

# 沙柳沙障沙埋段 5 种木腐真菌的生物学特性

段晓婷, 高永, 梁钰镁, 王瑞东, 赵晨, 郭鑫

(内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** [目的] 明确培养条件(碳源、氮源和 pH 值)对木腐真菌生长的影响,为延长沙柳(*Salix psammophila*)沙障使用周期提供理论依据。[方法] 以沙柳沙障沙埋段 5 种木腐真菌:桔绿木霉(*Trichoderma citrinoviride*)、Xs 木霉(*Xylogone sphaerospora*)、哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)、拟康氏木霉(*Trichoderma koningiopsis*)、黑曲霉(*Aspergillus niger*)为研究对象,在固体和液体下进行培养,分别探究不同培养条件下菌丝生长速度和生物量,确定菌株生长的最适条件。[结果] ① 在固体培养条件下,桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和黑曲霉以葡萄糖为碳源时生长最快,其生长速度分别为 12.97, 8.56, 13.25, 5.22 mm/d; 桔绿木霉最佳氮源为硫酸铵 13.06 mm/d, Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉最佳氮源为蛋白胨,其生长速度分别为 9.44, 13.17, 8.78 mm/d; 5 种木腐真菌最适 pH 值在 5~7 之间。② 在液体培养条件下,葡萄糖是桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉、拟康氏木霉和黑曲霉的最佳碳源,每 100 ml 的培养液中生物量分别达到 446.67, 454.67, 728.67, 687.67, 713.00 mg; 桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉最适氮源为蛋白胨,黑曲霉以氯化铵为氮源时生物量最大为 610.00 mg; 5 种木腐真菌在 pH 值 5~7 的范围内生物量较大。[结论] 固体与液体条件下桔绿木霉、Xs 木霉和哈茨木霉最适碳源为葡萄糖,最适氮源为蛋白胨, pH 值为 5~6; 拟康氏木霉液体培养条件下最适碳源为葡萄糖,最适氮源为蛋白胨, pH 值为 5~6; 黑曲霉在液体培养条件下最适碳源为葡萄糖、最适氮源为氯化铵、pH 值为 5~6。

**关键词:** 木腐真菌; 碳源; 氮源; 酸碱度; 沙柳; 沙障

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)01-0093-06

中图分类号: S727.23

**文献参数:** 段晓婷, 高永, 梁钰镁, 等. 沙柳沙障沙埋段 5 种木腐真菌的生物学特性[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 93-98. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.01.013; Duan Xiaoting, Gao Yong, Liang Yumei, et al. Biological characteristics of five wood-rot fungi in sand-buried sections of *Salix psammophila* [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 93-98.

## Biological Characteristics of Five Wood-Rot Fungi in Sand-buried Sections of *Salix Psammophila*

Duan Xiaoting, Gao Yong, Liang Yumei, Wang Ruidong, Zhao Chen, Guo Xin

(College of Desert Control Science and Engineering,

Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

**Abstract:** [Objective] The influence of culture conditions (carbon source, nitrogen source, and pH value) on the growth of wood-rot fungi was analyzed in order to provide a theoretical basis for prolonging the service period of *Salix psammophila* sand barriers. [Methods] *Trichoderma citrinoviride*, *Xylogone sphaerospora*, *Trichoderma harzianum*, *Trichoderma koningiopsis*, and *Aspergillus niger* in sand-buried sections of *S. psammophila* were the five fungi species used as research objects. The growth rate and biomass of mycelium under different culture conditions (solid and liquid) were investigated to determine the optimal growth conditions for each fungi species. [Results] ① Under solid culture conditions, *T. citrinoviride*, *X. sphaerospora*, *T. harzianum*, and *A. niger* grew fastest when glucose was used as the carbon source, and their growth rates were 12.97, 8.56, 13.25, and 5.22 mm/d, respectively; The best nitrogen source for *T. citrinoviride* was ammonium sulfate, and the growth rate was 13.06 mm/d. The best nitrogen source for

收稿日期: 2021-09-08

修回日期: 2021-10-19

资助项目: 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: 段晓婷(1997—), 女(汉族), 北京市人, 硕士研究生, 研究方向为荒漠化防治。Email: 1246365644@qq.com。

通信作者: 高永(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 教授, 博士生导师, 主要从事荒漠化防治研究。Email: 13948815709@163.com。

*X. sphaerospora*, *T. harzianum*, and *T. koningiopsis* was peptone, and their growth rates were 9.44, 13.17, and 8.78 mm/d, respectively; The optimum pH value for the five species of wood-rot fungi was between 5 and 7. ② Under liquid culture conditions, glucose was the best carbon source for the five species of wood-rot fungi, and the biomass values per 100 ml of culture medium reached 446.67, 454.67, 728.67, 687.67, and 713.00 mg, respectively. The most suitable nitrogen source for *T. citrinoviride*, *X. sphaerospora*, *T. harzianum*, and *T. koningiopsis* was peptone. The biomass of *A. niger* was 610.00 mg when ammonium chloride was used as the nitrogen source. The biomass of the five species of wood-rot fungi was large in the pH value range from 5 to 7. [Conclusion] Under solid and liquid conditions, the most suitable carbon source for *T. citrinoviride*, *X. sphaerospora*, and *T. harzianum* is glucose, the most suitable nitrogen source is peptone, and the pH value is between 5 and 6. Under the liquid culture condition, the most suitable carbon source for *T. koningiopsis* is glucose, the most suitable nitrogen source is peptone, and the pH value is between 5 and 6. Under the liquid culture condition, the most suitable carbon source for *A. niger* is glucose, the most suitable nitrogen source is ammonium chloride, and the pH value is between 5 and 6.

**Keywords:** wood-rotting fungi; carbon source; nitrogen source; pH value; *Salix psammophila*; sand barrier

沙柳(*Salix psammophila*)沙障是中国西北地区防沙治沙的主要工程措施之一<sup>[1-2]</sup>,能够在一定程度上改善土壤养分状况<sup>[3-4]</sup>,有利于增加沙丘表层细颗粒的含量明显降低地表粗化<sup>[5]</sup>,通过改变近地表风沙流结构<sup>[1]</sup>,有效控制土地沙化,且固沙成本较低<sup>[6]</sup>,所以被广泛用于荒漠化地区。然而,障体的使用效益具有一定周期,这主要是环境因子与微生物的综合作用<sup>[7]</sup>,沙柳沙障沙埋段腐化障体的主要腐解微生物为木腐真菌<sup>[8]</sup>,木腐真菌以菌丝体或孢子形式在沙柳沙障障体表面以及内部生长<sup>[9]</sup>,使障体细胞壁受到破坏,导致障体理化性质和物质组成发生变化,障体变得松软易碎,呈现出筛孔状或粉末状等形态<sup>[10]</sup>,最终导致沙柳沙障因破损发生倒伏。

木腐真菌是造成障体沙埋部腐烂的主要微生物<sup>[11]</sup>,其生长在各种形态的木材基质上<sup>[12]</sup>,木腐真菌通过分泌过氧化物酶和漆酶降解障体中的木质素和纤维素<sup>[13-14]</sup>使障体内部出现一系列细胞塌陷、空腔等腐化现象,且木腐真菌菌丝对木材 C、N 等营养元素具有重要的吸收和转移作用,促使障体物质组成发生变化<sup>[15]</sup>,从而失去其本身的价值。目前,关于沙柳沙障腐化规律、破损规律、作用机制、沙柳沙障对土壤的改良作用及其固沙效益等方面已得到一定的研究<sup>[1-6]</sup>,微生物作为沙柳沙障腐朽的主要原因,前人研究了不同垂直位置微生物数量的分布特征,及其与障体腐蚀之间的联系,以及致腐因子和防腐性能等方面<sup>[7-9]</sup>,相对于沙柳沙障腐朽过程中不同木腐真菌的生物学特性研究尚显不足。

基于此,本研究以分离自内蒙古自治区鄂尔多斯市独贵塔拉镇境内库布齐沙漠稳定沙埋段障体木腐真菌为研究对象,探究不同培养条件(碳源、氮源和酸碱度)对障体沙埋段木腐真菌生长的影响,以筛选其适宜

的生长条件,初步了解障体沙埋段木腐真菌的生物学特性,以期延长沙柳沙障使用周期提供理论依据。

## 1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市独贵塔拉镇境内库布齐沙漠,地处鄂尔多斯高原脊线的北部(39°22'33"—40°52'14"N,106°55'16"—109°16'02"E)。研究区属于温带大陆性季风气候,年均降水量 227 mm,年均蒸发量 2 400 mm,地貌类型主要为流动沙丘、半流动沙丘和固定沙丘。土壤质地主要为壤土,以粉砂质壤土和砂质壤土为主,植被类型主要包括沙柳(*Salix psammophila*)、甘草(*Glycyrrhiza uralensis*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、杨柴(*Hedysarum mongolicum*)和猪毛菜(*Salsola collina*)等<sup>[16]</sup>。

## 2 研究方法

(1) 菌种制备。障体取自 2019 年 11 月 3 日,选取沿 S24 穿沙公路两侧已铺设 5 a 的沙柳沙障 1 m×1 m 规格样地,样品采集方法参照“树木病原真菌”的分离方式<sup>[17]</sup>来进行特定部位取样,使用经高温灭菌的枝剪剪取稳定沙埋段障体受真菌侵染的部位,无菌密封袋封装标记,低温保存运回实验室,于超净工作台上进行两种操作,一部分直接挑取障体表面菌丝进行分离培养,剩余部分用镊子夹取障体破损较严重部位碎木屑进行分离培养,在 25 °C 恒温箱中培养。待平板上长出不同形态和不同颜色的菌落后,分别反复挑取直至获得纯菌株。接种于斜面培养基,存放于 4 °C 备用。本试验使用的 5 种木腐真菌均为前期分离纯化保存于沙地植物抗逆生理实验室的菌种。将菌种接种于 90 mm 的 PDA 平板培养基上,25 °C 培

养 3~5 d,然后用已灭菌的打孔器(直径 5 mm)在菌落边缘打取菌饼,用于固体和液体培养接种。

## (2) 培养基。

①PDA 培养基:马铃薯(去皮)100 g,葡萄糖 10 g,琼脂 10 g,蒸馏水 500 ml,蛋白胨 2.5 g,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  1.5 g,  $\text{MgSO}_4$  0.75 g,  $\text{VB}_1$  0.005 g,氯霉素 0.05 g。

②碳源基础培养基:以 PDA 培养基为基础,将葡萄糖用等量甘露醇、羧甲基纤维素钠、淀粉和麦芽糖代替。

③氮源基础培养基:以 PDA 培养基为基础,蛋白胨用等量尿素、氯化铵、硫酸铵和草酸铵代替。

④pH 值基础培养基:以 PDA 培养基为基础,使用 NaOH 和 HCl 溶液调节培养基酸碱度。

(3) 不同碳源、氮源和酸碱度试验。①固体培养:用等量甘露醇、羧甲基纤维素钠、淀粉和麦芽糖代替不同碳源培养基中的葡萄糖;用等量尿素、氯化铵、硫酸铵和草酸铵代替不同氮源培养基中的蛋白胨;使用 NaOH 与 HCl 溶液调节培养基的 pH 值。将 5 种真菌分别接种于不同碳源、氮源和酸碱度培养基的中心位置,25 °C 恒温培养 7 d,以接种块为中心每 24 h 测量菌落直径(mm),设 3 个重复,每个重复随机测量 3 次,取平均值。计算菌丝日均长速<sup>[18]</sup>:

$$\text{菌丝日均长速}(\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}) = \frac{\text{菌落直径} - 5 \text{ mm}}{2 \times \text{培养天数}}$$

②液体培养:去除 PDA 培养基中的琼脂进行液体培养。于 250 ml 的锥形瓶中装入等量 100 ml 液体

PDA 培养基,每瓶接种 1 个菌饼,25 °C,120 r/min 摇床培养 7 d,过滤收集菌丝并用蒸馏水冲洗 3 次,放于锡纸上,80 °C 烘干至恒质量后称量菌丝干质量(生物量),每种处理 3 个重复<sup>[19-20]</sup>。

(4) 数据处理。采用 Excel 2010 对试验数据进行整理,使用 SPSS 20.0(one-way ANOVA)分析对不同碳源、氮源和酸碱度下木腐真菌的平均生长速率以及生物量进行方差分析,并利用 Duncan 法进行差异显著性检验;使用 Origin 2021 软件绘图。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同碳源对 5 种障体木腐真菌生长的影响

由图 1 可知,5 种碳源下木腐真菌均可以生长。固体培养条件下,葡萄糖为桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和黑曲霉的最佳碳源,它们的生长速度分别为 12.97 mm/d,8.56 mm/d,13.25 mm/d 和 5.22 mm/d。桔绿木霉、Xs 木霉和哈茨木霉以葡萄糖为碳源较羧甲基纤维素钠显著提高了 52.6%,2.3 倍和 36.3%( $p < 0.05$ );黑曲霉则在 5 种碳源下的排序为:葡萄糖 > 甘露醇 > 麦芽糖 > 羧甲基纤维素钠 > 淀粉。

液体培养条件下,同样桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉、拟康氏木霉和黑曲霉以葡萄糖为碳源时生物量最大,其生物量分别为 446.67,454.67,728.67,687.67,713.00 mg/100 ml。综上所述葡萄糖是 5 种碳源中最适合木腐真菌生长的碳源。

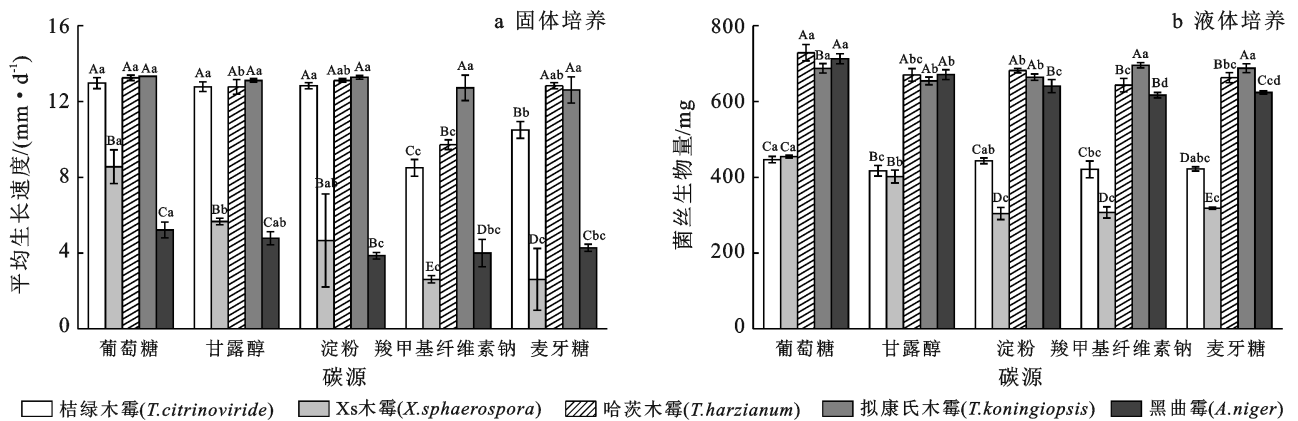


图 1 不同碳源对 5 种木腐真菌生长的影响

### 3.2 不同氮源对 5 种障体木腐真菌生长的影响

由图 2 可知,固体培养条件下,Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉最佳氮源均为蛋白胨,桔绿木霉最佳氮源为硫酸铵。其平均生长速度表现为:哈茨木霉 > Xs 木霉 > 拟康氏木霉;桔绿木霉则在以硫酸铵为氮

源的培养基中平均生长速度最快 13.06 mm/d。桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉以蛋白胨为氮源较以草酸铵为氮源平均生长速度显著提高 61.0%,3.7 倍、2.7 倍和 7.8 倍( $p < 0.05$ )。液体培养条件下,桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉以蛋白胨为

注:不同大写字母表示同一碳源下不同木腐真菌间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示不同碳源下木腐真菌间差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

氮源时生物量最大,氯化铵为氮源时黑曲霉生物量较大。以蛋白胨的为氮源时生物量分别为 473.33,

453.00,558.33,526.33 mg/100 ml,黑曲霉生物量为 610.00 mg/100 ml,且较其他氮源差异显著( $p < 0.05$ )。

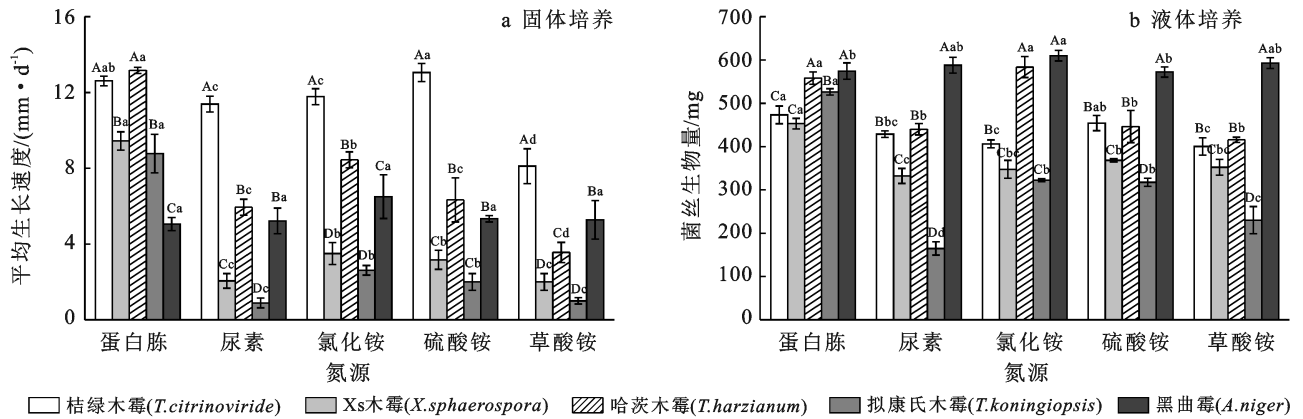


图 2 不同氮源对 5 种木腐真菌生长的影响

### 3.3 不同 pH 值对 5 种障体木腐真菌生长的影响

由图 3 可知,不同 pH 值使真菌的生长以及生物量产生差异。固体培养条件下,初始 pH=5 为 Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉最适酸碱度,初始 pH=6 的培养基中黑曲霉生长速度较快,桔绿木霉在初始 pH=5 和 pH=6 的培养基中生长速度无显著差异( $p < 0.05$ )。其中 Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉分别较 pH=9 平均生长速度显著提高 4.1 倍、78.0% 和 56.9%;桔绿木霉在初始 pH=5 和 pH=6 的培养基中生长速度为 5.22,6.33 mm/d,黑曲霉在初始

pH=6 的培养基中平均生长速度为 6.33 mm/d。综上所述,5 种木腐真菌适合在弱酸性条件下生长。

液体培养条件下,初始 pH=7 时桔绿木霉生物量较大,Xs 木霉和拟康氏木霉最适酸碱度为初始 pH=5,哈茨木霉和黑曲霉在初始 pH=6 时生物量较大。其中,桔绿木霉在初始 pH=7 时生物量为 673.00 mg/100 ml,Xs 木霉和拟康氏木霉较初始 pH=9 显著提高 42.6% 和 22.7% ( $p < 0.05$ ),哈茨木霉在初始 pH=6 时的生物量为 591.00 mg/100 ml,黑曲霉则是较初始 pH=9 显著提高 14.3% ( $p < 0.05$ )。

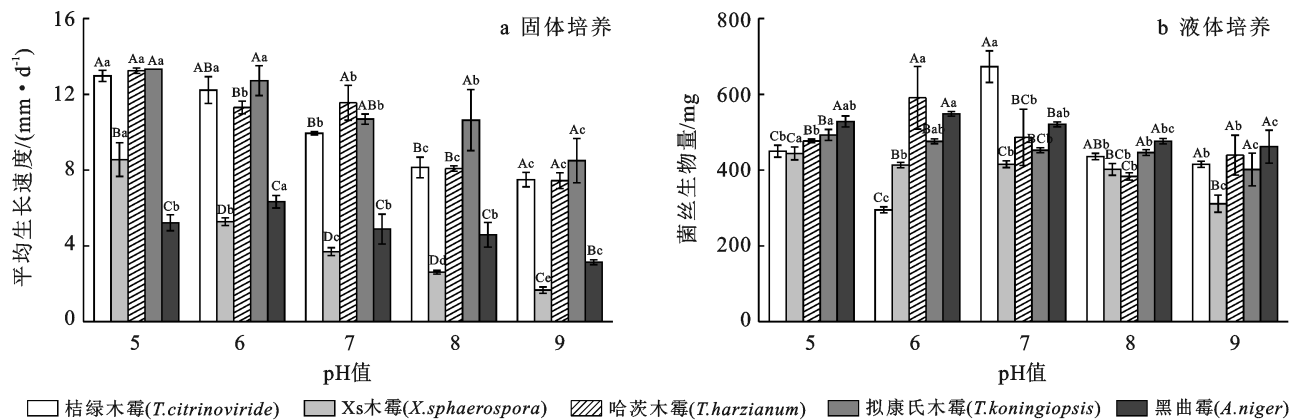


图 3 不同酸碱度对 5 种木腐真菌生长的影响

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

充足的碳源、氮源和适宜的 pH 值是微生物生长繁殖所需的必要条件。碳源为微生物的生长代谢主要提供所需碳元素<sup>[21]</sup>,提供细胞生命活动所需的能量,其次氮源是作为构成生物体的蛋白质、核酸及其他氮素化合物的材料。pH 值改变则会引起细胞膜电

荷的变化,从而影响了微生物对营养物质的吸收,同时会影响酶的活性。明确障体木腐真菌生物学特性可对障体的腐朽机制及腐朽成因等方面的研究提供理论依据,从而延长障体使用寿命。

由于不同样本的木腐真菌群落对碳源利用的模式也存在一定差异<sup>[22]</sup>,本文研究的 5 种木腐真菌除拟康氏木霉以外,剩余 4 种木腐真菌最适碳源均为葡萄糖,这与 Zeng 等<sup>[23]</sup>对 *Phellinus baumii* 的研究结



果一致,可能是因为葡萄糖为单糖,真菌可以直接吸收与利用,但在 Le 等<sup>[24]</sup>对 *P. nebrodensis* 的研究得出最适碳源为麦芽糖,这与本文结果不一致,可能是二者所选的真菌类型不同,Le 所选的真菌为百灵菇属于担子菌纲,主要引起白色腐朽,而本研究中哈茨木霉和黑曲霉属丝孢纲,因此其利用碳源的方式不同,将培养基内营养物质分解为自身需要简单碳水化合物的方式存在差异。

5 种木腐真菌在不同的氮源培养基下均能够生长,但对不同氮源的利用程度存在一定差异。除桔绿木霉最适氮源为硫酸铵和黑曲霉无最适氮源外,剩余 3 种木腐真菌最适氮源均是蛋白胨。该研究结果与顾琼楠等<sup>[25]</sup>对牛筋草炭疽菌的研究相悖。其研究发现,牛筋草炭疽菌最适氮源为酵母粉。可能是不同真菌群落所分泌酶的种类不同,代谢培养基内的营养物质的酶活性有所差异,其次代谢方式存在一定差异。本文中哈茨木霉、Xs 木霉和拟康氏木霉在以蛋白胨为氮源的培养基中生长速度均达 13.17, 9.44, 8.78 mm/d,这与 Ha 等<sup>[26]</sup>对 *P. japonica* 研究结果一致,原因是有机氮是一种植物、土壤和肥料相结合的含氮物质,所以有机氮较无机氮更有利于真菌的产生和积累一些代谢产物<sup>[27]</sup>,营养更加丰富,成分复杂。有机氮源除含有丰富的蛋白质、肽类、游离的氨基酸以外,还含有少量的糖类、脂肪和生长因子有利于木腐真菌的生长繁殖。同时,尿素作为氮源时,除黑曲霉平均生长速度较快以外,剩余 4 种木腐真菌平均生长速度均较缓慢,原因可能是尿素会使培养基 pH 值增大,影响菌株对培养基中营养物质的吸收速度<sup>[28]</sup>。

pH 值是影响真菌生理和生长的主要因素之一,真菌通常仅限于在接近中性的狭窄 pH 值范围内生长,许美玲等<sup>[29]</sup>研究发现外生菌根真菌在弱酸性条件下生长最好。在本文研究的 5 种木腐真菌中,固体培养条件下,桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉最适 pH 值为 6,桔绿木霉和黑曲霉最适 pH 值为 5。液体培养条件下,5 种真菌大部分最适酸碱度集中在 pH=6,同样是在弱酸性的条件下生长最好,与周慧杰<sup>[30]</sup>对外生菌根真菌的研究结果一致。同时,在龚萍<sup>[31]</sup>对沙柳沙障的研究中得出偏酸性的土壤能够促进沙柳沙障的腐蚀,证明了木腐真菌更适合在弱酸性条件下生长,原因是木腐真菌在碱性条件下会影响真菌细胞膜和离子的解离度,从而干扰木腐真菌对培养基中营养物质的吸收<sup>[32]</sup>,导致木腐真菌不能正常进行产物的积累以及代谢。

障体的分解主要是由于真菌的孢子和细胞的生

长繁殖而引起的。木腐真菌需要在足够的条件下才可以生长,主要有营养、温度、水分和酸碱度等。孙芳利等<sup>[33]</sup>研究得出化学防腐可以封闭菌类,使菌类缺乏营养,以达到抑制其生长和繁殖的目的。本文通过对 5 种木腐真菌的研究得出其最适条件,因此可根据木腐真菌最适营养条件选择合适的化学药剂。如秦理哲等<sup>[34]</sup>研究发现 ACQ 防腐处理会引起马尾松木材酸碱性质、化学元素组成和官能团强度的变化,从而改变木腐真菌最适生长环境。范慧青<sup>[35]</sup>通过炭化处理降低木材酸碱度和减少木材碳源氮源的供给使真菌的生命活动受到限制。本文 5 种木腐真菌适合弱酸性条件,因此对于因腐朽进行定期更换的沙柳沙障来说,同样可以通过不同浓度的 ACQ 改变木腐真菌最适条件或对障体进行一定的处理改变障体为微生物提供的生存环境,以延长沙柳沙障使用寿命。

## 4.2 结论

桔绿木霉、Xs 木霉、哈茨木霉和黑曲霉的最适碳源为葡萄糖,羧甲基纤维素钠不适合作为 5 种木腐真菌的碳源;Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉 3 种木腐真菌最佳氮源为蛋白胨,草酸铵不适合作为 Xs 木霉、哈茨木霉和拟康氏木霉的氮源;5 种木腐真菌均适合在弱酸性条件下生长,pH=9 时 5 种木腐真菌平均生长速度变缓,特别是哈茨木霉不适合在 pH=9 的条件下生长。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 高永,邱国玉,丁国栋,等.沙柳沙障的防风固沙效益研究[J].中国沙漠,2004,24(3):365-370.
- [2] 任余艳,胡春元,贺晓,等.毛乌素沙地巴图塔沙柳沙障对植被恢复作用的研究[J].水土保持研究,2007,14(2):13-15.
- [3] 王瑞东,党晓宏,高永,等.毛乌素沙地沙柳沙障破坏规律与植被恢复的研究[J].西南林业大学学报,2019,39(3):71-77.
- [4] 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.
- [5] 高菲,高永,高强,等.沙柳沙障对土壤理化性质的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2006,27(2):39-42.
- [6] 蒙仲举,任晓萌,高永.半隐蔽式沙柳沙障的防风阻沙效益[J].水土保持通报,2014,34(3):178-180.
- [7] 龚萍,高永,迟悦春.沙柳沙障腐蚀过程中微生物的作用[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2011,32(3):138-142.
- [8] Carlsson F, Edman M, Jonsson B G. Increased CO<sub>2</sub> evolution caused by heat treatment in wood-decaying fungi [J]. Mycological Progress, 2017,16(5):513-519.
- [9] 郝蓉蓉,郭海东,杨成德,等.西藏设施辣椒根腐病原的分离及鉴定[J].西北农业学报,2015,24(12):139-143.

- [10] 于海燕,路振远.腐朽木材的种类及其对材质的影响[J].黑龙江科技信息,2013(17):272.
- [11] Sánchez-Corzo L D, Álvarez-Gutiérrez P E, Meza-Gordillo R, et al. Lignocellulolytic enzyme production from wood rot fungi collected in Chiapas, Mexico, and their growth on lignocellulosic material [J]. *Journal of Fungi*, 2021,7(6): 450.
- [12] 李俊凝,李秋实,魏玉莲.丽江老君山国家公园木腐真菌区系组成与分布特征[J].应用生态学报,2020,31(1): 259-265.
- [13] 董秀芹,袁红莉,高同国.木质素降解酶及相关基因研究进展[J].生物技术通报,2014(11):62-72.
- [14] 魏玉莲.森林生态系统中木腐真菌群落形成机理及生态功能[J].生态学杂志,2021,40(2):534-543.
- [15] 李俊凝,李通,魏玉莲.丰林国家级自然保护区木腐真菌多样性与寄主倒木的关系[J].生物多样性,2019,27(8):880-886.
- [16] 刘江,袁勤,张立欣,等.库布齐沙漠北缘不同人工灌木林地土壤肥力质量状况[J].西北林学院学报,2021,36(2):46-53.
- [17] 单金雪,李增平,张宇,等.构树干基腐朽病病原菌鉴定及其生物学特性研究[J].热带作物学报,2021,42(10): 2952-2957.
- [18] 谢放,张生香,陈京津,等.恒温和变温培养对羊肚菌菌丝生长及菌核形成影响的比较研究[J].中国野生植物资源,2010,29(3):37-40,61.
- [19] 宿红艳,王磊,高兴喜,等.白灵菇不同菌株生物学特性的研究[J].食品科学,2008,29(7): 256-259.
- [20] 冉永红,马琳静,谢淑琴,等.羊肚菌母种培养基比较试验[J].食用菌,2021,43(2):34-36,39.
- [21] 贺云龙,齐玉春,彭琴,等.外源碳输入对陆地生态系统碳循环关键过程的影响及其微生物学驱动机制[J].生态学报,2017,37(2):358-366.
- [22] 安丽芸.微生物多样性及外加碳源对土壤碳矿化的影响[D].山西太原:山西大学,2018.
- [23] Zeng Niankai, Wang Qiuying, Su Mingsheng. Submerged culture conditions for production of mycelial biomass and exopolysaccharides by *Phellinus baumii* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2008,33(15):1798.
- [24] Le Jia, Hu Shunzhen, Xu Mei. Optimisation of submerged culture conditions for the production of mycelial biomass and exopolysaccharide by *Pleurotus nebrodensis* [J]. *Annals of Microbiology*, 2007,57(3):389-393.
- [25] 顾琼楠,欧翔,褚世海,等.牛筋草生防菌 NJC-16 的分离鉴定及生物学特性研究[J].中国生物防治学报,2021,37(4):817-825.
- [26] Ha Siyoung, Lee Donghwan, Yang Jaekyung, et al. Optimization of medium components and incubation time for the production of *Paecilomyces tenuipes* mycelia in submerged culture [J]. *Journal of Mushroom*, 2021,19(1):1-8.
- [27] Adour L, Couriol C, Amrane A. Organic or mineral nitrogen source during *Penicillium camembertii* growth on a glucose limited medium [J]. *Enzyme and microbial technology*, 2006,38(1/2):55-59.
- [28] 陈龙,吴兴利,于维,等. *Bacillus velezensis* 157 混合固态发酵生产多种木质纤维素酶的发酵条件优化[J].中国农业大学学报,2019,24(9):71-78.
- [29] 许美玲,朱教君,许爱华,等.不同培养基、pH 值、水势和温度对 2 种外生菌根真菌生长的影响[J].辽宁林业科技,2007(5):20-22.
- [30] 周慧杰.培养液 pH 对外生菌根真菌生长影响分析[J].中国食用菌,2019,38(8):42-44.
- [31] 龚萍.沙柳沙障腐蚀过程及防腐抗蚀效果研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2012.
- [32] 屈明华,俞元春,李生,等.丛枝菌根真菌对矿质养分活化作用研究进展[J].浙江农林大学学报,2019,36(2): 394-405.
- [33] 孙芳利,Prosper N K,吴华平,等.木竹材防腐技术研究概述[J].林业工程学报,2017,2(5):1-8.
- [34] 秦理哲,胡拉,杨章旗,等.季铵铜防腐剂对马尾松木材化学性质的影响[J].森林与环境学报,2019,39(6): 667-672.
- [35] 范慧青.木材炭化防腐处理对微生物生存条件的影响研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2014.