

曾浩宇, 李嘉兴, 刘世杰, 等. 不同类型地膜对土壤碳、氮、磷的影响[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(3): 124–133. Zeng Haoyu, Li Jiaxing, Liu Shijie, et al. Effects of different material types of mulching film on soil carbon, nitrogen and phosphorus[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(3): 124–133.

不同类型地膜对土壤碳、氮、磷的影响

曾浩宇^{1,2}, 李嘉兴^{1,2}, 刘世杰^{1,2}, 焦蒙^{1,2}, 杨娟^{1,2*}

(1. 云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 西南林业大学生态与环境学院(湿地学院), 云南 昆明 650224;
2. 国家高原湿地研究中心, 西南林业大学生态与环境学院(湿地学院), 云南 昆明 650224)

摘要: 为了探究不同类型地膜残留于土壤中的碎片对土壤大量元素以及微量元素的影响, 该文以聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)、聚乳酸(PLA)全生物降解地膜和聚乙烯(PE)地膜为研究对象, 探究不同地膜表面形貌变化、地膜残留对土壤大量元素碳、氮、磷和钾以及微量元素铁、铜、锌、钙、镁含量的影响。结果表明: (1) PBAT、PBAT+PLA两种生物降解地膜碎片在实验末期时表面已呈现分裂特征, 而PE地膜并未呈现。(2) 从实验初期至实验末期PBAT白色地膜和PBAT+PLA黑色地膜的土壤TOC、DOC含量分别增加78.1%、84.6%和182.7%、197.2%, 均高于PE地膜。(3) 添加生物降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片后的土壤溶解性有机质的荧光性(FDOM)和有色性(CDOM)均有提高, 但PE地膜处理与CK组无差异。(4) 添加了生物降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE地膜碎片处理土壤中的速效磷(AP)增加了约8倍, 速效氮(AN)增加了约1.3倍, 总氮(TN)增加了约2.5倍, 钾增加了约1.2倍, 铁增加了约1.2倍, 铜增加了约1.5倍, 锌增加了约1.1倍, 钙增加了约2.4倍, 镁增加了约1.9倍, 但PE地膜组与CK无差异, 数据表明可降解生物地膜的使用增加了土壤养分的含量, 而普通PE地膜的残留对土壤养分无明显影响。土壤营养元素对生物降解地膜的使用响应更加积极, 并且提高了土壤有机质含量, 而普通PE地膜对土壤营养元素无显著影响。

关键词: 生物降解地膜; 溶解性有机碳; 土壤养分; 聚乙烯地膜; 地膜形貌变化

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.1750.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2025)03-0124-10

Effects of Different Material Types of Mulching Film on Soil Carbon, Nitrogen and Phosphorus

ZENG Haoyu^{1,2}, LI Jiaxing^{1,2}, LIU Shijie^{1,2}, JIAO Meng^{1,2}, YANG Juan^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Highland Wetland Conservation and Restoration and Ecological Services in Yunnan Province, School of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. National Highland Wetland Research Center, School of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: This study aims to investigate the impact of various mulch film residues on the concentrations of major and trace elements in soil, focusing on poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), polylactic acid (PLA) biodegradable mulch films, and polyethylene (PE) mulch films. The research examined changes in surface morphology and the impact of film residues on the concentrations of soil carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), and trace elements iron (Fe), copper (Cu), zinc (Zn), calcium (Ca), and magnesium (Mg). The findings indicate that by the end of the experiment, PBAT and PBAT+PLA biodegradable mulch fragments exhibited splitting characteristics, while PE mulch remained intact. From the start to the end of the experiment, the total organic carbon (TOC) and dissolved organic carbon (DOC) content soils treated with the PBAT and PBAT+PLA films increased by 78.1% and 84.6%; 182.7% and 197.2%, respectively, both significantly higher than the increases seen in soils treated with PE films. The addition of biodegradable mulch films (PBAT and PBAT+PLA) also led to higher levels of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) and colored dissolved organic matter (CDOM), whereas no such increase was observed in soils treated with PE films, compared to the control (CK) group. Soils treated with biodegradable mulch fragments (PBAT and PBAT+PLA) experienced an approximate 8-fold increase in available phosphorus (AP),

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://hjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjksyjs@vip.126.com

收稿日期: 2024-10-15; 修回 2024-12-04

基金项目: 云南省科技厅重点研发计划项目(202203AC100001); 国家自然科学基金项目(22166033); 云南省农业联合面上项目(202101BD070001-112); 兴滇人才项目

作者简介: 曾浩宇(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新型有机污染物的环境行为, (电子信箱) zenghaoyu0119@163.com; *通讯作者, (电子信箱) kittyangjuan@swfu.edu.cn。

1.3-fold increase in available nitrogen (AN), 2.5-fold increase in total nitrogen (TN), 1.2-fold increase in potassium, 1.2-fold increase in iron, 1.5-fold increase in copper, 1.1-fold increase in zinc, 2.4-fold increase in calcium, and 1.9-fold increase in magnesium. In contrast, soils treated with PE film fragments showed no significant difference from the CK group. These results demonstrate that biodegradable mulch use significantly increased soil nutrient levels, while PE mulch residues have no noticeable effect on soil nutrient content. The response of soil nutrient elements to the application of biodegradable film was more positive, leading to an increase in soil organic matter. In contrast, the use of common PE film did not have a significant impact on soil nutrient elements.

Key words: biodegradable plastic film; soluble organic carbon; soil nutrient; polyethylene film; film morphology changes

塑料地膜因其低廉的造价和良好的农用性能,被广泛应用于各领域^[1]。研究表明,中国塑料地膜的使用量与覆盖面积位居世界首位^[2],国内约有2 500万hm²的耕地使用塑料地膜,占全球地膜使用量的60%~80%^[3]。

塑料地膜的覆盖可以促进农作物生长从而提高作物产量,同时地膜覆盖可以改善农作物周围的小气候,并促进早期肥料的转化^[4]。常用的覆盖地膜材料是聚乙烯(PE)。但聚乙烯是不可生物降解的材料,随着使用时间的推移,其碎片在农业土壤中因不能完全回收而不断累积在土壤环境中,这对土壤环境产生许多负面的影响^[3,5]。聚乙烯材料中含有大量的人工合成的有机化合物——邻苯二甲酸酯(PAEs),这种化合物可以提高塑料的延展性和可塑性,目前广泛应用于塑料地膜生产^[6]。2015年全球塑料产量超过1.5亿t,全球的邻苯二甲酸酯的年使用量约为800万t^[7]。塑料薄膜在农用地中被广泛使用,也导致了土壤和作物中PAEs的积累,同时在土壤中PAEs对植物和人体都会造成伤害^[8]。随着全球的环保意识提升,出现了一种生物降解膜可以被土壤微生物分解且不会造成土壤环境污染,可以取代传统的聚乙烯类不可生物降解的地膜^[9],如聚己二酸丁二酯/对苯二甲酸丁二酯(PBAT)、聚乳酸(PLA)等^[10],其中的PBAT是由丁二醇(BDO)、己二酸(AA)和对苯二甲酸(TPA)制成^[11],并且具有良好的性能和生物降解性,已广泛应用在农业领域^[12]。由于土壤微生物会将生物降解膜分解成对土壤环境无害的二氧化碳和水,生物降解地膜在破碎后容易分解进入土壤环境中^[13],同时在保持土壤温度、土壤水分以及控制杂草方面与传统聚乙烯地膜具

有相同的性能^[14]。这类降解地膜也有效减少了地膜的二次污染以及农业上的二次管理成本^[15],并且能有效增加土壤有机碳从而使土壤微生物丰度和活性受到影响。

现有研究表明,长期使用生物降解地膜可以降低土壤容重,提高土壤全氮、有效磷和有效钾含量,进而改善土壤环境质量^[16],生物降解地膜的分解成为了土壤有机碳的来源^[13]。因此本研究选择3种不同材料的地膜进行降解实验,揭示不同材料的地膜碎片残留对土壤营养元素含量的影响规律,为农业地膜的使用选择以及不同种类地膜对土壤营养元素的影响提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究地概况与材料

本实验选用中国西南地区云南省昆明市林地的红壤开展研究,该土壤呈弱酸性,且未有任何地膜使用的历史。实验地点选在高原区域——中国云南昆明市,地处东经102°10′~103°40′和北纬24°23′~26°22′。属于亚热带高原季风气候,昼夜温差大,年降雨量为530.4 mm,年平均气温14.5°。

在实验过程中,本文采用了3种不同成分的地膜,地膜材料分别是PE(聚乙烯)塑料地膜、PBAT(聚己二酸和对苯二甲酸丁二醇酯的共聚物)生物降解地膜以及PBAT+PLA(聚乳酸)生物降解地膜。地膜均剪裁为5 cm×5 cm大小的碎片,以确保实验条件的一致性和准确性。实验所用地膜均购自上海阿拉丁(aladdin)试剂有限公司。地膜基本信息见表1。

表1 不同地膜基本信息
Table 1 Basic information of different mulch films

材料	主要成分	颜色	膜厚/mm	膜宽/cm
PE	聚乙烯	白、黑	0.01	5×5
PBAT	聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯	白	0.01	5×5
PBAT+PLA	聚己二酸/对苯二甲酸丁二酯+聚乳酸	白、黑、绿、棕、银黑、透明	0.01	5×5

1.2 试验设计

本研究中,实验的不同类型地膜与不同处理设置

如下:共使用了3种类型地膜,总计9个地膜样本,分别为PE材质(黑色、白色)、PBAT材质(白色),以及

PLA+PBAT复合材质(黑色、白色、透明、绿色、棕色、银黑色)。实验过程采用模拟方式,即将地膜剪裁成5 cm×5 cm大小的碎片,并混合至土壤中。为确保实验结果的可靠性,每种地膜设置3个平行样本。实验自2023年7月1日起正式开展,为期4个月。期间分别在7月1日、8月1日、9月1日、10月1日采集土壤样品,并进行风干保存以供分析使用。

1.3 土壤采集处理与测定方法

使用非扰动土壤采样器采集土壤样品后,将其置于室温环境下进行自然风干。随后将风干后的土壤样品分别通过2 mm和1 mm的筛网进行筛分以获得2个不同粒径范围的样品并进行后续的土壤各指标分析。在分析过程中,称取2 g土壤样品,加入20 mL蒸馏水,放入50 mL离心管中。将离心管置于多功能振荡筛上,以150 r/min的转速运行24 h,使土壤样品与蒸馏水充分混合。随后将离心管置于离心机中,以3 500 r/min的转速离心10 min,以分离土壤悬浮液中的固体颗粒。离心后,通过水系0.45 μm滤器对土壤悬浮液进行过滤,以去除残余的固体颗粒。最终将过滤后的土壤溶液保存在4℃环境下,以备后续分析使用。为确保分析结果的准确性和可靠性,所有测定样品,包括对照样品(CK),均进行了3个重复测定,且所有样品均经过同等处理。土壤总有机碳(TOC)采用重铬酸钾氧化-外加热法进行测定,而土壤碱解氮(AN)和有效磷(AP)则分别采用碱解扩散法和比色法进行测定。此外,溶解性有机碳(DOC)和总氮(TN)则采用TOC总有机碳分析仪进行测定。

1.4 薄膜的表征

在实验初期(7月)及实验末期(10月),薄膜样品均从土壤中取出,为确保样品的纯净度,采用超纯水进行冲洗,并施以超声处理10 min,以彻底清除表面附着的土壤颗粒。随后,样品在室温条件下静置12 h,使其自然干燥。干燥完成后,利用定性滤纸对样品进行包裹,并存放于样品袋中,以便后续分析。采用扫描电镜(SEM)表征技术进一步测定了薄膜在力学性能及微观结构等方面可能产生的变化,以全面评估其表面变化。

1.5 统计分析

全文使用SPSS 20.0对相关数据进行差异性T检验(T-test)、相关性分析及主成分分析。所有的图形均使用Origin PRO 2021和Excel 2022制作。

2 结果

2.1 不同类型地膜的表面形态变化

利用扫描电镜(SEM)表征技术,对实验初期(7

月)的地膜以及实验末期(10月)3种地膜的形貌特征的变化进行表征。如图1所示,PE地膜在暴露的4个月内,形貌特征基本保持不变(图1(a)~(d));而可生物降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)的表面出现了不同程度的裂纹和凹坑(图1(e)~(p))。生物降解地膜在暴露之初的1个月内不同材料以及颜色的可降解地膜均保持了相对完整的外观,但随着时间的延长(暴露4个月),它们先后都出现了不同程度的裂纹和凹坑,以PBAT+PLA地膜表现得最为突出。PBAT和PBAT+PLA生物降解地膜比PE膜的稳定性差,更容易降解。以上结果表明PBAT与PBAT+PLA生物降解地膜比聚乙烯(PE)地膜表现出更高的降解水平。这与前人的研究结果一致^[17]。生物降解地膜表面的非均质性会随着地膜的降解而增强;而非均质性增强,则地膜化学结构的杂合性明显,而杂合性能够进一步诱导地膜碳链的降解,从而加剧PBAT、PBAT+PLA地膜的骨架结构开裂,这可能是可降解地膜形貌特征出现变化的原因。

2.2 土壤中总有机碳和溶解态有机碳含量的变化

土壤中添加了不同类型地膜碎片后总有机碳(TOC)和溶解态有机碳(DOC)含量的变化如图2所示。未添加地膜碎片处理(CK)的土壤中,TOC、DOC分别为3.4 mg/kg、1.32 mg/L;PE白色地膜碎片混合处理的TOC、DOC分别为3.9 mg/kg、1.75 mg/L;PBAT白色地膜碎片混合处理的TOC、DOC分别为6.8 mg/kg、3.01 mg/L;PBAT+PLA黑色地膜碎片混合处理的TOC、DOC分别为8.85 mg/kg、4.58 mg/L。从结果可知,投放了可降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE处理中的TOC和DOC分别增加了约1倍,PBAT+PLA生物降解地膜碎片混合处理的TOC和DOC的值最高。

生物可降解深色地膜(PBAT+PLA)比浅色地膜对TOC、DOC影响含量更高(图2),数据显示碎片混合处理的3种地膜与CK组的TOC、DOC实验末期含量按从高到底顺序为CK<PE<PBAT<PBAT+PLA;实验初期(7月)与实验末期(10月)碎片混合处理生物降解地膜TOC、DOC涨幅分别为PBAT白色:TOC 78.1%、DOC 84.6%;PBAT+PLA黑色:TOC 182.7%、DOC 197.2%。颜色深的生物降解地膜含量比颜色浅的地膜高。研究数据表明,PE组地膜与CK组对土壤TOC、DOC的影响不显著或PE地膜的碎片混合进入土壤降低了土壤碳的含量可能是因为CO₂的矿化,说明PE地膜的投放混合抑制了土壤碳的累积与增加^[18]。

2.3 不同类型地膜的添加对土壤荧光性、有色性值的影响

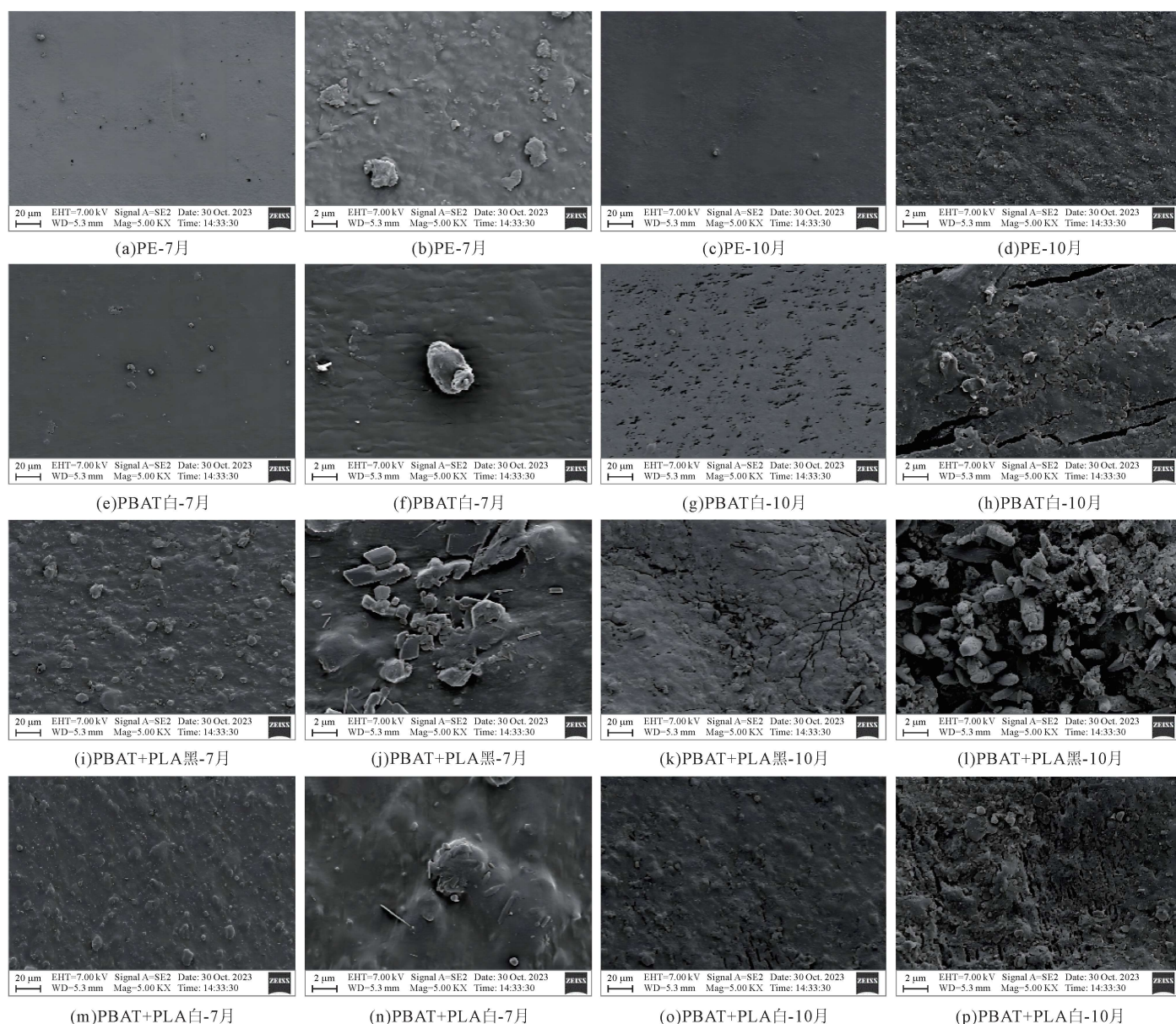
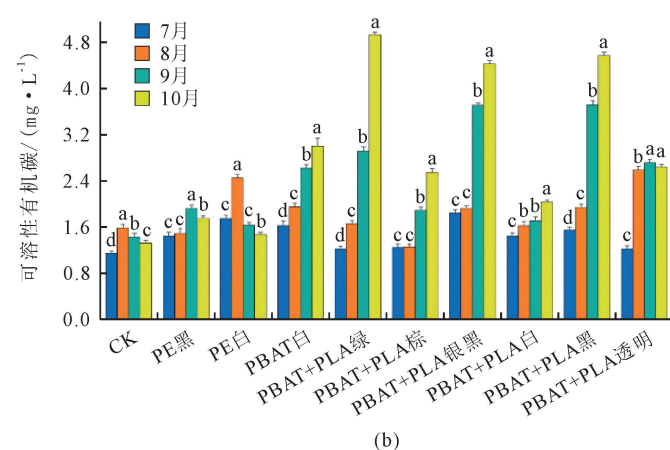
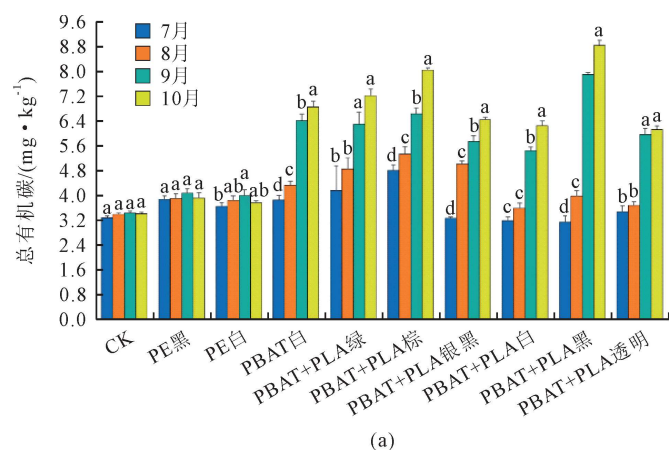


图1 3种不同地膜类型的扫描电镜(SEM)的剪碎混合处理第1个月与第4个月的结果
Fig.1 Scanning electron microscopy (SEM) of three different types of plastic film for the first and fourth month results

为探究不同类型地膜剪碎混合至土壤后对土壤中溶解态有机碳中的有色以及荧光部分的影响,利用荧光光谱分析,激发-发射矩阵(EEMs)的测量数

据,对荧光性(FDOM)、有色性(CDOM)值进行计算。如图3所示,土壤DOM中的FDOM以及CDOM值在CK组4个月中变化无明显差异,PE白色、黑色



注: 误差条代表标准误差; 柱状图上的不同字母表示差异显著, $P < 0.05$ 。下同。

图2 不同地膜对土壤总有机碳、可溶性有机碳含量的影响

Fig.2 Changes in total organic carbon (TOC) and soluble organic carbon (DOC) contents of soil affected by different mulching films

地膜的 FDOM 值无明显差异而 CDOM 发生了降低, CDOM 值在投放了地膜碎片的第 1 个月时 PE 白色地膜 6.21、PE 黑色地膜 6.47, PE 地膜组在地膜碎片混合处理第 4 个月时降低至 PE 白色地膜 6.00、PE 黑色地膜 6.04, PBAT 白色地膜 FDOM 值增加 0.2, CDOM 值增加 4.36, PBAT+PLA 黑色地膜增加最高, FDOM 值增加 0.6, CDOM 值增加 4.94, 其他颜色 PBAT+PLA 地膜的 FDOM、CDOM 值同时也均有提高。说明深

色全生物降解地膜的使用增加了土壤 DOM 中荧光部分的含量且比浅色全生物降解地膜影响更大, 各个不同地膜碎片的投放下对其影响的变化规律是 PBAT+PLA 深色地膜>PBAT+PLA 浅色地膜>PBAT 地膜>PE 组和 CK 组, 数据显示 PE 组和 CK 组的 CDOM 以及 FDOM 的差异不显著, 表明土壤 DOM 并未受到影响, 而 PBAT 以及 PBAT+PLA 组均有所升高(图 3)。

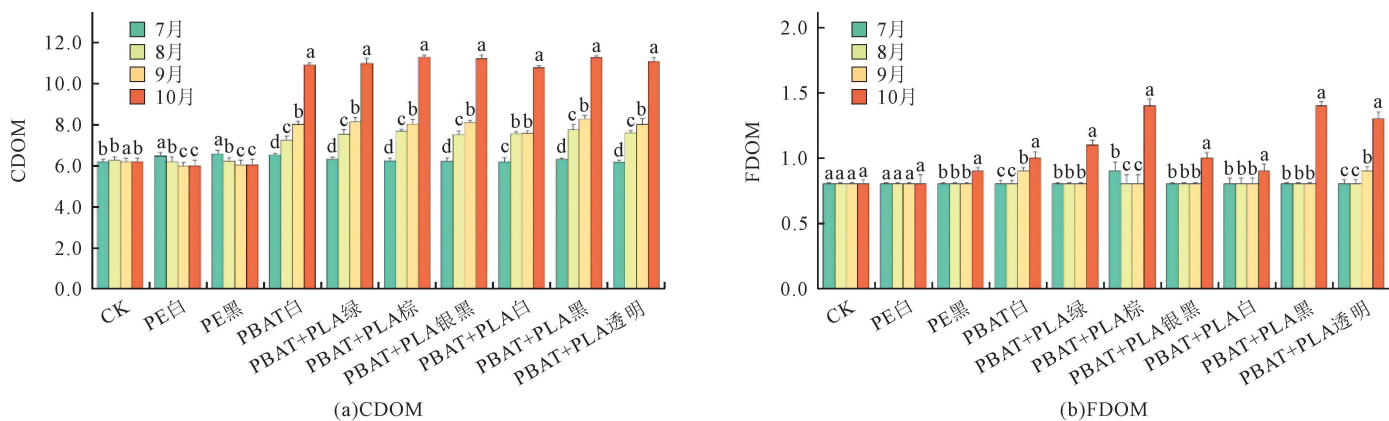


图3 添加不同地膜碎片后实验初期至实验末期的CDOM、FDOM值
Fig.3 The color (CDOM) and fluorescence (FDOM) values from the beginning of the experiment to the end of the experiment after adding different plastic film fragments

2.4 不同类型地膜碎片的添加对土壤中元素含量的影响

2.4.1 不同类型地膜碎片的添加对土壤中碳、氮、磷含量的影响

对于添加不同类型地膜碎片混合进土壤后速效磷(AP)、速效氮(AN)和总氮(TN)含量的变化。如图4、图5所示,在实验末期(10月)未投放任何地膜碎片处理(CK)的土壤中,AP、AN和TN分别为0.145 mg/kg、100.57 mg/kg、344.1 $\mu\text{g/L}$, PE白色地膜碎片混合处理的AP、AN和TN分别为0.138 mg/kg、105.11 mg/kg、357 $\mu\text{g/L}$, PBAT白色地膜碎片混合处理的AP、AN和TN分别为0.747 mg/kg、130.64 mg/kg、690 $\mu\text{g/L}$, PBAT+PLA黑色地膜碎片混合处理的AP、AN和TN分别为0.956 mg/kg、149.92 mg/kg、895 $\mu\text{g/L}$ 。从结果可知,投放了可降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE处理中的速效磷(AP)增加了约8倍,速效氮(AN)增加了约1.3倍,总氮(TN)增加了约2.5倍。

PBAT+PLA深色地膜(黑色、棕色)处理的AP、AN和TN的值最高。如图4、图5所示深色的生物可降解地膜碎片比浅色生物可降解地膜对AP、AN和TN影响含量更高,数据显示添加了不同类型地膜碎片的各处理与CK处理的AP、AN和TN的实验末期(10月)的含量从低到高为CK<PE<PBAT<PBAT+PLA;实验初期(7月)至实验末期(10月)添加生物降解地膜碎片土壤

中的AP、AN和TN涨幅变化分别提高幅度如下:PBAT白色:速效磷274.6%、速效氮19%、总氮85.9%,PBAT+PLA黑色:速效磷503.7%、速效氮45.9%、总氮125.4%。颜色深的生物降解地膜含量比颜色浅的地膜高。由图4、图5可以看出,在实验末期(10月)PBAT和PLA+PBAT处理的AP、AN和TN含量分别比空白对照和PE地膜处理明显增高。PE地膜组与CK组在实验初期与实验末期的含量差异并不显著,而全生物降解地膜(PBAT和PLA+PBAT)则有提高并且AP、AN和TN的含量提高成正比,全生物降解地膜碎片的添加使土壤AP、AN和TN含量在整个培养过程中逐渐增加,并在实验末期(10月)达到最大值。

2.4.2 不同类型地膜碎片的添加对土壤中钾、铁、铜、锌、钙、镁含量的影响

对于添加不同类型地膜碎片混合进土壤后钾、铁、铜、锌、钙、镁含量的变化。如图6所示,在实验末期(10月)未投放任何地膜碎片处理(CK)的土壤中钾、铁、铜、锌、钙、镁分别为36.339 1、15.141、0.179、0.483、3.071、1.822 mg/L, PE白色地膜碎片混合处理的土壤中钾、铁、铜、锌、钙、镁分别为36.035 7、15.369、0.184、0.487、3.082、1.782 mg/L, PBAT白色地膜碎片混合处理的土壤中钾、铁、铜、锌、钙、镁分别为40.3127、17.383、0.236、0.526、6.959、2.521 mg/L, PBAT+PLA黑色地膜碎片混合处理的土壤中钾、铁、铜、锌、钙、镁分别为46.337 2、19.376、0.272、0.579、

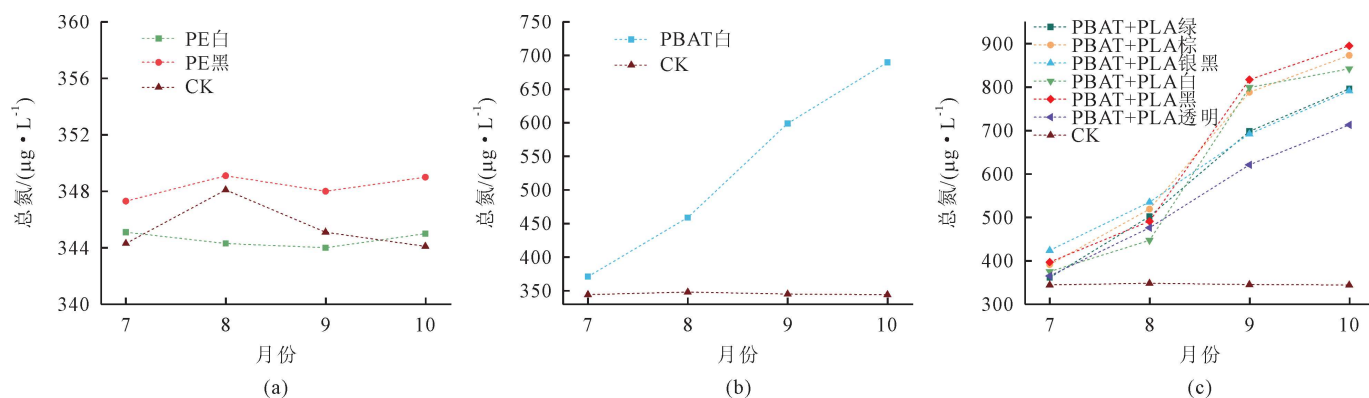


图4 实验初期(7月)至实验末期(10月)不同材料投放下9种投放地膜的土壤总氮(TN)值的变化
Fig.4 The change of soil total nitrogen (TN) value under different materials from the initial stage (July) to the end of the experiment (October)

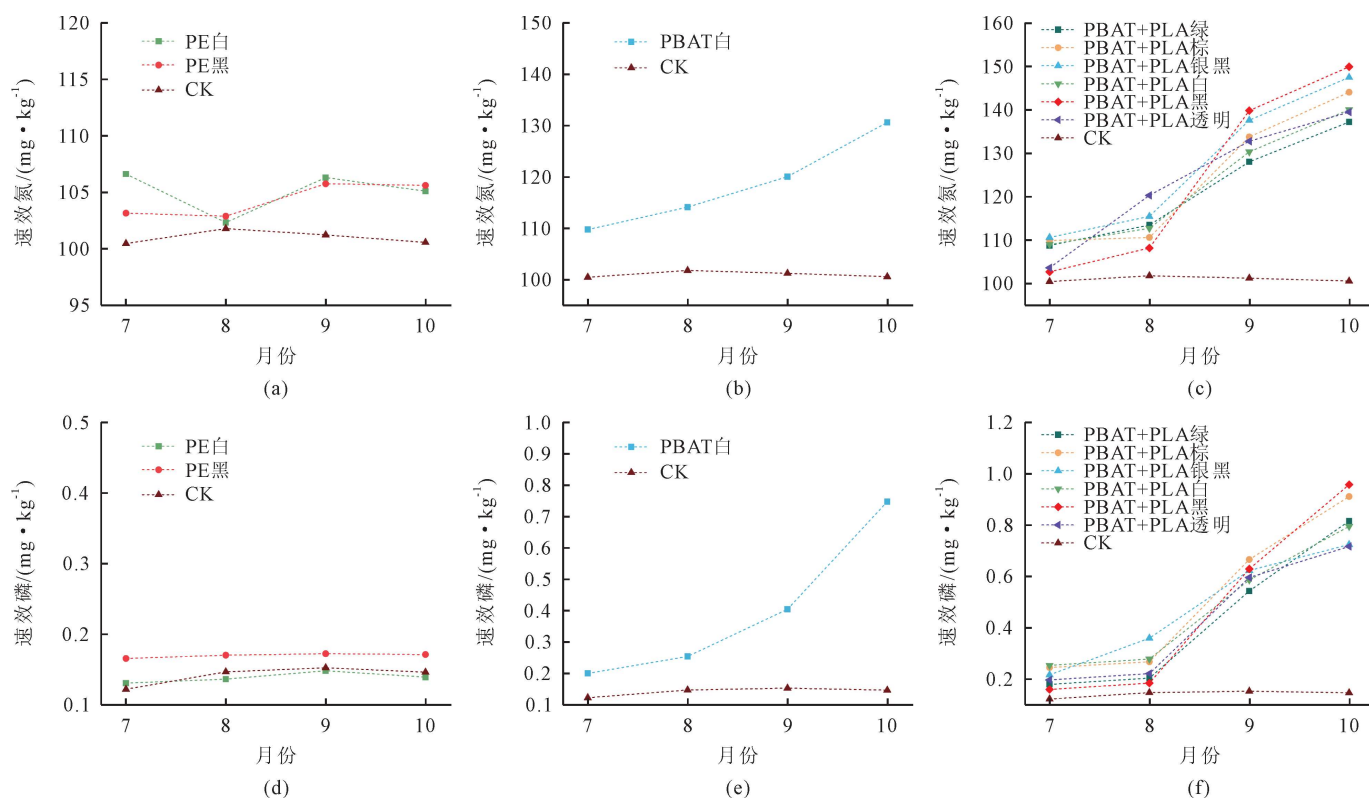


图5 实验初期(7月)至实验末期(10月)不同材料投放下9种投放地膜的土壤速效氮和速效磷值的变化
Fig.5 Changes of soil available nitrogen (AN) and available phosphorus (AP) values of 9 kinds of mulching film with different materials from the initial stage of the experiment (July) to the end of the experiment (October)

7.479、3.641 mg/L。从结果可知,投放了可降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE处理中的钾增加约1.2倍,铁增加约1.2倍,铜增加约1.5倍,锌增加约1.1倍,钙增加约2.4倍,镁增加约1.9倍。

PBAT+PLA深色地膜(黑色、棕色)处理的钾、铁、铜、锌、钙、镁的值最高。如图6所示,生物可降解深色地膜碎片的添加比浅色地膜对土壤微量元素的含量影响更高,数据显示添加了不同类型地膜碎片的各处理与CK处理的钾、铁、铜、锌、钙、镁的实验末期(10月)的含量从低到高为CK<PE<PBAT<PBAT+PLA;实验初期(7月)至实验末期(10月)添加了生物降解地膜碎片土壤中的钾、铁、铜、锌、钙、镁涨幅变化如下:

PBAT白色:钾11.5%、铁10.9%、铜35.6%、锌11.4%、钙124.5%、镁40.9%,PBAT+PLA黑色:钾27.8%、铁23.6%、铜54.5%、锌31.8%、钙148.6%、镁112%。数据表明颜色深的生物降解地膜含量比颜色浅的地膜高,由图6可以看出,在实验末期(10月)PBAT和PLA+PBAT处理的钾、铁、铜、锌、钙和镁含量分别比空白对照和PE地膜处理明显增高。PE地膜组与CK组在实验初期与实验末期的含量差异并不显著,而全生物降解地膜(PBAT和PLA+PBAT)则有提高,并且与钾、铁、铜、锌、钙和镁的含量提高成正比,全生物降解地膜碎片的添加使土壤钾、铁、铜、锌、钙和镁含量在整个培养过程中逐渐增加,并在实验末期(10月)达到最大值。

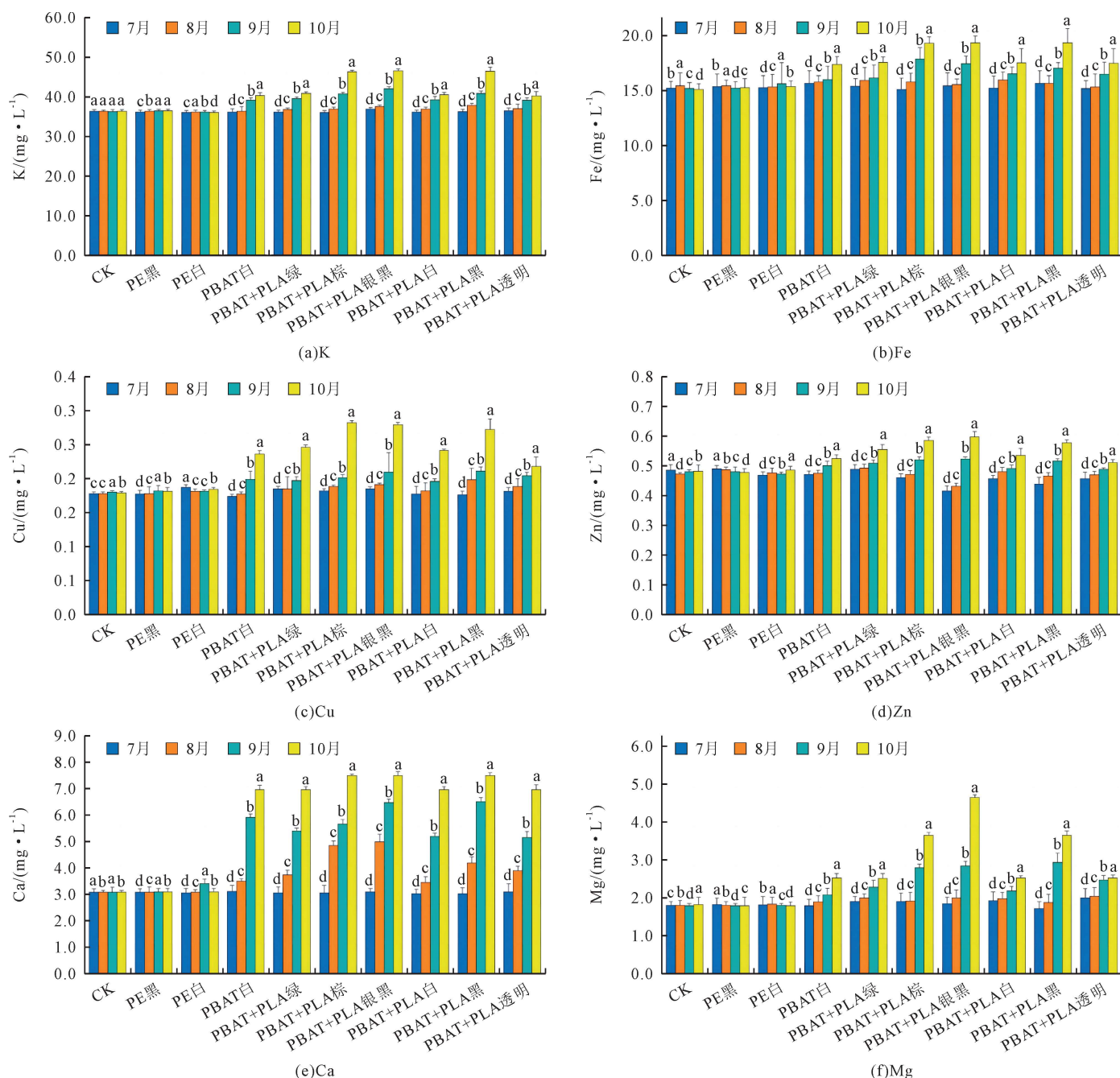


图6 实验初期(7月)至实验末期(10月)9种投放地膜的土壤钾、铁、铜、锌、钙、镁含量的变化
Fig.6 The contents of K, Fe, Cu, Zn, Ca and Mg in the soil of 9 kinds of mulching from the initial stage of the experiment (July) to the end of the experiment (October)

2.5 不同类型地膜剪碎混合至土壤中碳、氮、磷参数的相关性分析

由结果可知(图7),PE地膜组和CK组对TOC、DOC、AP、AN、TN以及FDOM、CDOM相关性并不显著或无相关性,但全生物降解地膜碎片(PBAT、PBAT+PLA)混合处理对土壤中TOC、DOC、AP、AN和TN以及FDOM、CDOM的影响呈显著正相关。土壤营养大量元素AP、AN和TN与土壤微量元素K、Fe、Cu、Zn、Ca、Mg的变化协同增加,TOC与DOC的变化同样具有显著相关性。深色(黑色、棕色)全生物降解地膜碎片对土壤营养元素的影响比浅色生物降解地膜和PE地膜以及CK组对土壤营养元素以及各指标的相关性影响更大。

3 讨论

3.1 总有机碳与可溶性有机碳对不同地膜剪碎混合至土壤的响应

研究发现TOC与DOC受全生物降解地膜(PBAT、PBAT+PLA)碎片的添加而使含量提高,可能是全生物降解地膜的分解致使有机质进入到土壤中从而产生影响且塑料地膜为高碳聚合物^[19],这与前人的研究结果一致^[20,21]。PE地膜组地膜对DOC的含量有降低的情况和前人的研究结果一致^[22]。由于增加的DOC可能来自全生物降解地膜的分解,与土壤中的原本DOC相比,全生物降解地膜的分解可能具有不同的有机分子来提供碳源,会导致土壤中微生物群落的

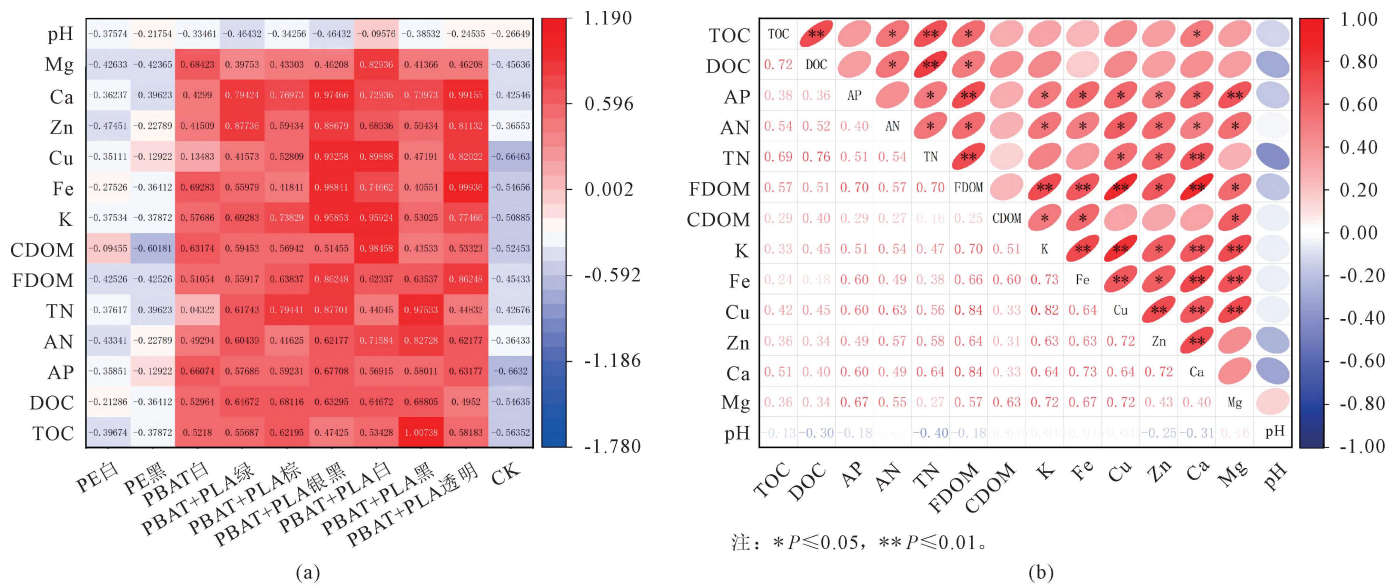


图7 不同类型地膜与大量元素以及微量元素、pH和FDOM、CDOM指标的相关性以及指标与指标的相关性图
Fig.7 Correlation diagrams of different types of mulching films with major elements, trace elements, pH, FDOM, and CDOM indicators, as well as the correlation diagrams among the indicators

变化^[23],但传统的PE塑料地膜则对土壤中的碳没有影响。

有研究表明PBAT和PLA可以水解形成水溶性低分子量低聚物,可以直接增加土壤活性碳的含量^[24, 25]。且有研究指出PBAT等生物降解地膜的使用使得羰基吸收峰相对变宽、增强,推测PBAT、PLA等全生物降解地膜的酯键断裂生成了羰基,且PE地膜的主成分为聚乙烯,而PE地膜投放过程中特征峰均未发生改变,证明其结构也未改变,这与扫描电镜结果一致^[26]。全生物降解地膜在分解过程中,向土壤中释放各种小分子的含碳化合物可能会导致地膜混合土壤中碳含量的变化。土壤环境中碳的储存在调节土壤生产力和土壤健康方面起着非常重要的作用^[27],PBAT、PLA是一种富含C的可生物降解塑料,可以通过输入PBAT残基和降解产物来提高土壤碳含量^[28]。全生物降解地膜组PBAT和PLA+PBAT的分解也许会提高微生物的生物量与活性^[29]。

3.2 全生物降解地膜碎片添加后荧光性和有色性值的变化

研究结果表明PBAT、PLA的处理组对土壤荧光组成部分FDOM、CDOM的影响更大,这与前人研究结果相似^[30]。FDOM称为荧光溶解有机物质^[31],CDOM由腐殖质物质(腐殖酸、黄腐酸)、脂质、蛋白质和其他成分组成^[32],CDOM的组分有助于生物地球化学循环^[33]。FDOM也会来自土壤碎屑和不同的陆生腐殖质化合物^[34],说明FDOM的提高受到生物降解地膜(PBAT、PBAT+PLA)的影响。有研究表明陆地输入对FDOM动态有很大影响,原位微生物活动也可能造成这种影响。另一方面,与植物生物量增加相关的

FDOM峰值的增加也可能是通过微生物再加工间接导致的^[35],会影响土壤微生物群落结构。

3.3 速效磷、速效氮、总氮、钾、铁、铜、锌、钙和镁对不同类型地膜碎片混合至土壤中的响应

从数据结果可知,混合了可降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE处理中的速效磷增加了约8倍,速效氮增加了约1.3倍,总氮增加了约2.5倍,钾增加了约1.2倍,铁增加了约1.2倍,铜增加了约1.5倍,锌增加了约1.1倍,钙增加了约2.4倍,镁增加了约1.9倍;PBAT+PLA深色地膜(黑色、棕色)处理的速效磷、速效氮和总氮的值最高。数据显示添加不同地膜碎片混合处理与CK组的速效磷、速效氮、总氮、钾、铁、铜、锌、钙和镁等元素,实验末期含量按从低到高顺序为CK<PE<PBAT<PBAT+PLA。有研究表明不同生物降解地膜投入下氮和磷的输入和输出历程对土壤中氮和磷的影响几乎相同,土壤中氮和磷的变化基本协同这与前人研究一致^[36]。结合相关性分析结果,土壤氮以及全生物降解地膜的投放与AP、AN和TN呈正相关,表明氮的有效性与AP、AN和TN是协同增加的,此外,有研究表明土壤受到氮添加从而显著增加了土壤POC池。这种积极的影响以前在不同的生态系统中都有记录^[37, 38],且发现实验添加氮显著增加了MAOC池^[39]。表明全生物降解地膜(PBAT、PBAT+PLA)是替代传统聚乙烯地膜减轻土壤塑料地膜残留污染的有效途径之一。有研究表明土壤中氮的富集会刺激微生物的生物量,进而促进微生物的坏死量积累而提高土壤SOC^[40]。有研究发现,长期施用氮磷钾化肥可以增加土壤中微量元素的含量,土壤中氮磷钾的含量与土壤微量元素的含量协同

增加,这与实验数据表现一致^[41]。可降解地膜是天然聚合物,它主要包括由植物和生物质等可再生资源合成的塑料,如聚乳酸(PLA)^[42]。生物降解地膜的分解使土壤有机质及腐殖酸含量增加^[43]。腐殖质在土壤环境过程中起着非常重要的作用,不仅能调节全球碳和氮的循环^[44],还会提高土壤营养物质(主要为氮、磷、钾、镁、铁和锌)的有效性^[45]。在土壤中施用含有还原型氮的肥料可使土壤氮含量增加,如尿素,会使土壤中有效微量元素含量增加^[46],土壤氮与微量元素也是协同增加。

4 结论

(1)与PE地膜和CK组相比,全生物降解地膜(PBAT、PBAT+PLA)的分解速度更快且表面形态变化更加明显。

(2)投放混合了可降解地膜(PBAT和PBAT+PLA)碎片的土壤比CK和PE处理中的TOC、DOC分别增加了约1倍;PBAT+PLA处理的TOC和DOC的值最高。

(3)土壤DOM中的FDOM和CDOM值在CK组4个月变化无明显差异,PE白色、黑色地膜的FDOM值无明显差异而CDOM值降低,PBAT白色地膜FDOM和CDOM值增加,PBAT+PLA黑色地膜增加最高,PBAT+PLA黑色地膜的FDOM值增加0.6以及CDOM值增加4.94,其他颜色PBAT+PLA地膜的FDOM和CDOM值均有提高。

(4)添加全生物降解地膜(PBAT、PBAT+PLA)碎片的土壤中AP、AN、TN、K、Fe、Cu、Zn、Ca、Mg的含量协同增加,而CK组与PE地膜组含量无明显差异,说明PE地膜对土壤AP、AN、TN、K、Fe、Cu、Zn、Ca、Mg含量并无显著影响。

[参考文献]

- [1] Malinconico M. Soil Degradable Bioplastics for a Sustainable Modern Agriculture[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [2] Gu X B, Cai H J, Fang H, et al. Soil hydro-thermal characteristics, maize yield and water use efficiency as affected by different biodegradable film mulching patterns in a rain-fed semi-arid area of China[J]. Agricultural Water Management, 2021,245:106560.
- [3] Kijchavengkul T, Auras R, Rubino M, et al. Assessment of aliphatic-aromatic copolyester biodegradable mulch films. Part I: field study[J]. Chemosphere, 2008,71(5):942-953.
- [4] Liu E K, He W Q, Yan C R. 'White revolution' to 'white pollution'—agricultural plastic film mulch in China[J]. Environmental Research Letters, 2014,9(9):091001.
- [5] 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.
- [6] Benson R. Hazard to the developing male reproductive system from cumulative exposure to phthalate esters—dibutyl phthalate, diisobutyl phthalate, butylbenzyl phthalate, diethylhexyl phthalate, dipentyl phthalate, and diisononyl phthalate[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2009,53(2):90-101.
- [7] Net S, Sempéré R, Delmont A, et al. Occurrence, fate, behavior and ecotoxicological state of phthalates in different environmental matrices[J]. Environmental Science and Technology, 2015,49(7):4019-4035.
- [8] Sun Y Y, Li C, Zhang X X, et al. Effects of film mulching on the distribution of phthalate esters in wheat grains from dryland[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021,28(22):27844-27851.
- [9] Serrano-Ruiz H, Martín-Closas L, Pelacho A M. Biodegradable plastic mulches: impact on the agricultural biotic environment[J]. Science of the Total Environment, 2021,750:141228.
- [10] Sander M. Biodegradation of polymeric mulch films in agricultural soils: concepts, knowledge gaps, and future research directions[J]. Environmental Science and Technology, 2019,53(5):2304-2315.
- [11] Ferreira F V, Cividanes L S, Gouveia R F, et al. An overview on properties and applications of poly(butylene adipate-co-terephthalate)-PBAT based composites[J]. Polymer Engineering & Science, 2019,59(s2): E7-E15.
- [12] Shen M C, Song B, Zeng G M, et al. Are biodegradable plastics a promising solution to solve the global plastic pollution?[J]. Environmental Pollution, 2020,263(Pt A):114469.
- [13] Bandopadhyay S, Martín-Closas L, Pelacho A M, et al. Biodegradable plastic mulch films: impacts on soil microbial communities and ecosystem functions[J]. Frontiers in Microbiology, 2018,9:819.
- [14] Braunack M V, Johnston D B, Price J, et al. Soil temperature and soil water potential under thin oxodegradable plastic film impact on cotton crop establishment and yield[J]. Field Crops Research, 2015,184:91-103.
- [15] Brodhagen M, Peyron M, Miles C, et al. Biodegradable plastic agricultural mulches and key features of microbial degradation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015,99(3):1039-1056.
- [16] Zhang M M, Xue Y H, Jin T, et al. Effect of long-term biodegradable film mulch on soil physicochemical and microbial properties[J]. Toxics, 2022,10(3):129.
- [17] Gao X H, Xie D, Yang C. Effects of a PLA/PBAT biodegradable film mulch as a replacement of polyethylene film

- and their residues on crop and soil environment[J]. *Agricultural Water Management*, 2021,255:107053.
- [18] Liang C, Schimel J P, Jastrow J D. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage[J]. *Nature Microbiology*, 2017,2:17105.
- [19] Sun Y Z, Li X F, Li X M, et al. Deciphering the fingerprint of dissolved organic matter in the soil amended with biodegradable and conventional microplastics based on optical and molecular signatures[J]. *Environmental Science and Technology*, 2022,56(22):15746–15759.
- [20] Chen H P, Wang Y H, Sun X, et al. Mixing effect of polylactic acid microplastic and straw residue on soil property and ecological function[J]. *Chemosphere*, 2020,243:125271.
- [21] Wang Q L, Feng X Y, Liu Y Y, et al. Effects of microplastics and carbon nanotubes on soil geochemical properties and bacterial communities[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022,433:128826.
- [22] Hou J H, Xu X J, Yu H, et al. Comparing the long-term responses of soil microbial structures and diversities to polyethylene microplastics in different aggregate fractions[J]. *Environment International*, 2021,149:106398.
- [23] Li X M, Chen Q L, He C, et al. Organic carbon amendments affect the chemodiversity of soil dissolved organic matter and its associations with soil microbial communities[J]. *Environmental Science and Technology*, 2019,53(1):50–59.
- [24] Elsayy M A, Kim K H, Park J W, et al. Hydrolytic degradation of polylactic acid (PLA) and its composites[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017,79:1346–1352.
- [25] Gigli M, Negroni A, Soccio M, et al. Influence of chemical and architectural modifications on the enzymatic hydrolysis of poly(butylene succinate) [J]. *Green Chemistry*, 2012, 14 (10):2885.
- [26] 金安妮,余奋霞,王玉林,等. PBAT全生物降解地膜降解特征[J]. *环境科学*, 2025,46(1):551–559.
- Jin Anni, Yu Fenxia, Wang Yulin, et al. Degradation characteristics of PBAT full-biodegradable mulch[J]. *Environmental Sciences*, 2025,46(1):551–559.
- [27] Doetterl S, Stevens A, Six J, et al. Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate[J]. *Nature Geoscience*, 2015,8(10):780–783.
- [28] Chah C N, Banerjee A, Gadi V K, et al. A systematic review on bioplastic–soil interaction: exploring the effects of residual bioplastics on the soil geoenvironment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,851:158311.
- [29] Liu Y Q, Zhang W, Chen M, et al. Molecular insights into effects of PBAT microplastics on latosol microbial diversity and DOM chemodiversity[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,450:131076.
- [30] Lee Y K, Murphy K R, Hur J. Fluorescence signatures of dissolved organic matter leached from microplastics: polymers and additives[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020,54(19):11905–11914.
- [31] Blough N, Vecchio R. Chapter 10—chromophoric DOM in the coastal environment[J]. 2002,509–546.
- [32] Coble P G. Marine optical biogeochemistry: the chemistry of ocean color[J]. *Chemical Reviews*, 2007,107(2):402–418.
- [33] Kutser T, Pierson D C, Kallio K Y, et al. Mapping lake CDOM by satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,94(4):535–540.
- [34] McKnight D M, Boyer E W, Westerhoff P K, et al. Spectrofluorometric characterization of dissolved organic matter for indication of precursor organic material and aromaticity[J]. *Limnology and Oceanography*, 2001,46(1):38–48.
- [35] Sánchez-Pérez E D, Pujo-Pay M, Ortega-Retuerta E, et al. Mismatched dynamics of dissolved organic carbon and chromophoric dissolved organic matter in the coastal NW Mediterranean Sea[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 746:141190.
- [36] 姚志霞,周怀平,解文艳,等. 黄土旱塬24 a不同秸秆还田土壤碳、氮、磷和胞外酶计量特征[J]. *环境科学*, 2023,44(5): 2746–2755.
- Yao Zhixia, Zhou Huaiping, Xie Wenyan, et al. Effects of 24 years different straw return on soil carbon, nitrogen, phosphorus, and extracellular enzymatic stoichiometry in dryland of the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science*, 2023,44(5):2746–2755.
- [37] Chen J G, Xiao W, Zheng C Y, et al. Nitrogen addition has contrasting effects on particulate and mineral-associated soil organic carbon in a subtropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020,142:107708.
- [38] Tang B, Rocci K S, Lehmann A, et al. Nitrogen increases soil organic carbon accrual and alters its functionality[J]. *Global Change Biology*, 2023,29(7):1971–1983.
- [39] Ye C L, Chen D M, Hall S J, et al. Reconciling multiple impacts of nitrogen enrichment on soil carbon: plant, microbial and geochemical controls[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(8): 1162–1173.
- [40] Fan Y X, Yang L M, Zhong X J, et al. N addition increased microbial residual carbon by altering soil P availability and microbial composition in a subtropical *Castanopsis* forest[J]. *Geoderma*, 2020,375:114470.
- [41] Zhao S C, Qiu S J, He P. Changes of heavy metals in soil and wheat grain under long-term environmental impact and fertilization practices in North China[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2018,41(15):1970–1979.
- [42] Fan P, Yu H, Xi B D, et al. A review on the occurrence and influence of biodegradable microplastics in soil ecosystems: are biodegradable plastics substitute or threat[J]. *Environment International*, 2022,163:107244.