

王亭亭, 李梅, 江伟, 等. 聚乳酸地膜在大棚西瓜种植中的应用研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 536-542.

WANG Ting-ting, LI Mei, JIANG Wei, et al. Application of Poly(Lactic Acid) Mulching Film in Watermelon Cultivation in Greenhouse[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(6): 536-542.

聚乳酸地膜在大棚西瓜种植中的应用研究

王亭亭, 李梅*, 江伟, 吴榕华, 孙成

(南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要:以西瓜作为受试生物, 采用聚乳酸地膜和普通地膜进行对比试验, 研究聚乳酸地膜在土壤中的降解特性及对土壤物理、化学特性和西瓜产量的影响。结果表明, 聚乳酸地膜的降解过程为首先出现裂纹, 再出现孔洞, 最后出现裂缝; 在西瓜生长过程中, 聚乳酸地膜具有良好的保温作用, 对土壤重金属以及主要元素氧化物含量无显著影响; 覆盖聚乳酸地膜与普通地膜相比, 西瓜苗茎粗和蔓长差异不显著, 叶片数和叶绿素含量聚乳酸地膜组均高于普通地膜组, 表现为增产趋势, 但西瓜产量两者差异不显著。提示聚乳酸薄膜具有良好的降解性且对土壤和作物无显著影响, 有望替代普通地膜在农田中推广使用, 减少农业薄膜对土壤造成的污染, 加快现代生态农业的发展。

关键词:聚乳酸地膜; 降解; 西瓜; 重金属

中图分类号: X53

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)06-0536-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0140

Application of Poly(Lactic Acid) Mulching Film in Watermelon Cultivation in Greenhouse

WANG Ting-ting, LI Mei*, JIANG Wei, WU Rong-hua, SUN Cheng

(State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The degradation properties of poly(lactic acid)(PLA) mulching film and its effects on soil and crops were studied in this paper. The comparison experiments based on watermelon production were conducted with PLA mulching film and traditional non-degradable PE mulching film. The results showed that the PLA mulching film firstly appeared cracks, then holes and breaks in the end during the degradation process. The PLA mulching film had more favorable heat preservation effect, and there were no significant differences in the content of soil heavy metals and metal oxidation of main elements in the process of watermelon growth between two mulching films. The impacts of two different mulching films on watermelon stem diameter and length had no significant differences, while the watermelon seedlings, leaves number and chlorophyll content of the PLA mulching film group were higher than that of the traditional non-degradable PE mulching film group, however the watermelon production had no significant differences. The PLA mulching film with good degradation is expected to replace the traditional mulching film in the field. It will reduce the soil pollution caused by agricultural film and accelerate the development of modern ecological agriculture.

Keywords: poly(lactic acid)(PLA) mulching film; degradation; watermelon; heavy metals

地膜是农业生产的重要物质资料之一, 地膜技术的应用极大地促进了农业产量和效益的提高, 带动了农业生产方式改变和生产力的飞跃发展^[1]。地膜覆盖不仅具有增温、保墒、早熟和增产等作用, 还能防止土

壤流失, 有效控制土壤盐碱度, 减少氮的淋洗。地膜覆盖栽培技术自 1979 年在我国试验应用并推广以来, 增产增收效益明显。过去 30 多年, 地膜用量和农作物覆膜面积一直稳定增长, 2014 年地膜用量达到 144 万 t, 覆膜面积超过 1 800 万 hm²^[2], 未来 10 年我国地膜覆盖面积仍将以每年 10% 的速度增长^[3]。地膜已成为我国继化肥、农药之后的第三大农用生产资料^[4]。

目前使用的地膜多以化纤作原料, 其主要成分是聚乙烯或聚氯乙烯, 可在田间残留几十年不降解, 连

收稿日期: 2017-05-26 录用日期: 2017-07-05

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07204-005-3)

作者简介: 王亭亭(1989—), 女, 助理研究员, 主要从事农业资源方面研究。E-mail: wt_1122@126.com

* 通信作者: 李梅 E-mail: meili@nju.edu.cn

年使用导致碎膜逐年累积于土壤耕层,造成土壤板结、通透性差、根系生长受阻,后茬作物减产等问题^[5],无论覆盖何种作物,所有覆膜土壤均有残膜。据统计,我国农膜年残留量高达35万t,残膜率达42%,即有近一半的农膜残留在土壤中,这无疑是极大的隐患^[6],因此科学家开始致力于可降解地膜的应用与研究。目前国内外开发应用的可降解地膜主要有光降解地膜、生物降解地膜和双降解地膜。其中双降解地膜由于光和生物降解的协同效应,埋土和地面部分均可降解,不影响下季耕作,可基本消除残膜危害^[7],因此目前国外对此研究较多,但国内相对较落后。因在生产中涉及掺配可被生物降解的化学助降剂和可被光激发反应的光敏剂,在工艺和设备等方面均有较高要求,且现阶段光降解和生物降解的有机结合还不甚理想,故其研究开发和应用困难较大^[8]。目前国内对降解地膜的试验研究主要集中在光降解和淀粉填充型生物降解地膜的研究,与普通膜相比,降解膜由于具有可降解特性,能有效减少残膜的污染危害,但由于区域气候条件和作物种类不同,其覆盖后的降解特性以及作物产量的增减也千差万别^[9]。

聚乳酸,又称聚丙交酯,因原材料易获取,可完全降解、无害性等特点,在减少环境污染、节省石油资源及减轻地球温室效应方面具有重要的应用意义,因而被认为是最具发展前景的理想绿色高分子材料之一^[10]。聚乳酸无毒,与人体相容性好,在体内可完全降解,被认为是最有前途的医用高分子材料,近年来,由于生态环境保护的需要,又开始将其作为通用塑料替代产品,但由于聚乳酸材料本身的缺陷,如性能脆、抗冲击性差以及热不稳定,缺乏柔性和弹性,极易弯曲变形^[11]。聚乳酸地膜是聚L-乳酸(PLA)经改性后进行吹膜加工制成。由于传统地膜的不可降解性,大量使用不仅带来严重的白色污染,而且造成农作物减产,降低化肥吸收利用率,加速农田土壤氮素流失,引起富营养化等问题,因此采用生物可降解聚乳酸薄膜有望从根本上解决农业白色污染问题^[12]。张妮等^[13]研究结果表明:聚乳酸生物降解地膜具有与普通膜相当的增温、保墒性能,尤其在保温性能方面优于传统普通地

膜,此外,聚乳酸生物降解地膜可满足棉花正常生长的需求,但与此同时厚的降解膜增加了使用的成本,给推广造成了一定的难度,在今后原料成本逐渐降低及生产工艺不断改进的基础上有望代替普通地膜推广使用。

西瓜作为一种重要的经济作物,它在中国主产区的播种总面积达到180万hm²以上,总产量达到3800多万t,其产值已占蔬菜产业总产值的10%以上^[14]。本研究选用绿色聚乳酸地膜和普通地膜分别覆盖种植西瓜,并对两者在使用过程中保温、保墒、对西瓜生长发育影响及降解状况进行系统比较研究,以期聚乳酸地膜大面积应用提供理论依据和技术支持,减少农业薄膜对土壤造成的污染,加快现代生态农业的发展。

1 材料与方法

1.1 试验材料

聚乳酸地膜所使用的聚乳酸原料来自南京大学国家有机毒物污染控制与资源化工程技术研究中心中试产品,并经改性吹膜加工成地膜成品。试验按覆膜技术要求进行,播前或移栽前整地,覆膜、灌溉等技术措施与当地生产一致。试验用绿色聚乳酸地膜(PLA,批次TR2015-1),膜宽120cm,膜厚0.06mm;普通PE地膜膜宽120cm,膜厚0.06mm。供试西瓜品种为台湾小兰,先育种后进行瓜苗移栽。西瓜播时施用三元复合肥(N、P₂O₅、K₂O各15%)630kg·hm⁻²,饼肥(菜籽饼)630kg·hm⁻²,尿素187.5kg·hm⁻²,有机肥12495kg·hm⁻²。

1.2 试验地概况

本实验于2015年3—6月在南京市江宁区进行,南京市地处中纬度,属于亚热带季风性气候,年平均气温16℃^[15],夏冬季节长而春秋季节短,雨量充沛,光照充足,年平均雨季117d,年平均相对湿度74%^[16]。受试地块位于江宁区台湾农民创业园新源宝城市农场(118°78'E,31°78'N)。试验前按S型进行土样采集,风干、磨碎过5mm筛混合后检测理化性质,结果见表1。

表1 南京江宁试验点位土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties of experimental site in Jiangning, Nanjing

pH值	有机质/%	容重/g·cm ⁻³	砂粒/%	粉粒/%	粘粒/%	脲酶/mg·g ⁻¹	全磷/%	全氮/%
6.97±0.04	1.22±0.04	1.51±0.06	3.99±0.14	59.19±3.16	35.03±2.82	0.82±0.14	0.056±0.08	0.52±0.30

注:实验数据为3次检测平均值。

1.3 试验设计

选用普通 PE 地膜与聚乳酸地膜(PLA, TR2015-1)进行对比试验,普通地膜记作 1,聚乳酸地膜记作 2,每种地膜 3 个平行地块,分别记作 A、B、C。总面积 800 m²,2015 年 3 月下旬育苗,两叶一心时定植,缓苗 1 周,3 蔓整枝,开花期人工授粉,其他管理措施按当地农民习惯。株间距 40 cm,垄间距 1 m,垄上覆白膜,主要作用是提高地温、保湿;整块试验田覆黑膜,主要作用是防草、保湿;覆膜采用人工作业。本试验主要研究黑色地膜的降解情况。

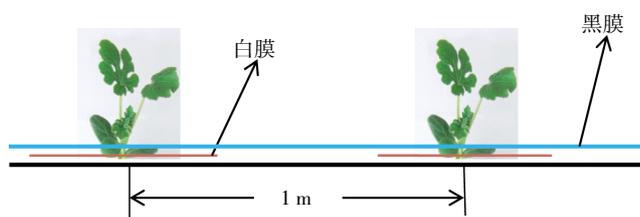


图 1 西瓜种植示意图

Figure 1 The diagram of watermelon planting patterns

1.4 测定指标与方法

1.4.1 地膜降解情况

田间地膜降解情况采用目测和照相相结合的方法,将地膜降解过程分为 3 个阶段,第一阶段是从开始铺膜到出现小裂缝的时间为诱导期阶段;第二阶段从肉眼清楚看到大裂缝的时间为破裂期;第三阶段是地膜已经裂解成大碎块,没有完整的膜面至出现膜崩裂的时间,即为崩裂期;地面无大块残膜存在,虽仍有微小碎片,但对土壤和作物已无影响,即为完全降解。通过定期的人为肉眼观测,记录地膜颜色、形态及表面完整情况的变化。

1.4.2 土壤质量检测

试验过程中每日对膜下表层温度进行测定,并分别在覆膜前和作物生长结束、地膜降解 5 个月后,按梅花型或 S 型采集 5 个点位土壤样品,烘干法检测土壤水分含量,原子吸收光谱仪(Hitachi 180-80)测定重金属含量,X 射线荧光光谱仪(ARL-9800)检测金属元素氧化物含量。

1.4.3 作物生长发育指标测定

用卷尺从主茎靠近地表处测量株高,数显游标卡尺对主茎基部进行茎粗测量,每次取样 20 株;叶绿素含量采用常规丙酮研磨提取法测定,每次取样 10 株;西瓜成熟后进行分区采摘,每个处理选取 10 个果实(同一授粉日期),计算平均单果重;上述处理均为 3

个平行地块。

1.5 数据分析

数据统计采用 Excel 和 Origin 8.5 软件进行分析,将试验组与对照组进行显著性 t 检验,以 $P < 0.05$ 作为显著性依据。

2 结果与讨论

2.1 不同地膜的降解性能

西瓜覆膜播种后进行田间实地观测,结果显示黑色 PLA 地膜和普通地膜颜色均随着时间增长逐渐变浅,两者颜色区别不明显;黑色 PLA 地膜覆盖 7 周前未出现明显降解,覆膜后第 7 周出现裂纹,第 9 周 25% 田间地膜出现裂纹,逐渐裂成条状,地膜变薄变脆;而普通地膜在覆膜后第 9 周才开始出现裂纹;因普通地膜不具降解性,其出现的细小裂纹属正常损耗;覆膜前期两种地膜正常,均可保湿防草,没有破损,两种地膜外观差别不明显;覆膜中期,两种地膜颜色变浅,PLA 地膜开始出现细小裂纹;覆膜后期,1/4 PLA 地膜出现条状裂纹,PE 地膜除正常损耗外,无降解性质裂纹(图 2)。西瓜种植结束时,在两种地膜的土壤采样点进行相同面积的比较,两种地膜均裂解成条状,未全部降解,但 PE 地膜的成型地膜(>20 cm×20 cm)的面积大于 PLA 地膜,大块地膜被分类回收,不成形的小块地膜残留在试验田。

西瓜种植结束后,部分小块地膜依然残留于土壤中,被翻入下层土壤,后续将跟踪聚乳酸地膜对土壤结构性质和后茬作物的影响及地膜整体降解特性研究。

2.2 覆盖不同地膜对土壤质量影响

由图 3 可见,播种后前两周,覆盖普通地膜的土壤水分高于 PLA 地膜;从第 3 周开始,覆盖 PLA 地膜的土壤水分逐渐高于普通地膜,显示 PLA 地膜后期保水保湿效果明显,但两者无显著性差异。第 1 周普通地膜膜下温度高于 PLA 地膜,随时间增加,差异逐渐减小,PLA 膜下温度逐渐高于普通地膜,除第 2 周有显著性差异外,覆盖 2 种地膜对土壤温度基本无显著性差异,表明应用 PLA 地膜代替普通地膜未影响其增温效果。

覆膜前和地膜降解 5 个月后土壤样品重金属含量测定结果的描述性统计分析见表 2。结果表明覆膜前和地膜降解 5 个月后重金属含量无显著变化,提示覆膜对土壤重金属无明显影响。与国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中 II 级标准相比,重金属含量

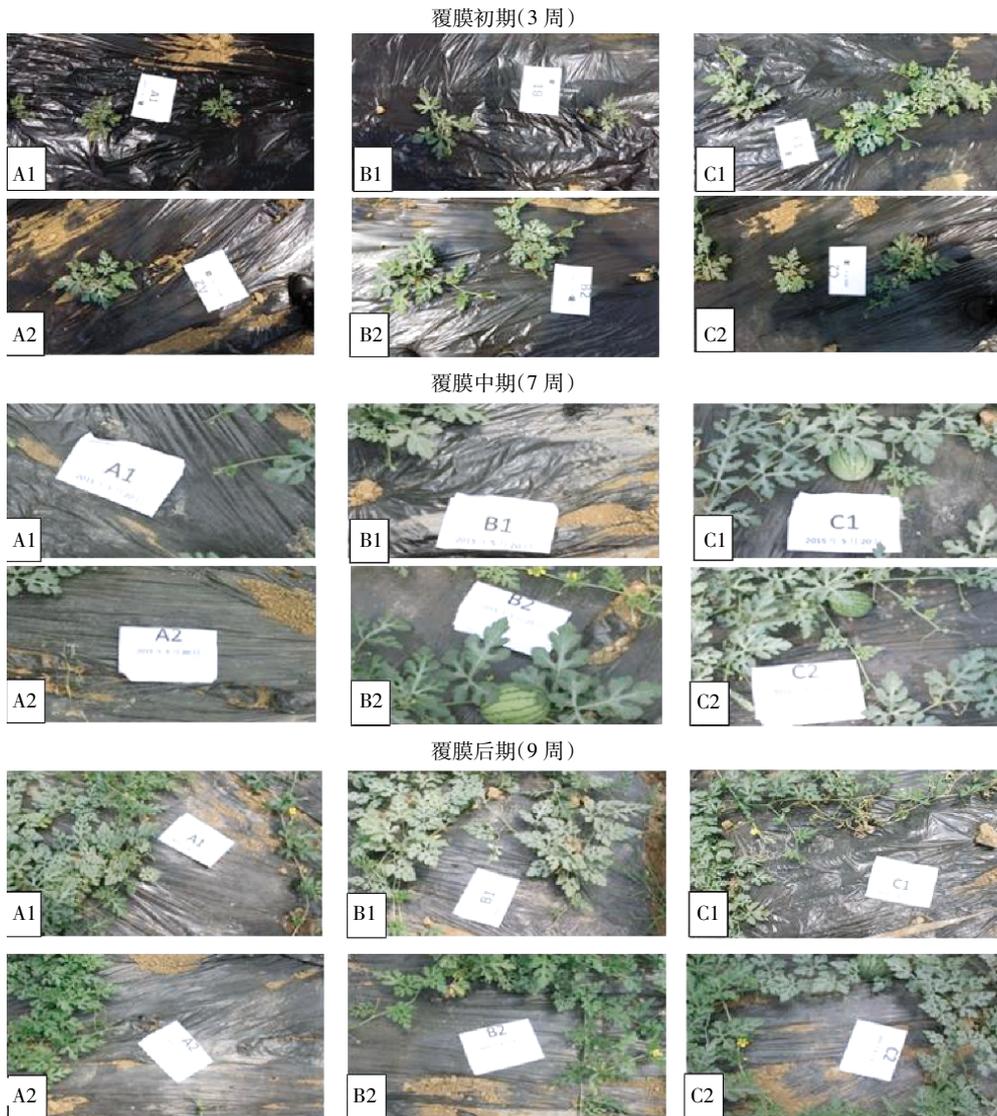
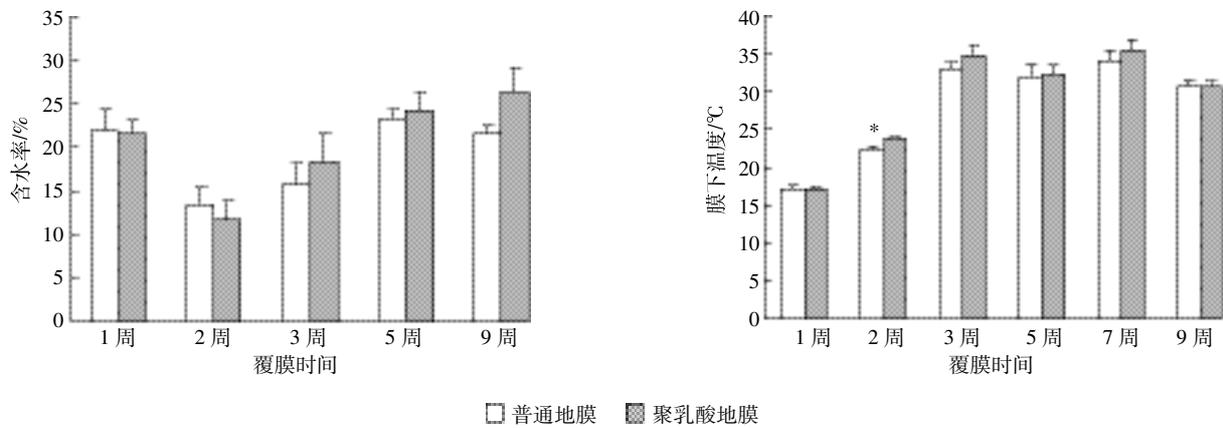


图2 地膜降解状态图

Figure 2 Degradable state diagram of two mulching films



□ 普通地膜 ■ 聚乳酸地膜

“*”表示有 $P < 0.05$ 显著性差异。下同

图3 土壤含水率和温度变化

Figure 3 The changes of soil moisture and temperature under two mulching films

均未超过规定限值。土壤中主要元素氧化物含量测定结果的描述性统计分析见表 3,除 CaO 和 SO₃ 在地膜降解 5 个月后有明显增加外,其他主要元素含量基本没有变化。SO₃ 增加可能受空气中含硫影响^[17];CaO 的增加可能是由于深根系作物将移动到较深土层中的

钙素吸收,通过植物器官运送到土壤表层或分泌、或以植物残体形式归还于土壤上层,并且改善表层土壤有关性状,这种效应被称作“阳离子泵”作用^[18]。

2.3 作物生长发育指标测定

由图 4~图 6 可见,在第 2、3 周,PLA 地膜和普通

表 2 覆膜前和地膜降解后土壤重金属含量(mg·kg⁻¹)
Table 2 The changes of the soil heavy metal contents(mg·kg⁻¹)

项目	Mn	Cu	Zn	Sn	Hg	Ni	Co
覆膜前	657.83±17.50a	36.40±2.55a	70.17±2.73a	ND	ND	30.73±0.99a	13.37±0.99a
地膜降解 5 个月后	667.83±25.98a	38.20±1.91a	67.30±5.65a	ND	ND	27.30±0.26a	10.57±0.23a
土壤环境质量 II 级标准	—	100	250	—	0.5	50	—

注:ND 表示未检出。不同小写字母表示显著性差异(P<0.05)。下同。

表 3 覆膜前和地膜降解后土壤主要元素氧化物含量(%)
Table 3 The changes of the soil metal oxidation of main elements content(%)

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	烧失量
覆膜前	67.38±0.76a	15.36±0.39a	4.00±0.71a	2.20±0.09a	0.94±0.20a	0.83±0.03a	0.95±0.21a	0.81±0.02a	0.16±0.02a	0.09±0.02a	7.08±0.18a
地膜降解 5 个月后	66.78±2.35a	14.89±0.21a	3.93±0.13a	2.19±0.06a	1.00±0.16a	0.82±0.01a	1.68±1.43b	0.80±0.02a	0.14±0.02a	0.12±0.02b	7.42±0.84a

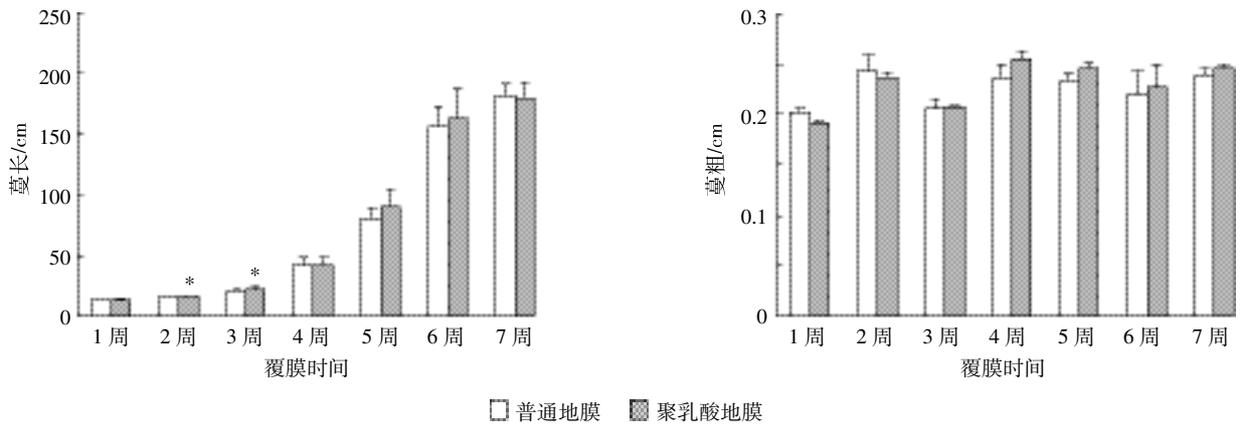


图 4 蔓长蔓粗变化

Figure 4 The changes of watermelon plant length and stem diameter under two mulching films

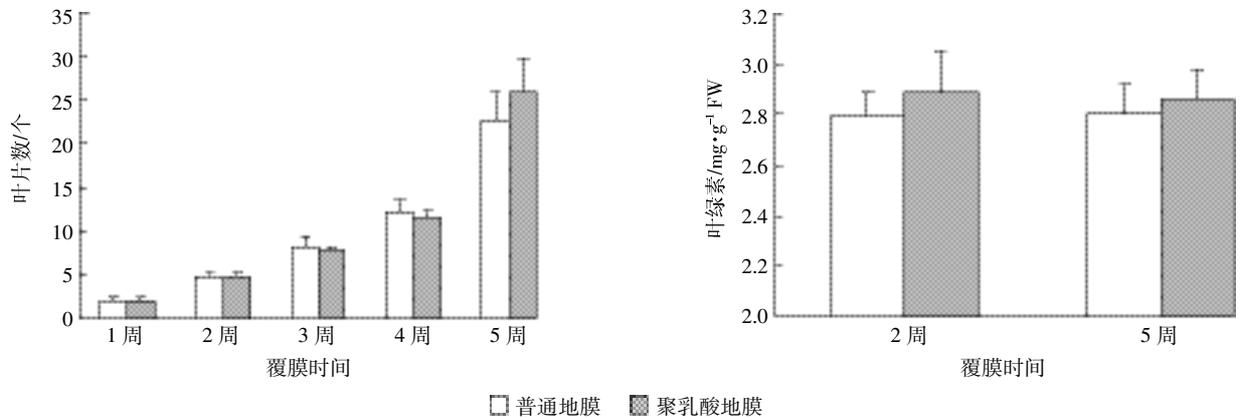


图 5 叶片数和叶绿素变化

Figure 5 The changes of leaves number and chlorophyll content under two mulching films

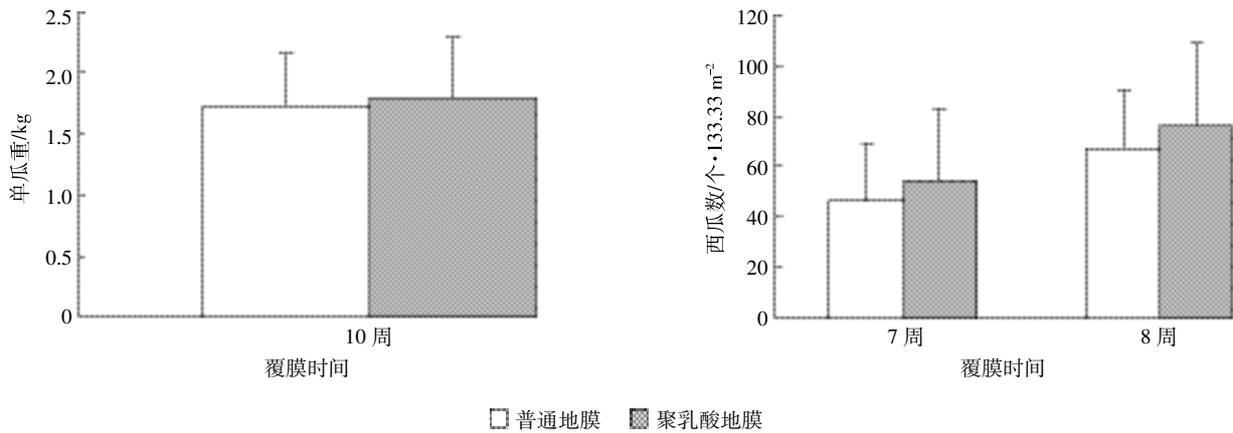


图6 西瓜单重和总数对比

Figure 6 The changes of watermelon yield under two mulching films

地膜的蔓长有差异性,随生长期延长,两种地膜对西瓜蔓长的影响差异消失;在生长前期(前3周)普通覆膜组西瓜蔓粗稍大于PLA地膜,随生长期延长,覆盖PLA地膜的西瓜蔓粗则大于普通覆膜组,但差异不显著(图4);至第5周后PLA地膜组的叶片数也普遍多于普通地膜组,叶绿素含量也是如此,即PLA地膜组高于普通地膜组,但差异均不显著(图5)。在收获期,对单瓜重而言,PLA地膜和普通地膜无显著性差异,而西瓜总数则显示PLA地膜组的略高于普通地膜组(图6);总体而言,覆盖PLA地膜组的西瓜生长指标均高于普通地膜组,提示覆聚乳酸可降解地膜对植物的生长具有促进作用。

聚乳酸中试生产成本 $16\ 635\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,可降解农用地膜政府补贴政策为 $25\ \text{元}\cdot 667\ \text{m}^{-2}$,可降解农用地膜使用量为 $7\ \text{kg}\cdot 667\ \text{m}^{-2}$,使用可降解农用地膜可节省地膜捡拾人工费 $50\ \text{元}\cdot 667\ \text{m}^{-2}$,算上所有补贴,综合成本可降至 $13\ 035\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,而普通PE地膜成本为 $10\ 000\sim 13\ 000\ \text{元}\cdot\text{t}^{-1}$,绿色聚乳酸地膜在保温性能方面优于传统普通地膜,不会出现因膜内升温过快而“烫苗”现象,不会因为温度下降过快而影响幼苗发育。

综上所述,聚乳酸地膜不但可以解决农业“白色污染”问题,同时也为农业固体废弃物治理提供一个新的契机。聚乳酸地膜作为一种新型环保材料,在提高并保持土壤温度和水分方面作用明显,有望替代普通地膜大面积应用于农业生产,其后续降解特性和对土壤影响及田间应用效果仍在逐步验证中,以期进一步提高准时可控性、用后快速降解性和完全降解性,进而为绿色聚乳酸地膜替代传统不可降解地膜提供技术支撑,同时为绿色聚乳酸地膜的规模化生产与推广奠定基础。

3 结论

通过对比聚乳酸地膜和普通地膜使用过程中对西瓜生长的影响及降解情况研究,结论如下:

(1)PLA地膜的降解过程为首先出现裂纹,然后出现孔洞,最后出现裂缝;

(2)在西瓜生长过程中,PLA地膜具有良好的保温作用,2种地膜在提高并保持土壤温度和水分方面作用相当;对西瓜的生长和增产均具一定促进作用;

(3)PLA地膜具有良好的降解性且对土壤和作物无显著影响,有望替代普通地膜在农田中推广使用。

参考文献:

- [1] 李若帆. 不同覆膜条件对春玉米种植的作用研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014:5.
LI Ruo-fan. Research on the influences of spring corn under different film condition[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014:5. (in Chinese)
- [2] 严昌荣, 何文清, 薛颖昊, 等. 生物降解地膜应用与地膜残留污染防控[J]. 生物工程学报, 2016, 32(6):748-760.
YAN Chang-rong, HE Wen-qing, XUE Ying-hao, et al. Application of biodegradable plastic film to reduce plastic residual pollution in Chinese agriculture[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2016, 32(6): 748-760. (in Chinese)
- [3] 李晓莎, 岳善超, 李世清. 地膜覆盖对农田 N_2O 排放影响的研究现状[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(10):78-81.
LI Xiao-sha, YUE Shan-chao, LI Shi-qing. Research status of the effects of plastic film mulching on N_2O emission in farmland[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(10):78-81. (in Chinese)
- [4] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜对土壤、温度水分及玉米生长发育的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(6):25-30.
SHEN Li-xia, WANG Pu, ZHANG Li-li. Effects of degradable film on soil temperature, moisture and growth of maize[J]. *Transactions of the*

- Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27 (6):25-30. (in Chinese)
- [5] 刘敏. 可生物降解地膜的应用效果及其降解机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2011:4.
LIU Min. Studies on application and degradation mechanism of biodegradable plastic film[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011:4. (in Chinese)
- [6] 王朝云, 许香春, 易永健, 等. 麻地膜降解对土壤性质和作物产量影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1):84-92.
WANG Chao-yun, XU Xiang-chun, YI Yong-jian, et al. Effects of degradation with bast fiber mulching film on soil properties and crop yields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):84-92. (in Chinese)
- [7] 申丽霞, 王璞, 张丽丽. 可降解地膜的降解性能及对土壤温度、水分和玉米生长的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4):111-116.
SHEN Li-xi, WANG Pu, ZHANG Li-li. Degradation property of degradable film and its effect on soil temperature and moisture and maize growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(4):111-116. (in Chinese)
- [8] 康虎, 敖李龙, 秦丽珍, 等. 生物质可降解地膜的田间降解过程及其对玉米生长的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(6):54-58.
KANG Hu, AO Li-long, QIN Li-zhen, et al. Effects of biodegradable mulch film by reusing biomass residue on degradation in field and corn growth[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(6):54-58. (in Chinese)
- [9] 张雪梅. 新疆天山北坡植棉区降解地膜降解机制的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2013:6.
ZHANG Xue-mei. Degradation mechanism research of degradable mulching film on the cotton plantation area of the northern slope of the Tianshan Mountains in Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013:6. (in Chinese)
- [10] 赵彩霞, 何文清, 刘爽, 等. 新疆地区全生物降解膜降解特征及其对棉花产量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8):1616-1621.
ZHAO Cai-xia, HE Wen-qing, LIU Shuang, et al. Degradation of biodegradable plastic mulch film and its effect on the yield of cotton in Xinjiang region, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8):1616-1621. (in Chinese)
- [11] 赵丹, 冯辉霞, 陈娜丽, 等. 强聚乳酸的合成工艺及应用研究进展[J]. 应用化工, 2009, 38(1):128-130.
ZHAO Dan, FENG Hui-xia, CHEN Na-li, et al. Research on synthesis and application of polylactic acid[J]. *Applied Chemical Industry*, 2009, 38(1):128-130.
- [12] 陈东城. 我国农用地膜应用现状及展望[J]. 甘蔗糖业, 2014(4):50-54.
CHEN Dong-cheng. Application status and development of mulch film in China[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2014(4):50-54. (in Chinese)
- [13] 张妮, 李琦, 侯振安, 等. 聚乳酸生物降解地膜对土壤温度及棉花产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(2):114-119.
ZHANG Ni, LI Qi, HOU Zhen-an, et al. Effect of polylactic acid-degradable film mulch on soil temperature and cotton yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(2):114-119. (in Chinese)
- [14] 原伟杰. 聚乳酸纤维沙袋沙障降解老化性能研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2014:6.
YUAN Wei-jie. Study on the degradation and aging performance of poly lactic acid fiber sandbag sand-barrier[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014:6. (in Chinese)
- [15] 杨小振, 张显, 马建祥, 等. 滴灌施肥对大棚西瓜生长产量及品质的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7):109-118.
YANHG Xiao-zhen, ZHANG Xian, MA Jian-xiang, et al. Effects of drip fertigation on growth, yield and quality of watermelon in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(7):109-118. (in Chinese)
- [16] 周丽敏, 张皓, 李琪, 等. 黑色地膜对马铃薯产量及土壤质量的影响[J]. 南京大学信息工程学报(自然科学版), 2016, 8(4):316-321.
ZHOU Li-min, ZHANG Hao, LI Qi, et al. Effect of black film mulching on potato yield and soil quality[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2016, 8(4):316-321. (in Chinese)
- [17] 李男. 表层土壤硫含量和硫同位素组成以及与苔藓植物的对比研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012:12.
LI Nan. Different forms of sulfur content and $\delta^{34}\text{S}$ in topsoils and the comparative study with mosses[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012:12. (in Chinese)
- [18] 史红平. 关中农田土壤钙素状况及其退化特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016:5.
SHI Hong-ping. Degradation characteristics and effect of soil calcium in Guanzhong farmland[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2016:5. (in Chinese)