

塑料和可降解地膜的残留与降解及对土壤健康的影响：进展与思考

丁凡^{1,*}, 李诗彤¹, 王展¹, 冯良山², 赵祥云³, 汪景宽¹

(1.沈阳农业大学 土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866; 2.辽宁农业科学院, 辽宁 沈阳 110161;
3.石林县鹿阜街道农业综合服务中心, 云南 昆明 652299)

摘要:传统塑料地膜覆盖带来巨大经济效益的同时,也引起了严重的土壤退化和污染。可降解地膜代替传统塑料地膜是未来的必然选择。本文对近年来国内外关于传统地膜覆盖带来的土壤塑料残留和可降解地膜的最新研究进行了综述,并总结了该领域一些亟待解决的问题。主要包括:(1)传统塑料地膜覆盖土壤中塑料的残留数量巨大,覆膜20 a的农田中大塑料(粒径大于5 mm)的残留最高能达到307.95 kg/hm²,覆膜农田中微塑料的残留也不容忽视,目前亟需制定出统一的土壤微塑料(粒径小于5 mm)残留检测标准。(2)新型可降解地膜被认为是解决塑料地膜污染最有效的途径之一,但目前没有考虑到可降解地膜会碎裂成微塑料,可能会危害土壤健康,未来应加强这方面的研究;最后,本文对以上方向进行了展望,并提出可降解地膜是一种微生物可以利用的碳源,未来应利用同位素示踪技术来研究可降解地膜参与的土壤碳循环过程。

关键词:塑料地膜;可降解地膜;地膜残留;土壤健康

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 2095-7300 (2021) 03-0083-07

Residue and Degradation of Plastic and Degradable Mulch in Cropland and Their Effects on Soil Health: Progress and Perspective

DING Fan¹, LI Shitong¹, WANG Zhan¹, FENG Liangshan²,
ZHAO Xiangyun³, WANG Jingkuan¹

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2. Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161, China; 3. Lufu street agricultural integrated service center in Shilin County, Kunming 652299, China)

Abstract: Traditional plastic film mulching brings a large economic advantage on agriculture, but results in severe soil degradation and pollution. Thus, the substitution of plastic film by biodegradable film should be an inevitable choice in the future. However, there are still some barriers for application of biodegradable film. The previous studies on the residues in soil from plastic and biodegradable mulching films at home and abroad in recent years were reviewed, and some unresolved problems in this field were summarized. The main issues are: 1) There is a huge amount of plastic residue in croplands after long-term plastic film mulching, which can get to the maximum value of 307.95 kg hm⁻² after 20 years of plas-

收稿日期: 2021-04-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071069); 国家公益性行业专项(201503105)

作者简介: *为通信作者, 丁凡, 博士, 硕士生导师, 讲师, 研究方向: 土壤生态学, E-mail: dingfan1985@syou.edu.cn.

引文格式: 丁凡, 李诗彤, 王展, 等. 塑料和可降解地膜的残留与降解及对土壤健康的影响: 进展与思考[J]. 湖南生态科学学报, 2021, 8(3): 83-89.

DING F, LI S T, WANG Z, et al. Residue and degradation of plastic and degradable mulch in cropland and their effects on soil health: Progress and perspective[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2021, 8(3): 83-89.

tic film mulching. The microplastic problem in mulched cropland should not be ignored. There is an urgent need to develop a unified residue detection standard for soil microplastics (particle size less than 5 mm). Finally, the future outlook on the above issues is prospected and it is proposed that degradable mulch is also a carbon source that can be used by microorganisms. In the future, isotope tracer technology should be used to study the soil carbon cycle process involving degradable mulch.

Key words: plastic film mulch; biodegradable mulch; plastic mulch residue; soil health

塑料已经成为现代人类生活必需的消耗品,人类已经进入“塑料时代”。据统计显示,全球每年塑料总使用量超过24亿吨,其中绝大部分最终会被丢弃到环境中^[1];全球每年向海洋中排放480~1 270万吨塑料^[2],对全球的海洋环境和生物造成了极大的影响,近些年,海洋塑料污染已受到前所未有的重视^[2],海洋中的塑料多数来自陆地,陆地上塑料的残留总量要远远大于海洋。因此,陆地尤其是土壤中塑料污染也应该受到重视^[3-4]。一项欧洲的研究表明,欧盟每年向陆地中释放的塑料总量可能是往海洋中释放总量的4~23倍^[5],仅农田土壤中每年输入的塑料就远超过全球海洋表面漂浮的塑料总量^[6]。我国农田的塑料污染更为触目惊心,随风飘舞的塑料已经成为北方一些农村周围“灾难性”景观。最近一项调查研究表明,我国长期覆膜农田土壤中塑料残留量为71.9~259.1 kg/hm²^[7]。

地膜覆盖是农田土壤中塑料残留最主要的来源之一。1979年我国从日本引进了地膜覆盖栽培技术,极大地促进了我国旱作农业的发展。地膜覆盖可以提高地温、减少水分蒸发、抗病防虫、抑制杂草、充分利用有限的光、热、水、和养分资源^[8]。地膜覆盖可以促进种子萌发,加速根系和植物地上部分生长,延长有效生育期,达到作物早熟、高产、优质的良好效果^[9-10]。因此,农业地膜覆盖已成为我国干旱、半干旱、低洼和盐碱和寒冷等地区农作物增产、节水、保温和控草的重要措施。我国地膜用量从1982年0.6万吨增加到2014年147.1万吨,地膜覆盖面积从1982年的11.7万公顷迅速扩大到2016年的1 840万公顷^[11]。当前,我国已成为世界地膜生产量和地膜覆盖面积最大的国家。

然而,大量农业地膜的使用使农田中残留了大量的塑料,给土壤和环境造成了严重的污染^[12]。塑料地膜一般由聚乙烯制备而成,绝大多数降解很慢或不可降解。由于以往我国的农用地膜非常薄(厚度一般为0.005~0.008 mm),回收困难,导致农田地膜平均回收率不到60%^[13]。长期地膜覆盖的土壤中残留塑料会越积越多,造成农田的“白色污染”。地膜残留会阻碍土壤毛管水和自然水的渗透,影响土壤吸湿性,降低土壤的通透性,影响微生物活动和

土壤肥力水平,还可能导致地下水难以下渗,造成土壤次生盐碱化,最终影响土壤质量和作物产量^[14]。此外,地膜的自然风化或受到人为影响(耕作、地膜回收等),会使其碎裂成更小的碎片,变成微塑料(粒径小于5 mm)。微塑料的运移能力很强,可能运移到深层土壤或地下水中,进而对地下水质量有负面影响,影响人类健康^[15]。从2011年开始,微塑料污染被联合国环境规划署(UNEP)列为全球要面对的一个新的问题和挑战^[16]。

1 传统塑料地膜在土壤中的残留与微塑料提取方法

近十年,国内科技工作者在农用地膜残留的定量化方面做了一些工作。严昌荣等^[17]对新疆农垦科学院连续20 a覆膜种植棉花的土壤残膜进行监测,结果显示:研究区土壤中地膜平均残留量高达300.6 kg/hm²,并且覆膜年限越久,残留量越高,连续覆膜10 a和20 a棉田中地膜残留量分别为259.65 kg/hm²和307.95 kg/hm²。马辉等^[18]调查了邯郸市不同覆膜年限棉花田地膜残留情况,发现连续覆膜2 a、5 a和10 a的棉田中地膜残留量分别为59.1 kg/hm²、75.3 kg/hm²和103.4 kg/hm²。张丹等^[19]采用问卷调查及样方检测方法对华北地区主要作物的地膜残留状况进行系统调查,发现华北地区土壤耕层地膜残留数量分布范围为0.2~82.2 kg/hm²,其平均值为26.8 kg/hm²。以上研究虽然监测了长期地膜覆盖土壤中残膜的数量,但是研究中残膜的收集均是靠人工捡拾,该方法只能收集比较大块的残膜(一般面积大于4 cm²),而漏掉了小的残膜,更无法考虑微塑料的数量。

国际上学者对土壤中微塑料(粒径小于5 mm)的定量化做了一些尝试,但还存在很多问题。一般微塑料的密度值在0.8~1.4 g/cm³^[20]。当前,最常用的微塑料提取的方法是用1.0~1.4 g/cm³的氯化锌、氯化钠、氯化钙、碘化钠或多钨酸钠溶液,通过密度浮选法去掉土壤中的矿质相^[21]。但是,这些方法都有其局限性^[22],比如,NaCl虽然便宜易获得,且Na⁺有利于粒子的分散,但NaCl溶液的密度太低,饱和NaCl溶液的密度才1.2 g/cm³。ZnCl₂溶液和NaI溶

液密度均可达到最佳浮选密度^[23],但ZnCl₂和NaI昂贵且有毒性^[24],且ZnCl₂溶液的酸性可能会影响土壤样品中的微塑料^[25]。CaCl₂溶液中Ca²⁺可以凝聚有机物质,影响后续识别实验。其次,微塑料提取后,土壤中密度小于1.4 g/cm³的游离态有机质会与微塑料混在一起,从而影响其目视识别的效果。目前,学者尝试了各种酸、碱、氧化剂(如H₂O₂)或酶去除土壤有机质的方法,但是这些方法难以达到既去除有机质又不对塑料产生影响的目的^[26]。酸处理可能会降解塑料^[27]。碱性处理可引起塑料表面降解^[28]。虽然大多数微塑料不受H₂O₂的影响,但PE和PP塑料在接触H₂O₂时形状会发生轻微的变化^[28-29]。酶催化在消除土壤有机质方面的效力存在很大的不确定性,特别是考虑到土壤基质的复杂组成和不同的理化性质时^[30]。此外,虽然目前有很多技术手段对微塑料进行识别和量化,包括视觉分类、光谱(如可见光-近红外光谱,拉曼光谱、傅立叶红外光谱)或热分析技术(如热萃取-解吸-气相色谱-质谱(TED-GC-MS)及热解气相色谱-质谱(Pyr-GC-MS)),但这些方法均存在一定的土壤有机质干扰问题^[26]。拉曼光谱和傅立叶红外光谱易受到土壤有机质自发荧光的干扰,且检测过程耗时较长;视觉分类存在高误识率的问题,特别是对于较小的和纤维状的物品^[20];Pyr-GC-MS、热重分析-质谱(TGA-MS)和TED-GC-MS等热分析技术无法提供有关所分析粒子数量和形态特性的信息。总的来说,在土壤这种复杂的、富含有机物的固体环境基质中,目前土壤微塑料测定的方法(包括计量单位、时空变异模式、环境因素的影响、污染控制等)呈现多样化,这导致不同研究之间数据无法进行比较,同时研究结果是否可以反映微塑性污染的真实水平也受到质疑^[31]。因此,目前亟需一种能被大家广泛认可的土壤微塑料检测方法,并制定统一的国家标准。

2 新型可降解地膜在土壤中的降解速率与及其参与的碳循环过程

可降解地膜替代塑料地膜是未来必然的选择。可降解地膜不用回收,可以直接犁进土壤中,也可以堆在田里。与普通塑料地膜相比,可降解地膜的使用可以减少清理和处理地膜的成本(包括劳动力,处理/回收费用等)。可降解地膜可以由不同的原材料制成,包括天然生物物质和石油基两大类。天然生物物质如淀粉、纤维素、甲壳素等,通过对这些原料改性、再合成形成可降解地膜的生产原料。以石油基为原材料生产的可降解地膜的主要成分是二元酸二

元醇共聚酯(PBS、PBAT等)、聚羟基烷酸酯(PHA)、聚己内酯(PCL)、聚羟基丁酸酯(PHB)、二氧化碳共聚物-聚碳酸亚丙酯(PPC)。理想情况下,可降解地膜在自然界中能够很快分解和被微生物利用,最终降解产物为二氧化碳和水。

弄清可降解地膜在土壤中的降解速率至关重要。如果可降解地膜降解过快,在作物生长阶段就破碎化,导致生长后期不能有效控制杂草、增加地温和保持水分,从而失去了地膜覆盖的效果。相反,如果可降解地膜降解速率过慢,就可能与塑料地膜一样对土壤产生负面影响。尤其是,在耕作过程中,可降解地膜被土壤掩埋在地下,下层土壤中的氧气浓度较低,微生物活性较低,可降解地膜的降解速率可能大大地降低。

近些年,很多学者监测了可降解地膜的降解速率,目前一种方法是采用地膜覆盖安全期来进行评价,即某一作物在某一区域要求地膜覆盖的最佳天数,也就是地膜覆盖农田土面能保持膜面完整的日数^[32],这种方法主要是评价降解地膜对作物产量和生长发育的影响效应。另一种方法是将可降解地膜剪成一定面积的形状,放在野外或室内培养一段时间后,通过膜面积或重量的减少来计算膜的降解率。例如,Barragán等^[33]将5种不同材料的可降解地膜剪成7 cm×7 cm的正方形放在含有土的培养瓶中,在恒温恒湿条件下培养6个月后,这些膜几乎全部被降解。Li等^[34]将可降解地膜剪成46 cm×61 cm的长方形,放入网带中,埋入野外土壤24个月后,纤维素纸膜全部降解,而聚乳酸膜只降解了10%,淀粉膜降解了11%~98%。Rudnik and Briassoulis^[35]将PLA和PHA材料的可降解地膜,剪成21 mm×15 mm的碎片,放入网带中埋入10~15 cm的土层位置或放到地面上7个月后,发现PLA膜的降解速率比PHA膜慢很多。Wen and Lu^[36]将5种不同配方的PHA地膜剪成10 mm×10 mm的碎片(重10 mg)埋入公园的土中,在室温和20%的土壤水分条件下培养60 d后,膜的重量损失54%~93%。然而,以上研究中通过膜面积或重量的减少来计算膜的降解率,没有考虑微米级或纳米级地膜颗粒在土壤中的积累量(无法收集),他们的结果不是真实的膜降解速率,实际上只是膜的破碎速率。

可降解地膜既能被微生物降解,也能被微生物利用^[37],从而参与土壤中的碳循环过程。Moreno and Moreno^[38]研究表明,与覆盖传统塑料地膜相比,覆盖生物可降解地膜会增加土壤微生物量碳。Zumstein等^[39]将¹³C标记的可降解地膜加入到土壤中培养,发现土壤真菌的菌丝体内含有可降解地膜来源的碳信号,说明土壤真菌可以利用可降解地膜作为碳源

供自身生物体生长。因此,可降解地膜碳,可能与作物秸秆碳一样,能转化成土壤有机质(进入土壤团聚体被包裹起来或与土壤矿物结合形成有机无机复合体),和参与土壤碳循环过程。然而,关于可降解地膜碳能否转化成土壤有机质,是否能进入土壤团聚体或形成有机无机复合体(赋存状况),目前尚不清楚。 ^{13}C 稳定同位素示踪技术可以用来研究可降解地膜来源的碳(如PBAT)在土壤中的去向^[39]。 ^{14}C 也可以用来示踪以石油为原材料生产的可降解地膜,如PBAT(己二酸丁二醇酯和对苯二甲酸丁二醇酯聚合物),PHA(羟基烷酸酯)、PCL(聚己内酯)、PHB(聚羟基丁酸酯)等成分。 ^{14}C 具有放射性,半衰期为5 000多年,而石油在地下经过了很长的地质历史(几百万年以上),因此,石油及其产物中几乎不含 ^{14}C , ^{14}C 丰度为-1 000‰^[40]。土壤有机质中 ^{14}C 包含两个信号来源,一个是不含 ^{14}C 的地质历史时期形成的有机碳(丰度为-1 000‰),另一个是现代大气($\text{CO}_2\text{-C}$ 通过光合作用进入植物体再转移到土壤中)。由于20世纪五、六十年代形成的核爆 ^{14}C 信号的干扰,现代大气具有较高的 ^{14}C 丰度(+55‰)^[41]。并且,越是表层土壤,有机质的 ^{14}C 信号越接近于现代大气^[42],这意味着表层土壤有机质与石油及其产物的 ^{14}C 丰度有较大的差异。因此,一些研究结合自然丰度的 ^{14}C 示踪技术和PLFA,示踪石油或石油产物(多环芳烃)污染物在土壤中的分布以及被微生物同化利用情况^[43-44]。因此,利用自然丰度的 ^{14}C 示踪PBAT在土壤中的分布和转化过程是可行的。虽然碳同位素示踪技术已经广泛用于外源有机物料(如秸秆)在土壤中的碳周转过程研究^[45],但是还没有学者利用碳同位素技术研究可降解地膜在土壤中的降解速率与赋存状况。因此,未来应探索利用 ^{13}C 和 ^{14}C 同位素技术来研究可降解地膜的降解速率,以及其在土壤团聚体或有机无机复合体中的赋存情况。

3 地膜覆盖对土壤健康的影响

随着人们就现有的土地管理实践影响土壤物理、化学和生物学性质认识的不断提高,土壤健康(soil health)术语经常在科技文献和大众媒体中使用。美国学者Doran and Parkin^[46]把土壤健康定义为:土壤在生态系统边界内行使维持生物生产力、改善环境质量和促进植物和动物健康机能的能力。后来,澳大利亚学者Pankhurst等^[47]也采纳了这一定义,并且指出土壤健康的定义应包括三个部分:持续的生物生产力、植物和动物健康水平的提高、环境质量的维持。最近,Moebius-Clune等^[48]在前人的基础上,给土壤健康定义为:土壤作为一个生态系统来支撑植

物、动物和人类的生存的可持续能力。根据康奈尔土壤健康综合评价(CASH)系统,土壤健康包含土壤结构、土壤水文、土壤生物学、土壤化学、土壤肥力以及土壤盐分和碱度共6个方面的参数指标^[43]。

传统塑料地膜在土壤中残留了大量的塑料,从多方面危害着土壤的健康。首先,塑料残留会导致土壤性质恶化,包括破坏团聚体结构、降低土壤孔隙度和含水量、影响土壤溶质运移和气体交换、降低土壤通气和透水性,因而会降低农作物出芽率,影响根系的生长,阻隔对养分的吸收,会造成粮食减产^[49-51]。其次,地膜碎裂成塑料颗粒后,吸附能力大大增加,会吸附重金属离子和有机污染物(多环芳烃、多氯联苯、杀虫剂、除草剂和抗生素等),可能在环境中扮演着污染物迁移载体的角色,从而增加了土壤污染物治理的难度^[15]。此外,土壤中微塑料可能成为致病菌等有害微生物的运输载体,影响土壤生态系统健康^[15]。最后,土壤中微塑料可能影响土壤动物的生存,研究表明土壤动物(如蚯蚓、纤毛虫、鞭毛虫、和变形虫)会误食微塑料,从而造成它们成长、存活和造成肠道的损伤^[54-55]。微塑料不仅存在于土壤表层,还可能运移到深层土壤中。Liu等^[52]在研究上海郊外农田土壤塑料污染的过程中发现,浅表层土壤中微(中)塑料的含量高于深层土壤,而且浅层土壤中微(中)塑料的尺寸也显著大于深层土壤。Zhang等^[53]发现蚯蚓能够将土壤表层的塑料拖曳至深层土壤,蚯蚓或昆虫也会通过摄取-排泄的方式将塑料带入土壤内部^[54-55]。另外塑料还能够通过土壤孔隙或孔洞垂直向下迁移,被运输到深层土壤^[5]。微塑料在土壤剖面上的垂直分布与蚯蚓和昆虫等的行为有关^[54-55],也与微塑料自身物理特性和土壤环境有关^[22,26]。

可降解地膜是否对土壤健康产生负面影响,关系到未来可降解地膜在农业上的推广和利用。目前,只有少数研究报道了可降解地膜覆盖对土壤健康的影响。Li等^[56]评估了不同材料的生物可降解地膜使用18个月后土壤健康的变化,结果显示:土壤健康的变化很小。然而,考虑到土壤健康的变化较慢,18个月的时间太短,可能不足以观察到土壤健康的改变。美国华盛顿州立大学Markus Flury教授和田纳西大学Sean Schaeffer副教授在田纳西州和华盛顿州开展了不同材料的生物可降解地膜(包括塑料地膜)试验,评价了2015—2017年土壤健康的变化,结果显示:可降解地膜对土壤健康的影响在两个试验站是不同的,在华盛顿州,覆膜会增加土壤水文健康指数(基于土壤孔隙度和可利用水含量等参数评价),塑料地膜会降低土壤生物的健康指数(基于土壤酶和土壤呼吸等参数评价);而在田纳西州,所有覆膜

处理均不影响土壤水和生物的健康指数^[57]。中国作为一个农业大国,与美国有着截然不同的气候、土壤和种植制度,而可降解地膜覆盖对土壤健康影响的研究目前较少,尤其缺乏长期的可降解地膜覆盖试验。因此,通过田间试验,开展可降解地膜覆盖对我国农田土壤健康长期影响的研究是十分必要和紧迫的。

4 结论与展望

4.1 结论

传统农田塑料地膜覆盖带来巨大经济效益的同时,也引起了严重的土壤退化和污染,危害土壤健康。传统塑料地膜覆盖土壤中塑料的残留数量巨大,覆膜20 a的农田中大塑料(粒径大于5 mm)的残留最高能达到307.95 kg/hm²。现有研究证明塑料残留会破坏团聚体结构、降低土壤孔隙度和含水量、影响土壤溶质运移和气体交换、降低土壤通气和透水性,进而影响作物生长;土壤中微塑料也可能成为致病菌等有害微生物的运输载体,影响土壤生态系统健康,还会影响土壤动物的生存。同时,地膜碎裂成塑料颗粒后,吸附能力大大增加,会吸附重金属离子和有机污染物,可能会增加土壤污染物治理难度。虽然目前生态环境中的塑料污染问题已达到人们前所未有的重视,但在土壤微颗粒定量测定方面还没有一种公认的可靠方法,密度浮选法、显微镜技术,可见光-近红外光谱,拉曼光谱、傅立叶红外光谱、TED-GC-MS及Pyr-GC-MS热解分析法等现有的方法,均存在土壤有机质干扰等耗时或检测不准确的问题。未来可探索利用¹³C或¹⁴C同位素技术来研究可降解地膜的降解速率,以及其在土壤团聚体或有机无机复合物中的赋存情况。

4.2 展望

(1) 我国北方有大面积的长期塑料地膜覆盖的农田,这些田块中残留了大量的塑料残体和微塑料。然而,目前还没有一种可靠的塑料残留量的检测方法,特别是对微塑料的定量化。这极大地制约了全球或区域土壤塑料污染的评估和后续研究。应尽早完善或开发塑料残留量测定的技术与方法,制定出统一的塑料残留检测标准。

(2) 可降解地膜是一种土壤微生物可以利用的外源有机物料。但关于可降解地膜能否转化成土壤有机质,可降解地膜中的碳是否能进入土壤团聚体或形成有机无机复合物(赋存状况),目前尚不清楚。未来应加强土壤中可降解地膜的碳循环过程研究。

(3) 可降解地膜代替塑料地膜是未来必然的趋势。目前可降解地膜的利用仍然存在一定障碍,这与可降解地膜对土壤健康的长期影响仍不清楚有一定的关系。未来应该通过田间定位试验,开展可降解地膜覆盖对农田土壤健康长期影响的研究,为土地的可持续利用提供支撑。

参考文献:

- [1] THOMPSON R C, SWAN S H, MOORE C J, et al. Our plastic age[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009,364(1526):1973-1976.
- [2] JAMBECK J R, GEYER R, WILCOX C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean[J]. *Science*, 2015,347(6223):768-771.
- [3] RILLIG M C. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012,46(12):6453-6454.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] NIZZETTO L, FUTTER M, LANGAAS S. Are agricultural soils dumps for microplastics of urban origin? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(20):10777-10779.
- [7] 严昌荣,刘恩科,舒帆,等.我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. *农业资源与环境学报*, 2014,31(2):95-102.
- [8] DING F L, LU X T, et al. Opposite effects of nitrogen fertilization and plastic film mulching on crop N and P stoichiometry in a temperate agroecosystem [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2019,12(4):682-692.
- [9] KASIRAJAN S, NGOUAJIO M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012,32(2):501-529.
- [10] ZHANG F, ZHANG W, QI J, et al. A regional evaluation of plastic film mulching for improving crop yields on the Loess Plateau of China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018,248:458-468.
- [11] 国家统计局农村社会经济调查司. *中国农村统计年鉴* [M]. 北京:中国农业出版社, 2017.
- [12] CHAE Y, AN Y J. Current research trends on plastic pollution and ecological impacts on the soil ecosystem: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2018,240:387-395.
- [13] 赵岩,陈学庚,温浩军,等.农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2017,48(6):1-14.

- [14] 严昌荣,梅旭荣,何文清,等.农用地膜残留污染的现状与防治[J].农业工程学报,2006,22(11):269-272.
- [15] 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.
- [16] KERSHAW P,KATSUHIKO S,LEE S, et al. Plastic debris in the ocean[A].BECH S,GOVERSE T.UNEP Year Book 2011: Emerging issues in our global environment[Z].United Nations Environment Programme, 2011.
- [17] 严昌荣,王序俭,何文清,等.新疆石河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J].生态学报, 2008,28(7):3470-3474.
- [18] 马辉,梅旭荣,严昌荣,等.华北典型农区棉田土壤中地膜残留特点研究[J].农业环境科学学报, 2018,27(2):570-573.
- [19] 张丹,胡万里,刘宏斌,等.华北地区地膜残留及典型覆膜作物残膜系数[J].农业工程学报,2016,32(3):1-5.
- [20] HIDALAO-RUZ V, GUTOW L, THOMPSON R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J].Environmental Science & Technology, 2012,46(6):3060-3075.
- [21] WANG Z,TAYLOR S E,SHARMA P, et al.Poor extraction efficiencies of polystyrene nano- and microplastics from biosolids and soil[J]. PloS ONE,2018,13(11):e0208009.https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208009.
- [22] SCHEURER M,BIGALKE M.Microplastics in Swiss Flood-plain Soils[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(6):3591-3598.
- [23] LI J, SONG Y, CAI Y B. Focus topics on microplastics in soil: Analytical methods, occurrence, transport, and ecological risks[J]. Environmental Pollution,2019,257:113570.
- [24] HAN X X, LU X Q, VOGT R D. An optimized density-based approach for extracting microplastics from soil and sediment samples[J]. Environmental Pollution,2019,254:113009.https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113009
- [25] 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.
- [26] BLÄSING M, AMELUNG W. Plastics in soil: Analytical methods and possible sources [J].Science of the Total Environment,2018,612(C):422-435.
- [27] DEHAUT A,CASSONE A L,FRERE L, et al.Microplastics in seafood:benchmark protocol for their extraction and characterization, Environmental Pollution,2016,215:223-233.
- [28] HURLEY R R,LUSHER A L,OLSEN M, et al. Validation of a method for extracting microplastics from complex, organicerich, environmental matrices[J].Environmental Science & Technology,2018,52:7409-7417.
- [29] NUELLE M T,DEKIFF J H,REMY D, et al. A new analytical approach for monitoring microplastics in marine sediments [J].Environmental Pollution,2014,184:161-169.
- [30] WAMG W F,GE J,YU X Y, et al.Environmental fate and impacts of microplastics in soil ecosystems: Progress and perspective[J]. The Science of the Total Environment,2019 , 708:134841.
- [31] DABID J,STEINMETZ Z,KUCERIK J, et al. Quantitative analysis of poly (ethyleneterephthalate) microplastics in soil via thermogravimetry- mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry (Washington),2018,90:8793-8799.
- [32] 严昌荣,何文清,刘恩科,等.作物地膜覆盖安全期概念和估算方法探讨[J].农业工程学报,2015,31(9):1-4.
- [33] BARRAGAN D H, PELACHO A M, MARTIN-CLOSAS L. Degradation of agricultural biodegradable plastics in the soil under laboratory conditions[J]. Soil Research,2016,54(2): 216-224.
- [34] LI C, MOORE-KUCERA J, MILES C, et al.Degradation of potentially biodegradable plastic mulch films at three diverse U.S. locations[J].Agroecology and Sustainable Food Systems,2014,38(8):861-889.
- [35] RUDNIK E,BRIASSOULIS D.Comparative biodegradation in soil behaviour of two biodegradable polymers based on renewable resources [J]. Journal of Polymers and the Environment,2011,19(1):18-39.
- [36] WEN X, LU X.Microbial degradation of poly (3- Hydroxybutyrate-co-4-Hydroxybutyrate) in Soil[J]. Journal of Polymers and the Environment,2012,20(2):381-387.
- [37] BANDOPADHYAY S, MARTIN-CLOSAS L,PELACHO A M, et al.Biodegradable plastic mulch films: impacts on soil microbial communities and ecosystem functions[J]. Frontiers in Microbiology,2018,9:7.
- [38] MORENO M M, MORENO A.Effect of different biodegradable and polyethylene mulches on soil properties and production in a tomato crop[J]. Scientia Horticulturae,2008, 116(3):256-263.
- [39] ZUMSTEIN M T,SCHINTLMEISTER A,NELSON T F, et al. Biodegradation of synthetic polymers in soils: Tracking carbon into CO₂ and microbial biomass [J].Science Advances,2018,4:9024.
- [40] MAHMOUDI, N,FULTHORPE R R,BURNS L, et al.Assessing microbial carbon sources and potential PAH degradation using natural abundance ¹⁴C analysis [J].Environmental Pollution,2013,175:125-130.
- [41] TURNBULL J C, LEHMAN S J,MILLER J B, et al. A new high precision ¹⁴CO₂ time series for North American continental air[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007,112(D):11310.

- [42] VANDERVOORT T S, HAGEDORN F, MCINTYRE C, et al. Variability in ^{14}C contents of soil organic matter at the plot and regional scale across climatic and geologic gradients[J]. *Biogeosciences*,2016,13:3427-3439.
- [43] AHAD J M E, BURNS L, MANCINI S, et al. Assessing microbial uptake of petroleum hydrocarbons in groundwater systems using natural abundance radiocarbon[J]. *Environmental Science & Technology*,2010,44:5092-5097.
- [44] COWIE B R, GREENBERG B M, SLATER G F. Determination of microbial carbon sources and cycling during remediation of petroleum hydrocarbon impacted soil using natural abundance ^{14}C analysis of PLFA[J]. *Environmental Science & Technology*,2010,44:2322-2327.
- [45] XU Y D, DING F, GAO X D, et al. Mineralization of plant residues and native soil carbon as affected by soil fertility and residue type[J]. *Journal of Soils and Sediments*,2019,19(3):1407-1415.
- [46] DORAN J, PARKIN T. Defining and assessing soil quality[J]. *SSSA Special Publication*,1994,35:3-21.
- [47] PANKHURST C, HAWKE B, MCDONALD H. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health[J]. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1995,35:1015-1028.
- [48] MOEBIUS-CLUNE B N, MOEBIUS-CLUNE D J, GUGINO B K, et al. Comprehensive Assessment of Soil Health-The Cornell Framework[D]. Geneva: Cornell University, 2016.
- [49] 汪军, 杨杉, 陈刚才, 等. 我国设施农业农膜使用的环境问题刍议[J]. *土壤*,2016,48(5):863-867
- [50] CAO D, WANG X, LUO X, et al. Effects of polystyrene microplastics on the fitness of earthworms in an agricultural soil[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*: IOP Publishing, 2017.
- [51] RILLIG M C, BONKOWSKI M. Microplastic and soil protists: A call for research[J]. *Environment Pollution*,2018, 241:1128-31.
- [52] 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.
- [53] ZHANG L, SINTIM H Y, BARY A I, et al. Interaction of *Lumbricus terrestris* with macroscopic polyethylene and biodegradable plastic mulch[J]. *Science of The Total Environment*,2018,635:1600-1608.
- [54] MAAß S, DAPHI D, LEHMANN A, et al. Transport of microplastics by two collembolan species[J]. *Environmental Pollution*,2017,225:456-459.
- [55] RILLIG M C, ZIERSCH L, HEMPEL S. Microplastic transport in soil by earthworms[J]. *Scientific Reports*,2017,7:1362.
- [56] LI C, MOORE-KUCERA J, LEE J, et al. Effects of biodegradable mulch on soil quality[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014,79:59-69.
- [57] SINTIM H Y, BANDOPADHYAY S, ENGLISH M E, et al. Impacts of biodegradable plastic mulches on soil health[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,2019,273:36-49.

责任编辑: 周安刚
英文校对: 王芬