可降解聚乳酸沙障降解性能研究

原伟杰[1]，虞 毅[1]，王 戈[1]，高 永[2]，高君亮[3]，王淮亮[2]
(1. 国际竹藤中心，北京 100102；2. 内蒙古农业大学 生态环境学院，内蒙古 呼和浩特 010019；
3. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心，内蒙古 磴口 015200)

摘 要：按不同坡向和不同坡位，对乌兰布和沙漠铺设 3.5 a 的聚乳酸(PLA)方格沙障的降解性能进行了研究。通过单根纱线拉伸试验研究了沙障的力学性能变化，利用天平称重测定了失重率变化，并利用环境扫描电镜观察了障体表面形态变化。结果表明，与未使用的 PLA 沙障相比，随坡位的上升，障体 4 个部位的单纱断裂强度呈现出不同程度的降低，各部位的单纱断裂强度由小到大排序依次为：迎风面、顶部、背风面、贴地面。从坡底到坡顶，障体的失重率整体呈现出逐渐增大的变化特点。沙障暴露部分的降解现象较贴地部分的明显。风沙流吹蚀磨蚀是影响 PLA 沙障材料性能的最主要因素，光照的影响其次，沙区土壤微生物的作用最小。

关键词：乌兰布和沙漠；聚乳酸(PLA)沙障；降解性能
文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2012)03-0107-04 **中图分类号**：S775

Degradation Characteristics of Degradable Polylactic Acid Sand Barrier

YUAN Wei-jie[1], YU Yi[1], WANG Ge[1], GAO Yong[2], GAO Jun-liang[3], WANG Huai-liang[2]
(1. *International Center for Bamboo and Rattan, Beijing* 100102, *China*; 2. *College of Ecology and Environment Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia* 010019, *China*; 3. *The Experimental Center for Desert Forestry, CAF, Dengkou, Inner Mongolia* 015200, *China*)

Abstract: In order to understand the degradation characteristics of polylactic acid(PLA) square sand barriers, the PLA square sand barriers paved for 3.5 years were investigated in different slope directions and at different slope positions in the U Lan Buh Desert. Changes in the mechanical properties of the PLA sand barriers were studied by means of yarn tensile test. Changes in loss ratio were weighed by electronic balance and changes in surface morphology of sand barriers were described by environmental scanning electron microscope (ESEM). Results are as follows: Compared with the original PLA sand barriers, yarn breaking tenacities of four positions of the PLA sand barrier decreased differently with slope position ascending, and the order from low to high was windward side, top side, leeward side and ground side. Loss ratios gradually increased from the bottom to the top of the slope. The degradation of exposed section of the sand barrier was more serious than that of ground section. Blastation and abrasion by wind flow is the most important factor to the degradation of the PLA sand barrier, ultraviolet irradiation is in the second place, and microorganism in sandy soil has the minimal impact.

Keywords: U Lan Buh Desert; polylactic acid sand barrier; degradation characteristic

聚乳酸(polylactic acid，PLA)是一种可生物降解的绿色新型高分子材料。它一般以含淀粉的小麦、稻谷、玉米、红薯、马铃薯以及甜菜等农作物为原料经发酵生成，降解的最终产物是 CO_2 和 H_2O，不会对环境产生污染，可看作是自然界碳循环的组成部分[1-2]。由于具有良好的生物相容性、可降解性和优异的加工性能，聚乳酸自问世以来逐渐受到了世人的广泛关注，其产品已在医疗、农业、服装、生活领域等方面显示出广阔的应用前景[3-5]。目前，PLA 已作为一种新型的沙障材料应用于防沙治沙领域。相比于麦草、黏土等传统沙障，PLA 沙障具有质量轻、运输便利、使用寿命长、施工方便、生态效益好等优点，发展前景十分巨大。目前国内对 PLA 沙障的研究主要集中于以下几个方面：PLA 沙障的施工设计，防风效益研究，凹曲面特性研究及 PLA 沙障对土壤硬度、土壤含水量的影响等[6-9]。

收稿日期：2011-08-12 **修回日期**：2011-09-21
资助项目：国家自然科学基金项目“沙袋沙障的构造参数及工程尺度与防风固沙机理研究”(30771765)
作者简介：原伟杰(1986—)，女(汉族)，山东省招远市人，硕士研究生，研究方向为荒漠化防治。E-mail：yuanweijie717@163.com。
通信作者：虞毅(1964—)，男(汉族)，内蒙古自治区呼伦贝尔市人，博士，研究员，主要从事荒漠化防治研究。E-mail：yuicbr@163.com。

可降解性是 PLA 的重要特征，也是人们研究 PLA 的出发点之一，因而研究聚乳酸的降解性能对于指导不同领域的实际需要具有非常重要的意义。研究材料的生物降解性能时可采用多种表征手段，如考察外观变化、失重情况、力学性能变化、酶降解产物等[10-12]。

本文采用测定力学性能、失重率及观察表面形态的方法，按不同坡向，不同坡位，对乌兰布和沙漠铺设了 3.5 a 的 PLA 方格沙障的降解性能进行了研究，以了解 PLA 作为沙障材料在沙漠环境下使用时的降解特性，初步分析影响 PLA 沙障降解的主要影响因子，以期为提高 PLA 沙障的使用寿命提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于乌兰布和沙漠西南缘的吉兰泰地区，北纬 39°48′14″，东经 105°42′45″，具有典型的温带荒漠气候特征。年平均气温 7.6 ℃，极端最高气温 40.9 ℃，极端最低气温 -31.2 ℃，绝对气温年较差可达 72.1 ℃，≥10 ℃有效积温 3 247.1 ℃，年平均无霜期 136 d。降水稀少，气候干燥，年平均降雨量 119.1 mm，多集中于 6—9 月这 4 个月，年蒸发量 2 372.1 mm。主风向为东北风，主害风为西北风，年平均风速3.1 m/s，最大瞬时风速 24 m/s，冬春季节风速较大。沙丘形态主要有新月形沙丘和沙丘链、垄状沙丘、格状沙丘等。天然沙质荒漠植被主要植物建群种有唐古特白刺(*Nitraria tangutorum*)，白沙蒿(*Artemisia sphaerocephala*)，梭梭(*Haloxylon ammodendron*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等。

1.2 研究材料

本试验所用的 PLA 材料是用小圆机织法织制的圆筒状针织物，分子式$(C_3H_4O_2)_n$，线密度 16.7 tex，比重 1.25 g/cm^3。在自然状态下筒径为 8～10 cm。利用常见的 PVC 管作为装沙工具，将织物充填以就地取材的沙土就形成了最基本的沙障障体。依据沙障的命名习惯，将这种沙障统称为聚乳酸沙障，简称 PLA 沙障。

1.3 PLA 沙障的设置

于 2007 年 4 月，在吉兰泰盐湖保护区 9 号井西北方约 2 km 处，选择走向、形态和大小相似的 3 个沙垄，分别布设 1 m×1 m，2 m×2 m，3 m×3 m 的 3 种不同规格的格状 PLA 沙障。每一规格的沙障的一边与沙垄走向垂直，另一边与沙垄走向平行。为了确保沙障规格尺寸在施工中的正确性，铺设时首先按照设计要求在沙垄上布设工程线。此外，为了避免风速过大将沙障的格状吹散或由于地形因素等引起格状变形，在铺设沙障时采用编席的方式，相互叠压，编织成方格，最终形成大的格状网平铺于沙垄上。

1.4 研究方法

1.4.1 试验样品采集 于 2010 年 9 月底(PLA 沙障设置 3.5 a 后)，选取铺设 2 m×2 m 规格 PLA 沙障的沙垄，分不同坡向(迎风坡、背风坡)、不同坡位(坡底、坡中、坡顶)，选取典型取样点。由于沙障类型为方格状，因此在每一个取样点，每一格状沙障内又分为经向障体和纬向障体(图 1)，其中，与沙垄走向垂直的障体为经向障体，与沙垄走向平行的障体为纬向障体。另外，由于沙区沙障障体的上下小环境(光、风沙活动、土壤)明显不同，因此在取样时，每一根障体还进一步地分为顶部(部位 1)、迎风面(部位 2)、贴地面(部位 3)及背风面(部位 4)，其中部位 1，2，4 合称为暴露部分(图 2)。

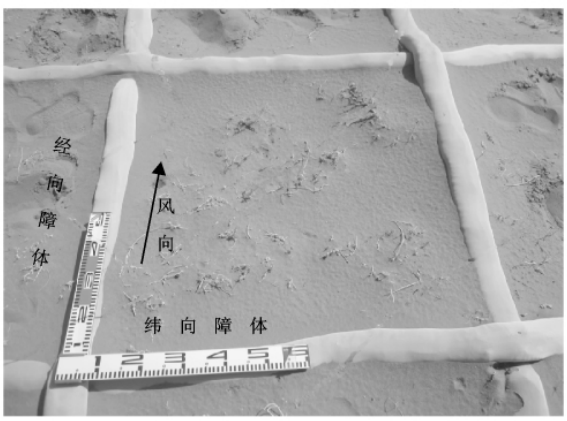


图 1 格状沙障内不同走向的障体

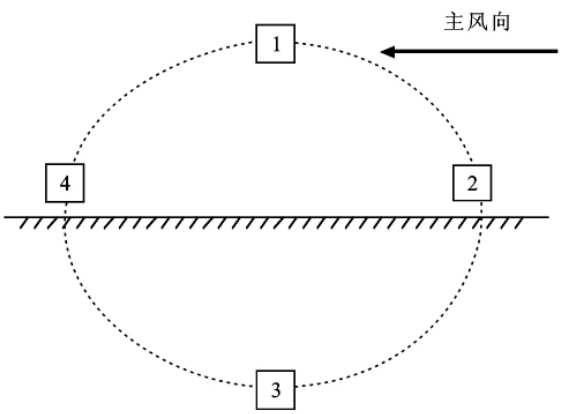


图 2 单根沙障剖面的不同测定部位

1.4.2 试验指标及测定方法

(1) 力学性能指标。本试验所采用的指标是断裂强度，通过拉伸试验测得，是表征材料拉伸性能的一个指标。拉伸试验是力学性能测试中最常用的一

种。采用 GB/T 3916—1997 标准测定单根纱线的拉伸性能,测试前,将试样放置于标准大气下调湿平衡。仪器使用 INSTRON 5848Q9170 型万能材料试验机,室温,夹距 100 mm,拉伸速度 100 mm/min,预加张力 05±0.1 cN/tex,不同部位的纱线分别测定 30 根,最后取平均值。

(2) 失重率。将在试验地使用 3.5 a 的 PLA 沙障试样带回实验室冲洗干净,连同未使用的 PLA 沙障一起存放于烘箱中干燥至恒重,用 Sartorius BP221S 型(0.1 mg)电子天平称重,计算失重率。由于 PLA 沙障在使用后会发生变形,这会对取样后的障体长度的测量带来误差,进而会对质量的称量造成误差,所以在实际计算中需添加修正系数进行修正。修正系数是根据针织物单位长度内的线圈数确定的,为原始 PLA 沙障 5 cm[13]内的线圈数与使用后 PLA 沙障 5 cm 内的线圈数比值(如表 1 所示)。

表 1　不同坡位、不同走向障体的长度修正系数

项 目	迎风坡坡底障体		迎风坡坡中障体		坡顶障体		背风坡坡中障体		背风坡坡底障体	
	纬向	径向	纬向	径向	纬向	径向	纬向	径向	纬向	径向
修正系数	80/78	80/79	80/90	80/90	80/87	80/90	80/78	80/77	80/83	80/85

失重率计算公式为:

$$\eta=(m_1-km_2)/m_1\times100\%$$

式中:η——失重率;k——修正系数;m_1——试样降解前的重量;m_2——试样降解后的重量。

(3) 表面形态变化。降解前后 PLA 沙障的表面用 XL30 ESEM—FEG 场发射环境扫描电子显微镜观察,放大倍数为 2 000 倍。观察前试样经真空喷金处理。

2　结果与分析

2.1　降解前后 PLA 沙障的力学性能变化

相比于未使用过的 PLA 沙障,使用 3.5 a 后的障体各部位单纱断裂强度都有不同程度的降低,并且随着坡位的上升,单纱断裂强度呈现出逐渐降低的特点。无论是纬向障体还是经向障体,迎风面的单纱断裂强度下降最多,其次是顶部及背风面,贴地面的断裂强度下降最少(见图 3)。

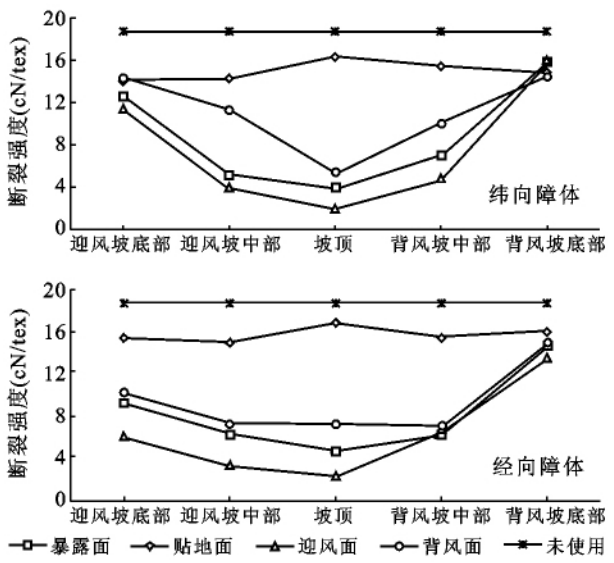


图 3　PLA 沙障障体各部位力学性能变化

与贴地面相比,障体迎风面、顶部、背风面 3 个部位的单纱断裂强度明显较低,这是由于 3 个部位长期暴露于大气中,沙漠地区频繁的风沙活动使得沙障在阻挡风沙活动时迎风面、顶部及背风面都受到不同程度的风沙流吹蚀磨蚀作用。同时,沙漠地区的日光照射非常强烈,长时间的日光照射会对材料的物理化学性能产生很大影响[14-15]。因此在这 2 个因素综合作用下导致了 3 个部位的力学性能产生了较大的损耗。而贴地面与土壤接触,完全不受这 2 个因素的影响。此外,根据相关的文献报道[15-16],一般影响材料降解的外界因素还有水、pH 值、金属离子等,但沙漠地区高温少雨、干燥多风等气候条件,决定了这些因素对 PLA 沙障的作用不大,可以忽略不计。

在经向障体迎风面、顶部、背风面 3 个部位中,当风沙流对沙障作用时迎风面最先受到冲击,因而迎风面障体受到的风沙流吹蚀磨蚀作用最强,其次是顶部和背风面。而光照对障体 3 个部位的影响则刚好相反,即背风面障体受到的光照影响最大,其次是顶部障体,迎风面障体受到的光照影响最小。据迎风面障体的单纱断裂强度总体上最低可推断,风沙流对 PLA 障体的吹蚀磨蚀作用大于光照。

2.2　降解前后 PLA 沙障的重量损失变化

图 4 表示聚乳酸作为沙障材料在乌兰布和沙漠使用 3.5 a 后,不同走向障体随坡位的变化情况。由图 4 可知,无论是迎风坡还是背风坡,从坡底到坡顶,PLA 沙障的失重率逐渐变大。对于经向障体,坡顶处的失重率最大,为 21.21%,背风坡坡底处失重率最小,为 12.2%。纬向障体,迎风坡中部的失重率最大,为 19.89%,坡顶处的失重率略低于迎风坡中部,为 19.5%,背风坡坡底处的失重率最小,为 11.49%。此外,迎风坡各部位障体的失重率总体上比背风坡各部

位的大，这也与沙区迎风坡所受风沙活动作用大于背风坡的实际情况相符。

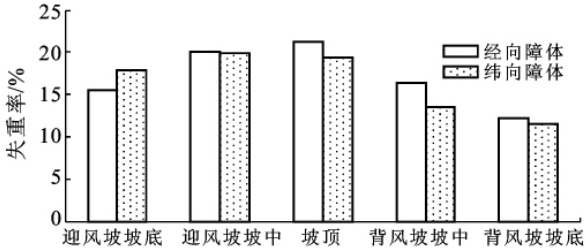


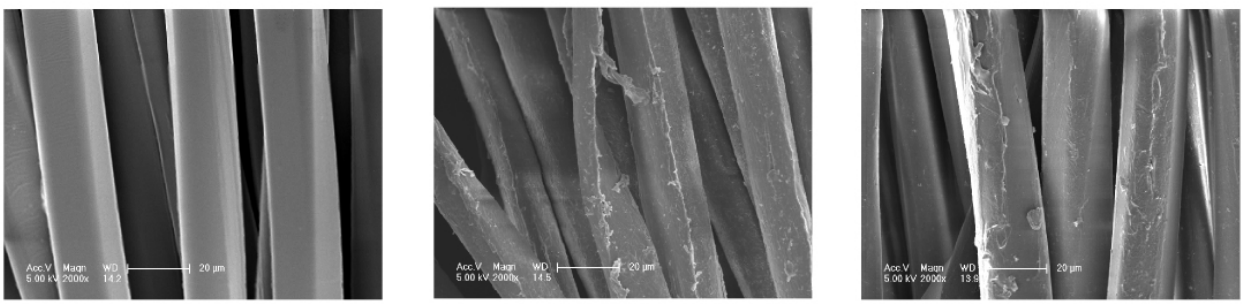
图 4 不同走向障体失重率随坡位的变化情况

2.3 降解前后 PLA 沙障表面的微观形态变化

为了深入地考察材料表面在降解过程中的微观形态变化，对 PLA 沙障的降解情况进行了环境扫描电镜(ESEM)观察。图 5(a)是降解前 PLA 沙障表面的 ESEM 照片。图 5(b)和图 5(c)为在乌兰布和沙漠沙丘顶部使用 3.5 a 后的纬向障体的 ESEM 照片。

由 ESEM 实验结果分析知：未经使用的 PLA 沙障的表面十分光滑，但是在沙漠环境下使用 3.5 a 后，障体的暴露部分及贴地部分出现了不同程度的降解特征。障体暴露部分的表面出现了较大的裂缝，且可见有部分材料脱落的痕迹。此外，还可发现有不规则分布的微小孔洞，这是由于聚乳酸材料发生了简单的本体水解而形成的[17-18]。障体贴地部分的表面整体坑洼不平，只产生了一些零星碎片或者条状剥皮。

整体而言，障体贴地部分的降解特征不及暴露部分的那么明显，综合分析认为暴露部分受到强烈的日光照射及风沙流吹蚀磨蚀，导致表面纤维受到严重的破坏。而贴地面部分与沙区土壤接触，虽不受上述 2 个因素影响，但或多或少都会受到土壤微生物的作用，进而引起了降解现象的产生。但是，由于 PLA 是通过人工合成的办法获得的，自然界中能分泌 PLA 降解酶的降解菌和能以 PLA 为营养进行代谢的微生物含量低，另外，再加上沙漠地区特有的环境条件，对微生物、细菌等的生长不利，这就导致了微生物对贴地部分的作用较小，贴地部分的降解特征不及暴露部分的显著。



a 未使用的 PLA 沙障　　b 使用后沙障的暴露部分　　c 使用后沙障的贴地部分

图 5 PLA 材料作为沙障使用 3.5 a 后环境扫描电镜照片

3 结 论

(1) 与未使用的 PLA 沙障相比，随坡位的上升，障体 4 个部位的单纱断裂强度呈现出不同程度的降低。各部位的单纱断裂强度由小到大排序依次为：迎风面、顶部、背风面、贴地面。

(2) 从坡底到坡顶，障体的失重率整体呈现出逐渐增大的变化特点。

(3) 沙障暴露部分的降解现象较贴地部分的明显。

(4) 风沙流吹蚀磨蚀是影响 PLA 沙障材料性能的最主要因素，光照的影响其次，沙区土壤微生物的作用最小。

(5) 由于沙障的暴露部分降解程度较大，贴地部分变化微乎其微。为继续保证 PLA 沙障防护效益的发挥，可以考虑在 PLA 沙障使用 3～4 a 后，将障体上下反转互换，以延长整根障体的使用寿命。本研究仅对使用 3.5 a 后的沙障进行了性能研究，并从风沙流与光照 2 个方面初步解释了性能变化的原因，但对于 PLA 沙障的使用寿命及紫外线强度、沙丘表面风速随沙丘位置的分布关系，尚有待进一步深入研究。

[参 考 文 献]

[1] Kricheldorf H R. Syntheses and application of polylactides[J]. Chemophere, 2001,43(1):49-54.

[2] 盛敏刚，严永新，张金花，等. 环境友好型生物降解材料聚乳酸的性能研究[J]. 中国农学通报，2007,23(9):499-500.

[3] Huneault M A, Li H B. Morphology and properties of compatibilized polylactide/thermoplastic starch blends [J]. Polymer, 2007,48(1):270-280.

[4] Wang Wenshou, Ping Peng, Chen Xuesi, et al. Polylactide based polyurethane and it's shape memory behavior[J]. European Polymer Journal, 2006, 42(6):1240-1249.

(下转第 132 页)

高作物干物质积累量和产量。施用改良剂后，土壤盐分含量相对降低量与对照相比差异显著，且作物的产量也都高于对照。不同改良剂处理后土壤含盐量降低程度和作物增产效果不同，以腐殖酸处理降低土壤盐分含量和提高作物产量效果最好，其次是禾康盐碱土改良剂、康地宝盐碱土改良剂和金满田生物菌剂。

(2) 石膏处理能显著降低土壤盐分含量，提高作物干物质积累量和产量，与改良剂配施后能取得更好的效果，但是石膏在降低土壤 pH 值上效果不显著，因此，施用石膏改良滨海盐渍土时要防止土壤发生碱化。

(3) 腐殖酸与石膏配施是适宜于滨海盐渍土的最佳改良剂组合。腐殖酸与石膏配施处理后土壤盐分含量和 pH 值降低最多，作物干物质积累量和产量最高，所以在本研究区腐殖酸与石膏配施具有最佳的土壤改良利用效果，是适宜于研究区滨海盐渍土的最佳改良剂组合。

[参 考 文 献]

[1] 刘阳春，何文寿，何进智，等. 盐碱地改良利用研究进展[J]. 农业科学研究，2007，28(2)：68-71.

[2] 张文渊. 江苏沿海地区盐渍土改良利用的治理措施[J]. 中国农业资源与区划，2000，21(5)：43-45.

[3] 孔明杰，曾繁森. 高聚物土壤改良剂的研究进展[J]. 土壤通报，2000，31(5)：199-202.

[4] 孙义祥，黄晓澜，张祥明，等. 土壤改良剂对辣椒营养元素积累的影响[J]. 安徽农业科学，1999，27(2)：148-149.

[5] 吴增芳. 土壤结构改良剂[M]. 北京：中国林业出版社，1986：68-74.

[6] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京：中国农业科技出版社，2000.

[7] 张凌云，赵庚星，徐嗣英，等. 滨海盐渍土适宜土壤盐碱改良剂的筛选研究[J]. 水土保持学报，2005，19(3)：21-23.

[8] Choudharya O P, Josana A S, Bajwaa M S, et al. Effect of sustained sodic and saline-sodic irrigation and application of gypsum and farmyard manure on yield and quality of sugarcane under semi-arid conditions[J]. Field Crops Research, 2004，87(2/3)：103-116.

[9] 王遵亲，祝寿泉，俞仁培，等. 中国盐渍土[M]. 北京：科学出版社，1993.

[10] 田霄鸿，南雄雄，赵晓进，等. 施用硫磺和 ALA 对碱性盐土上作物生长发育及土壤性质的影响[J]. 生态环境，2008，17(6)：2407-2412.

[11] 徐胜光，李淑仪，蓝佩玲，等. 燃煤烟气脱硫副产物对花生作物营养效应及其机理[J]. 生态环境，2003，12(4)：415-418.

[12] 李茜，孙兆军，秦萍，等. 燃煤烟气脱硫废弃物和糠醛渣对盐碱土的改良效应[J]. 干旱地区农业研究，2008，26(4)：70-73.

[13] 李焕珍，徐玉佩，杨伟奇. 脱硫石膏改良强度苏打盐渍土效果的研究[J]. 生态学杂志，1999，18(1)：25-29.

[14] 王金满，杨培岭，张建国. 脱硫石膏改良碱化土壤过程中的向日葵苗期盐响应研究[J]. 农业工程学报，2005，21(9)：33-37.

(上接第 110 页)

[5] Bhuvanesh Guptaa, Nilesh Revagade, Jöns Hilbom. Poly(lactic acid) fiber: an overview[J]. Progress in Polymer Science, 2007，32(4)：455-482.

[6] 周丹丹. 生物可降解聚乳酸(PLA)材料在防沙治沙中的应用研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2009.

[7] 周丹丹，虞毅，胡生荣，等. 沙袋沙障凹曲面特性研究[J]. 水土保持通报，2009，29(4)：22-25.

[8] 袁立敏，高永，虞毅，等. PLA 沙障对土壤硬度的影响[J]. 中国水土保持科学，2010，8(4)：90-94.

[9] 韩春冬，高君亮，虞毅，等. PLA 沙障对毛乌素沙地新月形沙丘土壤水分的影响[J]. 内蒙古林业科技，2010，36(4)：1-4.

[10] 容敏智，卢珣，章明秋. 全植物纤维复合材料的生物降解性能研究[J]. 中国塑料，2006，20(8)：64-68.

[11] Yutaka Tokiwa, Buenaventurada P Calabia. Biodegradability and biodegradation of poly(lactide) [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006，72(2)：244-251.

[12] Alauzet N, Garreau H, Bouché M, et al. Earthworms and the degradation of lactic acid-based stereocopolymers[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2002，10(1/2)：53-58.

[13] 余序芬，鲍燕萍，吴兆平，等. 纺织材料实验技术[M]. 北京：中国纺织出版社，2004：232-233.

[14] Tomonori Ishigaki, Wataru Sugano, Michihiko IKE, et al. Effect of UV irradiation on enzymatic degradation of cellulose acetate[J]. Polymer Degradation and Stability, 2002，78(3)：505-510.

[15] 魏晓丽. 聚丙烯土工布纤维抗老化性能研究与测试[D]. 天津：天津工业大学，2003.

[16] 张敏，崔春娜，宋洁，等. 聚乳酸降解的影响因素和降解机理的分析[J]. 包装工程，2008，29(8)：16-18.

[17] 邹俊，狄东华，周海骏，等. 聚—L—乳酸/超细 β—磷酸三钙复合材料的降解研究[J]. 江苏科技大学学报：自然科学版，2006，20(5)：76-80.

[18] 王华林，盛敏刚，史钱钧，等. PLA 及 PLA 复合材料降解性能研究进展[J]. 高分子材料科学与工程，2004，20(6)：20-23.