

目次

持久性、迁移性和潜在毒性化学品环境健康风险与控制研究现状及趋势分析	张少轩, 陈安娜, 陈成康, 景侨楠, 刘建国 (3017)
我国厨余垃圾资源化技术的多维绩效评价	杨光, 史波芬, 周传斌 (3024)
基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络	乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方 (3034)
城市空间格局与热环境响应关系:以合肥市为例	陈媛媛, 姚侠妹, 偶春, 张清怡, 姚晓洁 (3043)
天津市“十三五”期间 PM _{2.5} 减排效果评估	肖致美, 徐虹, 蔡子颖, 张裕芬, 刘茂辉, 孙猛, 李鹏, 杨宁, 戴运峰 (3054)
清洁取暖对保定市采暖期 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的影响	罗宇睿, 张凯, 赵好希, 任家豪, 段菁春, 李欢欢, 关键, 郭志强, 李博文 (3063)
南京地区细颗粒物污染输送影响及潜在源区	谢放尖, 郑新梅, 窦焱焱, 杨峰, 刘春蕾, 李洁, 谢轶嵩, 王艳, 胡建林, 陈长虹 (3071)
大气环流型对珠三角 2015~2020 年臭氧变化的影响	汪瑶, 刘润, 辛繁 (3080)
热带气旋对海南岛臭氧污染的影响分析	符传博, 丹利, 佟金鹤, 徐文师 (3089)
基于 CMAQ 和 HYSPLIT 模式的日照市夏季臭氧污染成因和来源分析	林鑫, 全纪龙, 王伊凡, 陈羽翔, 刘永乐, 张鑫, 敖丛杰, 刘浩天 (3098)
2016~2020 年成都市控制 PM _{2.5} 和 O ₃ _{8h} 污染的健康效益评价	张莹, 田琪琪, 魏晓钰, 张少波, 胡文东, 李明刚 (3108)
深圳市 2022 年春季新冠疫情管控期间空气质量分析	刘婵芳, 张傲星, 房庆, 叶毓婧, 杨红龙, 陈炯恺, 吴雯潞, 侯岳, 莫佳佳, 傅宗玖 (3117)
贵州省生物质燃烧源大气污染物排放清单	王艳妮, 杨敬婷, 黄贤峰, 程燕, 陆标, 顾兆林 (3130)
西安市大气降水的主要化学组分及其来源	周东, 黄智浦, 李思敏, 王森, 牛振川, 熊晓虎, 冯雪 (3142)
宜昌市大气微塑料的分布、呼吸暴露及溯源	刘立明, 王超, 巩文雯, 陆安祥, 任东, 涂清, 贾漫珂 (3152)
雅鲁藏布江水化学演变规律	江平, 张全发, 李思悦 (3165)
无定河流域地表水硝酸盐浓度的时空分布特征及来源解析	徐奇峰, 夏云, 李书鉴, 王万洲, 李志 (3174)
太浦河水体与沉积物中重金属的季节变化特征与污染评价	罗鹏程, 涂耀仁, 孙婷婷, 刘生辉, 高佳欣, 寇佳怡, 顾心彤, 段艳平 (3184)
北京市北运河水体中抗生素污染特征及风险评估	蒋宝, 隋珊珊, 孙成一, 王亚玲, 荆降龙, 凌文翠, 李珊珊, 李国傲 (3198)
氮和氧同位素示踪伊洛河河水硝酸盐来源及转化过程	郭文静, 张东, 蒋浩, 吴洋洋, 张郭妙, 段慧真, 许梦军, 麻冰涓, 陈昊, 黄兴宇 (3206)
淮河下游湖泊表层水和沉积物中 PPCPs 分布特征及风险评估	武宇圣, 黄天寅, 张家根, 田永静, 庞燕, 许秋瑾 (3217)
西宁市浅层地下水化学特征及形成机制	刘春燕, 于开宁, 张英, 荆继红, 刘景涛 (3228)
叶尔羌河流域平原区地下水污染风险评价	闫志云, 曾妍妍, 周金龙, 孙英, 马常莲 (3237)
密云水库细菌群落组成结构及影响因素	陈颖, 王佳文, 梁思航, 陈倩 (3247)
可见光激发下模拟海水中四环素光降解的机制和路径	许恒韬, 付小航, 丰卫华, 王挺 (3260)
纳米零价铁改性生物炭对水中氨氮的吸附特性及机制	陈文静, 石峻岭, 李雪婷, 张李金, 刘富强, 陈正祝, 庞维海, 杨殿海 (3270)
高锰酸钾改性椰壳生物炭对水中 Cd(II) 和 Ni(II) 的去除性能及机制	张凤智, 王敦球, 曹星洋, 刘桥京, 岳甜甜, 刘立恒 (3278)
铜改性净水污泥水热炭对水体中磷的吸附特性及底泥内源磷的固定	何李文泽, 陈钰, 孙飞, 李艳君, 杨顺生, 张志鹏 (3288)
城镇生活污水处理厂出水硝酸盐浓度及同位素组成的影响因素	张东, 葛文彪, 赵爱萍, 高振朋, 陈昊, 张琮, 蒋浩, 吴文阳, 廖琪, 李成杰, 黄兴宇, 麻冰涓 (3301)
基于 Meta 分析的污水处理工艺对微塑料去除效果影响	符立松, 侯磊, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌 (3309)
我国自然生态系统氮沉降临界负荷评估	黄静文, 刘磊, 颜晓元, 迺超普 (3321)
气候变化和人类活动对东部沿海地区 NDVI 变化的影响分析	金岩松, 金凯, 王飞, 刘春霞, 秦鹏, 宗全利, 刘佩娟, 陈明利 (3329)
基于 InVEST 模型和 PLUS 模型的环杭州湾生态系统碳储量	丁岳, 王柳柱, 桂峰, 赵晨, 朱望远 (3343)
河西走廊中段荒漠绿洲土壤生态化学计量特征	孙雪, 龙永丽, 刘乐, 刘继亮, 金丽琼, 杜海峰, 陈凌云 (3353)
乌梁素海东部流域非生季草地土壤细菌群落结构的垂向差异	李文宝, 张博尧, 史玉娇, 郭鑫, 李兴月 (3364)
芦芽山华北落叶松林土壤剖面细菌群落分布格局	毛晓雅, 刘晋仙, 贾彤, 吴铁航, 柴宝峰 (3376)
植被类型对黄土高原露天矿山复垦土壤碳循环功能基因的影响	赵姣, 马静, 朱燕峰, 于昊辰, 张琦, 陈浮 (3386)
施用生物炭对麦田土壤细菌群落多样性和冬小麦生长的影响	姚丽茹, 李伟, 朱良正, 曹布仓, 韩娟 (3396)
甜龙竹不同种植年限对土壤真菌群落的影响	朱书红, 辉朝茂, 赵秀婷, 刘蔚漪, 张仲富, 刘会会, 张文君, 朱礼月, 涂丹丹 (3408)
生物炭对热带地区辣椒种植土壤 N ₂ O 排放及其功能基因的影响	陈琦琦, 王紫君, 陈云忠, 王誉琴, 朱启林, 胡天怡, 胡煜杰, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (3418)
覆膜和有机无机配施对夏玉米农田温室气体排放及水氮利用的影响	蒋洪利, 雷琪, 张彪, 吴淑芳 (3426)
不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响	穆晓国, 高虎, 李梅花, 赵欣茹, 郭宁, 靳磊, 李建设, 叶林 (3439)
基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析	陈明, 王琳玲, 曹柳, 李名闯, 申哲民 (3450)
云南 5 城市道路扬尘 PM _{2.5} 中重金属含量表征及健康风险	韩新宇, 郭晋源, 史建武, 李定霜, 王怡明, 宁平 (3463)
兰州市黄河风情线地表积尘及周边绿地土壤重金属污染特征及风险评价	李军, 李开明, 王晓槐, 焦亮, 臧飞, 毛潇萱, 杨云钦, 台喜生 (3475)
PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价:以西北某典型工业园区为例	高越, 吕童, 张鑫凯, 张博哈, 毕思琪, 周旭, 张炜, 曹红斌, 韩增玉 (3488)
基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析	张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (3500)
PCA-APCS-MLR 和地统计学的典型农田土壤重金属来源解析	王美华 (3509)
三峡库区稻田土壤重金属污染特征及风险评价	刘娅君, 李彩霞, 梅楠, 张美平, 张成, 王定勇 (3520)
皖江经济带耕地重金属健康风险评价及环境基准	刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨, 黄健敏 (3531)
张家口市万全区某种植区土壤重金属污染评价与来源分析	安永龙, 殷秀兰, 李文娟, 金爱芳, 鲁青原 (3544)
滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价	汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华 (3562)
矿业废弃地重金属形态分布特征与迁移转化影响机制分析	魏洪斌, 罗明, 向奎, 查理思, 杨慧丽 (3573)
基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析	卫晓峰, 孙紫坚, 陈自然, 魏浩, 孙厚云, 刘卫, 傅大庆 (3585)
不同种类蔬菜重金属富集特征及健康风险	祁浩, 庄坚, 庄重, 王琪, 万亚男, 李花粉 (3600)
山东省典型灌区土壤-小麦重金属健康风险评估	王菲, 费敏, 韩冬锐, 李春芳, 曹文涛, 姚磊, 曹见飞, 吴泉源 (3609)
基于机器学习方法的小麦镉富集因子预测	牛硕, 李艳玲, 杨阳, 商艳萍, 王天齐, 陈卫平 (3619)
《环境科学》征订启事(3062)	
《环境科学》征稿简则(3116)	
信息(3164, 3259, 3572)	

不同类型地膜覆盖对土壤质量、根系生长和产量的影响

穆晓国¹, 高虎¹, 李梅花¹, 赵欣茹¹, 郭宁¹, 靳磊¹, 李建设¹, 叶林^{1,2*}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 宁夏设施园艺工程技术研究中心, 银川 750021)

摘要: 针对我国农业生产中地膜大规模使用带来的土壤环境污染问题, 通过应用降解地膜进行大田试验, 以南瓜为研究试材, 探究了黑色普通地膜(CK)、白色降解地膜(WDF)、黑色降解地膜(BDF)和黑色 CO₂ 基降解地膜(C-DF)对土壤理化性质、根系生长与产量的影响, 并对土壤质量进行评估。结果表明, 3 种降解地膜处理土壤含水量和温度, 较普通地膜均不同程度降低; 各处理间土壤有机质含量无显著差异; C-DF 处理土壤速效钾含量较 CK 降低, WDF 和 BDF 无显著影响; BDF 和 C-DF 处理土壤全氮和速效氮含量较 CK 和 WDF 降低, 处理间差异达到显著水平。3 种降解膜处理土壤过氧化氢酶活性较 CK 显著提升 2.9%~6.8%, 蔗糖酶较 CK 显著降低了 33.3%~38.4%。BDF 处理土壤纤维素酶活性较 CK 显著提升 63.8%, WDF 和 C-DF 无显著影响。3 种降解膜处理对地下部根系生长具有促进作用, 长势明显增强。BDF 和 C-DF 处理南瓜产量与 CK 趋近, BDF 处理南瓜产量较 CK 显著降低 11.4%。试验结果表明, BDF 和 C-DF 处理对土壤质量和产量的影响与 CK 相当。研究认为 2 种黑色的降解地膜在高温生产季节可有效替代普通地膜。

关键词: 降解地膜; 南瓜; 土壤理化性质; 根系生长; 产量

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)06-3439-11 DOI: 10.13227/j.hjks.202206046

Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield

MU Xiao-guo¹, GAO Hu¹, LI Mei-hua¹, ZHAO Xin-ru¹, GUO Ning¹, JIN Lei¹, LI Jian-she¹, YE Lin^{1,2*}

(1. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Ningxia Facility Horticulture Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China)

Abstract: Aiming to address the problem of soil environmental pollution caused by the large-scale use of plastic film in agricultural production in China, field experiments were carried out by applying degradable plastic film. Pumpkin was used as the research material to explore the effects of black common plastic film (CK), white degradation plastic film (WDF), black degradation plastic film (BDF), and black CO₂-based degradable plastic film (C-DF) on soil physicochemical properties, root growth and yield, and soil quality. The results showed that the soil water content and temperature of the three degradable plastic films were lower than those of ordinary plastic films to different degrees; there was no significant difference in soil organic matter content among the treatments. The soil available potassium content of the C-DF treatment was lower than that of CK, and WDF and BDF had no significant effect. Compared with those in CK and WDF, soil total nitrogen and available nitrogen contents in the BDF and C-DF treatments were lower, and the difference between treatments reached a significant level. Compared with that of CK, the catalase activities of the three types of degradation membranes were significantly increased by 2.9%-6.8%, and the sucrase was significantly decreased by 33.3%-38.4%. Compared with that in CK, the soil cellulase activity in the BDF treatment was significantly increased by 63.8%, whereas WDF and C-DF had no significant effects. The three types of degradable film treatments could promote the growth of underground roots, and the growth vigor was obviously enhanced. The yield of pumpkin treated with BDF and C-DF was close to that of CK, and the yield of pumpkin treated with BDF was significantly lower than that of CK by 11.4%. The experimental results showed that the effects of the BDF and C-DF treatments on soil quality and yield were comparable to those of CK. According to the results, two types of black degradable plastic film can effectively replace ordinary plastic film in the high-temperature production season.

Key words: degradable plastic film; pumpkin; soil physical and chemical properties; roots growth; yield

地膜覆盖技术自 20 世纪 70 年代传入中国, 在农业生产中广泛被应用。因为从作物的生产角度来看, 地膜覆盖技术在低温环境下, 可以提高地温促进早熟, 并起到增产提质的作用; 相比露地, 高温环境下, 覆膜降低了土壤水分蒸发量, 起到保墒作用, 同时还可以控制土壤盐碱^[1], 有效改善农作物的生产环境, 保障了农作物高产和稳产的需求。然而, 这些积极作用只表现在农作物生产上, 却给土壤环境带来众多问题。由于土壤中积累了大量残膜, 其主要成分为无法降解的聚乙烯, 导致土壤水肥流通和气体交换等受阻, 造成土壤结构板结, 影响作物产量并严重危害生态环境^[2,3]。

降解膜是经过土壤环境与自然环境降解为 H₂O

和 CO₂ 的一种塑料薄膜, 可以避免普通聚乙烯地膜造成的环境污染等问题, 被认为是解决残膜问题的有效途径之一^[4~7]。目前, 栽培应用的降解膜大多以生物降解膜为主, 其主要材料为聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) 或聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT) + 聚乳酸 (PLA)^[8]。在番茄^[9]、玉米^[10,11]、马铃薯^[12]、棉花^[13] 和冬小麦^[14] 栽培生产中, 覆降解膜的土壤理化性质与普通聚乙烯地膜相比, 无明显差异, 二者所覆盖作物的产量趋

收稿日期: 2022-06-05; 修订日期: 2022-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1600300); 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2021BBF02019, 2018BBF02009)

作者简介: 穆晓国(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为设施园艺与蔬菜逆境生理生态, E-mail: Muxiaoguo0104@163.com

* 通信作者, E-mail: yelin.3993@163.com

近^[1].而在油菜应用降解膜的生产中发现,降解膜处理的土壤有机质含量较普通聚乙烯地膜提高7.0%^[15],另有报道显示,降解膜通过改变水热条件对土壤酶活性和微生物数量有着积极作用,形成良好的土壤结构^[16,17].从前人的研究结果来看,生物降解膜的应用效果与普通聚乙烯地膜趋近.但生物降解膜往往生产工艺复杂,相应的成本较普通聚乙烯地膜要高很多.近年来,中国科学院长春应用化学研究所研究出了性能优良的高相对分子质量二氧化碳基生物降解塑料,并实现了二氧化碳基生物降解地膜的工业化工艺设计,该类地膜以低成本的二氧化碳为主要合成原料,降低了地膜生产的成本投入^[18].目前,由于国内二氧化碳基生物降解塑料还处于应用基础研究阶段,相关生产厂家较少,所以二氧化碳基生物降解膜在栽培生产中的研究鲜见报道.针对不同材质降解膜在栽培生产上的应用效果展开研究是十分必要的.

为保障生态环境安全,宁夏地区在玉米和马铃薯上开展降解膜的栽培应用研究^[19],作为宁夏农业发展主导产业之一的蔬菜产业报道很少.基于宁夏地区土壤和气候条件,本研究通过比较2种常规降解膜、新型CO₂基降解膜和普通地膜对土壤质量、

根系生长和南瓜产量的影响,以期降解膜在蔬菜产业中推广应用的可行性提供参考理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于2021年在“全国易地搬迁移民致富示范区”吴忠市红寺堡区弘德村进行,该区域位于中国西北部省份宁夏,属典型的温带大陆性气候,常年干旱少雨,昼夜温差大.红寺堡地区年均降水量251 mm,蒸发量2 387 mm.年平均气温8.7℃,平均昼夜温差可达13.7℃,全年大于10℃积温在3 200℃以上,全年日照时数2 900~3 550 h,年平均风速2.9~3.7 m·s⁻¹,大风日数25 d.2021年5~9月试验期间,红寺堡地区持续高温天气,降雨量不足(图1),土壤水分无效蒸发与散失,覆膜作物种植与露地相比,保证了作物稳产.

1.2 试验材料

供试南瓜品种为艾丽斯,该品种发芽率不低于80%,试验前要求种子大小及饱满度趋于一致.

4种地膜购于国内地膜生产公司,依据试验要求将不同地膜覆盖分别编号为CK、WDF、BDF和C-DF.具体参数见表1.

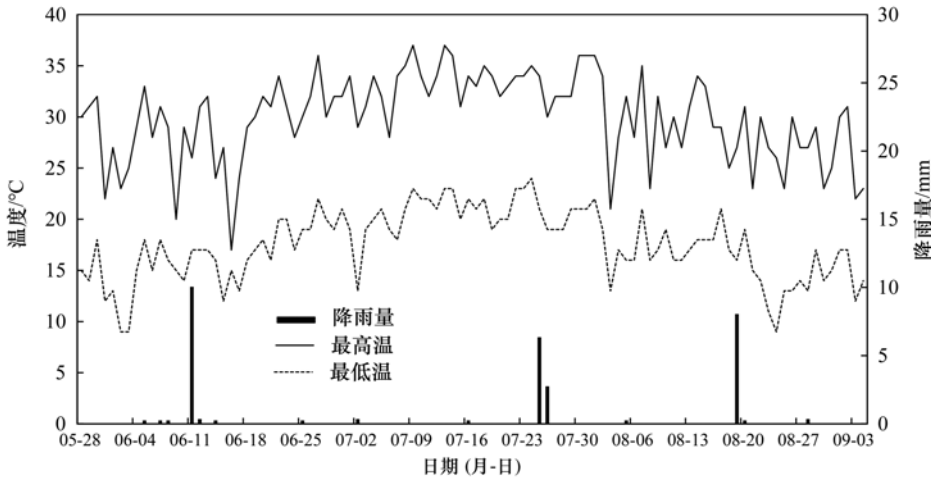


图1 红寺堡地区5~9月气温及降雨量

Fig. 1 Temperature and rainfall in Hongsibao area from June to September

表1 不同处理膜信息参数

Table 1 Information and parameters of different treated membranes

试验编号	地膜种类	主要成分	地膜厚度/mm
CK	黑色普通地膜	聚乙烯(PE)	0.010
WDF	白色降解膜	聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)+聚乳酸(PLA)	0.010
BDF	黑色降解膜	聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯(PBAT)+聚乳酸(PLA)	0.010
C-DF	黑色CO ₂ 基降解膜	二氧化碳/环氧丙烷共聚物	0.010

1.3 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,依据覆盖地膜的不同,设置4个处理,即普通地膜(CK)、白色降解膜

(WDF)、黑色降解膜(BDF)和CO₂基降解膜(C-DF).各处理重复3次,共12个试验小区,小区面积为50.4 m²(2.8 m×18 m),按照试验的随机性排列(图2).

南瓜种子于 2021 年 5 月 28 日播种. 应用一垄一膜双管双行、膜下滴灌、机械播种和覆膜的种植方式. 不同处理膜宽均为 120 cm, 膜厚 0.010 mm, 畦宽 80 cm, 畦高 10 cm, 沟宽 200 cm, 株距 80 cm, 行距为 50 cm. 水肥用量和后期管理等与当地大田一致. 9 月 3 日进行南瓜收获.

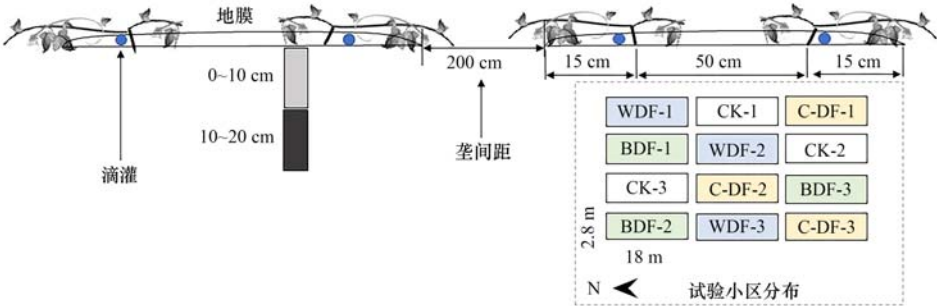


图 2 地膜覆盖与滴灌设计布局、取土位置、试验小区随机分布示意

Fig. 2 Schematic illustration of the design layout, soil borrowing location, and random distribution of experimental plots for mulching and drip irrigation

1.4 样品采样与测定

1.4.1 地膜基本特性测定

降解速率测定: 对于各时期不同地膜降解情况, 设定单位面积 (20 cm × 20 cm, 图 2) 观测点, 在垂直于地膜上方 30 cm 处拍照, 通过 Photoshop 对不同时期单位面积降解膜进行图像采集及区域分类 (分辨

率: 3000 × 4000 像素), 计算出已降解地膜的面积, 以面积之比 V 来计算降解率, 每个处理小区选取 9 个观察点.

$$V = S_c / S \quad (1)$$

式中, S 表示单位地膜样品面积, S_c 表示单位地膜样品已降解面积, V 表示降解率.

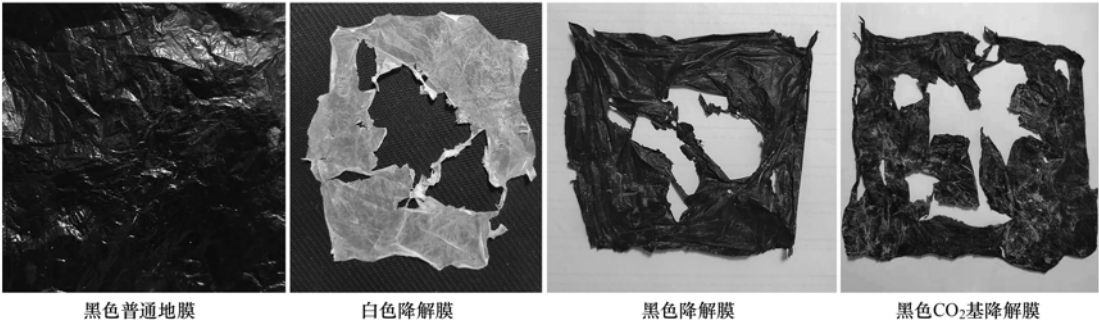


图 3 普通地膜和 3 种不同降解膜单位面积降解照片

Fig. 3 Pictures of cracking of common plastic film and three different degradation films per unit area

水蒸气透过量测定: 各处理裁取 3 块面积大小为 100 cm × 100 cm 的地膜, 寄送河南青源天仁生物技术有限公司进行水蒸气透过量测定.

1.4.2 土壤温度和含水量测定

土壤温度测定以每天 08:00 ~ 18:00 为时间段, 将精创 RC-4 地温计 (江苏省精创电气股份有限公司) 探头分别埋于土壤 10 cm 和 20 cm 深层处, 每隔 1 h 进行温度数据记录, 各小区重复 3 次. 土壤含水量以南瓜不同生育期为测定节点, 将根系周围 10 cm 和 20 cm 深层土壤采集于铝盒进行鲜土称重, 并带回实验室烘干称重.

1.4.3 土壤理化性质和酶活性测定

南瓜成熟期, 对各处理植株根系土壤不同深层的土壤进行采样, 装于塑封袋带回实验室, 进行晾干和粉碎, 筛土完成后进行理化性质及酶活性的测定. 采取电位法 (水土比 2.5: 1) 测定土壤

pH^[20], 分别用凯氏定氮法和钼蓝比色法测定土壤的氮和磷含量^[20], 采用火焰光度法和重铬酸钾外加热法测定土壤的钾和有机质含量^[20], 采用苯酚-次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法和高锰酸钾滴定法测定土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性^[21], 磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[20].

1.4.4 根系生长和根系活力测定

南瓜根系在苗期和成熟期进行采样, 苗期以茎为中心, 挖半径为 20 cm, 垂直向下高为 20 cm 的近似圆柱体, 成熟期在以茎为中心, 挖半径为 40 cm, 垂直向下高为 40 cm 的近似圆柱体. 挖出土壤和所有根系, 除去根系上粘连的松土, 再带回实验室进行洗根, 并使用根系扫描仪对苗期与成熟期的根系生长势进行测定; 根系活力采用氯化三苯基四氮唑 (TTC) 脱氢酶法^[22].

1.4.5 土壤质量评估

土壤质量评估步骤如下:①选择有效的土壤指标:土壤指标与相关参数显著相关($P < 0.05$)^[23];②对土壤指标进行标准化主成分分析(principal component analysis, PCA):如果主成分(principal component, PC)能解释至少 5% 的方差,那么每一个都保留作进一步分析^[24];③建立最小数据集(minimum data set, MDS):在每个保留 PC 中,高加权因子载荷的绝对值在最高因子载荷的 10% 内,保留在 MDS 中^[24];④土壤质量指数(SQI)计算:在每个关键的土壤质量指标中,通过使用 D'Hose 等^[25]的描述的评分函数,将每个指标标准化为 0~1 标度,在对 MDS 中的所有指标进行评分和加权后,计算土壤质量指数(SQI)^[26]。

$$SQI = \sum_{i=1}^n W_i \cdot Q_i \quad (2)$$

式中, SQI 表示土壤质量指数, W_i 是每个指标的分配权重, Q_i 表示指标得分, n 表示最终 MDS(最小

数据集)中的指标数。

1.5 数据处理

采用 Photoshop 进行地膜图像采集和降解面积计算,采用 Excel 2019 整理数据, Origin 2021 进行作图. 采用 SPSS 20.0 软件进行显著分析($P < 0.05$)、相关性分析和 PCA 分析。

2 结果与分析

2.1 不同类型地膜基本特性变化

由图 4 可以看出, 不同类型地膜的基本特性随生育期发生变化。开花期之前, 黑色降解膜(BDF)的降解速率高于其他处理。结果期时, CO_2 基降解膜(C-DF)降解速率提升, 高于其他处理, 普通地膜(CK)无降解现象, 表面出现物理损伤小孔, 降解速率大小依次为: C-DF > BDF > WDF > CK。幼苗期之后, 随着膜裂解的出现, 水蒸气透过量与降解率呈正相关, 不同时期 CO_2 基降解膜的水蒸气透过量均高于其他处理。

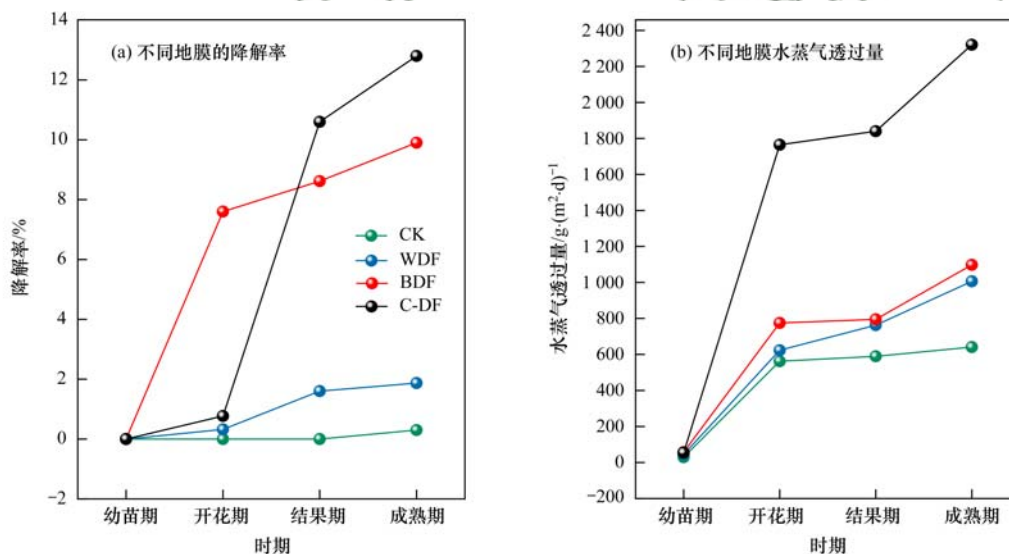


图 4 不同类型地膜基本特性变化

Fig. 4 Changes in basic properties of different types of plastic mulching

2.2 不同类型地膜覆盖对土壤理化性质和酶活性的影响

2.2.1 不同类型地膜覆盖对土壤温度的影响

由图 5(a)和图 5(b)可知,膜下 10 cm 和 20 cm 处土壤深层温度在伸蔓期(6 月 25 日)至结果期(7 月 21 日)正处于夏季高温气候,土壤温度均在持续升高。播种时间(5 月 28 日)距伸蔓期接近降解膜裂解的诱导期,降解膜开始不同程度地裂解[图 4(a)]. 伸蔓期,CK 处理的不同深层土壤温度均高于其他 3 个处理,至结果期,CK 与 3 种降解膜之间的白昼温差明显增加。C-DF 处理的两个深层土壤温度均属 4 个处理中最低,主要因为其裂解程度最大,热

量通过水分蒸发和热传导途径散失。到了果实膨大期(8 月 20 日),此时进入秋季,且处于连续阴雨天(图 1),各处理不同深层土壤温度大幅降低,此时 CK 表现出较好的保温性能,与 BDF 和 C-DF 之间存在显著差异。在成熟期,随着叶蔓冠层的增加和气温降低等原因,3 种不同降解膜处理之间在膜下 10 cm 深层土壤温度接近,且低于 CK。不同处理膜下 20 cm 处土壤深层温度始终保持一定的差异性,各个深层土壤温度高低均呈 CK > WDF > BDF > C-DF 的趋势。CK 在不同生育期 0~10 cm 的深层土壤白昼均温较其他处理高出 0.9~1.5℃,且 20 cm 处深层土壤均温较 3 个处理膜下土壤温度高 0.8~1.4℃。

在 08:00~10:00 时,整个生育期膜下 20 cm 深层土壤温度要高于膜下 10 cm 深层土壤温度[图 5(c)和图 5(d)].膜下 10 cm 深层土壤在 08:00 时达到最低温,BDF 和 C-DF 地温较 CK 低 0.6℃和 0.8℃,膜下 20 cm 深层土壤在 09:00 时达到最低温,此时大气温度较低,各处理间土壤温差无明显.10:00 之后,随着表层土壤接受的太阳辐射越来越

多,膜下 10 cm 层土壤温度升高,并逐渐高于 20 cm 深层处土壤温度.在 16:00 时,上层土壤温度升至最高,CK 处理与 BDF 和 C-DF 处理的土壤最大温差分别达到 1.25℃和 1.01℃.在 16:00 时之后,上层土壤温度随大气温度降低而下降,下层土壤吸收上层土壤的热量,地温继续升高.到了 18:00 时,各处理两个不同深层土壤温度开始趋近.

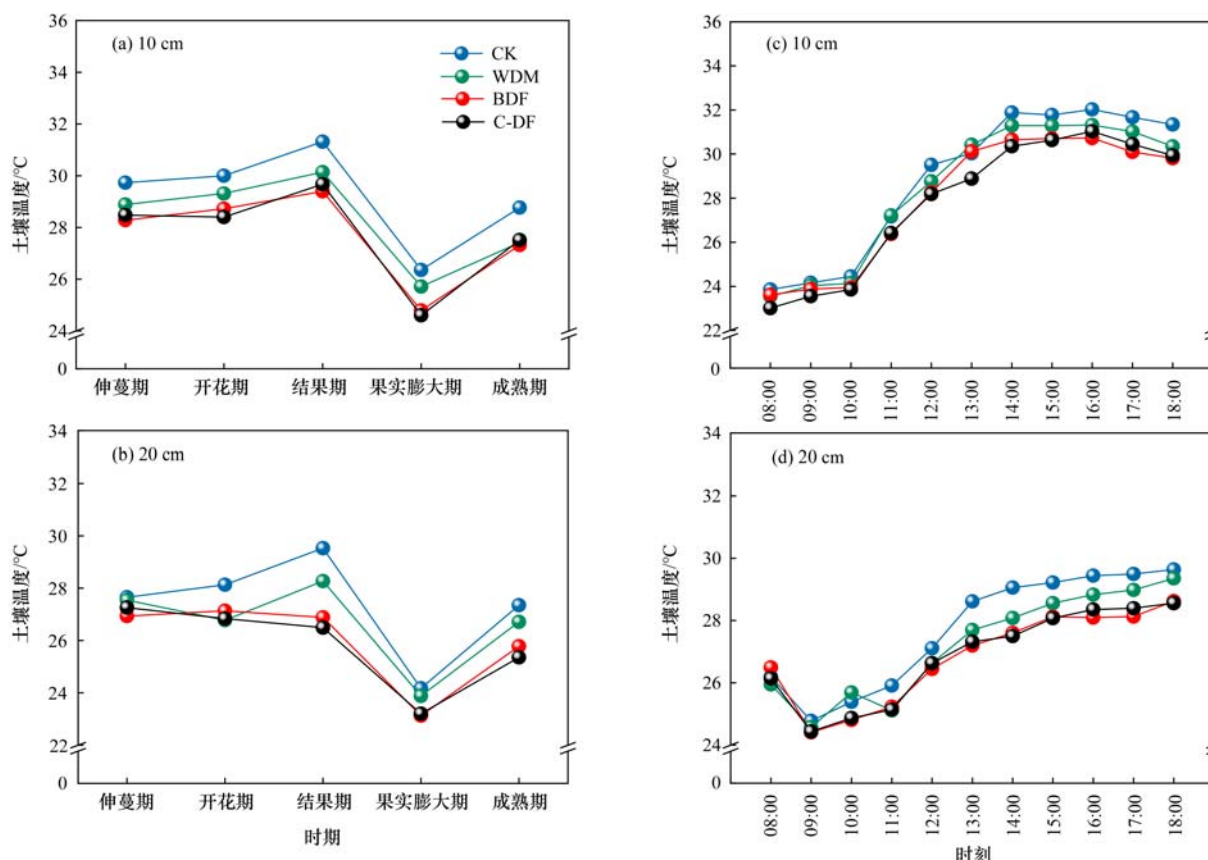


图 5 不同处理对不同深层土壤温度的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on different deep soil temperatures

2.2.2 不同降解膜对土壤含水量的影响

土壤水作为植物生长的必需物质和矿质肥力的运输载体,对植物的生长发育起着至关重要的作用,同时还能传导热量、维持土壤温度稳定.由表 2 可以看出,在幼苗期,各处理的土壤含水量差异不大,同一处理不同深层含水量也无明显差异.在伸蔓期,不同降解膜处理之间差异不大,CK 处理比 3 种降解膜的含水量略高,一方面,是因为随着环境因子和土壤微生物作用,3 种降解膜出现不同程度裂解[图 4(a)],另一方面,膜的水蒸气透过量升高[图 4(b)],使得土壤水分蒸发量较 CK 增加,不同处理 0~10 cm 深层较 10~20 cm 深层含水量均有下降趋势.试验地干旱少雨,成熟期含水量突然上升,其原因是开花期采样距灌水的时间接近,不同处理间的含水量差异缩小,同一处理的不同深层含水量从上向下明显

升高.

结果期,CK 处理的含水量略高于其他处理,差异不明显.CK 处理虽然地膜完整,具有较高的保水性能,但其植株长势旺盛,蒸腾作用加强,因而需水量大.各处理不同深层土壤从上至下含水量增加.在膨大期,随地膜裂解程度和水蒸气透过量的增加,3 种降解膜处理较 CK 的土壤水分蒸发加速,WDF、BDF 和 C-DF 处理 0~10 cm 土壤深层的含水量分别较 CK 明显低 24.1%、27.6% 和 28.7%.降解地膜大量破解后,土壤透气性增加,表层土壤水分亏缺,根系吸收 10~20 cm 深层土壤水分,因此,CK 处理的 10~20 cm 深层土壤含水量最高,与其他处理存在显著差异.膨大期以后,南瓜需水量降低,到了成熟期,CK 与降解程度低的 WDF 之间差异减小,显著高于 BDF 和 C-DF.3 种不同的降解膜虽然在结果期以后含水量显著低于 CK,但在结果期和之前的

时期土壤含水量与 CK 的差异较小,满足南瓜生长需求,仍具有一定的保墒作用.

表 2 各生育期土壤含水量¹⁾/%

Table 2 Soil water content in each growth stage/%							
处理	土壤深度/ cm	幼苗期	伸蔓期	开花期	结果期	膨大期	成熟期
CK	0 ~ 10	12. 9a	11. 7a	29. 5a	11. 2a	8. 7a	7. 3a
	10 ~ 20	13. 6a	11. 6a	27. 6a	12. 7a	8. 8a	8. 2a
WDF	0 ~ 10	12. 7a	10. 3a	29. 4a	10. 5a	6. 6b	6. 4b
	10 ~ 20	13. 0a	11. 3a	28. 1a	11. 3ab	7. 1a	6. 8b
BDF	0 ~ 10	12. 3a	9. 8b	28. 7a	10. 1b	6. 4b	5. 3bc
	10 ~ 20	13. 4a	10. 9a	26. 8a	10. 8ab	8. 2a	6. 7b
C-DF	0 ~ 10	12. 1a	9. 5b	28. 9a	9. 6b	6. 3b	5. 1c
	10 ~ 20	13. 2a	10. 6ab	26. 7a	10. 1c	6. 9ab	6. 2b

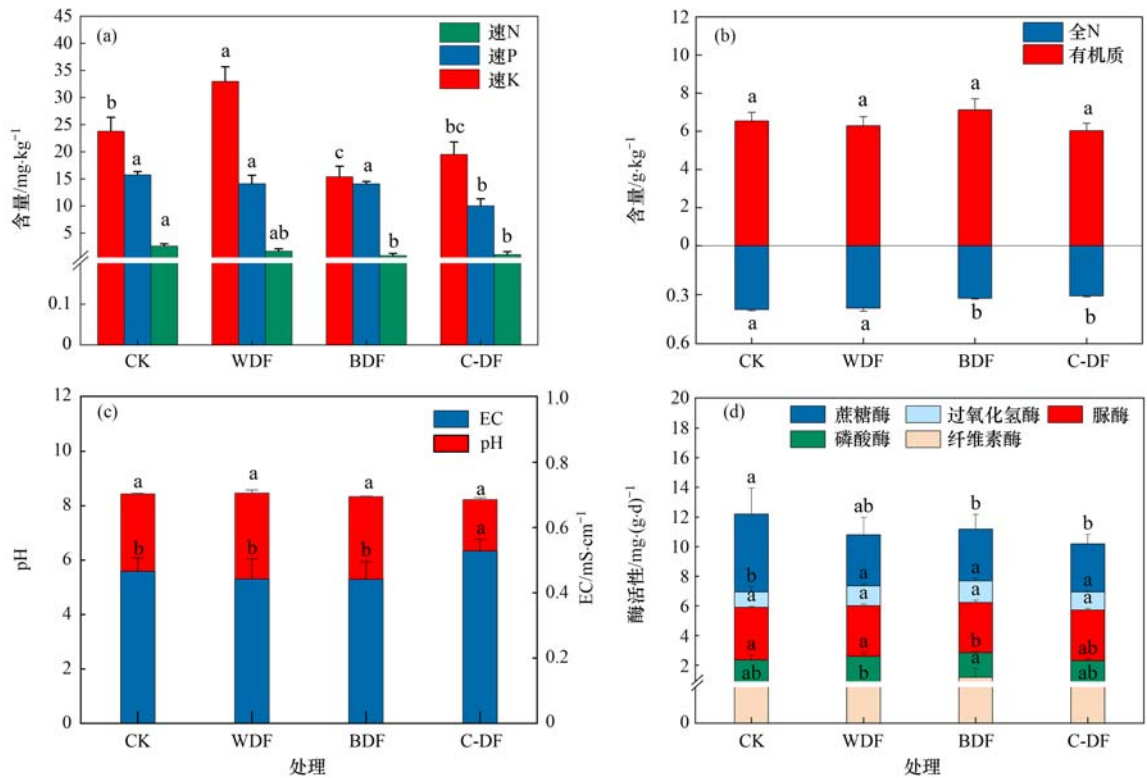
1) 同列不同小写字母表示不同处理下土壤含水量的差异显著($P < 0.05$)

2.2.3 不同降解膜对土壤化学性质和酶活性的影响

所有种植小区均为弱碱性土壤,土壤养分为 5 级,极其贫乏.图 6 表明,在地膜降解后,种植南瓜所覆盖的 4 种不同地膜处理间,土壤 pH 和有机质含量无显著性差异.随着降解膜的部分降解,BDF 和 C-DF 速效钾含量呈下降趋势,WDF 处理的土壤速效钾含量显著高于其他处理,BDF 速效钾含量最低.C-DF 处理的土壤速效磷含量在 4 个处理中最低,与其他出处理的差异均达到显著水平.与 CK 相比,降解程度较大的 BDF 和 C-DF 处理的土壤速效氮和全氮含量降低,均显著低于 CK,降解程度较低的 WDF 处理土壤速效氮和全氮含量与 CK 相比,无

明显差异.3 种降解膜处理中,WDF 和 BDF 处理土壤 EC 值显著低于 C-DF,但与 CK 差异不显著.

土壤酶活性作为评价土壤肥力的重要指标之一,酶活性越高,土壤肥力越高.同时,土壤酶活性也受土壤理化性质的影响.由图 6(d)可以看出,CK 处理的蔗糖酶活性较其他处理显著提高.受不同地膜降解的影响,CK 处理的过氧化氢酶活性较其他处理下降,差异并达到显著水平.3 种降解膜虽不同程度降解,但对土壤脲酶活性的影响不大,与 CK 相比无明显差异.土壤磷酸酶活性随地膜降解程度的增加而降低,BDF 和 C-DF 处理的酶活性较 CK 和 WDF 处理显著降低.纤维素酶是碳循环



不同小写字母表示不同处理土壤理化性质的差异显著($P < 0.05$)

图 6 不同降解膜对土壤理化性质的影响

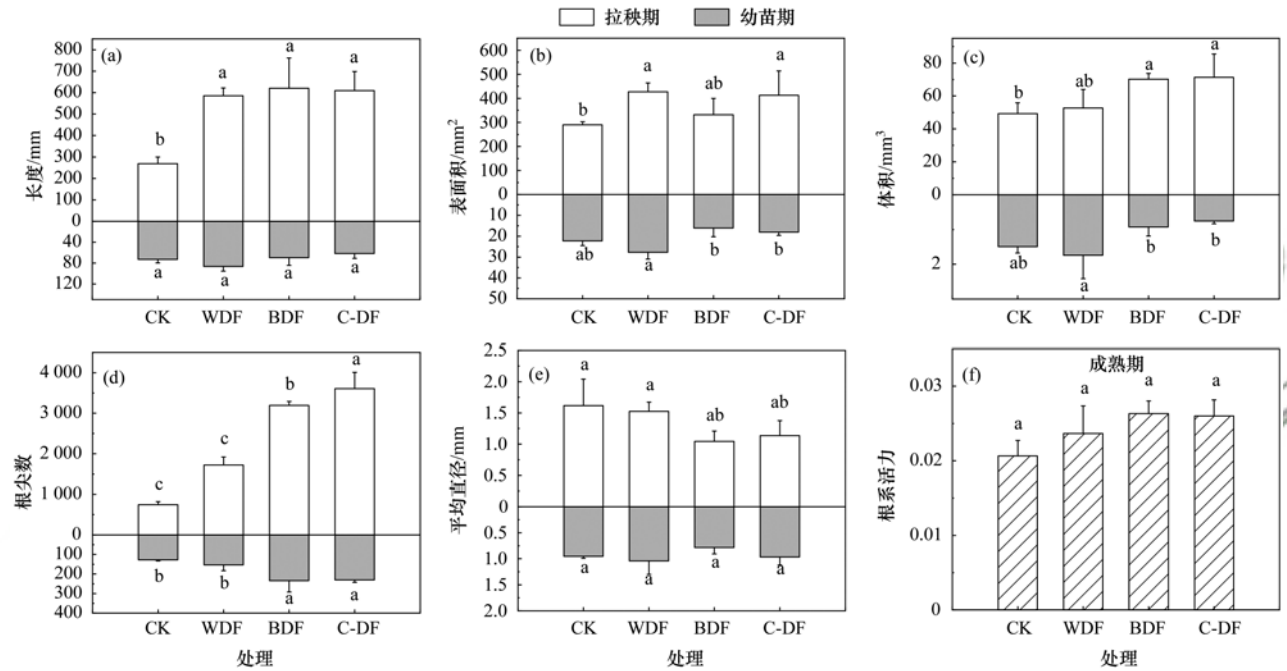
Fig. 6 Effects of different degradation films on soil physical and chemical properties

所需要的重要酶,其酶活性作用于有机物的合成过程,BDF 处理的土壤纤维素酶活性较其他处理提高,BDF 与 WDF 处理的土壤纤维素酶活性差异达到显著水平.

2.3 不同降解地膜对植株根系生长和产量的影响

根系形态分析如图 7 所示,不同地膜覆盖影响南瓜根系总长度、表面积、体积、根尖数、平均直径和根系活力. 幼苗期,根系生长于较浅层土壤中,BDF 和 C-DF 处理的水分含量略低于 CK 和 WDF (表 2),促使根系的分化,产生更多毛根,BDF 和 C-DF 处理的根尖数显著高于 CK 和 WDF. 同时,CK 和

WDF 处理的根系总长度和平均直径略高于 BDF 和 C-DF,但处理间差异不显著,WDF 处理的总表面积和总体积显著高于 BDF 和 C-DF,与 CK 的差异不明显. 成熟期,受土壤环境改变的影响,WDF、BDF 和 C-DF 处理的根系活力较 CK 提高. CK 处理的根系总长度显著低于其他处理,而平均直径显著高于其他处理. C-DF 处理的根尖数显著高于其他处理,BDF 和 C-DF 处理的根体积也较 CK 和 WDF 增加,达到显著水平,受根的总长度、平均直径和根尖数的影响,根系表面积也表现出差异,WDF 和 C-DF 的根总表面积显著高于 CK.



不同小写字母表示不同处理下根系特征的差异显著($P < 0.05$)

图 7 不同降解膜对南瓜根系特征的影响

Fig. 7 Effects of different degradation films on root growth of pumpkin

从表 3 可以看出,CK 处理的南瓜平均单果重显著高于 WDF,与 BDF 和 C-DF 之间没有显著差异. CK 和 BDF 处理的南瓜亩产略高于 C-DF,无显著性差异,WDF 处理的南瓜产量最低,且与 CK 和 BDF 处理之间的差异达到显著水平.

表 3 不同地膜对南瓜产量的影响¹⁾

Table 3 Effects of different plastic films on pumpkin yield		
处理	平均单果重/kg	亩产/kg·hm ⁻²
CK	1.4a	36 660.0a
WDF	1.1b	32 485.5b
BDF	1.3ab	35 460.8a
C-DF	1.2ab	34 291.5ab

1) 不同小写字母表示不同处理下南瓜产量的差异显著($P < 0.05$)

2.4 土壤质量综合评估

通过对土壤指标与根系生长和产量的相关性分析(表 4),根据显著性($P < 0.05$),选取 pH、脲酶、

蔗糖酶、磷酸酶、速效磷、速效氮、全氮和平均地温,进行主成分分析(表 5),保留 PC 中高加权因子载荷的绝对值在最高因子载荷的 10% 内作为最小数据集,通过隶属度函数将土壤质量指标测定值标准化为 0~1 之间的无量纲值,根据文献[25]描述的方法计算出土壤质量指数(SQI)结果(图 8).

通过 PCA 对土壤各项指标分析,采用特征值 > 1 识别了两个主成分.由表 5 可以看出,PC1 的贡献率为 49.86%,而 pH、速效磷、速效氮、全氮和平均地温指数在 PC1 上具有较大的载荷,分别为 0.776、0.80、0.798、0.856 和 0.683;由此推断 pH、速效磷、速效氮、全氮和平均地温是影响根系生长和南瓜产量的主要土壤条件.由图 8 可知,WDF、BDF 和 C-DF 土壤质量指数与 CK 相比,无明显差异,说明降解膜对土壤质量的影响效果与聚乙烯地膜相当.

表 4 土壤指标与根系生长和产量的相关性分析¹⁾

Table 4 Correlation analysis of soil indicators with root growth and yield

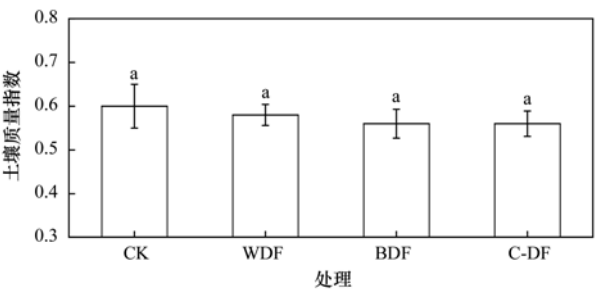
项目	产量	长度	表面积	体积	平均直径	根尖数
pH	-0.137	-0.371	-0.218	-0.217	0.447	-0.709 **
EC	-0.189	0.117	0.212	0.408	-0.202	0.444
脲酶	0.249	-0.640 *	-0.371	-0.153	0.309	-0.417
过氧化氢酶	-0.106	0.400	0.314	0.178	-0.149	0.405
蔗糖酶	0.325	-0.643 *	-0.553	-0.514	0.325	-0.584 *
纤维酶	-0.011	0.504	0.174	-0.113	-0.259	0.273
磷酸酶	-0.436	-0.098	0.272	0.418	0.784 **	-0.463
速效钾	-0.185	-0.096	0.192	0.302	0.442	-0.567
速效磷	0.276	-0.409	-0.344	-0.450	0.425	-0.688 *
速效氮	0.115	-0.761 **	-0.564	-0.359	0.371	-0.819 **
有机质	-0.237	0.032	-0.196	-0.183	-0.191	0.065
全氮	-0.216	-0.478	-0.161	0.046	0.589 *	-0.716 **
平均地温	0.271	-0.370	-0.156	-0.166	0.581 *	-0.714 **
平均含水量	-0.363	0.320	0.371	0.238	0.442	-0.040

1) * 和 ** 分别表示在 0.05 和 0.01 水平下土壤指标与植株参数有显著相关关系

表 5 主成分分析旋转因子载荷、特征值和累计方差贡献率

Table 5 Principal component analysis rotation factor loading, eigenvalues, and cumulative variance contribution

项目	PC1	PC2
pH	0.776	0.404
脲酶	0.581	-0.492
蔗糖酶	0.571	0.598
磷酸酶	0.495	-0.104
速效磷	0.80	0.341
速效氮	0.798	-0.186
全氮	0.856	-0.379
平均地温	0.683	-0.172
特征值	3.989	1.098
贡献率/%	49.86	13.72
累积贡献率/%	49.86	63.58



不同小写字母表示不同处理下土壤质量的差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 不同处理土壤质量指数

Fig. 8 Soil quality index of different treatments

3 讨论

3.1 不同地膜对土壤温度和含水量的影响

土壤热通量因覆盖地膜或地膜材质的不同而发生改变,土壤温度随热通量变化^[27]. Chen 等^[28]研究表明,普通聚乙烯地膜的有效土壤积温较降解地膜高 4%. 郭强等^[29]研究表明,在棉田中覆盖降解膜较普通地膜土壤温度降低,表明土壤温度与降解膜

降解程度有关. 本研究中,全生育期覆盖 3 种降解膜的处理,10 cm 深层土壤白昼平均地温较普通聚乙烯地膜低 0.9 ~ 1.5℃,且 20 cm 处深层土壤白昼平均地温较普通聚乙烯地膜低 0.8 ~ 1.4℃. 另有研究表明,降解膜平均地温较普通地膜土壤温度要高,根据李仙岳等^[30]研究结果表明,这可能与降解膜材质、作物种类和环境有关. Bandopadhyay 等^[31]和郭怡婷等^[32]研究结果均表明,覆盖降解膜的土壤含水量相对普通聚乙烯地膜有所降低. 本研究中,全生育期普通聚乙烯地膜 10 cm 深层土壤平均含水量较 3 种降解膜高 4.3% ~ 16.5%, 20 cm 处深层土壤平均含水量较 3 种降解膜高 17% ~ 30.3%. 其原因在于降解膜较聚乙烯地膜的降解程度和水蒸气透过量增加,土壤水分蒸发量上升,土壤含水量下降.

3.2 不同地膜对土壤理化性质及酶活性的影响

降解膜中富含的有机碳会使部分土壤理化性质发生变化^[33]. 王斌等^[34]研究表明,降解膜处理的土壤速效磷含量较普通聚乙烯地膜降低,速效氮及速效钾无显著性差异. 刘莘等^[35]研究表明降解膜处理的棉花土壤速效钾高于普通膜. 本研究中,普通聚乙烯地膜处理的土壤速效氮含量较 3 种降解膜高,白色降解膜的速效钾含量显著高于其他膜处理,CO₂基降解膜处理的土壤速效磷含量显著降低,这一研究结果与王斌等^[34]和刘莘等^[35]研究的结果略有不同. 根据 Wang 等^[36]的研究结论可知,这种差异可能是环境条件和膜的材料不同所造成的. 同时,降解膜中有机碳对土壤有机碳具有积极作用^[37]. 闵文豪等^[21]在小麦应用降解膜的研究中发现,降解膜可提高土壤全氮含量,对有机质含量无显著影响. 本研究中,不同地膜覆盖对土壤全氮和有机质含量无显著

影响. 其原因可能是降解膜的颗粒未完全降解, 降解产物还未被土壤吸收, 未显现差异性.

土壤酶是评价土壤肥力的重要指标之一, Chen 等^[17]研究表明, 覆盖降解膜的土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性较普通聚乙烯地膜低 20.2%、12.0% 和 0.6%. 本研究中, 土壤蔗糖酶活性结果与其相似, 脲酶无显著差异, 而降解膜下土壤过氧化氢酶活性较 PE 膜升高. 与已有研究结论不同的原因可能是土壤环境中的总氮含量趋近, 所以脲酶活性无差异, Huang 等^[38]研究表明, 降解膜降解有效改善了土壤孔隙度, 因此降解膜处理的过氧化氢酶活性升高. 樊俊等^[39]研究表明, 降解膜与普通聚乙烯地膜对土壤纤维素酶活性的影响无显著差异, 降解膜处理的土壤磷酸酶活性较普通聚乙烯地膜显著降低. 本研究中, 各处理膜的土壤纤维素酶活性不具有显著差异, 黑色降解膜处理的土壤磷酸酶活性较 CK 处理明显提高, 这与刘长源等^[40]研究的结论相似.

3.3 不同地膜对植株根系生长与南瓜产量的影响

地膜覆盖可促进植物根系生长, 加强对土壤养分的吸收能力^[41]. 霍轶珍等^[42]研究表明, 黑色地膜覆盖条件对根系层的降温效应, 提高了根系活力. 本研究中, 2 种黑色膜处理的南瓜根系活力较 2 种白色膜处理提高. 受降解膜降解程度和水蒸气透过量的变化, 3 种降解膜处理下的含水量和肥力相对普通聚乙烯地膜处理降低, 为保证植株地上部分正常生长, 根系需产生更多的侧根及须根来汲取水肥, 3 种降解膜处理的植株根系的总体积、表面积和根尖数均显著高于普通聚乙烯地膜. 相反, 由于普通聚乙烯地膜下土壤水肥相对较充足, 根系分布于较浅层土壤, 其根系平均直径显著升高. 张杰等^[43]在玉米和周永瑾等^[19]在马铃薯上的研究表明, 降解膜与普通聚乙烯地膜处理在作物产量上未形成显著差异, 这与本试验黑色降解膜的结果相似, 而白色降解膜的产量显著低于黑色降解膜和普通地膜. 综合来看, 降解膜虽然保温保水性能较普通聚乙烯地膜减弱, 但对产量的影响与普通聚乙烯地膜相当. 降解膜还可以缓解土壤环境污染问题, 从生态环境安全与农业生产效果角度出发, 降解膜具有替代普通聚乙烯地膜的可行性.

4 结论

(1) 较黑色普通地膜相比, 覆盖 3 种降解膜处理的不同深层土壤温度和含水量均降低, 其中黑色 CO₂ 基降解地膜表现最为明显. 覆盖不同地膜对土壤 pH 和有机质影响不显著; 覆盖黑色 CO₂ 基降解地膜土壤 EC 值显著增高, 且速效磷含量显著降低;

覆盖黑色降解地膜和黑色 CO₂ 基降解地膜土壤全氮和速效氮含量明显下降; 覆盖白色降解地膜土壤速效钾含量显著增加.

(2) 覆盖 3 种降解膜土壤过氧化氢酶活性显著增加, 而蔗糖酶活性显著下降; 覆盖黑色降解地膜和黑色 CO₂ 基降解地膜土壤磷酸酶活性显著下降; 黑色降解地膜处理土壤纤维素酶活性显著增加; 不同地膜覆盖对土壤脲酶活性无显著影响.

(3) 覆盖 3 种降解地膜可显著增强根系长势, 除白色降解膜外, 黑色降解地膜和黑色 CO₂ 基降解膜处理南瓜产量与普通地膜趋近.

(4) 本研究表明了两种黑色降解地膜覆盖对土壤质量指数和南瓜产量的影响无显著差异, 且降解膜能有效缓解普通地膜造成的土壤环境污染问题, 为其他蔬菜及作物应用降解膜提供理论依据, 有助于覆膜农业生产模式可持续发展.

参考文献:

- [1] Abdwaiti A, Liu X W, Yan C R, *et al.* Testing biodegradable films as alternatives to plastic-film mulching for enhancing the yield and economic benefits of processed tomato in Xinjiang region[J]. *Sustainability*, 2021, **13** (6), doi: 10.3390/su13063093.
- [2] Brodhagen M, Goldberger J R, Hayes D G, *et al.* Policy considerations for limiting unintended residual plastic in agricultural soils[J]. *Environmental Science & Policy*, 2017, **69**: 81-84.
- [3] Steinmetz Z, Wollmann C, Schaefer M, *et al.* Plastic mulching in agriculture. Trading short-term agronomic benefits for long-term soil degradation? [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **550**: 690-705.
- [4] 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.
- [5] 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]. *Science of the Total Environment*, 2020, **703**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134722.
- [6] Qi Y L, Ossowicki A, Yang X M, *et al.* Effects of plastic mulch film residues on wheat rhizosphere and soil properties [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, **387**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121711.
- [7] Zhang J R, Ren S Y, Xu W, *et al.* Effects of plastic residues and microplastics on soil ecosystems: a global meta-analysis[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, **435**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129065.
- [8] 马跃超, 刘峻, 章若红, 等. 微生物响应 PBAT-PLA 生物降解膜袋工业需氧堆肥降解机制[J]. *农业工程学报*, 2021, **37** (24): 224-231.
Ma Y C, Liu J, Zhang R H, *et al.* Microorganism responded biodegradation mechanism of PBAT-PLA biodegradable packaging under industrial aerobic composting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, **37** (24): 224-231.
- [9] Sekara A, Pokluda R, Cozzolino E, *et al.* Plant growth, yield,

- and fruit quality of tomato affected by biodegradable and non-degradable mulches [J]. *Horticultural Science*, 2019, **46** (2019): 138-145.
- [10] Deng L, Yu Y, Zhang H Y, *et al.* The effects of biodegradable mulch film on the growth, yield, and water use efficiency of cotton and maize in an arid region[J]. *Sustainability*, 2019, **11** (24), doi: 10.3390/su11247039.
- [11] Wang F J, Wang Z H, Zhang J Z, *et al.* Combined effect of different amounts of irrigation and mulch films on physiological indexes and yield of drip-irrigated maize (*Zea mays* L.) [J]. *Water*, 2019, **11**(3), doi: 10.3390/w11030472.
- [12] 陈超, 李荣, 李芬, 等. 不同沟垄覆盖下土壤水热效应对旱作马铃薯生长及产量的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, **38**(11): 1160-1166.
- Chen C, Li R, Li F, *et al.* Influences of soil hydrothermal effect on dryland potato growth and yield under various ridge and furrow mulch conditions [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, **38**(11): 1160-1166.
- [13] Liu E K, Zhang L W, Dong W Y, *et al.* Biodegradable plastic mulch films in agriculture: feasibility and challenges [J]. *Environmental Research Letters*, 2021, **16**(1), doi: 10.1088/1748-9326/abd211.
- [14] 赵刚, 樊廷录, 党翼, 等. 旱塬区全生物降解地膜覆盖对冬小麦生长发育的影响[J]. *干旱区研究*, 2019, **36**(2): 339-347.
- Zhao G, Fan T L, Dang Y, *et al.* Effects of biodegradable plastic film mulching on the growth winter wheat on the loess plateau dryland[J]. *Arid Zone Research*, 2019, **36**(2): 339-347.
- [15] 谷晓博, 李援农, 杜娅丹, 等. 生物降解膜促进冬油菜养分吸收减少土壤硝态氮累积[J]. *农业工程学报*, 2016, **32** (10): 90-97.
- Gu X B, Li Y N, Du Y D, *et al.* Biodegradable film enhancing nutrient uptake of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) and reducing soil nitrate accumulation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, **32**(10): 90-97.
- [16] Huang F Y, Liu Z H, Mou H Y, *et al.* Effects of different long-term farmland mulching practices on the loessial soil fungal community in a semiarid region of China [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, **137**: 111-119.
- [17] Chen N, Li X Y, Shi H B, *et al.* Effect of biodegradable film mulching on crop yield, soil microbial and enzymatic activities, and optimal levels of irrigation and nitrogen fertilizer for the *Zea mays* crops in arid region[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **776**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145970.
- [18] 郭智臣. 二氧化碳基新型生物降解塑料量产[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2019, **17**(1): 16.
- [19] 周永瑾, 普雪可, 吴春花, 等. 垄沟集雨种植下不同降解地膜沟覆盖对农田马铃薯产量和土壤水热的影响[J]. *核农学报*, 2021, **35**(11): 2664-2673.
- Zhou Y J, Pu X K, Wu C H, *et al.* Effects of different degradable plastic film with furrow mulch under ridge-furrow planting on farmland potato yield and soil water and heat [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, **35**(11): 2664-2673.
- [20] 关天霞, 马国泰, 马志录, 等. 连续施用鸡粪对露地黄瓜产量、品质和土壤性质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(8): 1351-1360.
- Guan T X, Ma G T, Ma Z L, *et al.* Effects of continuous application of chicken manure on field-grown cucumber yield, quality, and soil properties [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(8): 1351-1360.
- [21] 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 等. 全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 560-568.
- Min W H, Wang C L, Wang L W, *et al.* Effects of biodegradable film raw material particles on soil properties, wheat growth, and nutrient absorption and transportation [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 560-568.
- [22] 王妮敏, 邓珂, 邹华, 等. 微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(4): 1468-1472.
- Wang W M, Deng Y, Zou H, *et al.* Effects of microcystins on growth and antioxidant system of rice roots [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(4): 1468-1472.
- [23] 魏彦凤, 申佳丽, 安明远, 等. 不同物料配施对微咸水灌溉黄瓜土壤质量及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2022, **38** (5): 95-104.
- Wei Y F, Shen J L, An M Y, *et al.* Effects of different materials on soil quality and yield of cucumber under brackish irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, **38**(5): 95-104.
- [24] Andrews S S, Carroll C R. Designing a soil quality assessment tool for sustainable agroecosystem management [J]. *Ecological Applications*, 2001, **11**(6): 1573-1585.
- [25] D'Hose T, Coughnon M, de Vlieghe A, *et al.* The positive relationship between soil quality and crop production: a case study on the effect of farm compost application [J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **75**: 189-198.
- [26] Li P, Zhang T L, Wang X X, *et al.* Development of biological soil quality indicator system for subtropical China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, **126**: 112-118.
- [27] 王宁, 冯克云, 南宏宇, 等. 生物降解膜对甘肃河西棉花的生态生物学效应[J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(11): 3607-3614.
- Wang N, Feng K Y, Nan H Y, *et al.* Ecological and biological effects of biodegradable film on cotton in Hexi area of Gansu, Northwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, **29**(11): 3607-3614.
- [28] Chen N, Li X Y, Šimůnek J, *et al.* Evaluating the effects of biodegradable and plastic film mulching on soil temperature in a drip-irrigated field [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, **213**, doi: 10.1016/J.STILL.2021.105116.
- [29] 郭强, 王振华, 郑旭荣, 等. PBAT生物降解膜覆盖对绿洲滴灌棉花土壤水热及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, **33**(16): 135-143.
- Wu Q, Wang Z H, Zheng X R, *et al.* Effects of biodegradation film mulching on soil temperature, moisture and yield of cotton under drip irrigation in typical oasis area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, **33**(16): 135-143.
- [30] 李仙岳, 郭宇, 丁宗江, 等. 不同地膜覆盖对不同时间尺度地温与玉米产量的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, **49**(9): 247-256.
- Li X Y, Guo Y, Ding Z Y, *et al.* Influence of different film Mulchings on soil temperature at different time scales and maize yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(9): 247-256.
- [31] Bandopadhyay S, Sintim H Y, Debruyne J M. Effects of biodegradable plastic film mulching on soil microbial communities in two agroecosystems [J]. *PeerJ*, 2020, **8**, doi: 10.7717/peerj.9015.
- [32] 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 等. 生物可降解地膜覆盖对关中地

- 区小麦-玉米农田温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2788-2801.
- Guo Y T, Luo X Q, Wang R, *et al.* Effects of biodegradable plastic film mulching on greenhouse gas emissions under wheat-maize rotation system in the Guanzhong Plain[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2788-2801.
- [33] Li C, Moore-Kucera J, Lee J, *et al.* Effects of biodegradable mulch on soil quality[J]. Applied Soil Ecology, 2014, **79**: 59-69.
- [34] 王斌, 万艳芳, 王金鑫, 等. PBAT 型全生物降解膜对新疆番茄产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, **36**(5): 640-648.
- Wang B, Wan Y F, Wang J X, *et al.* Effects of PBAT biodegradable mulch film on the physical and chemical properties of soil and tomato yield in southern Xinjiang, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, **36**(5): 640-648.
- [35] 刘苹, 仲子文, 王丽红, 等. 可降解地膜覆盖对土壤养分和棉花产量的影响[J]. 山东农业科学, 2014, **46**(8): 81-83.
- Liu P, Zhong Z W, Wang L H, *et al.* Effect of degradable plastic film mulching on soil nutrient and cotton yield [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, **46**(8): 81-83.
- [36] Wang Z H, Wu Q, Fan B H, *et al.* Testing biodegradable films as alternatives to plastic films in enhancing cotton (*Gossypium hirsutum* L.) yield under mulched drip irrigation[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **192**: 196-205.
- [37] Hayes D G, Anunciado M B, DeBruyn J M, *et al.* Biodegradable plastic mulch films for sustainable specialty crop production[A]. In: Gutiérrez T J (Ed.). Polymers for Agri-Food Applications [M]. Cham: Springer, 2019.
- [38] Huang Y, Zhao Y R, Wang J, *et al.* LDPE microplastic films alter microbial community composition and enzymatic activities in soil[J]. Environmental Pollution, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.112983.
- [39] 樊俊, 谭军, 邓建强, 等. 不同地膜的降解性能及对烟株生长和土壤环境的影响[J]. 中国烟草科学, 2019, **40**(4): 22-28, 36.
- Fan J, Tan J, Deng J Q, *et al.* Degradation property of degradable films and their effects on flue-cured tobacco development and soil ecological environment [J]. Chinese Tobacco Science, 2019, **40**(4): 22-28, 36.
- [40] 刘长源, 焦凤丽, 洪圣哲, 等. 不同覆盖处理对土壤酶活性和土壤养分的影响[J]. 华北农学报, 2021, **36**(S1): 246-252.
- Liu C Y, Jiao F L, Hong S Z, *et al.* Effects of different mulch treatments on soil enzyme activities and soil nutrients[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, **36**(S1): 246-252.
- [41] 赵维峰, 杨文秀, 张艳芳, 等. 行距配置和覆膜对金菠萝产量及果实品质的影响[J]. 南方农业学报, 2018, **49**(12): 2469-2475.
- Zhao W F, Yang W X, Zhang Y F, *et al.* Effects of row spacing and film covering on yield and fruit quality of pineapple cv. MD-2[J]. Journal of Southern Agriculture, 2018, **49**(12): 2469-2475.
- [42] 霍铁珍, 丁春莲, 王文达, 等. 黑色地膜覆盖土壤水热效应及对玉米产量的影响[J]. 水土保持研究, 2020, **27**(1): 335-339.
- Huo Y Z, Ding C L, Wang W D, *et al.* Effects of black plastic film mulching on soil moisture, soil temperature and maize yield [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, **27**(1): 335-339.
- [43] 张杰, 任小龙, 罗诗峰, 等. 环保地膜覆盖对土壤水分及玉米产量的影响[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(6): 14-19.
- Zhang J, Ren X L, Luo S F, *et al.* Influences of different covering materials mulching on soil moisture and corn yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, **26**(6): 14-19.

CONTENTS

Research Status and Trend Analysis of Environmental and Health Risk and Control of Persistent, Mobile, and Toxic Chemicals	ZHANG Shao-xuan, CHEN An-na, CHEN Cheng-kang, <i>et al.</i> (3017)
Assessment of the Multidimensional Performances of Food Waste Utilization Technologies in China	YANG Guang, SHI Bo-fen, ZHOU Chuan-bin (3024)
Spatial Network of Urban Heat Environment in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration Based on MSPA and Circuit Theory	QIAO Zhi, CHEN Jia-yue, WANG Nan, <i>et al.</i> (3034)
Relationship Between Urban Spatial Pattern and Thermal Environment Response in Summer: A Case Study of Hefei City	CHEN Yuan-yuan, YAO Xia-mei, OU Chun, <i>et al.</i> (3043)
Assessment of Emission Reduction Effect of Major Air Pollution Control Measures on PM _{2.5} Concentrations During 13th Five-Year Period in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (3054)
Effect of Clean Heating on Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During the Heating Period in Baoding	LUO Yu-qian, ZHANG Kai, ZHAO Yu-xi, <i>et al.</i> (3063)
Transport Influence and Potential Sources of PM _{2.5} Pollution for Nanjing	XIE Fang-jian, ZHENG Xin-mei, DOU Tao-tao, <i>et al.</i> (3071)
Impact of Atmospheric Circulation Patterns on Ozone Changes in the Pearl River Delta from 2015 to 2020	WANG Yao, LIU Run, XIN Fan (3080)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in Hainan Island	FU Chuan-bo, DAN Li, TONG Jin-he, <i>et al.</i> (3089)
Analysis of Causes and Sources of Summer Ozone Pollution in Rizhao Based on CMAQ and HYSPLIT Models	LIN Xin, TONG Ji-long, WANG Yi-fan, <i>et al.</i> (3098)
Health Benefit Evaluation for PM _{2.5} as Well as O ₃ - _{8h} Pollution Control in Chengdu, China from 2016 to 2020	ZHANG Ying, TIAN Qi-qi, WEI Xiao-yu, <i>et al.</i> (3108)
Impacts of COVID-19 Lockdown on Air Quality in Shenzhen in Spring 2022	LIU Chan-fang, ZHANG Ao-xing, FANG Qing, <i>et al.</i> (3117)
Emission Inventory of Airborne Pollutants from Biomass Combustion in Guizhou Province	WANG Yan-ni, YANG Jing-ting, HUANG Xian-feng, <i>et al.</i> (3130)
Main Chemical Components in Atmospheric Precipitation and Their Sources in Xi'an	ZHOU Dong, HUANG Zhi-pu, LI Si-min, <i>et al.</i> (3142)
Distribution, Respiratory Exposure, and Traceability of Atmospheric Microplastics in Yichang City	LIU Li-ming, WANG Chao, GONG Wen-wen, <i>et al.</i> (3152)
Hydrochemical Evolution in the Yarlung Zangbo River Basin	JIANG Ping, ZHANG Quan-fa, LI Si-yue (3165)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Nitrate in Surface Water of Wuding River Basin	XU Qi-feng, XIA Yun, LI Shu-jian, <i>et al.</i> (3174)
Seasonal Variation Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment of Taipu River	LUO Peng-cheng, TU Yao-jen, SUN Ting-ting, <i>et al.</i> (3184)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in Beiyun River Basin in Beijing	JIANG Bao, SUI Shan-shan, SUN Cheng-yi, <i>et al.</i> (3198)
Tracking Riverine Nitrate Sources and Transformations in the Yiluo River Basin by Nitrogen and Oxygen Isotopes	GUO Wen-jing, ZHANG Dong, JIANG Hao, <i>et al.</i> (3206)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Sediments of Lakes in the Lower Reaches of the Huaihe River	WU Yu-sheng, HUANG Tian-yin, ZHANG Jia-gen, <i>et al.</i> (3217)
Characteristics and Driving Mechanisms of Shallow Groundwater Chemistry in Xining City	LIU Chun-yan, YU Kai-ning, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3228)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of the Yarkant River Basin	YAN Zhi-yun, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (3237)
Composition Structure and Influence Factors of Bacterial Communities in the Miyun Reservoir	CHEN Ying, WANG Jia-wen, LIANG En-hang, <i>et al.</i> (3247)
Photo-Degradation Mechanism and Pathway for Tetracycline in Simulated Seawater Under Irradiation of Visible Light	XU Heng-tao, FU Xiao-hang, FENG Wei-hua, <i>et al.</i> (3260)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Ammonia Nitrogen in Water by Nano Zero-valent Iron-modified Biochar	CHEN Wen-jing, SHI Jun-ling, LI Xue-ting, <i>et al.</i> (3270)
Removal Performance and Mechanism of Potassium Permanganate Modified Coconut Shell Biochar for Cd(II) and Ni(II) in Aquatic Environment	ZHANG Feng-zhi, WANG Dun-qiu, CAO Xing-feng, <i>et al.</i> (3278)
Phosphorus Adsorption in Water and Immobilization in Sediments by Lanthanum-modified Water Treatment Sludge Hydrochar	HE Li-wen, CHEN Yu, SUN Fei, <i>et al.</i> (3288)
Factors Affecting Nitrate Concentrations and Nitrogen and Oxygen Isotope Values of Effluents from Waste Water Treatment Plant	ZHANG Dong, GE Wen-biao, ZHAO Ai-ping, <i>et al.</i> (3301)
Effects of Wastewater Treatment Processes on the Removal Efficiency of Microplastics Based on Meta-analysis	FU Li-song, HOU Lei, WANG Yan-xia, <i>et al.</i> (3309)
Assessment of Critical Loads of Nitrogen Deposition in Natural Ecosystems of China	HUANG Jing-wen, LIU Lei, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (3321)
Impacts of Climate Change and Human Activities on NDVI Change in Eastern Coastal Areas of China	JIN Yan-song, JIN Kai, WANG Fei, <i>et al.</i> (3329)
Ecosystem Carbon Storage in Hangzhou Bay Area Based on InVEST and PLUS Models	DING Xue, WANG Liu-zhu, GUI Feng, <i>et al.</i> (3343)
Soil Stoichiometry Characterization in the Oasis-desert Transition Zone of Linze, Zhangye	SUN Xue, LONG Yong-li, LIU Le, <i>et al.</i> (3353)
Vertical Differences in Grassland Bacterial Community Structure During Non- Growing Season in Eastern Ulansuhai Basin	LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, SHI Yu-jiao, <i>et al.</i> (3364)
Distribution Pattern of Bacterial Community in Soil Profile of <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forest in Luya Mountain	MAO Xiao-ya, LIU Jin-xian, JIA Tong, <i>et al.</i> (3376)
Effects of Vegetation Types on Carbon Cycle Functional Genes in Reclaimed Soil from Open Pit Mines in the Loess Plateau	ZHAO Jiao, MA Jing, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i> (3386)
Effects of Biochar Application on Soil Bacterial Community Diversity and Winter Wheat Growth in Wheat Fields	YAO Li-ru, LI Wei, ZHU Yuan-zheng, <i>et al.</i> (3396)
Effects of Different Planting Years of <i>Dendrocalamus brandisii</i> on Soil Fungal Community	ZHU Shu-hong, HUI Chao-mao, ZHAO Xiu-ting, <i>et al.</i> (3408)
Effects of Biochar Amendment on N ₂ O Emission and Its Functional Genes in Pepper Growing Soil in Tropical Areas	CHEN Qi-qi, WANG Zi-jun, CHEN Yun-zhong, <i>et al.</i> (3418)
Effects of Mulching and Application of Organic and Chemical Fertilizer on Greenhouse Gas Emission and Water and Nitrogen Use in Summer Maize Farmland	JIANG Hong-li, LEI Qi, ZHANG Biao, <i>et al.</i> (3426)
Effects of Different Types of Plastic Film Mulching on Soil Quality, Root Growth, and Yield	MU Xiao-guo, GAO Hu, LI Mei-hua, <i>et al.</i> (3439)
Pollution Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Atmospheric Deposition in a Lead-zinc Smelting City Based on PMF Model	CHEN Ming, WANG Lin-ling, CAO Liu, <i>et al.</i> (3450)
Characterization and Health Risk of Heavy Metals in PM _{2.5} from Road Fugitive Dust in Five Cities of Yunnan Province	HAN Xin-yu, GUO Jin-yuan, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (3463)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Dusts and Surrounding Green Land Soils from Yellow River Custom Tourist Line in Lanzhou	LI Jun, LI Kai-ming, WANG Xiao-huai, <i>et al.</i> (3475)
Source Apportionment and Pollution Assessment of Soil Heavy Metal Pollution Using PMF and RF Model: A Case Study of a Typical Industrial Park in Northwest China	GAO Yue, LÜ Tong, ZHANG Yun-kai, <i>et al.</i> (3488)
Source Analysis of Soil Heavy Metals in Agricultural Land Around the Mining Area Based on APCS-MLR Receptor Model and Geostatistical Method	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (3500)
Source Analysis of Heavy Metals in Typical Farmland Soils Based on PCA-APCS-MLR and Geostatistics	WANG Mei-hua (3509)
Characteristics and Risk Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Soils in the Three Gorges Reservoir Area	LIU Ya-jun, LI Cai-xia, MEI Nan, <i>et al.</i> (3520)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Wanjiang Economic Zone	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (3531)
Evaluation and Source Analysis of Soil Heavy Metal Pollution in a Planting Area in Wanquan District, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3544)
Heavy Metal Concentration, Source, and Pollution Assessment in Topsoil of Chuzhou City	TANG Jin-lai, ZHAO Kuan, HU Rui-xin, <i>et al.</i> (3562)
Analysis on the Distribution Characteristics and Influence Mechanism of Migration and Transformation of Heavy Metals in Mining Wasteland	WEI Hong-bin, LUO Ming, XIANG Lei, <i>et al.</i> (3573)
Ecological Risk Assessment and Source Apportionment of Heavy Metals in Mineral Resource Base Based on Soil Parent Materials	WEI Xiao-feng, SUN Zi-jian, CHEN Zi-ran, <i>et al.</i> (3585)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals and Health Risk in Different Vegetables	QI Hao, ZHUANG Jian, ZHUANG Zhong, <i>et al.</i> (3600)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Wheat Grain in the Typical Sewage Irrigated Area of Shandong Province	WANG Fei, FEI Min, HAN Dong-nui, <i>et al.</i> (3609)
Prediction of Cadmium Uptake Factor in Wheat Based on Machine Learning	NIU Shuo, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (3619)