

沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量及酶活性的影响

梁钰镁，高 永，王瑞东，段晓婷，郭 鑫

(内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010020)

摘要：为探究沙柳沙障腐烂过程土壤微生物生物量及酶活性的变化规律,以铺设 10 年的沙柳沙障为研究对象,采用野外原位取样和室内指标测定法,结合 RDA 多元数据排序分析,揭示影响土壤微生物生物量及酶活性的主要环境因子。结果表明:(1)随铺设年限的增加,土壤中的 C : N 与 C : P 呈上升趋势,10 年后的 C : N 是 1 年的 16.14 倍,而 N : P 呈下降趋势,10 年后下降 83.96 % ;(2)随腐烂程度的加剧,土壤 MBC、MBN 与 MBP 均呈先上升后下降趋势,7 年均达到最大值,分别为 1 年的 2.67、2.18、1.43 倍;(3)土壤碱性磷酸酶活性随铺设年限增加呈先上升后下降趋势,6 年时最大且表现出显著性差异($P<0.05$),但脲酶与蔗糖酶活性均为 1 年时显著大于其他各组($P<0.05$);(4)RDA 分析结果表明,土壤理化因子对土壤微生物生物量及酶活性影响的大小顺序为速效钾>含水率>碳氮比>碱解氮>酸碱度>速效磷>氮磷比>碳磷比,即速效钾与含水率为主要驱动因子。研究结果对进一步探讨荒漠生态系统土壤碳、氮、磷养分循环提供了重要的理论依据。

关键词：沙柳沙障；腐烂分解；土壤微生物生物量；土壤酶活性

中图分类号：S154；S793.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1009-2242(2022)02-0305-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.039

Effects of *Salix psammophila* Sand Barriers Decay on Soil
Microbial Biomass and Enzymes Activities

LIANG Yumei, GAO Yong, WANG Ruidong, DUAN Xiaoting, GUO Xin

(College of Desert Control Science and Engineering , Inner Mongolia Agricultural University , Hohhot 010020)

Abstract: The purpose of this study was to investigate the changes in soil microbial biomass and enzymes activities during the decaying of *Salix psammophila* sand barriers. The sand barriers which had been laid for ten years were used as the research object. The research methods included field in-situ sampling and laboratory tests. Combined with RDA data sequencing analysis, the main environmental factors affecting soil microbial biomass and enzymes activities were revealed. The results showed that the values of C : N and C : P in soil increased with the increase of laying years. The C : N value in 10 years was 16.14 times of that in one year, while the N/P decreased by 83.96 % after 10 years. The soil MBC, MBN and MBP increased firstly and then decreased with the decaying, and reached the maximum value in the 7th year, which was 2.67, 2.18 and 1.43 times that in the 1st year, respectively. With the increase of decaying years, the activity of soil alkaline phosphatase increased first and then decreased. It peaked in the 6th year and showed a significant difference ($P<0.05$), but the activities of urease and sucrose in one year were significantly higher than those in others ($P<0.05$). The RDA analysis showed that the sequences of the major soil physical and chemical factors affecting soil microbial biomass and enzymes activities were as follows: available potassium>water content>C : N ratio>alkaline hydrolysable nitrogen>pH>available phosphorus>N : P ratio>C : P ratio. The main driving factors were soil available potassium and water content. The results of this study could provide an important theoretical basis for the study on soil carbon, nitrogen and phosphorus cycling in the desert ecosystem.

Keywords: *Salix psammophila* sand barriers; decomposition; soil microbial biomass; soil enzyme activity

土壤微生物生物量及酶活性在陆地生态系统的
养分循环中起着重要作用,是土壤有机质分解的关键
因子^[1]。在沙柳沙障的腐烂分解过程中土壤微生物能
够分泌并释放大量不同功能的催化酶,促使障体碳的分

收稿日期:2021-08-22
资助项目:国家重点研发计划项目“不同气候区新材料研发、筛选与施配技术及效果研究”(2018YFC0507101);国家自然科学基金项目“大气—沙土界面动态过程对沙柳沙障耐蚀性的强化机制”(41861044)
第一作者:梁钰镁(1993—),女,在读博士研究生,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: liang490002878@163.com
通信作者:高永(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: 13948815709@163.com

解与转化,而酶活性的大小反过来又能够表示土壤微生物活性的强弱与土壤演变过程发生的方向。在许多生态系统中,通常由多种酶来共同响应生物代谢过程^[2]。脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的活性可以分别作为调控土壤氮动态^[3]、反映碳循环强度与速度^[4]及表征有机磷矿化和生物活性的指标^[5]。此外,土壤微生物生物量是有机质中最活跃的组分,微生物生物量碳、氮分别是土壤中活跃的碳库和氮库^[6],微生物生物量碳主要表征有机物在分解过程中活体微生物的生物量大小及数量^[7],而微生物生物量氮是反映微生物在有机物的腐烂分解过程中氮利用特性的重要指标^[8]。

沙柳沙障是我国西北干旱区荒漠化防治领域中广为采用的半隐蔽式机械沙障,运用平茬的沙柳枝条设置为多种规格的沙障形式以改变过境风沙流的速度和方向^[9-10]。然而,长期受到沙埋环境的影响,障体稳定沙埋部因水分波动及分布不均容易引起频繁膨胀和收缩,同时阴暗较潮湿的环境为土壤微生物活动及分解障体有机质提供了有利条件,从而导致细胞壁结构和功能受损^[11]。以往的学者^[12-13]大多侧重于沙柳沙障大气暴露段的相关研究,表明其能够改变风速流场并增加沙丘表层土壤细颗粒物质和土壤有机碳,能够改变土壤的物理和化学性质。近来,部分学者^[11,14-15]开始关注沙柳沙障沙埋部的分解特征及降解规律,研究表明,沙柳沙障在分解过程中质量损失率增加,木质纤维素等化学成分降低,且随腐烂程度的增加,真菌群落物种数量及多样性增大,群落结构趋于复杂化。然而,在沙柳沙障腐烂过程中与土壤微生物密切相关的酶活性和土壤微生物生物量的研究尚显不足,且二者与土壤基本性质之间的响应关系尚不明确。

基于此,本研究以铺设 10 年为沙柳沙障的腐烂期限,分别选取了 1~10 年的 10 块样地为研究对象,采用野外原位取样和室内指标测定的方法,分析沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量碳、氮和磷以及酶活性的影响,同时结合土壤基本理化性质,运用生态学多元数据排序手段,揭示沙柳沙障腐烂过程中土壤微生物生物量和酶活性与环境因子的相互关系,对明晰沙柳沙障分解特征及荒漠生态系统中养分循环过程具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯独贵塔拉镇境内(40°36'N,108°42'E)。该地区属于温带大陆性气候,高空常年受西风环流控制,近地面受季风环流的影响。夏季炎热多雨、冬季寒冷干燥,年均降水量 258.3 mm,集中于 7—8 月,年均日照时间为 3 193 h,年均气温 6.1 °C,平均风速 4.4 m/s,年风沙活动天数为

45~75 天,主要集中在 3—5 月。地貌类型为流动沙丘、半流动沙丘及固定沙丘。植被类型主要包括:沙柳(*Salix psammophila*)、油蒿(*Artemisia ordosica*)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等^[10]。由于受到荒漠地区大风或沙尘暴等极端天气的影响,该地区穿沙公路两侧均采用半隐蔽式沙柳沙障控制过境流沙。

1.2 土壤样品采集

样品采集于 2021 年 5 月下旬,试验区均位于库布齐沙漠(独贵塔拉镇境内)的穿沙公路两侧,地势皆平缓且受到外界相近的自然因素。样地分别选取铺设 1~10 年、规格均为 1 m×1 m 的沙柳沙障 10 块样地。每块样地以“S”形线上选取间隔为 5 m 的 3 个障格,每个障格的每条障边上(东、西、南、北)等间距选取 2 根(直径为(1.8±0.02) cm,沙埋深度约为 20 cm)沙柳沙障枝条,依次采集其周围的土壤样品,每个障格共计取样 8 处。具体操作方法为:将单枝沙柳沙障取出后,首先使用已灭菌处理的刷子将(20±1) cm 处的覆土清刷并采集,然后使用灭菌小铲取其周围 1 cm 厚度的覆土,每个障格中以“8 个点”采集的沙障周围土样充分混匀为 1 个样品,每组共计 3 个重复,分别装入无菌密封袋中,编号并标记,置于 4 °C 冷藏箱中运回实验室。去除土样中残留根系、砾石等杂质物后,使用 2 mm 土筛过筛处理。将过筛后的土样等分为 2 份:一份为新鲜样品,用于土壤微生物生物量碳、氮和磷含量以及土壤蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性的测定;另一份自然阴干后,进行土壤理化指标测定。

1.3 土壤基本性质测定及分析

土壤 pH 使用便携式 pH 计测定,在 105 °C 条件下采用烘干法测定土壤含水率,采用解碱扩散法测定土壤碱解氮含量,土壤速效磷与速效钾含量分别采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法与火焰光度法测定。土壤全磷采用钼锑抗比色法测定,土壤总碳与全氮含量分别采用重铬酸钾氧化法和全自动凯氏半微量定氮仪(FOSS2200)测定。此外,土壤 C : N 采用总碳与全氮含量的比值来表示;C : P 采用总碳与全磷含量的比值来表示;N : P 采用全氮与全磷含量的比值来表示。

1.4 土壤微生物生物量及酶活性测定

土壤微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)均采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L K₂SO₄ 浸提法,分别使用碳—自动分析仪(Phoenix 8000)与流动注射分析仪(FIASStar 5000)测定有机碳和有机氮的含量。土壤微生物生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸—0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提法测定,使用分光光度计(UV8500II型)在 880 nm 波长下比色。以熏蒸与未熏蒸的土壤样品中有

机碳、氮和磷含量的差值除以转换系数,系数 K_C 、 K_N 和 K_P 取值分别为 0.45,0.45 和 0.40。

土壤蔗糖酶(Suc)活性采用 3,5—二硝基比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤生成的葡萄糖的毫克数(mg)表示蔗糖酶活性;碱性磷酸酶(APh)采用磷酸苯二钠比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中释放出来的酚的毫克数(mg)表示碱性磷酸酶活性;脲酶(Ure)活性运用苯酚钠—次氯酸钠比色法测定,以 24 h 后 1 g 土壤中 $\text{NH}_3\text{—N}$ 的毫克数(mg)表示土壤脲酶活性。

1.5 数据分析

采用 SPSS 22.0 软件进行土壤基本性质、土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性的单因素方差分析(One-way ANOVA),并使用 Duncan 法进行组间显著性差异检验(显著水平为 0.05);运用 GraphPad Prism 8.0 软件进行折线图、柱状图及小提琴图的绘制;采用 Canoco 5.0 软件以土壤微生物生物量碳氮磷及酶活性作为响应变量,土壤物理化学基本性质作为解释变量进行 RDA 分析。

表 1 不同铺设年限沙柳沙障周围土壤理化性质

铺设 年限/a	含水率/%	pH	C : N	N : P	C : P	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
1	1.49±0.16e	8.64±0.31c	2.77±0.24g	1.06±0.12a	2.93±0.47d	1.84±0.40d	2.15±0.17a	65.76±3.21e
2	1.97±0.15de	8.63±0.27c	6.32±0.20fg	0.66±0.09b	4.15±0.45cd	1.93±0.09d	1.78±0.05bcd	62.95±2.25e
3	2.26±0.56d	8.98±0.17abc	7.61±1.35fg	0.53±0.05c	4.03±0.93cd	2.18±0.17cd	1.82±0.16bcd	71.51±2.22d
4	2.46±0.47d	8.84±0.19bc	11.04±1.20ef	0.48±0.03cd	5.31±0.41bc	2.10±0.37d	1.66±0.11cde	76.10±3.37c
5	3.25±0.20bc	8.64±0.36c	13.31±0.88e	0.58±0.13bc	7.68±1.18a	2.76±0.67bc	1.30±0.12f	83.91±1.81b
6	3.16±0.25bc	8.08±0.29bc	21.17±2.42d	0.37±0.09d	7.90±1.84a	2.98±0.19b	1.68±0.16cde	84.17±2.10b
7	4.07±0.15a	9.34±0.11a	33.32±2.50c	0.23±0.02e	7.51±1.06a	3.67±0.44a	1.92±0.17abc	91.62±1.87a
8	3.33±0.10bc	9.15±0.28ab	39.45±3.15b	0.18±0.01e	6.95±0.66ab	3.20±0.33ab	1.46±0.13ef	85.27±2.30b
9	3.64±0.22ab	9.04±0.14abc	36.76±7.25bc	0.23±0.04e	8.39±2.08a	3.74±0.29a	2.02±0.18ab	81.55±3.33b
10	3.11±0.18c	9.18±0.24ab	44.70±0.74a	0.17±0.02e	7.63±0.75a	3.12±0.15ab	1.62±0.13de	82.01±3.66b

注:表中数据为平均值±标准差;同列相同小写字母表示同一指标组间无显著性差异($P>0.05$)。

2.2 土壤微生物生物量碳、氮、磷的变化特征

随着沙柳沙障腐烂程度的加剧,障体周围土壤中的微生物生物量发生规律性变化。由图 1a 和图 1b 可知,土壤 MBC 的变化范围为 25.80~68.93 mg/kg,土壤 MBN 的变化范围为 4.62~10.08 mg/kg。MBC 与 MBN 的变化均呈现先上升后下降的趋势,7 年的沙柳沙障土壤 MBC(68.93 mg/kg)和 MBN(10.08 mg/kg)均显著高于其他各组($P<0.05$),但沙柳沙障铺设后前 4 年的各组之间 MBN 均无显著性差异($P>0.05$),7 年土壤的 MBC 与 MBN 分别是 1 年的 2.67,2.18 倍。由图 1c 可知,土壤 MBP 整体呈先波动式缓慢增长后急剧降低的趋势,7 年的沙柳沙障土壤 MBP(9.30 mg/kg)最大,为 1 年的 1.43 倍。由小提琴图(图 1d)中的土壤 MBC、MBN 和 MBP 的分布特征可知,沙

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质的变化特征

沙柳沙障的腐烂分解对荒漠生态系统中土壤养分的循环与补给起着十分重要的作用。从表 1 可以看出,随铺设时间的增加,土壤中的 C : N 与 C : P 整体呈现上升趋势,10 年土壤中的 C : N 最大,约为 1 年的 16.14 倍,而 C : P 在 9 年达到最大值,较 1 年增加 2.86 倍;N : P 含量整体呈下降趋势,沙柳沙障铺设 10 年后下降 83.96%。土壤速效钾与含水率随铺设时间的增加呈先上升后下降的趋势,均于 7 年达到最大,分别为 1 年的 1.39,2.73 倍。土壤碱解氮含量变化介于 1.84~3.74 mg/kg,沙柳沙障铺设的前 4 年各分组之间的土壤碱解氮含量均无显著性差异($P>0.05$),但与 6~10 年的 5 个分组之间均具有显著性($P<0.05$)。土壤速效磷含量变化介于 1.30~2.15 mg/kg,整体呈先降低后增加的趋势,1 年的速效磷含量最大(2.15 mg/kg),与 9 年无显著性差异(2.02 mg/kg, $P>0.05$),但与其他各组含量均存在显著性($P<0.05$)。

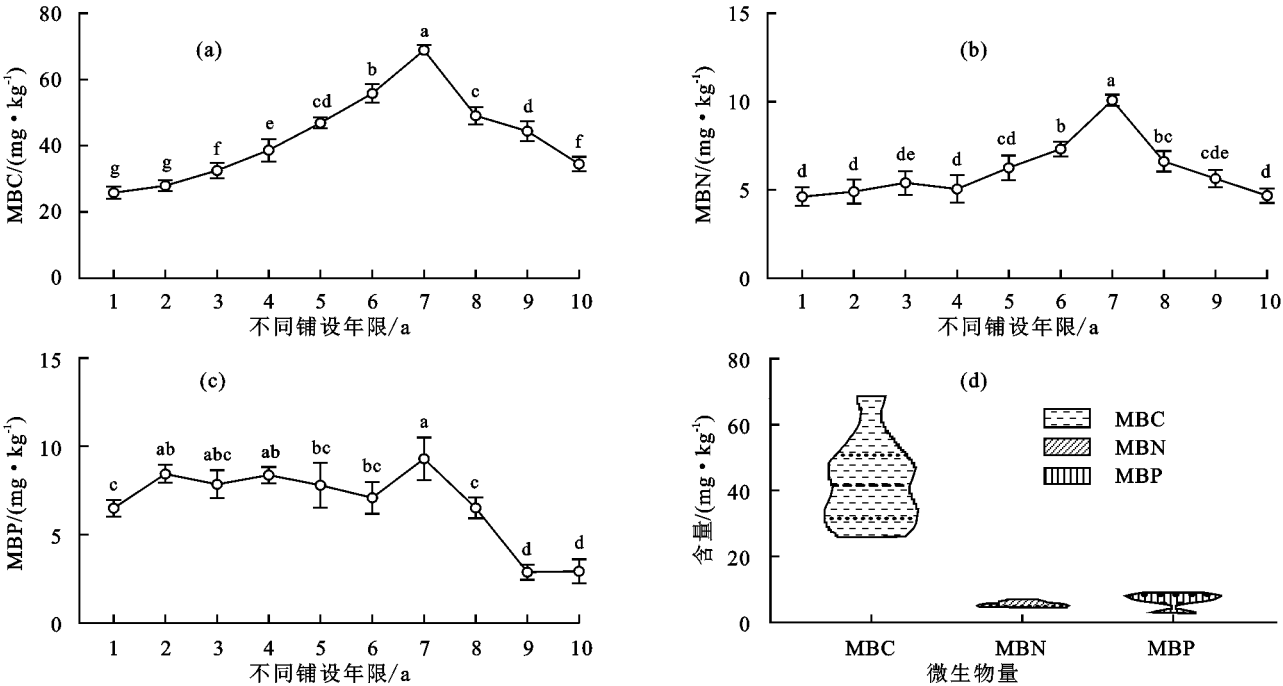
柳沙障铺设 10 年的过程中,对土壤 MBC 的影响最大,且对 MBN 的影响最小。

2.3 土壤酶活性的变化规律

不同铺设年限的沙柳沙障周围土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性呈现不同的变化规律(图 2)。脲酶与蔗糖酶活性随铺设时间的增加整体呈先下降后上升再下降趋势,而碱性磷酸酶活性呈先上升后下降趋势。由图 2a 可知,脲酶活性的变化范围为 4.97~11.94 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$,1 年的脲酶活性最大,且与其他各组均存在显著性差异($P<0.05$);5 年的脲酶活性最小,较 1 年降低 58.38%。由图 2b 可知,蔗糖酶活性的变化范围为 0.21~1.78 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{d})$,1 年的蔗糖酶活性最大,且与其他各组均具有显著性差异($P<0.05$),10 年的脲酶活性最小,较 1 年降低 88.20 %。

由图 2c 可知,1 年的碱性磷酸酶活性最小(0.013 mg/(g · d)),而 6 年的活性最大(0.045 mg/(g ·

d)),其值为 1 年的 3.46 倍,6 年的碱性磷酸酶活性显著大于其他各组($P<0.05$)。



注:图中不同字母表示同一指标在不同铺设年限之间存在显著性差异($P<0.05$)。下同。

图 1 不同铺设年限沙柳沙障土壤微生物生物量碳、氮、磷的动态变化规律

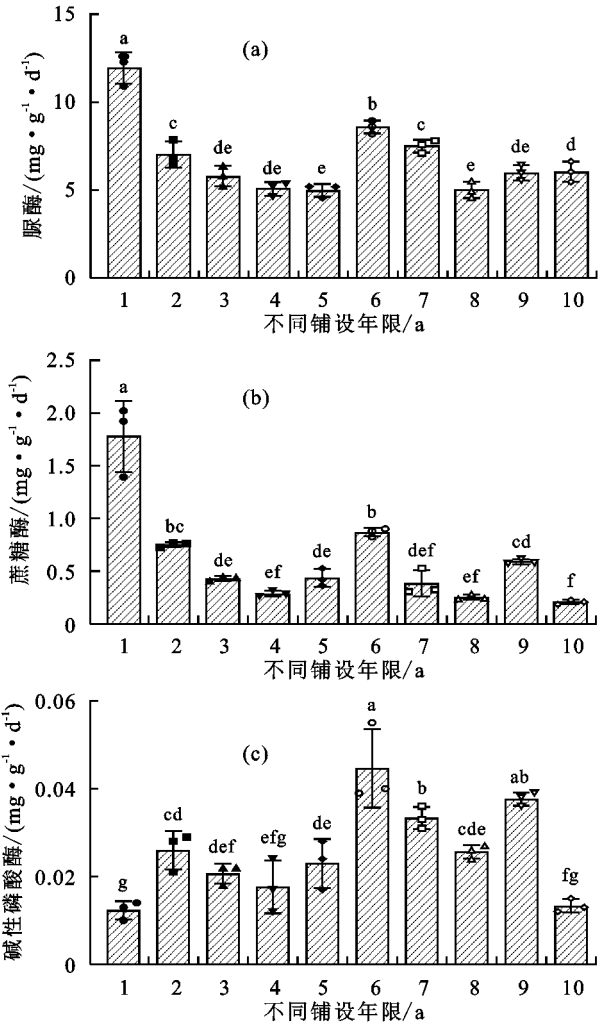


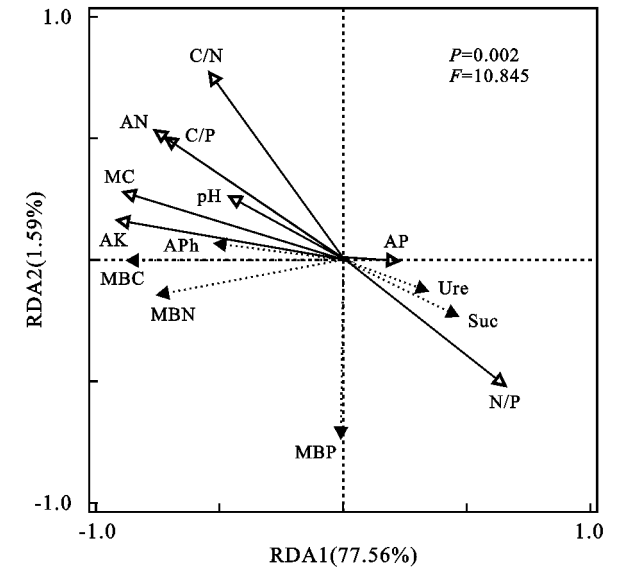
图 2 不同铺设年限沙柳沙障周围土壤酶活性的动态变化规律

2.4 土壤微生物生物量与酶活性变化的 RDA 分析

采用冗余分析方法(redundancy analysis, RDA)探究沙柳沙障腐烂过程土壤微生物生物量及酶活性变化与环境因子的响应关系。由表 2 可知,4 个排序轴可累积解释土壤环境因子与微生物量及酶活性变化关系的 80.50%。其中,RDA1 特征值为 77.56%,RDA2 特征值为 1.59%,前 2 个排序轴可累积解释变化关系的 79.15%。蒙特卡洛检验结果表明,土壤环境因子与微生物生物量及酶活性变化具有显著相关性($P<0.05$),即存在空间上的有序关系。

由图 3 可知,土壤速效钾、含水率、碱解氮、C : P、C : N 及 pH 与 RDA1 轴呈负相关关系,相关系数分别为-0.848 8,-0.818 3,-0.710 4,-0.663 3,-0.497 4,-0.419 8;N : P 及速效磷与 RDA1 轴呈正相关关系,相关系数分别为 0.588 9,0.183 9。其中,土壤含水率与速效钾的影响程度最大。此外,土壤 N : P 含量对脲酶和蔗糖酶的正相关影响最大,但却对碱性磷酸酶的负相关作用最大;N : P 对土壤 MBP 为主要的正相关影响,但对 MBC 的负相关作用最大;MBN 主要受到速效钾的正相关影响。由表 3 可知,土壤环境因子对微生物生物量及酶活性影响的大小顺序为速效钾>含水率>碳氮比>碱解氮>酸碱度>速效磷>氮磷比>碳磷比,其中,速效钾与含水率显著影响二者之间的关系。由此可见,沙柳沙障腐烂过程中土壤微生物生物量及酶活性的变化受多种土壤环境因子的复合影响,速效钾与含水率是影响两者关系的主要环境因子。

表 2 土壤环境变解释的 RDA 分析结果				
解释参数	RDA1	RDA2	RDA3	RDA4
特征值	0.7756	0.0159	0.0121	0.0014
Pseudo 典范相关性	0.9070	0.7400	0.7070	0.6870
累积方差解释度/%	77.5600	79.1500	80.3600	80.5000
典范特征值总和		0.8051		
特征值总和		1.0000		
所有典范轴 P 值		0.0020		



注:MC 为土壤含水率;AK 为速效钾;AP 为速效磷;AN 为碱解氮;pH 为酸碱度;C : N 为碳氮比;C : P 为碳磷比;N : P 为氮磷比;Ure 为脲酶;Suc 为蔗糖酶;APh 为碱性磷酸酶;MBC 为微生物生物量碳;MBN 为微生物生物量氮;MBP 为微生物生物量磷。

图 3 土壤微生物生物量及酶活性与环境因子关系的 RDA 分析

表 3 土壤环境变解释的重要性排序与显著性检验结果					
环境因子	解释量/ %	贡献量/ %	pseudo-F	P	重要性 排序
速效钾	68.0	84.5	59.5	0.002	1
含水率	4.5	5.6	4.9	0.040	2
碳氮比	3.1	3.9	2.9	0.084	3
碱解氮	2.0	2.5	2.3	0.132	4
酸碱度	1.4	1.7	1.6	0.218	5
速效磷	0.7	0.9	0.8	0.376	6
氮磷比	0.4	0.5	0.5	0.558	7
碳磷比	0.3	0.3	0.3	0.622	8

3 讨论

3.1 沙柳沙障腐烂过程对土壤基本性质的影响

铺设在沙丘上的沙柳沙障在使用前期可以有效发挥生态防护效益^[9,14],但随着年限的增加,长期沙埋部腐化程度加剧,障体抗弯强度损失率增加^[11,14],外界强烈的风沙运动增加了沙柳沙障的倒伏破坏率^[16]。沙漠地区的土壤养分及营养元素极为匮乏,腐烂的沙柳沙障可作为腐化有机物补给沙土中的营养元素,且其在沙漠土壤中的分解是养分循环所必须

的生态过程。本研究发现,土壤碱解氮与速效钾含量随着年限的增加,整体呈上升趋势,而速效磷含量呈先减少后增加趋势,与前人^[13]研究结果基本一致,这可能是因为沙障腐化分解过程中对营养元素的释放。此外,C : N 与 C : P 随着年限的增加呈上升趋势,即总碳增加的速度大于全氮,这可能与障体的木质纤维素被降解为多糖化合物有关,其碳含量大于氮。铺设 7 年的沙柳沙障周围土壤含水率显著大于其他各组 ($P<0.05$),主要是因为随障体质量损失率的增加,基本密度下降,其吸取沙漠表层大气降水或空气凝结水的能力上升,以致周围土壤的含水率增加,而当基本密度减小到一定程度时,吸水能力趋于稳定,周围土壤含水率小范围减小。

3.2 沙柳沙障腐烂过程对土壤微生物生物量碳、氮和磷的影响

土壤 MBC 和 MBN 均随铺设年限的增加呈先上升后下降的趋势,且 7 年的沙柳沙障周围的土壤 MBC 和 MBN 均显著大于其他各组 ($P<0.05$),与卢胜旭等^[17]和张艳等^[18]研究结果相似,凋落物的添加可以增加 MBC 和 MBN 的含量。主要是因为随沙障腐烂程度的加剧,进入土壤中的腐化物可作为一种激发底物,激发土壤中原有的有机碳分解,促使可利用性有机碳增加,进而增加土壤微生物生物量^[19]。然而沙柳沙障铺设 7 年以后降解速率减缓,生物间的相互作用和木材基质质量的变化,引起微生物群落在分解过程中发生转变^[20],腐化障体中底物质量的降低影响真菌和细菌的丰度^[21],导致可供正常生长繁殖的微生物数量及种类降低^[14],从而使土壤微生物生物量下降。本研究还发现,沙柳沙障腐烂过程对土壤 MBC 的影响程度较 MBN 和 MBP 更大,由 RDA 分析结果显示,其受到 C : N 的正相关作用,这与胡宗达等^[22]研究结果类似,MBC 和 MBN 与总碳和全氮具有显著相关关系。还有研究^[23]表明,MBC 和 MBN 与土壤有机质和全氮的变化规律一致,土壤养分的丰富程度直接影响微生物的生存条件,决定土壤中微生物生物量的大小。此外,土壤 MBP 含量亦为 7 年达到最大值,随后趋于下降。综上,本研究表明,沙柳沙障腐烂过程中土壤 MBC、MBN 和 MBP 均表现为先增加后减少的规律,与本课题组前期研究^[15]沙柳沙障分解特征结果一致,7 年为沙柳沙障降解过程的重要转折点。

3.3 沙柳沙障腐烂过程对土壤酶活性的影响

土壤酶作为许多生化反应的催化物,能够介导和催化生化反应过程,包括元素循环和有机质合成、分

解及转化等^[24-25]。本研究表明,随着沙柳沙障腐烂程度的增加,土壤碱性磷酸酶活性呈先上升后下降趋势,但脲酶与蔗糖酶的活性整体呈先下降后上升再下降趋势,与前人^[26]的研究结果略有不同。1 年的脲酶与蔗糖酶活性最大,均显著大于其他各组($P < 0.05$),原因可能为 1 年的沙柳沙障分解程度较低,土壤中源于障体的分解物质较少,酶活性的强弱主要受到原有土壤条件的影响,包括土壤 pH、水分、温度、盐碱度、植被类型以及底物可利用性等^[27-28]。土壤 pH 不仅影响微生物的种类及活性,而且直接影响土壤酶参与生化反应的速率,RDA 分析结果显示,土壤 pH 对碱性磷酸酶具有正相关影响,但对蔗糖酶与脲酶活性的负相关作用最大。综合分析表明,速效钾与含水率是影响土壤微生物生物量与酶活性的主要因子,土壤中含水率的大小直接影响氧气的含量,从而间接决定微生物种类和数量对水分的响应,而微生物数量的多少直接决定土壤中微生物量的大小,且其与土壤养分的有效性均影响土壤酶活性^[29-30],此外,有研究^[31]表明,土壤微生物生物量的变化趋势与土壤养分的变化相一致,本研究中土壤速效钾含量对土壤微生物生物量和酶活性的调控作用最大,可能是由于土壤中可利用养分的多少影响微生物代谢繁殖的速度与种类,从而影响微生物生物量与酶活性。不同水分条件对土壤酶活性的激活效应不同^[32],本研究中,土壤含水率对蔗糖酶与脲酶的活性为负相关影响。

4 结 论

沙柳沙障腐烂过程对土壤各项指标均具有显著影响,随铺设年限的增加,土壤 C:P 和 C:N 含量呈上升趋势,但 N:P 含量呈下降趋势,10 年后下降 83.96%;随腐烂程度的加剧,土壤 MBC、MBN 与 MBP 均呈先上升后下降的趋势,7 年为重要的拐点;土壤碱性磷酸酶活性随铺设年限的增加呈先上升后下降趋势,但脲酶与蔗糖酶的活性整体呈先下降后上升再下降趋势;本研究表明,沙柳沙障腐烂过程中土壤速效钾与含水率是影响土壤微生物生物量及酶活性的主要驱动因子。

参考文献:

- [1] Zhang Y L, Chen L J, Chen X H, et al. Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land[J].Catena,2015,133:64-70.
- [2] Adamczyk B, Kilpeläinen P, Kitunen V, et al. Potential activities of enzymes involved in N, C, P and S cycling in boreal forest soil under different tree species[J].Pedobiologia,2014,57(2):97-102.

- [3] Liang Y C, Yang Y F, Yang C G, et al. Soil enzymatic activity and growth of rice and barley as influenced by organic manure in an anthropogenic soil[J].Geoderma, 2003,115(1/2):149-160.
- [4] Miralles I, Domingo F, Cantón Y, et al. Hydrolase enzyme activities in a successional gradient of biological soil crusts in arid and semi-arid zones[J].Soil Biology and Biochemistry,2012,53:124-132.
- [5] Dick R P, Burns R G. A brief history of soil enzymology research[J].Methods of Soil Enzymology,2011,9:1-34.
- [6] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用[M].北京:气象出版社,2006.
- [7] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types[J].Applied Soil Ecology, 2002,21(3):187-195.
- [8] Guan Z Y, Zhao Y, Tong X L. Effect of Polyphenol of leaf litter on the leaf breakdown in a subtropical Stream [J].Ecological Science,2008,27(5):436-438.
- [9] 高永.沙柳沙障[M].北京:科学出版社,2013.
- [10] 荣文文.内蒙古大塔—何家塔铁路风沙路基综合防护体系[J].中国沙漠,2019,39(4):129-138.
- [11] Wang R D, Gao Y, Dang X H, et al. Microstructure and biodegradation of long-established *Salix psammophila* sand barriers on sand dunes[J].Environmental Technology and Innovation,2021,21:e101366.
- [12] Dai Y J, Dong Z, Li H L, et al. Effects of checkerboard barriers on the distribution of aeolian sandy soil particles and soil organic carbon[J].Geomorphology, 2019,338:79-87.
- [13] 张志伟,尹惠妍,周尧治,等.不同设置年限沙障对沙漠土壤理化性质的影响[J].西北林学院学报,2020,35(5):68-77.
- [14] 龚萍.沙柳沙障腐蚀过程及防腐抗蚀效果研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [15] Yang X, Liang Y M, Gao Y, et al. Decay process characteristics and fungal community composition of *Salix psammophila* sand barriers in an arid area, northern China[J].Sustainability,2021,13(14):1-13.
- [16] 王瑞东,党晓宏,高永,等.毛乌素沙地沙柳沙障破损规律与植被恢复的研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2019,39(3):71-77.
- [17] 卢胜旭,许恩兰,吴东梅,等.米楮人工林土壤微生物群落组成对凋落物输入的响应[J].森林与环境学报, 2020,40(1):16-23.
- [18] 张艳,李勋,宋思梦,等.马尾松与乡土阔叶树种凋落叶混合分解过程中微生物生物量特征[J].生态环境学报,2021,30(4):681-690.
- [19] 陆宇明,许恩兰,吴东梅,等.凋落物双倍添加和移除对

米楮林土壤水解酶活性及其化学计量比的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):313-320.

[20] Rajala T, Peltoniemi M, Pennanen T, et al. Fungal community dynamics in relation to substrate quality of decaying Norway spruce (*Piceaabies* [L.] Karst.) logs in boreal forests [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012,81:494-505.

[21] Kaiser C, Franklin O, Dieckmann U, et al. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay[J]. Ecology Letters, 2014, 17:680-690.

[22] 胡宗达,刘世荣,史作民,等.川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J].林业科学研究, 2012,25(3):261-268.

[23] 孔涛,刘紫薇,沈海鸥,等.辽西北沙地苹果一大豆间作对土壤养分和微生物量分布的影响[J].生态学杂志, 2021,40(2):340-351.

[24] Kardol P, Cregger M A, Campany C E, et al. Soil ecosystem functioning under climate change: Plant species and community effects[J]. Ecology, 2010,91(3):767-781.

[25] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Eoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009,462(7274):795.

[26] 郭新送,张娟,巩有才,等.生草不同条件还田对桃园土壤微生物、酶活性及养分供应的影响[J].水土保持学报, 2021,35(4):307-312,320.

[27] Yin R, Deng H, Wang H L, et al. Vegetation type affects soil enzyme activities and microbial functional diversity following revegetation of a severely eroded red soil in sub-tropical China[J]. Catena, 2014,115:96-103.

[28] Razavi B S, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016,97:15-22.

[29] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(3):820-828.

[30] Stark S, Männistö M K, Eskelinen A. Nutrient availability and pH jointly constrain microbial extracellular enzyme activities in nutrient-poor tundra soils[J]. Plant and Soil, 2014,383(1/2):373-385.

[31] 林雅超,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林土壤理化性质与微生物生物量的动态变化[J].生态学杂志, 2020,39(5):1445-1454.

[32] 李旺霞,陈彦云,陈科元,等.不同降雨量对雨养农业区土壤酶活性和土壤微生物的影响[J].南方农业学报, 2015,46(9):1579-1583.

(上接第 304 页)

[22] 方华军,杨学明,张晓平,等.利用¹³⁷Cs 技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J].应用生态学报, 2005,16(3): 464-468.

[23] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报, 2016,36(1): 11-16.

[24] 何超,王磊,郑粉莉,等.垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报, 2018,32(5):24-28.

[25] 王磊.模拟降雨条件下黑土流失的研究[D].长春:吉林农业大学, 2008.

[26] 翟国庆,韩明钊,李永江,等.黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析[J].生态学报, 2020,40(16):304-313.

[27] 姜义亮.黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2019.

[28] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报, 2020,34(3):75-80.

[29] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报, 2016, 47(2):90-97.

[30] 柯奇画,张科利.我国人工降雨侵蚀相关试验的研究进展回顾[J].中国水土保持科学, 2018,16(2):134-143.

[31] 高莹.小麦/玉米间作系统生产力与养分光热资源利用研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015.

[32] 徐丽娜,闫艳,梅沛沛,等.不同玉米品种冠层光分布和湿度比较研究[J].华北农学报, 2020,35(6):106-112.

[33] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].陕西 杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2016.

[34] 陈星任.中国持续极端降水时空变化特征及其未来预估[D].长春:东北师范大学, 2021.