

# 全生物降解地膜在高原环境的降解情况 及对土壤性质的影响

裴琼<sup>1</sup>, 龙华<sup>2</sup>, 阮刘文<sup>3</sup>, 边巴罗布<sup>2</sup>, 张天博<sup>1</sup>, 多吉欧珠<sup>2</sup>

(1. 东华(西藏)低碳科技有限责任公司, 西藏 日喀则 857000; 2. 日喀则市科学技术局, 西藏 日喀则 857000; 3. 河南龙都天仁生物材料有限公司, 河南 濮阳 457400)

**摘要:**全生物降解地膜作为传统聚乙烯地膜的绿色替代品,对高原特殊环境下的应用效果与生态影响意义深远。聚焦青藏高原的典型农业区——西藏日喀则,针对该地区土壤普遍存在于高原,系统探讨了全生物降解地膜主要有效成分(PBAT、PLA、淀粉基材料等)在高原环境下的降解行为。结合2025年作物生长季的实地监测数据,研究发现:高原与低温环境虽然延缓了生物降解的酶解速率,但物理应力促进了地膜的破碎。实测表明:白膜(DL-B)在高原环境下表现出最优的降解性能。

**关键词:**全生物降解地膜;高原;土壤生态效应;日喀则

中图分类号:S316

文献标识码:A

## Degradation Performance of Fully Biodegradable Plastic Mulch Film in Plateau Environment and Its Impact on Soil

PEI Qiong<sup>1</sup>, LONG Hua<sup>2</sup>, RUAN Liuwen<sup>3</sup>, Bianbaluobu<sup>2</sup>, ZHANG Tianbo<sup>1</sup>, Duojiouzhu<sup>2</sup>

(1. ECEC (Xizang) Low-Carbon Technology Co. Ltd., Shigatse Xizang 857000, China; 2. Shigatse Municipal Bureau of Science and Technology, Shigatse Xizang 857000, China; 3. Henan Longdu Tianren Biological Materials Co. Ltd., Nanle, Puyang Henan 457400, China)

**Abstract:** As a green alternative to traditional polyethylene mulch films, the application effects and ecological impacts of fully biodegradable mulch films in the special plateau environment are of profound significance. Focusing on Shigatse, Xizang, a typical agricultural area on the Qinghai-Xizang Plateau, and addressing the common plateau soil conditions in this region, this study systematically investigated the degradation behavior of main components of fully biodegradable mulch films (PBAT, PLA, starch-based materials, etc.) in plateau environment. Based on field monitoring data during the 2025 crop growing season, the results showed that plateau low-temperature environment slowed down the enzymatic degradation rate, while physical stress promoted the fragmentation of mulch films. Field measurements indicated that white mulch film (DL-B) showed the optimal disintegration and degradation performance in plateau environment.

**Key words:** fully biodegradable mulch film; plateau; soil ecological effect; Shigatse

农业地膜覆盖技术是保障粮食安全、提高作物产量的重要手段。传统聚乙烯(PE)地膜难以降解,其残留导致的“白色污染”严重威胁着土壤健康与生态环境。全生物降解地膜(Biodegradable Mulching Film,以下简称BDM)应运而生,其可在自然环境中被微生物最终分解为水、二氧化碳和生物质,被视为解决地膜污染问题的根本途径之

一。全球范围内,以PBAT、PLA、淀粉及其复合材料为主的BDM研发与应用已取得显著进展<sup>[1]</sup>。

日喀则市位于西藏自治区南部,雅鲁藏布江及其支流年楚河流域,平均海拔超过3800m,是青藏高原重要的青稞、蔬菜和牧草产区。该区域的农业活动逐渐依赖大棚、地膜覆盖以抵御强蒸发、低温和保墒增产,然而日喀则乃至整个青藏

收稿日期:2025-12-23

基金项目:2025年日喀则市中央引导地方发展资金项目(RKZ2025ZYD-01)。

作者简介:裴琼(1971—),女,正高级工程师,主要从事化工、新材料的研究,E-mail:peiqiong@cncce.cn。

通信作者:多吉欧珠(1984—),男,高级畜牧师,主要从事牦牛养殖的研究,E-mail:duo.ou@163.com。

高原的土壤环境具有鲜明的特殊性:1)土壤深层常承受着由历史冰川作用、深厚沉积层及持续地质构造活动产生的显著高原现象;2)低温、干旱、强紫外线辐射并存;3)生态系统极其脆弱且恢复力低。这些因素共同构成了BDM降解的独特“压力场”<sup>[2]</sup>。

目前,关于BDM的研究多集中于常温常压或一般农田环境,对其在如日喀则这般特殊高原下的降解状况及生态效应认知严重不足。高原可能通过改变土壤孔隙结构、水分运移、微生物活性及酶促反应,深刻影响BDM的降解路径、速率以及中间产物的生成与转化,进而对土壤健康产生未知的影响。本研究旨在通过实际应用、理论分析与文献综合,阐明日喀则地区BDM有效成分的土壤行为与影响,为高原农业的绿色可持续发展提供理论支撑。

## 1 日喀则地区高原土壤的成因与特征

### 1.1 地质与历史成因

日喀则地区的高原土壤是一个多因素耦合形成的自然现象:1)青藏高原作为全球最新的造山带,持续受到印度板块与欧亚板块的碰撞挤压,地壳应力巨大,这种构造应力部分传递至表层土壤;2)第4纪多次冰期在高原留下深厚的冰碛物和冰水沉积物,厚重的历史冰川覆压对下层土壤形成了长期且深刻的压实效应;3)区域内广泛分布的湖相沉积、冲洪积物在不断堆积过程中自重压实作用显著<sup>[3]</sup>。

### 1.2 土壤学特征

日喀则农区土壤以亚高山草原土、草甸土等为主,但由于多种原因,许多区域土壤呈现出容重较高(部分地区可达 $1.4\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ )、孔隙度较低(尤其是非毛管孔隙)、渗透性较差的特点。这种背景下的土壤物理结构对水分、空气和物质传输形成天然屏障。

## 2 全生物降解地膜主要有效成分及其在高原下的降解行为

### 2.1 主要有效成分

目前商业化BDM的主要有效成分包括:石油基可降解聚酯(如PBAT,柔韧性好)、生物基聚酯(如PLA,强度高但较脆)、天然高分子(如淀粉、纤维素)以及它们的共混复合材料<sup>[4]</sup>。添加剂可能包括增塑剂、光稳定剂、促降解剂等。本

研究选用以PBAT为基材的全生物降解地膜,更能有效适应高原温差大、强紫外线等特定环境。

### 2.2 高原对降解过程的影响机理

物理破碎阶段:高压(尤其是周期性应力,如冻融循环引起的压力变化)可能加速地膜材料的脆化与物理破裂,增大比表面积,理论上为后续微生物降解创造了条件,但像日喀则这样的高原环境,早晚温差更大,PBAT的韧性有可能下降。

光氧降解阶段:太阳光中紫外线的波长在 $300\sim 400\text{ nm}$ ,日喀则地区6月紫外强度每天约 $300\text{ 万 J/m}^2$ ,远高于低海拔地区。由于臭氧层对中波紫外线(UVB)的吸收在高海拔地区减弱,会比低海拔地区强3~6倍。PBAT生物降解地膜为聚酯类材料,含有紫外光线吸收基团,如羰基等,这些基团在紫外线的照射下,会吸收辐射能量,当波长在 $320\text{ nm}$ 以下时,吸收大大增加; $300\text{ nm}$ 时,吸收十分明显。在氧存在下,聚酯类材料可发生主链断裂,导致分子链断裂,从而使聚合物由大分子链断裂为小分子链。聚酯光氧化的主要产物为 $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ 及羧酸。

微生物降解与酶解阶段:这是关键阶段,高原的影响复杂且双向。1)高压直接压缩土壤孔隙,导致土壤通气性降低。好氧降解是BDM的主要降解途径,氧气扩散受限将严重制约好氧微生物的活性,从而减缓PBAT等聚酯的酶解水解速率。2)高压又可能迫使地膜碎片与土壤颗粒、微生物细胞更紧密的接触,在某些情况下可能增强了界面反应。

### 2.3 田间降解效果实测

为验证BDM在日喀则特殊高原下的田间降解表现,研究团队于2025年进行了全周期(生长季)的田间监测。

#### 2.3.1 田间试验概况

试验点设于日喀则典型农区,种植作物包括玉米和白菜,不同地膜处理区采用标识牌进行区分。

#### 2.3.2 收获期破膜效果评估

至2025年9月25日(覆膜约4.5个月后),作物进入收获期,团队对不同类型地膜的破膜效果进行了详细的实地检测与破坏性试验。结果显示,不同材质的地膜在高原土壤环境下的表现差异明显(表1)。

白膜(DL-B)表现出极佳的降解启动性能,实测发现其破膜效果显著,物理结构已大幅弱化,轻轻拉扯即可发生破碎。在田间表层几乎无

大块的完整残留,说明其分子链在高原强紫外线与土壤微生物的共同作用下已发生有效断裂。黑膜(DL-A)同样具备降解特征,但进程略慢于白膜。相较于DL-B,其破膜的明显程度稍弱,虽然大部分区域已出现裂解,但在受力牵拉时仍保持一定的拉伸强度及伸长率(图1)。普通PE膜(对照组)表现为典型的耐候性,仍存在较多整块残留,虽然受机械作业和作物根系影响有较大破损,但材料本体未见明显生物降解迹象(图2)。

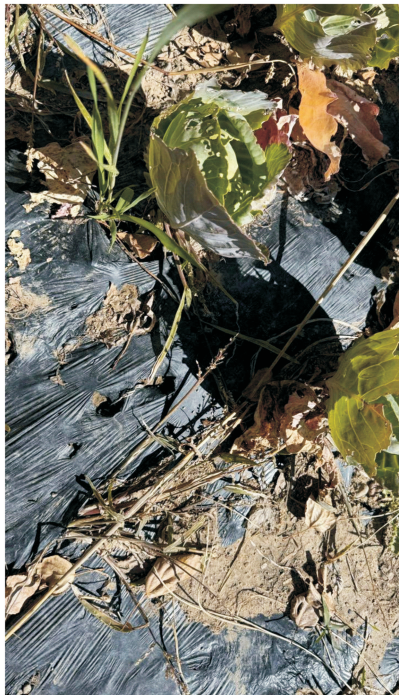


图1 全生物降解地膜(DL系列)

**表1 日喀则试验点不同地膜的田间破膜效果实测**

地膜类型	破膜效果及状态描述	现场残留情况
白膜(DL-B)	破膜效果显著,轻轻拉扯即可破损	现场几乎无整块残留
黑膜(DL-A)	具备破膜效果,但相较于白膜,其破膜明显程度稍弱	仍有残留,但大部分已破碎
PE膜	未发生生物降解破膜	仍存在较多整块残留,有较大破损情况



图2 普通PE膜

### 3 有效成分降解对日喀则土壤性质的综合影响

#### 3.1 土壤物理性质

高海拔地区通常具有严酷的气候条件和有限的营养供应,这些环境特征使微生物在维持生态系统稳定性方面发挥着不可替代的作用。高海拔生态系统土壤细菌和真菌群落在纬度梯度上的响应机制,一般而言细菌对纬度梯度的响应较为敏感。短期内,可降解地膜碎片的存在可能轻微扰动了土壤环境,但也起到了保温保湿的作用,有利于植物的前期生长;长期看,完全降解后,不影响土壤结构。而不可降解地膜残留对土壤会产生多方面的负面影响,可破坏土壤团粒结构,阻碍水分渗透和养分输送。因此在高海拔地区,必须保证所用地膜不影响土壤性质,才能维持土壤微生物群落的稳定。

#### 3.2 土壤化学性质动态监测

本研究对试验田土壤进行了全周期的理化性质监测,通过对比作物生长旺盛期(6月23日)与收获期(9月1日)的数据(表2),可以分析地膜(以白色可降解地膜为例)覆盖下的土壤环境演变。

##### 3.2.1 水热环境变化

由表2可知,从6月到9月,土壤温度由26.1℃显著下降至14.5℃。低温是高原环境制约全生物降解地膜(特别是PLA成分)后期生物降解速率的关键因子。

##### 3.2.2 土壤温度与太阳辐射相关

在作物生育早期由于未形成封垄,太阳辐射直达土壤及地膜表面,使得覆盖地膜的土壤温度升高明显;7月中旬后,玉米已经处于拔节期,部分形成封垄,太阳辐射很难到达地膜及土壤表面,而7月份的日喀则地区处于多降雨天气,土壤温度上升不再明显。

表2 日喀则试验点土壤理化性质动态监测数据

检测时间	温度 / $^{\circ}\text{C}$	湿度 /%	电导率 / $(\mu\text{s} \cdot \text{cm}^{-1})$	pH 值	氮 / $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	磷 / $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	钾 / $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	综合肥力
2025-06-23	26.1	91.4	510	7.5	25	20	17	56
2025-09-01	14.5	88.3	345	7.4	17	13	11	37
变化值	11.6	3.1	165	0.1	8	7	6	19

数据来源:本项目组田间土壤实际监测记录。

### 3.2.3 盐分与 pH 值

土壤电导率(EC)下降,表明土壤盐分随雨季淋溶或作物吸收而降低,未出现因地膜降解产物积累导致的次生盐渍化风险。pH 值维持在 7.4~7.5 的微碱性范围内,说明降解产生的有机酸被土壤缓冲体系有效中和。

### 3.2.4 养分循环

氮、磷、钾含量均呈现下降趋势,主要归因于作物生长消耗,提示在全生物降解地膜应用过程中,需关注降解高峰期微生物与作物的养分竞争关系。

## 3.3 土壤生物学性质

微生物群落方面,BDM 的引入为土壤微生物提供了新的碳源,必然改变群落结构。高原会强化这种选择的特异性,预计好氧降解菌(如多种变形菌门、放线菌)在初期可能因氧气受限而受到抑制,厌氧或兼性厌氧微生物(如某些厚壁菌门、拟杆菌门)的相对丰度可能增加。这种群落的演替方向决定了降解路径和最终产物的环境友好性。酶活性的动态变化是降解进程的敏感指标,与降解相关的酶,如酯酶、脂肪酶(针对聚酯)、淀粉酶、纤维素酶等活性会因受到刺激而升高,但高压本身可能抑制部分酶的构象变化或扩散速率;氧化酶类(如过氧化物酶)活性可能因缺氧而受到抑制。

## 3.4 微塑料与生态风险

一个必须警惕的问题是,在日喀则低温、高压、缺氧的条件下,BDM 的降解可能停留在微米甚至纳米级别碎片阶段,形成“可降解微塑料”。土壤中残留的地膜会对种子发芽及生根产生一定程度的阻碍,可能会延迟种子的萌发甚至烂种,在作物的生长周期影响作物水分及营养的吸收,需要进一步跟踪来年再次覆膜前的最终降解情况。调查不同类型地膜残留对土壤理化性状的影响,包括土壤的紧实度、土壤水分含量、土壤温度、土壤氮磷钾及肥力的影响。调查不同类型地膜残留对不同作物生长发育的影响及地膜残

留对作物水分及营养吸收利用率的影响。

## 4 结论与展望

在西藏日喀则特殊的高原土壤环境下,全生物降解地膜的有效成分经历了一个不同于低海拔地区的降解历程。高原环境延缓了以好氧降解为主导的完全降解过程,增加了中间产物积累和形成可降解微塑料的风险。这些变化对土壤理化性质和生物活性产生了复杂的影响,短期内可能扰动原有的脆弱平衡,但长期看,在科学管理下,其最终产物有望整合进入土壤有机质库,改善土壤结构。

本次研究通过大田及实验室双重验证,采用了以 PBAT 为基材、通过熔融封端处理技术的全生物降解地膜,并采用分子组装的方法设计的多功能的抗降解稳定剂,该地膜产品转化降解适合高原环境,对农作物友好。未来研究着力于:1)继续地膜配方优化,提高 PBAT、PLA 的柔韧性,调整光热敏剂组分;2)开展连续种植和长期观测,量化地膜与降解速率、产物谱的关系,以及土壤微生物群落功能的长期变化;3)开展生命周期评价(LCA),全面评估其环境效益。

全生物降解地膜在日喀则的应用,是高原农业现代化与生态保护协同共进的重要探索。只有充分认知并尊重当地特殊的自然环境压力,通过科技革新与精细管理,才能确保这项绿色技术真正服务于青藏高原地区。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 熊兴容.西藏日喀则市农业种植结构变化及影响因素[J].耕作与栽培,2020,40(4):39-43.
- [3] 李维,席永士,李芳,等.日喀则地区主要农田土壤养分状况及相关特性分析[J].西藏科技,2014,36(9):3-4,6.
- [4] 沈玥,梁春玲,刘永,等.我国农膜使用现状及污染防治措施[J].现代农业科技,2023(12):147-151,159.