

# 全生物降解地膜对娃娃菜生长发育及土壤理化性质的调控效应

安昱瑾<sup>1</sup>, 李文德<sup>1</sup>, 王 兴<sup>2</sup>

(1. 张掖市耕地质量建设管理站 甘肃张掖 734000; 2. 张掖市农业科学研究院 甘肃张掖 734000)

**摘要:** 为筛选适宜河西地区娃娃菜生产的全生物降解地膜, 本研究以 PBAT(聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯)、淀粉、PLA(聚乳酸)、PBAT+PLA、PLA+淀粉为主要成分的 5 类全生物降解地膜为处理, 以普通 PE(聚乙烯)地膜为对照, 系统评价了其对于娃娃菜生长发育、光合特性、生理指标及土壤环境的影响。测定内容包括植株干物质积累量、叶绿素含量、抗氧化酶(POD、SOD)活性、丙二醛(MDA)含量, 以及土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和全氮、全磷、全钾与有机质含量。结果表明, PBAT+PLA 材质的全生物降解地膜处理的娃娃菜生长发育显著改善: 叶绿素含量提高 162.96%, 光合速率提升 79.15%, POD 和 SOD 活性增强, MDA 含量降低 87.5%, 最终产量较对照(PE)增加 10.40%。该地膜降解性能优异, 残膜量减少 77.69%; 对土壤环境也有积极影响: 土壤蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶活性分别较 PE 处理提高 2.21%、32.70% 和 7.35%; 土壤全氮、全磷、全钾和有机质含量分别增加 2.15%、10.75%、15.33% 和 15.14%。PBAT+PLA 全生物降解地膜可通过促进娃娃菜光合作用和提高其抗逆性, 优化土壤理化性质与提高酶活性, 实现增产与环保双赢, 适宜在河西地区推广使用。

**关键词:** 全生物降解地膜; 娃娃菜; 生长; 土壤理化性质

中图分类号: S634.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2026)03-173-08

## Regulatory effect of fully biodegradable plastic film on the growth and development of baby cabbage and soil physicochemical property

AN Yujin<sup>1</sup>, LI Wende<sup>1</sup>, WANG Xing<sup>2</sup>

(1. Cultivated Land Quality Management Station of Zhangye City, Zhangye 734000, Gansu, China; 2. Zhangye Academy of Agricultural Sciences, Zhangye 734000, Gansu, China)

**Abstract:** To screen for fully biodegradable mulching films suitable for the production of baby cabbage in the Hexi region, this study treated five types of fully biodegradable mulching films with PBAT, starch, PLA, PBAT+PLA, and PLA+starch as the main components, and used ordinary PE mulching film as the control. The study systematically evaluated their effects on the growth, development, photosynthetic characteristics, physiological indicators of baby cabbage, and the soil environment. The measured contents included dry matter accumulation of plants, chlorophyll content, antioxidant enzyme (POD, SOD) activity, MDA content, and soil sucrase, urease, and catalase activity, as well as total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and organic matter content. The results showed that the fully biodegradable mulch film made of PBAT+PLA significantly improved the growth and development of Chinese cabbage: Chlorophyll content increased by 162.96%, photosynthetic rate increased by 79.15%, POD and SOD activity were enhanced, MDA content decreased by 87.5%, and ultimately, the yield increased by 10.40% compared to the PE control. This mulch film exhibited excellent degradation performance, with a 77.69% reduction in residual film. It also had a positive impact on the soil environment: Soil sucrase, urease, and catalase activity were increased by 2.21%, 32.70%, and 7.35%, respectively, compared to the PE treatment; soil total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and organic matter content were increased by 2.15%, 10.75%, 15.33%, and 15.14%, respectively. The fully biodegradable mulch film made of PBAT+PLA can enhance photosynthesis

收稿日期: 2025-05-27; 修回日期: 2025-10-08

基金项目: 甘肃省科技计划项目(24CXNG003, 26CXNG004); 张掖市市级科技计划项目(ZY2023BJ26)

作者简介: 安昱瑾, 女, 高级农艺师, 主要从事耕地质量提升工作。E-mail: 283409773@qq.com

通信作者: 李文德, 男, 正高级农艺师, 主要从事蔬菜栽培技术推广工作。E-mail: 57228573@qq.com

and stress resistance in baby cabbage, optimizing soil physicochemical properties and enzyme activity, achieving both yield increase and environmental protection.. It is suitable for promotion and application in the Hexi region.

**Key words:** Fully biodegradable plastic film; Baby cabbage; Growth; Soil physicochemical property

地膜覆盖技术对我国西北干旱半干旱地区作物增产具有重要贡献<sup>[1]</sup>,能有效提高土壤墒情和水分利用效率<sup>[2]</sup>。然而,长期使用普通 PE(聚乙烯)地膜导致土壤中残膜量急剧增加,影响种子发芽,改变土壤理化性质,如增加土壤容重、降低孔隙度<sup>[3-4]</sup>,并引起土壤养分含量变化<sup>[5-6]</sup>。全生物降解地膜以生物降解材料为主要成分,可在微生物作用下完全降解为 H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub>,是解决农田残膜污染问题的有效途径<sup>[7]</sup>。

目前,全生物降解地膜在玉米、棉花等大田作物中的研究较多,在蔬菜中的应用仍较缺乏<sup>[8-12]</sup>。张掖市作为全国重要的高原夏菜生产基地,娃娃菜种植面积稳定在 0.64 万 hm<sup>2</sup><sup>[13-15]</sup>,但长期覆膜与连作导致土壤板结、病害加剧、品质下降。为此,笔者在张掖娃娃菜产区引进 5 种全生物降解地膜,以普通 PE 地膜为对照,系统研究不同地膜处理对娃娃菜生长发育、光合特性、抗氧化酶活性、产量品质及土壤酶活性与养分状况的影响,旨在筛选适宜河西地区娃娃菜生产的全生物降解地膜产品,通过探究其对娃娃菜生长发育及土壤环境的综合影响,为解决农田残膜污染问题、促

进蔬菜绿色生产与可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概述

试验开展于 2022 年 3—8 月,为期 184 d,试验地点位于甘肃省张掖市甘州区党寨镇下寨村蔬菜生产基地。该地区多年平均气温为 7 °C,1 月平均气温-9.2 °C,7 月平均气温 21.5 °C。无霜期年平均 156 d,全年降水量 118.4 mm,降水集中在每年 6—9 月,全年日照 2550~3500 h。

### 1.2 试验设计

供试娃娃菜品种为当地主栽品种金玉黄,由张掖市兆田生态农业有限公司提供。本试验共设置 6 个覆膜试验组,包括 5 个全生物降解地膜及 1 个 PE 地膜(表 1)。采用随机区组排列,每个小区面积为 7.0 m<sup>2</sup>(10 m×0.7 m),行距 30 cm,株距 24.5 cm,每个小区保苗 82 株,3 次重复。其余田间管理措施与常规栽培模式一致。在试验地周边设置保护行以消除边际效应的影响。所有处理均统一采用穴盘育苗方式进行移栽。

表 1 不同覆膜处理材料  
Table 1 Different film-coating treatment materials

处理 Treatment	地膜类型 Type of mulching film	来源 Source	颜色 Color	规格 Specification		主要成分 Main ingredients
				宽度 Width/ cm	厚度 Thickness/ mm	
1	全生物降解地膜 Fully biodegradable mulching film	青岛海益塑业有限责任公司 Qingdao Haiyi Plastic Industry Co., Ltd.	黑色 Black	120	0.01	聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯 Polybutylene terephthalate(PBAT)
2	全生物降解地膜 Fully biodegradable mulching film	常州百利基生物材料科技有限公司 Changzhou Bailiji Biomaterials Technology Co., Ltd.	黑色 Black	120	0.01	淀粉 Starch
3	全生物降解地膜 Fully biodegradable mulching film	甘肃福雨塑业有限责任公司 Gansu Fuyu Plastic Industry Co., Ltd.	黑色 Black	120	0.01	聚乳酸 Poly(lactic acid) (PLA)
4	全生物降解地膜 Fully biodegradable mulching film	兰州鑫银环橡塑制品有限公司 Lanzhou Xinyinhuan Rubber and Plastic Products Co., Ltd.	黑色 Black	120	0.01	聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯+聚乳酸 Polybutylene terephthalate (PBAT)+Poly-lactic acid(PLA)
5	全生物降解地膜 Fully biodegradable mulching film	甘肃前沿生物科技有限公司 Gansu Frontier Biotechnology Co., Ltd.	黑色 Black	120	0.01	聚乳酸+淀粉 Poly(lactic acid)(PLA)+淀粉 Starch
CK	标准塑料地膜 Standard plastic film for covering	市场采购 Market purchase	黑色 Black	120	0.01	聚乙烯 Polyethylene(PE)

### 1.3 测定项目

1.3.1 田间指标测定 观察记录娃娃菜全生育期,系统观测并记录各处理地膜的降解进程,每个试验小区选取5株生长状况一致的植株,测定娃娃菜的主要生物学性状<sup>[16]</sup>(包括株高、开展度、球高度、紧实度、球径及球形指数等)和经济学性状(如单球质量与净菜率),并最终进行产量测定。

1.3.2 娃娃菜主要指标测定 于娃娃菜结球生长后期,选择晴朗天气上午10:00—12:00时段,在各试验小区随机选取5株生长状况一致的植株,使用浙江托普云农公司生产的光合测定仪TP-PM-2,统一于植株相同叶位测定叶片净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )及气孔导度( $G_s$ ),每项指标以5株测定值的平均值作为该小区的代表值。

在娃娃菜成熟前期,每个小区随机选择5株长势一致的娃娃菜,取相同部位面积同样大小的叶片鲜样,用液氮保存,带回实验室,采用斐林试剂滴定法测定还原糖含量,采用2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素C含量,采用分光光度法测定叶绿素含量,采用愈创木酚法测定POD含量<sup>[17]</sup>,采用氮蓝四唑光化还原法测定SOD含量<sup>[17]</sup>,采用硫代巴比妥酸法测定MDA含量<sup>[17]</sup>。

在娃娃菜结球前期和成熟期,每个小区随机选择5株长势一致的娃娃菜,选取不同部位,用自来水清洗干净后,冷藏保存运回实验室。采用凯氏定氮法测定全氮含量<sup>[18]</sup>,采用钼钒黄比色法测定全磷含量<sup>[18]</sup>,采用火焰光度计法测定全钾含量<sup>[18]</sup>。

在娃娃菜收获后期,每个处理采取3点取样法,取样面积为1m×1m,以土壤深度30cm为取样区间,挑取其中残膜,分别统计每个样点的残膜质量。

1.3.3 土壤理化性质及酶活性测定 土壤样品分别于2022年3—8月采收前、采收后按“S”形多点采样,取土壤表层0~20cm的土壤样品混合均匀,风干过筛后,采用半微量凯氏定氮法测定土壤全氮含量<sup>[19]</sup>;采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量<sup>[19]</sup>;采用氢氧化钠熔融-火焰光度计法测定土壤全钾含量<sup>[19]</sup>;采用电位法测定土壤pH值<sup>[19]</sup>;采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定土壤脲酶活性<sup>[20]</sup>;采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定土壤蔗糖酶活性<sup>[20]</sup>;采用高锰酸钾滴定法或紫外分光光度法测定土壤过氧化氢酶活性<sup>[20]</sup>。

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel软件整理试验数据,采用SPSS 20.0进行方差分析,采用Origin 2024作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同降解地膜处理对娃娃菜农艺性状的影响

由表2可知,5种不同全生物降解地膜覆膜处理和PE地膜覆膜处理均可保障娃娃菜完成生育期。不同覆膜材料处理下的娃娃菜生育期均为50~52d,且生育期长短差异不明显。其中,处理5生育期最短,仅有50d,处理1、处理2生育期最长,均为52d。

表2 不同处理娃娃菜生育期比较

Table 2 Comparison of growth periods of baby cabbage under different treatments

处理 Treat- ment	播种期 Sowing date	定植期 Transplan- ting date	莲座期 Rosette stage	结球期 Head formation stage	成熟期 Maturity stage	生育期 Growth period/d
1	04-08	05-10	05-21	06-11	06-30	52
2	04-08	05-10	05-23	06-14	06-30	52
3	04-08	05-10	05-20	06-13	06-29	51
4	04-08	05-10	05-21	06-12	06-29	51
5	04-08	05-10	05-22	06-14	06-28	50
CK	04-08	05-10	05-21	06-13	06-29	51

由表3可知,6种覆膜处理下娃娃菜的株高、开展度、球高度等农艺性状具有显著差异。采用全生物降解地膜处理的娃娃菜株高均高于PE对照组(处理1除外)。其中,处理4、5增加显著,差异较大;开展度与对照相比,各处理也有所增加,表现优于对照(处理2除外),其中处理4开展度最大,增加6.68%;球高度与对照相比,除处理1外均显著增加,其中处理3的球高度最高,为22.4cm,处理1最低;球径与对照相比,各处理差异不显著,处理1、2和4差异显著;球形指数与对照相比,各处理间均具有差异显著性,其中,处理4球形指数最大,处理2最小;6种覆膜处理娃娃菜在紧实度方面均表现为紧实。

由表4可知,6种覆膜处理下的娃娃菜维生素C含量和还原糖含量具有一定的差异性。在还原糖含量方面,处理4下娃娃菜的还原糖含量最高,处理1下娃娃菜的还原糖含量最低,处理4、5优于对照,具体表现为:处理4>处理5>CK>处理3>处理2>处理1,处理间差异均达到显著水平。在维生素C含量方面,处理2含量最高,处理4含量最低,具体表现为:处理2>处理1>处理5>处理3>CK>处理4。维生素C含量和还原糖含量变化呈反比例趋势。

由表4可知,6种覆膜处理下的娃娃菜主要经济性状具有较大差异,总体来看,处理3、4、5均优于对照,处理1、2性状表现不如对照。处理4毛质量和净质量均最大。各处理单球质量介于850~

表3 不同覆膜材料下娃娃菜的农艺性状比较

Table 3 Comparison of agronomic traits of baby cabbage under different coating materials

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	开展度 Spread/cm	球高度 Bulb height/cm	球径 Bulb diameter /cm	球形指数 Bulb shape index	紧实度 Compactness
1	33.8±3.14 e	51.2±4.27 ab	19.6±1.77 c	14.7±1.2 b	1.42±0.35 e	紧 Tight
2	34.7±2.55 abc	49.3±3.88 c	21.7±2.01 ab	14.7±0.9 b	1.31±0.48 f	紧 Tight
3	34.5±3.53 bc	50.6±4.13 bc	22.4±1.56 a	14.8±1.4 ab	1.43±0.27 d	紧 Tight
4	35.7±2.85 a	52.7±2.46 a	21.5±1.44 b	15.2±1.3 a	1.61±0.25 a	紧 Tight
5	35.2±2.43 ab	50.8±4.33 ab	22.3±2.23 ab	15.0±0.8 ab	1.58±0.31 b	紧 Tight
CK	34.1±3.24 cd	49.4±3.27 c	20.8±1.28 c	14.8±1.1 ab	1.47±0.22 c	紧 Tight

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

表4 不同处理娃娃菜主要经济性状及品质比较

Table 4 Comparison of main economic traits and quality of baby cabbage under different treatments

处理 Treatment	15 株毛质量 Hair mass of 15 sprouts/ kg	15 株净质量 Net mass of 15 sprouts/kg	单球质量 Individual ball mass/g	净菜率 Net vegetable rate/%	w(还原糖) Reducing sugar content/%	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·kg <sup>-1</sup> )
1	19.3±1.25 d	13.1±1.2 d	873±27 d	67.9±2.5 a	2.17±0.12 e	5.73±0.28 b
2	19.6±1.38 d	12.8±1.3 d	853±34 d	65.3±3.2 b	2.28±0.05 d	6.83±0.24 a
3	20.7±2.01 c	13.5±1.1 c	900±41 c	65.2±3.6 b	2.46±0.09 c	5.13±0.27 cd
4	22.6±1.22 a	14.7±0.9 a	980±28 a	65.0±2.7 b	3.18±0.12 a	4.85±0.18 e
5	21.8±1.37 b	14.1±1.3 b	940±38 b	64.7±3.0 b	2.85±0.05 b	5.18±0.26 c
CK	20.5±1.75 c	13.7±1.4 c	913±29 c	66.8±2.8 a	2.47±0.10 c	5.07±1.90 d

980 g,净菜率最高的为处理 1,最低的是处理 5。

由表 5 可知,处理 3~5 光合速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、气孔导度均高于其他处理,且 5 种全生物降解地膜处理下娃娃菜的光合特性均优于对照(PE)(除气孔导度外)。全生物降解地膜在进入诱导期后,地表开始裸露,增强了土壤的通透性,使得土壤根系更加发达,土壤呼吸增强,进而促进娃娃菜光合作用和呼吸作用增强,植株保持了超强的生长特性,这与不同处理娃娃菜农艺性状、主要经济性状比较结果相关联,具有一致性。

由表 6 可知,处理 3~5 的过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、叶绿素含量较高,处理 1、处理 2、CK 含量较低,这些变化与光合特性一致。丙二醛(MDA)含量与前 3 种生化指标呈反比例变化趋势。当全生物降解地膜进入诱导期后,残膜颗粒进入土壤,土壤通透性增强,娃娃菜光合作用得到增强,使得娃娃菜叶片的叶绿素含量及 POD、SOD 活性得到显著增强,同时增强了抵御外界伤害的功能。

## 2.2 不同降解地膜处理对娃娃菜产量的影响

由表 7 可知,6 种覆膜处理下的娃娃菜产量间具有很大差异,5 种全生物降解地膜影响娃娃菜生物产量,处理间具有显著差异性。其中,处理 4 产量最高,667 m<sup>2</sup>折合产量 5 897.61 kg,高于对照 10.4%;

表5 不同处理对娃娃菜光合特性的影响

Table 5 Effects of different treatments on the photosynthetic characteristics of baby cabbage

处理 Treatment	光合速率 Photosynthetic rate/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	蒸腾速率 Transpiration rate/ (μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	胞间 CO <sub>2</sub> 浓度 Intercellular CO <sub>2</sub> concentration/ (μmol·mol <sup>-1</sup> )	气孔导度 Stomatal conductivity/ (mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )
1	2.22±0.18 e	3.11±0.19 c	320±9.45 cd	128±4.88 d
2	2.74±0.27 d	2.56±0.32 d	317±17.36 de	139±7.14 cd
3	2.88±0.33 c	2.73±0.26 d	338±10.56 ab	173±5.66 b
4	3.78±0.21 a	4.38±0.43 a	343±11.78 a	188±8.13 a
5	3.56±0.28 b	3.57±0.37 b	332±7.44 bc	177±6.34 ab
CK	2.11±0.15 f	2.08±0.22 e	314±13.83 e	145±3.58 c

处理 1 的 667 m<sup>2</sup>折合产量最低,为 4 926.46 kg,低于对照 7.78%。总体表现处理 4 最优,处理 1 最差,具体表现为处理 4>处理 5>处理 3>CK>处理 2>处理 1。

## 2.3 不同降解地膜处理对娃娃菜养分吸收的影响

由表 8 可知,在 5 种全生物降解地膜开始降解后,逐步影响到娃娃菜不同时期氮素吸收,且差异显著。娃娃菜不同部位氮素积累,表现为叶球>外叶>根,结球初期<采收期。处理 3~5 娃娃菜不同时期氮素吸收优于对照,处理 1~2 娃娃菜不同时期氮素吸收弱于对照,其中处理 4 氮素积累量最大,结球初期叶球氮素吸收高于对照 14.94%,采收期叶球

表6 不同处理对娃娃菜生化指标的影响

Table 6 Effects of different treatments on biochemical indicators of baby cabbage

处理 Treatment	过氧化物 酶活性 Peroxidase activity/ (U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	超氧化物 歧化酶活性 Superoxide dismutase activity/ (U·g <sup>-1</sup> )	b(丙二醛) Malondial- dehyde content/ (μmol·g <sup>-1</sup> )	w(叶绿素) Chlorophyll content/ (mg·g <sup>-1</sup> )
1	12.23±0.45 e	2.56±0.09 d	0.58±0.05 c	0.28±0.02 d
2	13.24±0.37 d	2.37±0.03 e	0.77±0.03 b	0.32±0.03 c
3	22.19±0.52 c	3.23±0.08 c	0.24±0.04 d	0.58±0.02 b
4	25.77±0.38 a	3.77±0.06 a	0.11±0.02 e	0.71±0.05 a
5	23.84±0.44 b	3.59±0.05 b	0.18±0.06 d	0.65±0.03 b
CK	9.87±0.29 f	1.84±0.04 f	0.88±0.05 a	0.27±0.01 d

氮素吸收高于对照 21.08%。

由表 9 可知,娃娃菜不同部位磷素积累表现为叶球>外叶>根,结球初期<采收期。处理 3~5 娃娃菜不同时期磷素吸收整体优于对照,处理 1~2 娃娃

表7 不同处理娃娃菜产量比较

Table 7 Comparison of baby cabbage yields with different treatments

处理 Treatment	平均 10 m <sup>2</sup> 产量 Average yield per 10 m <sup>2</sup> /kg	折合 667 m <sup>2</sup> 产量 Output per 667 m <sup>2</sup> / kg	较 CK± More than CK±/kg	增产率 Production increase rate/%	排名 Rank
1	73.86 e	4 926.46 e	-415.54	-7.78	6
2	74.23 e	4 951.14 e	-390.86	-7.32	5
3	81.18 c	5 414.71 c	72.71	1.37	3
4	88.42 a	5 897.61 a	555.61	10.40	1
5	84.75 b	5 652.83 b	310.83	5.82	2
CK	80.09 d	5 342.00 d			4

菜不同时期磷素吸收弱于对照,其中处理 4 磷素积累量最大,结球初期叶球磷素吸收高于对照 6.31%,采收期高于对照 10.41%。

由表 10 可知,娃娃菜不同部位钾素积累表现为地上部分>地下部分,结球初期>采收期。处理 3~

表8 不同降解地膜处理对娃娃菜不同时期不同部位氮素吸收的影响

Table 8 Effects of different degradable mulching film treatments on nitrogen absorption in different parts of baby cabbage at different periods (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 root	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 Root
1	4.76±0.08 f	4.64±0.09 f	4.31±0.03 d	9.55±0.09 e	8.35±0.07 e	8.29±0.06 c
2	4.89±0.09 e	4.77±0.10 e	4.52±0.01 d	9.68±0.11 d	8.77±0.08 cd	8.56±0.07 c
3	5.18±0.02 c	5.09±0.04 c	4.82±0.02 c	10.02±0.08 c	9.64±0.11 b	9.08±0.10 b
4	5.77±0.07 a	5.65±0.08 a	5.33±0.01 a	11.83±0.07 a	10.43±0.03 a	9.68±0.04 a
5	5.48±0.04 b	5.29±0.07 b	5.17±0.04 b	10.66±0.07 b	9.77±0.04 b	9.14±0.06 b
CK	5.02±0.03 d	4.83±0.05 d	4.72±0.03 c	9.77±0.05 d	8.89±0.06 c	8.76±0.05 b

表9 不同降解地膜处理对娃娃菜不同时期不同部位磷素吸收的影响

Table 9 Effects of different degradable mulching film treatments on phosphorus absorption in different parts of baby cabbage at different periods (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 Root	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 Root
1	4.32±0.04 e	4.14±0.04 d	4.04±0.02 f	6.18±0.02 f	6.09±0.06 d	5.48±0.07 f
2	4.66±0.07 d	4.48±0.07 c	4.39±0.10 e	6.31±0.05 e	6.18±0.04 cd	5.77±0.08 e
3	5.08±0.06 b	4.79±0.04 b	4.66±0.11 d	6.66±0.03 c	6.37±0.03 b	6.15±0.10 b
4	5.23±0.11 a	5.15±0.07 a	5.01±0.07 a	7.11±0.11 a	6.88±0.05 a	6.38±0.03 a
5	5.11±0.05 b	5.08±0.02 a	4.88±0.02 b	6.84±0.08 b	6.38±0.07 b	6.06±0.04 c
CK	4.92±0.06 c	4.79±0.06 b	4.68±0.03 c	6.44±0.10 d	6.23±0.06 c	5.88±0.05 d

5 娃娃菜不同时期钾素吸收优于对照,处理 1~2 娃娃菜不同时期钾素吸收弱于对照,其中处理 4 积累量最大,结球初期叶球钾素吸收高于对照 11.70%,采收期高于对照 38.23%。

#### 2.4 不同降解地膜降解性能评价

由表 11 可知,5 种全生物降解地膜降解速度不

同,具有明显差异,其中处理 4 降解最快,覆膜后 30 d 进入诱导期,开始降解,并迅速进入开裂期、碎裂期;覆膜 67 d 进入无膜期,处理 1~3 降解周期太长,处理 1~3 后期残留,土层中具有碎片,但均无韧性;处理 5 降解速度较快,在覆膜 73 d 进入无膜期。5 种全生物降解地膜均以颗粒形式进入土壤耕

表 10 不同降解地膜处理对娃娃菜不同时期不同部位钾素吸收的影响

Table 10 Effects of different degradable mulching film treatments on potassium absorption in different parts of baby cabbage at different periods (g·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	结球初期 Early stage of ball formation			采收期 Harvest period		
	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 Root	叶球 Leaf ball	外叶 Outer leaf	根 Root
1	8.89±0.12 e	8.54±0.14 e	3.18±0.02 d	6.27±0.01 f	7.48±0.18 f	3.01±0.01 d
2	9.56±0.41 d	8.68±0.08 e	3.28±0.03 d	6.55±0.03 e	7.61±0.21 e	3.05±0.08 d
3	11.35±0.08 b	10.26±0.11 c	4.86±0.13 b	9.62±0.11 a	9.12±0.27 c	4.06±0.13 a
4	12.03±0.11 a	11.68±0.05 a	5.03±0.15 a	9.24±0.08 b	9.66±0.16 a	4.11±0.03 a
5	11.74±0.16 a	10.55±0.07 b	4.72±0.06 b	8.77±0.12 c	9.25±0.09 b	3.86±0.14 b
CK	10.77±0.07 c	9.62±0.21 d	4.55±0.19 c	6.68±0.05 d	7.75±0.14 d	3.27±0.15 c

表 11 全生物降解地膜降解性能评价

Table 11 Evaluation of degradation performance of fully biodegradable mulching film

处理 Treatment	覆膜期 Laminating period	定植期 Planting period	诱导期 Induction period	开裂期 Cracking period	大裂期 Big fissure period	碎裂期 Fragmentation stage	无膜期 Membraneless period	耕种时残膜状态 The state of residual film during cultivation
1	04-27	05-10	06-07	06-29	07-01	-	-	碎片无韧性 Fragments are not resilient
2	04-27	05-10	06-07	06-06	06-30	-	-	碎片无韧性 Fragments are not resilient
3	04-27	05-10	06-05	06-20	06-22	06-30	-	碎片无韧性 Fragments are not resilient
4	04-27	05-10	05-26	05-30	06-03	06-10	07-02	无影响 No influence
5	04-27	05-10	06-02	06-13	06-17	06-24	07-08	无影响 No influence
CK	04-27	05-10	-	-	-	-	-	基本完好 Basically intact

作层,土层外残膜存在较少,降解效果理想。处理 4 主要成分为聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯(PBAT)+聚乳酸(PLA),处理 5 主要成分为聚乳酸(PLA)+淀粉,这两种主要成分中富含酯键,推测这是降解速度较快的主要原因。

### 2.5 不同处理地膜残留量比较

由表 12 可知,6 个试验组地膜残留量具有显著差异性。其中,普通 PE 地膜不降解,地膜残留量最多,5 种全生物降解地膜残留量都较对照显著减少,其中处理 4(主要成分为聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯(PBAT)+聚乳酸(PLA))降解效果较好,残留量最少,处理 1(主要成分 PBAT)降解效果最差,残留量最多,与田间降解观察一致。处理 4 残留量少,可能是因为其富含更多的不饱和酯键,降解效果好。

### 2.6 不同降解地膜处理对土壤理化性质及酶活性的影响

由表 13 可知,在进入降解期后,6 种覆膜处理的残膜碎片对土壤基本理化性质影响较大,具有显著性差异。5 种全生物降解地膜降解后,与对照相比,pH 均提高 0.02~0.08,处理 2、处理 3 提升最大,处理 4、处理 5 提升较小,5 种全生物降解地膜处理 pH 均升高。土壤全氮含量在不同覆膜处理间差异较小,除处理 4 外均与对照差异不显著。5 种全生

表 12 不同处理地膜残留量比较

Table 12 Comparison of residual amounts of plastic film from different treatments

处理 Treatment	残膜量 Residual film amount/(kg·hm <sup>-2</sup> )	变异系数 Coefficient of variation/%
1	9.82±1.26 b	12.83
2	7.29±0.86 c	11.80
3	6.20±0.44 d	7.10
4	3.98±0.24 f	6.03
5	5.11±0.73 e	14.29
CK	17.84±2.32 a	13.00

物降解地膜处理的土壤全磷含量部分处理有所增加,处理 2、4 显著高于对照。土壤全钾含量变化趋势与全磷变化趋势保持一致,与对照相比均显著提高(除处理 2 外),5 种全生物降解地膜处理均在一定程度上显著提高了土壤有机质含量,且地膜降解速度越快,水溶性土壤有机质含量增加越多。

土壤蔗糖酶是体现土壤碳循环的一项指标<sup>[21]</sup>,土壤脲酶与土壤氮循环密切相关,尤其是含氮有机物的水解<sup>[22]</sup>,土壤过氧化氢酶与土壤孔隙结构密切相关<sup>[23]</sup>。

由表 14 可知,在降解期,6 种不同覆膜处理的土壤酶活性差异显著。总体来看,6 种覆膜处理均

表 13 地膜碎片对土壤基本理化性质的影响  
Table 13 Effects of plastic film fragments on the basic physicochemical property of soil

处理 Treatment	pH	w(全氮) Total nitrogen content/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(全磷) Total phosphorus content/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(全钾) Total potassium content/(g·kg <sup>-1</sup> )	w(有机质) Organic matter content/(g·kg <sup>-1</sup> )
1	8.27±0.01 b	0.92±0.13 bc	0.94±0.05 bc	30.53±1.38 d	12.78±1.21 d
2	8.31±0.02 a	0.90±0.09 d	0.95±0.03 b	29.88±2.54 de	12.84±1.24 c
3	8.31±0.02 a	0.94±0.14 ab	0.93±0.07 c	30.66±3.11 c	13.75±2.01 b
4	8.25±0.03 b	0.95±0.05 a	1.03±0.06 a	33.18±1.47 a	14.68±1.56 a
5	8.26±0.01 b	0.93±0.18 b	0.93±0.07 c	32.17±1.88 b	13.56±3.11 b
CK	8.23±0.02 c	0.93±0.06 b	0.93±0.05 c	28.77±2.84 e	12.75±1.84 d
处理前 Before treatment	8.23	0.91	28.73	0.93	12.76

提高了土壤蔗糖酶活性。与对照相比,5种全生物降解地膜处理对土壤蔗糖酶活性都具有显著增强的效果,其中处理2、处理4提高最多,分别较对照提高2.55%、2.21%,处理1提高最少。对于土壤脲酶活性而言,5种全生物降解地膜处理与对照土壤脲酶活性相比较,呈现显著提高的趋势。其中,处理4提高最多,处理1提高最少,与土壤初始酶活性相比,对照(PE)处理降低了土壤脲酶活性。总体来看,对于土壤过氧化氢酶活性而言,6种不同覆膜处理均提高了土壤过氧化氢酶活性。其中,处理4、处理3提高较多,处理1、处理2、CK提高较少。从以上结果来看,全生物降解地膜具有活化土壤、改变碳氮平衡、提高土壤酶活性的功能,从而加快了土壤中养分积累,促进娃娃菜不同部位养分积累。

表 14 不同处理土壤酶活性  
Table 14 Soil enzyme activity under different treatments (mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	蔗糖酶活性 Sucrase activity	脲酶活性 Urease activity	过氧化氢酶活性 Catalase activity
1	23.55±2.88 c	0.347±0.025 d	2.05±0.03 d
2	24.13±3.11 a	0.355±0.036 c	2.05±0.07 d
3	23.56±2.18 c	0.398±0.018 b	2.12±0.02 b
4	24.05±1.09 a	0.422±0.010 a	2.19±0.04 a
5	23.85±1.94 b	0.357±0.046 c	2.08±0.03 c
CK	23.53±3.75 e	0.318±0.028 e	2.04±0.04 d
处理前 Before treatment	23.11	0.321	2.04

### 3 讨论与结论

本试验结果表明,所试5种全生物降解地膜在娃娃菜整个生育期内均表现出良好的农艺适应性,能够支持其正常完成生育进程,在促进植株生长发

育方面与普通PE地膜无显著差异,该结果与在玉米、棉花、番茄中已报道的结论一致<sup>[24-26]</sup>。其中处理4(PBAT+PLA)与处理5(PLA+淀粉)因地膜分子结构中含较多酯键,表现出较快的降解速率,其降解过程包括出现裂缝、韧性下降、逐步碎裂等阶段,该现象与前人研究<sup>[27-28]</sup>描述的降解行为相符。从降解机制来看,该物质主要涉及微生物酶解和酯键的水解作用,最终降解产物以CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O为主,田间残留量极低,表明其在环境中具有良性消纳特性。

进一步分析显示,全生物降解地膜在降解过程中可释放富碳小分子物质,这些物质有助于增强土壤微生物活性,提高蔗糖酶、脲酶和过氧化氢酶等关键土壤酶活性,并显著提升土壤有机质及全量养分含量。这一微生态改良效应有助于改善娃娃菜的光合特性与干物质积累,最终提高产量,与程瑶<sup>[29]</sup>及许楚楚等<sup>[30]</sup>在油菜和其他蔬菜作物中报道的增产效应一致。尤其以PBAT+PLA材质(处理4)表现最为突出,说明该地膜不仅通过改善根际环境间接促进作物生长,还可能直接参与调控光合同化产物的代谢与积累途径。这一发现与傅玺豪等<sup>[31]</sup>在辣椒上观察到的叶绿素含量提升趋势一致,但增幅差异可能源于作物种类与地膜材料组成的不同。

在生理层面,全生物降解地膜处理显著增强了娃娃菜的抗氧化系统酶活性,POD与SOD活性上升表明植株抗逆能力增强,而MDA含量降低表明膜脂过氧化程度减轻。这种生理响应可能与降解地膜改善土壤理化性质、优化根际微环境密切相关,有助于植株在生育后期仍保持较高的生理活性<sup>[32]</sup>。

本研究结果表明,PBAT+PLA材质全生物降解地膜可显著提高娃娃菜光合能力与抗逆性,提高抗

氧化酶活性,减轻膜脂过氧化程度,同时有效提高土壤酶活性与改善养分状况,从而实现增产 10.40% 并大幅减少残膜污染,兼具农艺高效性与环境可持续性,适于在河西地区娃娃菜生产中推广应用。

## 参考文献

- [1] ZHANG S L, LOVDAHL L, GRIP H, et al. Effects of mulching and catch cropping on soil temperature, soil moisture and wheat yield on the loess plateau of China[J]. *Soil Tillage Research*, 2009, 102(1): 78-86.
- [2] 孙仕军,朱振闯,陈志君,等.不同颜色地膜和种植密度对春玉米田间地温、耗水及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(19): 3323-3336.
- [3] 解红娥,李永山,杨淑巧,等.农田残膜对土壤环境及作物生长发育的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007(S1): 153-156.
- [4] ZHAO Z Y, WANG P Y, WANG Y B, et al. Fate of plastic film residues in agro-ecosystem and its effects on aggregate-associated soil carbon and nitrogen stocks[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 416: 125954.
- [5] 宋超.聚乙烯地膜残留对作物产量、土壤质量以及土壤微生物群落组成的影响[D].兰州:兰州大学,2014.
- [6] DONG H G, LIU T, LI Y G, et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 91-99.
- [7] 胡琼恩,李婷,马丕明,等.生物可降解地膜的研究进展[J]. *塑料包装*, 2017, 27(3): 34-41.
- [8] 丁彬,谢吉先,冯梦诗,等.不同类型降解地膜对花生增产及在土壤中残留消解动态研究[J]. *花生学报*, 2020, 49(2): 59-66.
- [9] 侯爽,祁俊锋,王铁臣,等.不同材质生物降解地膜的性能及其对番茄生长的影响[J]. *蔬菜*, 2022(1): 13-16.
- [10] 李水凤,王华英,许楚楚,等.不同全生物降解膜对茎用莴苣产量的影响[J]. *中国蔬菜*, 2021(1): 62-65.
- [11] 王海娟,王国平,冯杨,等.不同类型生物降解地膜降解性能及对棉花产量的影响[J]. *农业科技通讯*, 2020(7): 104-106.
- [12] 魏静,王玉龙,贺鹏程,等.不同种类降解地膜覆盖对马铃薯产量和经济效益的影响[J]. *现代农业*, 2021(6): 57-59.
- [13] 华军,王勤礼,王鼎国,等.张掖市娃娃菜品种比较试验[J]. *中国瓜菜*, 2016, 29(8): 38-41.
- [14] 李文德,张文斌,张荣,等.张掖市高原夏菜产业现状与发展建议[J]. *甘肃农业科技*, 2014(7): 47-49.
- [15] 陶莲,杨永英,赵大芹,等.娃娃菜引种试验初报[J]. *耕作与栽培*, 2008(5): 56-57.
- [16] 夏成明,史嘉莉,马栋,等.化肥减量配施有机肥和微生物菌剂对麦后复种娃娃菜产量与品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2024, 37(10): 132-140.
- [17] 冯鹏,孙力,申晓慧,等.多年生黑麦草对 Pb, Cd 胁迫的响应及富集能力研究[J]. *草业学报*, 2016, 25(1): 153-162.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:中国农业出版社,1986.
- [20] 巩闪闪,刘晓静,张志勇,等.不同施氮措施对冬小麦农田土壤酶活性和氮转化的影响[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(11): 2215-2222.
- [21] 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(A): 112983.
- [22] KASIRAJAN S, NGOUAJIO M. Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 501-529.
- [23] CHANDRA R, RUSTG R. Biodegradable polymers[J]. *Progress in Polymer Science*, 1998, 23(7): 1273-1335.
- [24] 赵爱琴,李子忠,龚元石.生物降解地膜对玉米生长的影响及其田间降解状况[J]. *中国农业大学学报*, 2005, 10(2): 74-78.
- [25] 何文清,赵彩霞,刘爽,等.全生物降解膜田间降解特征及其对棉花产量影响[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(3): 21-27.
- [26] 赵敏,张长明,王元军.普通地膜残膜及生物降解地膜应用对番茄种植影响的研究进展[J]. *中国瓜菜*, 2025, 38(8): 9-14.
- [27] 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.
- [28] 王鑫,孙升学.可回收地膜和可降解地膜与普通聚乙烯地膜的应用对比分析[J]. *中国瓜菜*, 2025, 8(3): 164-168.
- [29] 程瑶.全生物可降解地膜对油菜产量和品质的影响[J]. *农业科技通讯*, 2024(6): 50-52.
- [30] 许楚楚,黎坤瑜,王华英,等.不同全生物降解地膜对设施鲜花生产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2025, 66(3): 645-651.
- [31] 傅玺豪,朱建强,范先鹏,等.生物降解地膜对辣椒生长发育的影响[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(1): 75-80.
- [32] 李成虎,崔建荣,王学俭,等.不同类型全生物降解地膜对旱作谷子生长、光合的影响[J]. *农业开发与装备*, 2024(11): 157-161.