结构,干扰微生物功能基因^[38],进而影响微生物的多样性和丰度;有些微塑料的存在会增加能够降解复杂有机物的微生物量。Zhang 等^[39]调查了聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)微塑料颗粒对沉积物中微生物群落的影响,结果表明 PET 微塑料的添加增加了沉积物中总有机碳(TOC)的含量,改变了微生物的多样性,增加了腐霉科微生物降解复杂有机物的能力。而聚乙烯微塑料可能干扰微生物功能基因,Yu 等^[40]调查发现,聚乙烯微塑料会改变水稻土的微生物功能基因丰度,增加氮氧化物的排放。

2.2.2 微塑料对土壤微生物的间接影响。土壤酶活性是土壤微生物活动的重要指标之一,也是土壤生态系统功能的关键驱动因素。微塑料通过改变土壤性质和直接吸附抑制土壤胞外酶活性,进而影响有机物的分解和养分的释放^[41]。Liu 等^[42]调查分析了非生物降解塑料对土壤呼吸及其酶活性的影响,发现不同类型的微塑料对土壤酶活性的影响程度不同,与塑料类型、浓度、尺寸以及暴露周期等因素相关。聚丙烯微塑料的添加使土壤呼吸和酶活性分别提高了 58.8% 和 10.2%;而聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚乙烯和聚苯乙烯塑料分别使土壤酶活性降低 13.0%、6.8% 和 5.0%。

微塑料对土壤酶活性的影响,引起了土壤生态功能和健康的一系列连锁效应,对整体土壤生态系统产生深远的影响。鉴于微生物在土壤生态系统的重要作用,有关微塑料对微生物的影响机制还需要更加深入地研究。

2.3 土壤中微塑料对人类健康的影响 土壤环境中的微塑料会被动植物、微生物吸收和积累,进而通过食物链转移。Huerta Lwanga 等^[43]调查了微塑料在家庭花园土壤-蚯蚓-鸡的食物链,发现土壤、蚯蚓粪、鸡粪和鸡胃中均检测到微塑料的存在,证实了微塑料可以通过食物链富集在蚯蚓粪及鸡粪。Carlin 等^[44]发现,鱼鹰等猛禽胃肠道中也含有微塑料,且以纤维类型微塑料居多,人类通过食物链(网)摄入这些微塑料后可能会对人体健康造成不利的影响。Ibrahim 等^[45]研究发现,在成年人粪便和结肠切除标本中检测到了微塑料,证实微塑料可以被人类摄食。关于微塑料对人类各器官、脏器的毒性作用机理,还需要根据微塑料的种类、粒径大小以及浓度等因素进行更加详细的调查研究。

3 土壤中微塑料的处理方法

微塑料作为一种固体废弃物,基于固体废物处理的“三R”原则,首先,应该加强塑料废弃物的分类管理,减少塑料废弃物的源头排放。其次,采取合理的方式对其进行回收和再利用。最后,对于有毒害的微塑料还需要采取必要的措施对其进行无害化处理,实现资源化应用。

土壤中微塑料的处理技术是一个复杂而又重要的问题,它涉及环境保护、人类健康等方面。为了解决这个问题,需要综合考虑微塑料的形状、大小、密度等物理特性,以及化学组成等因素。如果微塑料的物理特性不合适或者微塑料中含有有毒物质,可能会导致处理过程中的效率降低或者采取更加严格的措施,以避免处理过程中对环境造成二次污染。因此,在选择处理技术时需要综合考虑成本和效果之间的平衡。目前,常用的处理微塑料的方法有物理方法、化学方法和生物方法。

3.1 物理方法 包括土壤深翻、过滤和分离等,以清除土壤中的塑料颗粒。通过利用微塑料和土壤颗粒尺寸、密度和形状等特性的差异,可以采用合适的物理分离技术将微塑料与土壤分离。微塑料与土壤颗粒的分离技术主要有筛分法、密度分离法、静电分选法、泡沫浮选法、磁性分离法、油提法和加压流体萃取法等^[46],目前应用较多的分离方法有筛分法和密度分离法。筛分法是利用土壤与微塑料颗粒的粒径的不同进行分离微塑料的方法,是土壤中微塑料分离的初始步骤,可以在一定程度上简化微塑料的分析检测。密度分离法利用微塑料与土壤的密度差异达到微塑料与土壤颗粒快速分离的目的^[47]。经过筛分和密度分离操作,可以将微塑料颗粒从土壤中分离出来,从而减少微塑料对土壤生态的影响。传统物理方法操作简单且分离效果较好。而新兴的加压流体萃取法自动化程度高、成本低、效率高,有较好的发展前景,但可能会改变微塑料的形态,从而影响后续的形态信息表征^[48]。

3.2 化学方法 包括化学试剂分离、化学氧化分解。化学试剂分离又有溶剂浸提和浮选等,Liu 等^[49]开发了一种利用 NaBr 循环提取土壤中微塑料的技术,回收效率在 85%~100%。Li 等^[50]也设计了一种常用而且易于组装的装置,在 NaBr 溶液中浮选土壤中可降解/不可降解的微塑料,发现尽管颗粒大小和密度存在差异,但对于可生物降解和不可降解的微塑料,该装置均表现出良好的提取精度,在很大的颗粒密度和尺寸范围内,回收率从 92%到 99.6%不等。Han 等^[51]利用饱和的 NaCl 和 NaI 溶液作为浮选药剂对土壤及其沉积物中的微塑料进行分离,结果表明将 200 g 干土壤置于 1.3 L 体积比 1:1 的饱和的 NaCl 和 NaI 溶液中,聚丙烯、聚乙烯、聚氯乙烯和聚苯乙烯的平均回收率分别为 (92.0±11.7)%、(78.0±16.0)%、(100.0±0)%和 (98.0±4.0)%。化学氧化是采用强氧化剂或还原剂改变微塑料颗粒的结构和化学性质,从而使其分解为无害或低毒物质。化学方法处理过程中因化学试剂的使用可能产生有毒有害副产物,对环境和人体健康造成危害,未来合成无毒害的化学浸提剂是分离微塑料的

关键。

3.3 生物方法 包括微生物降解和植物修复,微生物降解是通过特定微生物将微塑料降解,降解的过程分为 4 个阶段:变质、解聚、同化以及矿化。然而,特定的微生物往往需要进行培养或分离筛选^[52]。Auta 等^[53]以含有不同微塑料聚合物作为唯一碳源的合成培养基,从马来西亚半岛红树林生态系统筛选分离出 2 株降解微塑料的芽孢杆菌菌株;Park 等^[54]以从垃圾填埋场分离的混合微生物群落的细菌菌群生物降解微聚乙烯颗粒。此方法具有专一性和高效性,而且环境友好、成本较低,但生物降解性能受微生物种类、微塑料性质、筛选和培养条件以及土壤等因素的影响^[55]。此外,微塑料与有机物在土壤中的作用规律,以及多种微塑料难以同时降解等问题还需要深入探究。

植物修复是利用植物吸收和分解能力来减少土壤中微塑料的含量,植物具有吸附微塑料颗粒的能力,可以将微塑料吸附在根系或茎叶表面^[56]。同时,植物的根系分泌的酶类物质可以降解微塑料,将其转化为无害物质。因此,通过种植具有吸附和分解微塑料能力的植物,可以有效减少土壤中的微塑料含量,但适用范围有限。

各种处理方法在去除微塑料方面具有一定的效果,但单一方法难以实现完全去除。综合处理技术是将物理、化学和生物方法结合,以提高微塑料污染治理的效果。例如,将物理分离和化学处理相结合,能够更全面地去除土壤中的微塑料,同时减小对土壤生态系统的不良影响,实现微塑料的高效去除和资源化利用。

4 土壤中微塑料的处理技术面临的挑战及未来研究方向

不同类型的微塑料在土壤中的行为和影响各异,微塑料的多样性和复杂性是微塑料治理过程中面临的最主要的挑战。因此,基于不同类型的微塑料制定合理的治理策略是一项复杂而紧迫的任务。加强土壤中微塑料污染的监测技术研究是处理过程中的另一个挑战。可靠的监测手段可为污染治理提供科学依据和技术支持,当前的检测技术还需要不断改进,以满足治理效果的实时监控需求。

针对土壤中微塑料污染问题,未来的科学研究应更多关注微塑料的污染状况(包括浓度、类型、有害元素的毒性及毒性机理等)以及微塑料与土壤生态系统的相互作用机制等多个重要方向。同时加强不同学科、不同领域间的合作,强化多学科交叉融合,探索土壤中微塑料污染治理的新方法和新策略,研发高效、环保、低成本的处理技术,推进治理技术的创新和完善,加快研究成果的落地转化。

5 结语

土壤中微塑料的污染已经成为全球环境科学研究的热点。对微塑料的来源、污染现状,微塑料对土壤生态环境的影响,土壤中微塑料的治理技术以及土壤中微塑料的处理技术面临的挑战及未来研究方向进行了综述。由此可知,尽管在土壤微塑料的研究已经取得了一定进展,但仍需全人类共同努力,有效解决和减缓土壤微塑料的污染及其对土壤环境和人类健康的潜在威胁,为共建一个清洁健康的

土壤生态贡献力量。

参考文献

- [1] ANDRADY A L. The plastic in microplastics: A review [J]. Marine pollution bulletin, 2017, 119(1): 12–22.
- [2] QI R M, JONES D L, LI Z, et al. Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review [J]. The science of the total environment, 2020, 703: 1–12.
- [3] HUERTA LWANGA E, GERTSEN H, GOOREN H, et al. Microplastics in the terrestrial ecosystem: Implications for *Lumbricus terrestris* (Oligochaeta, Lumbricidae) [J]. Environmental science and technology, 2016, 50(5): 2685–2691.
- [4] 杨杰, 李连祯, 周倩, 等. 土壤环境中微塑料污染: 来源、过程及风险 [J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 281–298.
- [5] FOITZIK M J, UNRAU H J, GAUTERIN F, et al. Investigation of ultra fine particulate matter emission of rubber tires [J]. Wear, 2018, 394/395: 87–95.
- [6] 周倩, 田崇国, 骆永明. 滨海城市大气环境中发现多种微塑料及其沉降通量差异 [J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3902–3909.
- [7] 何晶晶, 陈莉菡, 邵立明, 等. 生活垃圾填埋场: 微塑料产生源? ——在填埋场渗滤液中发现了微塑料 [J]. 环境卫生工程, 2020, 28(2): 95–96.
- [8] 孙飞虎, 张弛, 李洪波, 等. 微塑料污染现状及其对土壤生态系统的影响 [J]. 中国土壤与肥料, 2022(8): 239–246.
- [9] DRIS R, GASPERI J, SAAD M, et al. Synthetic fibers in atmospheric fallout: A source of microplastics in the environment [J]. Marine pollution bulletin, 2016, 104(1/2): 290–293.
- [10] MINTENIG S M, INT-VEEN I, LÖDER M G J, et al. Identification of microplastic in effluents of waste water treatment plants using focal plane array-based micro-Fourier-transform infrared imaging [J]. Water research, 2017, 108: 365–372.
- [11] 吴为, 张敏, 繆明, 等. 土壤环境中微塑料的发生、来源及影响研究进展 [J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(3): 90–98.
- [12] 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.
- [13] 鞠志成, 金德才, 邓晔. 土壤中塑料与微生物的相互作用及其生态效应 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(5): 2352–2361.
- [14] 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.
- [15] SCHEURER M, BIGALKE M. Microplastics in swiss floodplain soils [J]. Environmental science and technology, 2018, 52(6): 3591–3598.
- [16] KIM S K, KIM J S, LEE H, et al. 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, 2020, 403: 1–11.
- [17] VOLLERTSEN J, HANSEN A. Microplastic in Danish wastewater: Sources, occurrences and fate [R]. 2017.
- [18] ZHOU Y, LIU X, WANG J. Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China [J]. Science of the total environment, 2019, 694: 1–10.
- [19] ZHOU Q, ZHANG H B, FU C C, et al. The distribution and morphology of microplastics in coastal soils adjacent to the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Geoderma: An international journal of soil science, 2018, 322: 201–208.
- [20] 韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 等. 辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源 [J]. 环境科学, 2021, 42(4): 1781–1790.
- [21] YU Y X, ZHANG Z H, ZHANG Y X, et al. Abundances of agricultural microplastics and their contribution to the soil organic carbon pool in plastic film mulching fields of Xinjiang, China [J]. Chemosphere, 2023, 316: 137837.
- [22] 裴磊, 王发园, 张书武. 微塑料对土壤特性的影响 [J]. 山东化工, 2023, 52(18): 126–128, 131.
- [23] 连加攀, 沈玫玫, 刘维涛. 微塑料对小麦种子发芽及幼苗生长的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(4): 737–745.
- [24] 黎鹏. 微塑料与磷添加对玉米生长及土壤特性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
- [25] BOOTS B, RUSSELL C W, GREEN D S. Effects of microplastics in soil ecosystems: Above and below ground [J]. Environmental science and technology, 2019, 53(19): 11496–11506.
- [26] 安菁, 刘欢语, 郑艳, 等. 土壤微塑料残留对大豆幼苗生长及生理生化特征的影响 [J]. 四川农业大学学报, 2021, 39(1): 41–46.
- [27] 喻晨. 聚乙烯微塑料对豌豆生长及土壤特性的影响研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [28] 李连祯, 周倩, 尹娜, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料 [J]. 科学通报, 2019, 64(9): 928–934.
- [29] DE SOUZA MACHADO A A, LAU C W, KLOAS W, et al. Microplastics can change soil properties and affect plant performance [J]. Environmental science and technology, 2019, 53(10): 6044–6052.
- [30] 杨玲, 张玉兰, 康世昌, 等. 中国土壤微塑料污染 [J]. 自然杂志, 2021, 43(4): 267–273.
- [31] 李瑞静, 赵亚菲, 耿慧慧, 等. 农田土壤微塑料污染及其对植物的影响研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 681–688.
- [32] 谢彦. 土壤微塑料污染及微生物降解研究进展 [J]. 化工环保, 2024, 44(1): 21–27.
- [33] ZHU D, CHEN Q, AN X L, et al. Exposure of soil collembolans to microplastics perturbs their gut microbiota and alters their isotopic composition [J]. Soil biology and biochemistry, 2018, 116: 302–310.
- [34] 杨光蓉, 陈历睿, 林敦梅. 土壤微塑料污染现状、来源、环境命运及生态效应 [J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 353–365.
- [35] BROWNE M A, NIVEN S J, GALLOWAY T S, et al. Microplastic moves pollutants and additives to worms, reducing functions linked to health and biodiversity [J]. Current biology, 2013, 23(23): 2388–2392.
- [36] RILLIG M C, ZIERSCH L, HEMPEL S. Microplastic transport in soil by earthworms [J]. Scientific reports, 2017, 7: 1–6.
- [37] LEI L L, LIU M T, SONG Y, et al. Polystyrene (nano) microplastics cause size-dependent neurotoxicity, oxidative damage and other adverse effects in *Caenorhabditis elegans* [J]. Environmental science: Nano, 2018, 5(8): 2009–2020.
- [38] ZHANG Y X, LI X, XIAO M, et al. Effects of microplastics on soil carbon dioxide emissions and the microbial functional genes involved in organic carbon decomposition in agricultural soil [J]. Science of the total environment, 2022, 806: 1–8.
- [39] ZHANG W Z, LIU X M, LIU L N, et al. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and microbial communities in sediment of freshwater systems [J]. Journal of hazardous materials, 2022, 435: 1–12.
- [40] YU Y X, LI X, FENG Z Y, et al. Polyethylene microplastics alter the microbial functional gene abundances and increase nitrous oxide emissions from paddy soils [J]. Journal of hazardous materials, 2022, 432: 1–11.
- [41] YU H, FAN P, HOU J H, et al. Inhibitory effect of microplastics on soil extracellular enzymatic activities by changing soil properties and direct adsorption: An investigation at the aggregate-fraction level [J]. Environmental pollution, 2020, 267: 1–11.
- [42] LIU X H, LI Y Y, YU Y X, et al. Effect of nonbiodegradable microplastics on soil respiration and enzyme activity: A meta-analysis [J]. Applied soil ecology, 2023, 184: 1–9.
- [43] HUERTA LWANGA E, MENDOZA VEGA J, KU QUEJ V, et al. Field evidence for transfer of plastic debris along a terrestrial food chain [J]. Scientific reports, 2017, 7: 1–7.
- [44] CARLIN J, CRAIG C, LITTLE S, et al. Microplastic accumulation in the gastrointestinal tracts in birds of prey in central Florida, USA [J]. Environmental pollution, 2020, 264: 1–9.
- [45] IBRAHIM Y S, TUAN ANUAR S, AZMI A A, et al. Detection of microplastics in human colectomy specimens [J]. JGH Open, 2021, 5(1): 116–121.
- [46] 姜晓旭, 封雪, 周笑白, 等. 土壤中微塑料污染现状与检测技术研究进展 [J]. 环境化学, 2023, 42(1): 163–175.
- [47] HE D F, ZHANG X T, HU J N. Methods for separating microplastics from complex solid matrices: Comparative analysis [J]. Journal of hazardous materials, 2020, 409: 1–9.
- [48] FULLER S, GAUTAM A. A procedure for measuring microplastics using pressurized fluid extraction [J]. Environmental science and technology, 2016, 50(11): 5774–5780.
- [49] LIU M T, SONG Y, LU S B, et al. A method for extracting soil microplastics through circulation of sodium bromide solutions [J]. Science of the total environment, 2019, 691: 341–347.
- [50] LI C T, CUI Q, ZHANG M, et al. A commonly available and easily assembled device for extraction of bio/non-degradable microplastics from soil by flotation in NaBr solution [J]. Science of the total environment, 2021, 759: 1–9.
- [51] HAN X, LU X, VOGT R D. An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples [J]. Environmental pollution, 2019, 254: 1–7.
- [52] JEON H J, KIM M N. Isolation of mesophilic bacterium for biodegradation of polypropylene [J]. International biodeterioration and biodegradation, 2016, 115: 244–249.

3 结论与讨论

外源活性物质可促进植株根系生长发育,提高光合效率,增加烟叶叶绿素含量,提高烤烟生长速度,增加叶片数量和重量,改善烤烟的香气、口感和化学成分含量,有利于提高烤烟的产量和品质。

外源活性物质是具有植物激素活性且可促进植物生长发育和新陈代谢的有机物质^[20]。打顶后施用生长调节剂有助于烟株内源激素平衡^[11]。该试验不同外源活性物质处理均显著提高上部烟叶生长素、细胞分裂素含量,降低上部烟叶脱落酸含量,同时提高叶绿素酶活性,这说明外源活性物质能调控烟株内源激素,促进烟株生长发育,延缓烟株衰老,有利于提高上部烟叶耐熟性。

打顶后涂抹植物生长调节剂在一定程度上代替烟株顶端的作用^[21],烟株生长发育正常进行,内源激素和光合产物继续累积。该试验不同外源活性物质处理上部烟叶 SPAD 值和细胞膜稳定指数均提高,叶片光合作用增强,细胞膜结构稳定,有利于延缓烟株衰老。

植物生长调节剂能促进中上部烟叶的开片^[22]。该试验不同外源活性物质处理均能显著增加烟株节距和叶片数,节距的增加有利于改善烟株通风透光条件,叶片数的增多为烤烟产量打下物质基础。

喷施植物生长调节剂能提升烟叶经济性状^[23],烟叶产量增加了 59.0%^[24]。该试验不同外源活性物质处理均显著提高了上部烟叶产量和产值,其中均以 T3 处理最高,同时增加了均价和中上等烟比例,这与王念磊等^[25]研究结果一致。这是由于喷施外源活性物质增加了烟株叶片数,同时上部烟叶内源激素水平和叶绿素酶活性较高,光合产物积累较多。

喷施植物生长调节剂烟叶化学成分较为协调,感官评吸质量较好^[23]。该试验中 T2 和 T3 处理上部烟叶总糖、还原糖、钾含量均增加,烟碱含量均降低,两糖比和糖碱比均较高;不同外源活性物质处理上部烟叶感官质量和外观质量均较高,其中均以 T2 处理最好。这可能是因为喷施外源活性物质延缓了烟株上部烟叶的衰老,提高了上部烟叶的耐熟性,且随着成熟度的提高烟叶有机物质的消耗减少,积累了较多的内含物。

综上所述,喷施外源活性物质,尤其是喷施 1 mg/L 油菜素内酯的 T2 处理上部烟叶内源激素保持较高水平,叶绿素酶活性提高,增大了上部烟叶 SPAD 值和细胞膜稳定指数,提高了上部烟叶的耐熟性,为上部烟叶充分成熟提供了可

能;同时,彭氏外源活性物质改善了烟株农艺性状,增加了产量和产值,提高了烟叶等级结构,化学成分协调性较好,提高了外观质量和感官质量。

参考文献

- [1] 李江涛,董有波,朱永立,等.不同留叶数与叶面钾肥配合施用对上部烟叶品质的影响[J].江西农业学报,2023,35(7):9-13.
- [2] 刘华山,韩锦峰,曾涛,等.烤烟喷施降碱增钾制剂的生理效应及对品质的影响[J].华北农学报,2005,20(3):46-49.
- [3] 朱尊权.提高上部烟叶可用性是促“卷烟上水平”的重要措施[J].烟草科技,2010(6):5-9,31.
- [4] 贾中林,尹启生,陈广晴,等.成熟度对烤烟上部烟叶生理特性及烟叶质量的影响[J].江西农业学报,2023,35(4):1-7.
- [5] 李元实,王校辉,李浩亮,等.外源物质对烤烟上部叶物理性状及内在品质的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2010,38(3):119-124.
- [6] 王云.植物生长调节剂及其在林果生产中的应用[J].安徽农学通报,2012,18(14):135-136.
- [7] 邱春莲,齐国辉.植物生长调节剂在果树生产中的应用[J].河北果树,2004(4):1-3,35.
- [8] 徐增达.植物生长调节剂在花卉上的应用[J].江西农业学报,2006,18(3):94-96.
- [9] 李国成,李雪勤,袁爱荣.植物生长调节剂在林果生产中的应用[J].河南林业科技,2009,29(3):121-122.
- [10] 刘中阳,刘芳,化党领,等.不同植物生长调节剂和钾素水平对烟草生长发育的影响[J].中国农学通报,2006,22(10):195-198.
- [11] 邹焱,苏以荣.打顶及施用植物生长调节剂对烟草内源激素的影响[J].烟草科技,2008,41(10):50-52,57.
- [12] 寇江涛.外源 2,4-表油菜素内酯对盐胁迫下燕麦种子萌发抑制的缓解效应[J].草业科学,2020,37(5):916-925.
- [13] 蒋悦,罗倩,姜超英,等.烟草转录因子 NtMYB4a 响应干旱、低温和茉莉酸甲酯胁迫的功能分析[J].作物研究,2021,35(1):43-49.
- [14] 刘国顺.烟草栽培学[M].北京:中国农业出版社,2003:9-12.
- [15] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 水溶性糖的测定 连续流动法:YC/T 159—2002[S].北京:中国标准出版社,2004:397-401.
- [16] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 总植物碱的测定 连续流动法:YC/T 160—2002[S].北京:中国标准出版社,2004:402-406.
- [17] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 钾的测定 连续流动法:YC/T 217—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [18] 国家烟草专卖局.烟草及烟草制品 氯的测定 连续流动法:YC/T 162—2011[S].北京:中国标准出版社,2011.
- [19] 国家技术监督局.烤烟:GB 2635—1992[S].北京:中国标准出版社,1992:491-450.
- [20] 刘昆成.三种植物生长调节剂对格木幼苗生长及生理特性的影响[D].南宁:广西大学,2013.
- [21] 代晓燕,苏以荣,陈风雷,等.顶端调控措施对烤烟生长、内源激素及氮钾累积的影响[J].中国农学通报,2008,24(8):234-240.
- [22] 郭世洋,高远,程森,等.植物生长调节剂对烤烟中上部烟叶品质的影响[J].广东农业科学,2017,44(6):14-19.
- [23] 沈铮,韩富根,李元实,等.植物生长调节剂对烤烟经济性状、化学成分及香气质量的影响[J].江西农业大学学报,2009,31(4):639-643.
- [24] 梁琼月,潘明君,尹永强,等.育苗期施用复合植物生长调节剂对烤烟生长、产量及品质的影响[J].甘肃农业大学学报,2020,55(2):98-104.
- [25] 王念磊,张伟伟,焦绍赫,等.植物生长调节剂对烟草生长发育及产质量的影响[J].江苏农业科学,2018,46(19):76-79.

(上接第 19 页)

- [53] AUTA H S, EMENIKE C U, FAUZHIAH S H. Screening of *Bacillus* strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation[J]. Environmental pollution, 2017, 231: 1552-1559.
- [54] PARK S Y, KIM C G. Biodegradation of micro-polyethylene particles by bacterial colonization of a mixed microbial consortium isolated from a

landfill site[J]. Chemosphere, 2019, 222: 527-533.

- [55] 朱会会,张淑彬,邹国元,等.微塑料降解菌群的筛选与性能研究[J].农业环境科学学报,2023,42(3):547-557.
- [56] HE D F, LUO Y M, LU S B, et al. Microplastics in soils: Analytical methods, pollution characteristics and ecological risks[J]. Trends in analytical chemistry, 2018, 109: 163-172.