

栓皮栎林下主要丝状真菌的分解能力

宋福强, 田兴军*, 郝杰杰, 陈 彬

(南京大学生命科学学院, 南京 210093)

摘要:利用纯培养试验方法,研究了栓皮栎林下凋落物中可培养的 10 种主要丝状真菌对群落建群种栓皮栎(*Quercus variabilis*)和林下主要伴生树种山胡椒(*Lindera glauca*)叶片的分解能力。结果表明:在 10 种真菌的作用下,9 周时间内,栓皮栎叶片的平均失重率是山胡椒叶片的 2 倍;两种叶片前期(前 5 周)失重率均显著高于后期(后 4 周)。分析结果显示叶片失重率与叶片初始木质素/氮素、碳素/氮素的比值成反比。根据每个菌株对每种叶片在前期和后期的重量失重率(W)、木质素失重率/ W 和木质素失重率/全碳化合物失重率的值的相互关系,分解菌可以分为如下类型:*Trichoderma* sp. 1 和 *Cladosporium berbarum* 是对全碳化合物有一定利用能力的分解菌;*Trichoderma* sp. 2、*Aspergillus fumigatus*、*Alternaria* sp.、*Penicillium* sp. 2 对木质素、全碳化合物都有分解能力但偏向全碳化合物的分解,是分解能力相对较强的真菌;*Chaetomium bostrychodes*、*Pestalotia* sp. 对木质素、全碳化合物都有分解能力并偏向木质素的分解,但分解能力较弱;*Aspergillus niger*、*Penicillium* sp. 1 只在试验分解前期内对木质素、全碳化合物都有一定的分解能力。不同真菌对叶片的分解能力不同,即使是同属真菌之间也有显著的差异。

关键词:真菌;落叶;分解能力;木质素;全碳化合物

Decomposing ability of filamentous fungi on leaf litter in *Quercus variabilis* forest

SONG Fu-Qiang, TIAN Xing-Jun*, HAO Jie-Jie, CHEN Bin (School of Life Science, Nanjing University, Nanjing, 210093, China.). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(1): 89~95.

Abstract: Decomposition of litter is a very important process for nutrient recycles in forest ecosystem. Of decomposers, fungi play a critical role in the decomposition process. In the organic layers of the soil many fungi have such roles. We are still unclear which fungus is most important. The aim of this work is to determine the decomposition ability of fungi on the decomposition process of litter in the forest of Zijin Mountain with pure incubation method. The fungi used in this work were ten main decomposing fungi, *Trichoderma* sp. 1, *Trichoderma* sp. 2, *Chaetomium bostrychodes*, *Pestalotia* sp., *Aspergillus niger*, *Aspergillus fumigatus*, *Alternaria* sp., *Penicillium* sp. 1, *Penicillium* sp. 2 and *Cladosporium berbarum*, isolated from the organic layers of the *Quercus variabilis* forest which dominated by *Quercus variabilis* and accompanied by *Lindera glauca*. Two litters of *Quercus variabilis* and *Lindera glauca* were chosen as substrate materials. The substrate leaves were cut into 2.0cm diameter circle blades. Twelve of each kind of the dried sterilized blades (60°C) stained with the fungi solution were placed on the agar medium (2%, 20ml) incubated under 20°C and 80% moisture condition. The lignin and carbohydrate contents were determined by King and Heath's method. Carbon was analyzed by $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$ oxidation method. The total nitrogen was determined by Kjeldahl method. Samples were harvested from 5th week and 9th week. Triplicate was prepared for each treatment. The results indicated that during the whole period of nine weeks, the decomposition rate of *Quercus variabilis* driven by the ten fungi was, in general, two times to that of *Lindera glauca*. The weight loss of both leaves in earlier five weeks was

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30470299); 国家 863 资助项目(2003AA209030); 教育部博士点基金资助项目(20030284044)

收稿日期:2004-09-03; **修订日期:**2004-11-15

作者简介:宋福强(1969~),男,黑龙江省齐齐哈尔市人,博士,主要从事森林微生物学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: tianxj@nju.edu.cn

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(No. 30470299); High Technology Project (863) of China (No. 2003AA209030); Scientific Research Foundation for doctoral supervising laboratory, State Education Ministry (No. 20030284044)

Received date: 2004-09-03; **Accepted date:** 2004-11-15

Biography: SONG Fu-Qiang, Ph. D., mainly engaged in forest microbiology.

significantly higher than in later four weeks. The decomposition rate was negatively related to the original Lignin/N (L/N) and C/N ratio. According to the weight loss of litters and the changes of Lignin/W (L/W) and Lignin/C (L/C) ratio of litters during the decomposition period, the fungi could be classified into four groups: (1) the *Trichoderma* sp. 1 and *Cladosporium berbarum* were carbohydrate decomposing fungi; (2) *Trichoderma* sp. 2, *Aspergillus fumigatus*, *Alternaria* sp. and *Penicillium* sp. 2 were lignin and carbohydrate decomposing fungi, but more preferred for carbohydrate; (3) The *Chaetomium bostrychodes* and *Pestalotia* sp. were lignin and carbohydrate decomposing fungi with lower decomposition ability but favorite for lignin; (4) The *Aspergillus niger* and *Penicillium* sp. 1 have decomposition ability only in the early five weeks. The decomposing ability of different fungi varied for a detritus. Even within a same genus, the fungi also demonstrated significant differences in decomposing abilities.

Key words: fungus; litter; decomposition ability; lignin; carbohydrate

文章编号:1000-0933(2005)01-0089-07 中图分类号:Q938.1+3,S718.8 文献标识码:A

凋落物的分解是森林生态系统生物地球化学循环的一个重要组成部分,其分解速率对生态系统生产力有重要影响。凋落物的分解速率还是森林地表层生物量和养分含量的主要决定因素,并显著影响土壤的理化性质^[1]。真菌在森林生态系统有机凋落物的分解过程中扮演着重要的角色^[2~4],落叶的分解过程是由真菌利用有机物能力决定的^[5]。在森林土壤有机物层中参与分解的真菌有很多,但各种菌的作用怎样,其分解能力如何?现在还很少报道^[6]。一些研究只对森林凋落物分解菌的组成和结构进行了报道,往往把真菌出现频率作为重要的指标,而真菌出现的频率并不能完全代表分解菌的分解能力^[6]。因此,利用室内纯培养方法,来检验真菌对凋落物的分解能力是一种有效的方法^[7]。

凋落物的性质和成分决定着那些依赖于凋落物生存的腐生真菌在时间和空间上的分布格局^[8]。植物组织中的有机化学成分如单糖、胶质、纤维素、半纤维素、木质素、角质和酚类物质等是真菌可利用的能源^[3],这些物质对真菌的分解作用都会产生一定的影响。研究表明木材中的木质素和纤维素是影响真菌分解能力的主要因子^[9],然而相对于真菌对木材的分解研究而言,有关真菌对落叶分解能力的研究报道很少^[6]。

紫金山位于北纬 32°5',东经 118°48',属于北亚热带气候,土壤为黄棕壤,土壤层较薄且多为石砾,土壤养分相对贫瘠。栓皮栎林是紫金山主要的森林类型,建群种为栓皮栎(*Quercus variabilis*),林内伴生山胡椒(*Lindera glauca*)等灌木树种。在这种比较贫瘠的土壤环境条件下,凋落物分解释放的养分对树木的生长起着重要的作用,因为在一般条件下植物凋落物分解过程中每年释放的营养元素能够满足 69%~87% 的森林生长所需^[10]。通过前期研究发现紫金山主要林型有机凋落层丝状真菌多样性极为丰富^[11],而这些真菌对落叶的分解利用能力还是未知数。本实验在前期研究的基础上选出在栓皮栎林型凋落层内出现频率高的 10 种优势菌株,通过纯培养分解试验,比较不同菌种(株)对栓皮栎林型内建群树种栓皮栎和林下主要伴生树种山胡椒落叶的分解能力差异,旨在揭示分解真菌在森林生态系统物质循环中的作用。

1 材料与方法

1.1 材料准备

1.1.1 供试菌种 根据前期的研究结果^[11],在紫金山栓皮栎林型有机凋落层可培养丝状真菌中筛选出现频率较高的 10 种优势菌株:*Trichoderma* sp. 1 (TS1)、*Trichoderma* sp. 2 (TS2)、*Chaetomium bostrychodes* (ChB)、*Pestalotia* sp. (PS)、*Aspergillus niger* (AN)、*Aspergillus fumigatus* (AF)、*Alternaria* sp. (AS)、*Penicillium* sp. 1 (PS1)、*Penicillium* sp. 2 (PS2)、*Cladosporium berbarum* (CB),在 PDA 平板上扩繁培养,做为本项研究的实验菌种。

1.1.2 实验材料 本实验选取了紫金山的主要建群树种栓皮栎(*Quercus variabilis*)和伴生树种山胡椒(*Lindera glauca*)叶片为实验材料。凋落物于 2002 年 11 月在栓皮栎林下收集,同时测定了这两种叶片的初始化学成分(表 1)。

表 1 栓皮栎和山胡椒叶片初始化学成分

Table 1 The original chemical composition of the leaf litters

树种 Plant species	木质素 Content of lignin (%)	碳素含量 Content of carbon (%)	氮素含量 Content of nitrogen (%)	可溶性糖 Soluble carbohydrate (%)	木质素/氮素 Lignin/ nitrogen	碳素/氮素 Carbon/ nitrogen
栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>	28.50±1.22	48.64±0.78	0.926±0.15	2.62±0.52	30.78	52.52
山胡椒 <i>Lindera glauca</i>	32.76±2.02	43.08±1.35	0.578±0.11	1.54±0.26	56.68	74.53

* 表中的数值为平均值±标准误 The data in the table indicates means±SE (n=3)

1.2 方法

1.2.1 分解试验 把两种叶片清洗干净后,用直径 2.0cm 的打孔器把栓皮栎、山胡椒的叶片打成圆形小片(打孔部位尽可能一致,使样品在质量、体积上相差不大),放入 60℃ 的恒温箱中干燥(36h)至恒重。取圆形小片称重,并标记。然后放入灭菌锅中 121℃ 灭菌 30min。在预先长满供试菌种的平板上倒入 15ml 无菌水,制成菌悬液(5 层灭菌纱布滤去菌丝)。把灭菌的叶片沾上菌悬液后,按次序放到装有 20ml 2% 琼脂的平板培养基上。每一个菌种设 3 个重复,每一个平板放圆形小叶片 12 片。放入温度 20℃、湿度 80%~90% 恒温、恒湿箱中黑暗培养。培养到第 5 周(第 35 天)和第 9 周(第 49 天)时分别取样品,用小毛笔蘸无菌水轻轻擦洗掉上面的菌丝、孢子,然后在 60℃ 恒温干燥箱中烘干(36h)至恒重,再测定每片叶子的重量,计算失重率。

1.2.2 凋落物物质成分分析 木质素和全碳化合物测定采用 King 和 Heath 方法^[12]:称取样品 0.15g 左右,研碎,在常温下用酒精-苯提取,残留物用 72% 硫酸处理 2h,不断搅拌,然后用蒸馏水把硫酸溶液稀释至 2.5%,120℃ 灭菌 1h,冷却后通过砂芯漏斗过滤,105℃ 下干燥、称重,得到的重量为木质素量。滤液用作全部碳水化合物的测定,测定滤液体积后,取 2ml 放入试管中,再加入 5% 苯酚 1ml 和 98% 浓硫酸 2ml,冷却后在 490nm 下测定其光密度,以 D-葡萄糖溶液做标准对照,得到样品的全碳化合物含量。

凋落物初始碳素浓度用重铬酸钾-硫酸氧化湿烧法测定;全 N 测定采用浓硫酸消煮后凯氏定氮法;可溶性糖参考宁正祥方法^[13]。本实验在南京大学生命科学学院植物学实验室完成。

1.2.3 数据分析

叶片失重率(%)
$$W = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100$$

式中, W_0 为叶片原重, W_t 分解后叶片的重量。

木质素失重率(%)
$$L = (L_0 - L_t) / L_0 \times 100$$

式中, L_0 叶片初始木质素含量, L_t 叶片处理后木质素含量。

全碳化合物失重率(%)
$$C = (C_0 - C_t) / C_0 \times 100$$

式中, C_0 叶片初始全碳化合物含量; C_t 叶片在接种处理后的全碳化合物含量。采用 SPSS version 10.0 统计软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 凋落物重量损失

表 2 是叶片在培养到第 5 周(第 35 天)和第 9 周(第 49 天)时测定的重量损失百分率。从中可以看出不同分解真菌对同一种树木的落叶分解能力不同;同一种分解真菌对不同树木的落叶分解能力也不相同,即 10 种真菌使栓皮栎落叶失重率无论是在第 5 周还是第 9 周测定的结果都显著高于相应时期山胡椒落叶失重率($P < 0.05$)。

表 2 10 种真菌使两种凋落物在不同时期失重百分率(%)
Table 2 Weight loss (%) of two litters driven by the ten filamentous fungi at two stages

菌种 Fungi	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>			山胡椒 <i>Lindera glauca</i>		
	第 9 周 9 th week	前期(第 1~5 周) Early stage (1 st ~5 th week)	后期(第 6~9 周) Later stage (6 th ~9 th week)	第 9 周 9 th week	前期(第 1~5 周) Early stage (1 st ~5 th week)	后期(第 6~9 周) Later stage (6 th ~9 th week)
TS1	6.80±0.27 ^{Ae}	6.54±0.63 ^{Ad}	0.26	4.70±0.039 ^{Be}	4.70±0.27 ^{Bb}	0.00
TS2	12.32±0.21 ^{Ac}	7.07±0.47 ^{Ad}	5.25	7.88±0.21 ^{Bc}	4.25±0.35 ^{Bb}	4.13
ChB	5.55±0.05 ^{Af}	3.98±0.23 ^{Af}	1.57	3.55±0.46 ^{Bf}	1.88±0.49 ^{Bd}	1.67
PS	7.38±0.28 ^{Ae}	4.32±0.53 ^{Af}	3.06	3.28±0.36 ^{Bf}	0.89±0.26 ^{Be}	2.39
AN	8.14±0.12 ^{Ad}	5.38±0.34 ^{Ae}	2.76	1.50±0.45 ^{Bg}	0.07±0.02 ^{Bf}	1.43
AF	14.48±0.19 ^{Ab}	11.81±0.44 ^{Ab}	2.67	4.92±0.24 ^{Be}	3.66±0.20 ^{Bc}	1.26
AS	14.61±0.59 ^{Ab}	9.82±0.59 ^{Ac}	4.79	8.62±0.24 ^{Bb}	4.29±0.50 ^{Bb}	4.33
PS1	13.81±0.79 ^{Ac}	13.42±0.45 ^{Aa}	0.39	9.16±0.60 ^{Ba}	7.15±0.39 ^{Ba}	1.29
PS2	16.32±0.91 ^{Aa}	10.48±0.33 ^{Ac}	5.84	5.42±0.44 ^{Bd}	4.22±0.45 ^{Bb}	1.20
CB	4.65±0.43 ^{Af}	2.91±0.21 ^{Ab}	1.74	2.18±0.18 ^{Be}	1.92±0.52 ^{Bd}	0.26
均值 Average	10.41	7.57	2.83	5.12	3.30	1.81

表中的数值为平均值±标准误 The data in the table indicates means±SE ($n=3$); 同行同一时期的不同大写字母表示两种落叶失重存在显著差异 The different capital letters of the same row in the same period indicate significant differences ($P < 0.05$) between two litters; 同列不同小写字母表示菌种间存在显著差异 The different small letters in the same column indicate significant differences among fungi ($P < 0.05$)

2.1.1 栓皮栎叶片 在分解前期(前 5 周)10 种真菌使栓皮栎叶片失重百分率各不相同,由 2.91% 到 13.42%,其中引起失重率最高的为 *Penicillium* sp. 1,最低的为 *Cladosporium berbarum*,10 种真菌的平均失重率为 7.57%;引起叶片失重率超过 10% 的有 3 种分解菌,分别为 *Penicillium* sp. 1、*Penicillium* sp. 2 和 *Aspergillus fumigatus*;失重率低于 5% 有 3 种,他们分别是

Cladosporium berbarum、*Pestalotia* sp. 和 *Chaetomium bostrychodes*; 其余 4 种分解真菌使叶片失重率在 5%~10% 之间。当接种真菌叶片培养到第 9 周时叶片失重有所增加, 其中失重百分率最高的为 *Penicillium* sp. 2 (16.32%), 最低的仍是 *Cladosporium berbarum* (4.65%), *Trichoderma* sp. 2. 和 *Alternaria* sp. 处理的叶片失重百分率也超过了 10%, 10 种真菌引起的叶片平均失重率为 10.41%。每个菌种处理的叶片在后期(第 6~9 周)重量损失都小于前期(第 1~5 周)。其中 *Trichoderma* sp. 2、*Alternaria* sp.、*Penicillium* sp. 2 处理的栓皮栎叶片后期失重率都超过了 4%, 而 *Penicillium* sp. 1、*Trichoderma* sp. 1 两个菌株处理的叶片失重率仅为 0.39% 和 0.26%。

2.1.2 山胡椒叶片 接种 *Penicillium* sp. 1 的山胡椒叶片在分解实验前期失重率最高达到 7.15%, 其它菌株处理的叶片前期失重率均小于 5%。*Pestalotia* sp.、*Aspergillus niger* 在分解前期几乎没有分解能力(<1%), 特别是 *Aspergillus niger* 处理的叶片失重率仅为 0.07%。分解实验到第 9 周时, *Penicillium* sp. 1 使山胡椒叶片失重率仍然最高(9.16%), 同时 *Trichoderma* sp. 2、*Alternaria* sp.、*Penicillium* sp. 2 菌株处理的叶片失重率也都高于 5%。*Trichoderma* sp. 2、*Alternaria* sp. 后期失重率较高, 失重率分别为 4.13% 和 4.33%。*Trichoderma* sp. 1、*Cladosporium berbarum* 两个菌种在实验后期几乎没有使叶片继续失重。

2.2 凋落物化学成分变化

利用纯培养分解试验得到叶片失重的结果, 还不能完全说明真菌的分解潜能以及真菌的分解特性。于是测定了 10 种真菌处理的落叶在不同时期全碳化合物和木质素的含量。

2.2.1 凋落物全碳化合物失重 从表 3 的测定结果可以看出, 10 种真菌在两种叶片分解到第 5 周和第 9 周时, 只有 *Trichoderma* sp. 1 菌株对栓皮栎叶片的全碳化合物失重率显著低于山胡椒叶片($p < 0.05$), 而其它 9 种真菌使栓皮栎叶片的全碳化合物失重率均显著高于山胡椒叶片($p < 0.05$)。10 种真菌中 *Penicillium* sp. 1 菌株在第 9 周和第 5 周均使栓皮栎叶片全碳化合物失重率最高, 但两者之间的差值, 即分解阶段的后期(第 6~9 周)全碳化合物的失重率却最低(0.06%); 而 *Penicillium* sp. 2 菌株使栓皮栎叶片在分解阶段的后期全碳化合物失重率最高, 达到 10.39%。10 种真菌之间使山胡椒叶片全碳化合物的失重率也存在显著差异, 应用 *Trichoderma* sp. 1 菌种处理的叶片在分解第 9 周和第 5 周时测定的全碳化合物失重率都是最高(19.32%), 但两者之间的差值, 即分解阶段的后期全碳化合物的失重率却为 0.00%, 说明其在分解阶段的后期该菌株不再利用全碳化合物的能力; 而接种 *Alternaria* sp. 菌株的山胡椒叶片虽然在第 9 周和第 5 周测定的全碳化合物失重率近于 10 个菌株的平均值, 分别为 10.50%、5.69%, 但是其差值即分解阶段的后期全碳化合物的失重率却最大(4.82%)。

表 3 10 种真菌使两种凋落物在不同时期全碳化合物失重百分率(%)

Table 3 Weight loss (%) of carbohydrates in two litters driven by ten filamentous fungi at two stages

菌种 Fungi	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>			山胡椒 <i>Lindera glauca</i>		
	第 9 周	前期 (第 1~5 周)	后期 (第 6~9 周)	第 9 周	前期 (第 1~5 周)	后期 (第 6~9 周)
	9 th week	Early stage (1 st ~5 th week)	Later stage (6 th ~9 th week)	9 th week	Early stage (1 st ~5 th week)	Later stage (6 th ~9 th week)
TS1	10.57±0.47 ^{Bf}	9.71±0.18 ^{Be}	0.86	19.32±0.64 ^{Aa}	19.32±1.39 ^{Aa}	0.00
TS2	25.65±0.72 ^{Ac}	17.29±0.67 ^{Ad}	8.36	12.33±0.49 ^{Bc}	8.11±0.47 ^{Bc}	4.21
ChB	6.53±0.42 ^{Ag}	4.71±0.29 ^{Af}	1.82	3.99±0.34 ^{Bf}	2.00±0.29 ^{Be}	2.00
PS	9.24±0.52 ^{Af}	5.01±0.27 ^{Af}	4.23	3.49±0.44 ^{Bf}	1.04±0.46 ^{Bf}	2.45
AN	11.67±0.52 ^{Af}	9.32±0.69 ^{Ae}	2.35	2.01±0.15 ^{Bg}	0.08±0.04 ^{Bg}	2.00
AF	35.42±0.49 ^{Ab}	26.52±0.86 ^{Ab}	8.90	6.77±0.43 ^{Be}	5.26±0.30 ^{Bd}	1.51
AS	30.20±0.69 ^{Ac}	20.30±0.76 ^{Ac}	9.91	10.50±0.48 ^{Bd}	5.69±0.39 ^{Bd}	4.82
PS1	44.79±0.62 ^{Aa}	44.70±1.17 ^{Aa}	0.06	15.89±0.55 ^{Bb}	14.50±0.2 ^{Bb}	1.37
PS2	28.55±0.53 ^{Ad}	18.16±0.69 ^{Ac}	10.39	6.89±0.42 ^{Be}	5.85±0.31 ^{Bd}	1.06
CB	7.62±0.38 ^{Ag}	4.57±0.44 ^{Af}	3.05	2.8±0.32 ^{Bg}	1.60±0.14 ^{Be}	1.20
均值 Average	21.02	16.03	4.99	8.41	6.35	2.06

表中的数值为平均值±标准误 The data in the table indicates means±SE ($n=3$); 同行同一时期的不同大写字母表示两种落叶失重存在显著差异 The different capital letters of the same row in the same period indicate significant differences ($P < 0.05$) between two litters; 同列不同小写字母表示菌种间存在显著差异 The different small letters in the same column indicate significant differences among fungi ($P < 0.05$)

2.2.2 凋落物木质素的失重 除 *Trichoderma* sp. 1 菌株外, 其它 9 种真菌都使栓皮栎叶片木质素失重率明显高于山胡椒的失重率(表 4, $p < 0.05$)。*Aspergillus fumigatus* 分解栓皮栎叶片木质素能力显著高于其它菌株($p < 0.05$)。*Cladosporium berbarum* 分解木质素能力最弱, 其引起的木质素失重率远低于 10 种菌的平均值。*Trichoderma* sp. 1、*Penicillium* sp. 1 和 *Cladosporium berbarum* 在分解后期分解栓皮栎叶片木质素能力较弱, 失重率小于 1.00%。*Penicillium* sp. 2 在分解前期分解山胡椒叶片木质素的能力最强, 失重率最大; 而 *Alternaria* sp. 菌种在整个分解期(9 周)分解山胡椒叶片木质素的能力最大(失重率 10.99%),

特别在分解后期;*Trichoderma* sp. 1、*Cladosporium berbarum* 在分解后期几乎没有分解山胡椒叶片木质素的能力。

表 4 10 种真菌使两种凋落物在不同时期木质素失重百分率(%)

菌种 Fungi	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>			山胡椒 <i>Lindera glauca</i>		
	第 9 周	前期 (1~5 周)	后期 (6~9 周)	第 9 周	前期 (1~5 周)	后期 (6~9 周)
	9 th week	Early stage (1 st ~5 th week)	Later stage (6 th ~9 th week)	9 th week	Early stage (1 st ~5 th week)	Later stage (6 th ~9 th week)
TS1	3.58±0.08 ^{Ag}	3.39±0.06 ^{Ag}	0.18	3.48±0.27 ^{Ae}	3.48±0.25 ^{Ac}	0.00
TS2	16.74±0.55 ^{Ac}	8.13±0.32 ^{Ae}	8.61	8.59±0.29 ^{Bb}	4.47±0.26 ^{Bb}	4.13
ChB	7.63±0.34 ^{Ae}	5.41±0.33 ^{Af}	2.22	3.92±0.35 ^{Be}	1.88±0.18 ^{Bd}	2.04
PS	11.64±0.39 ^{Ad}	6.56±0.35 ^{Af}	5.08	3.83±0.25 ^{Be}	0.84±0.37 ^{Be}	2.99
AN	5.47±0.30 ^{Af}	4.19±0.31 ^{Ag}	1.27	0.52±0.11 ^{Bf}	0.01±0.009 ^{Bg}	0.50
AF	26.49±0.38 ^{Aa}	18.30±0.59 ^{Aa}	8.19	5.75±0.25 ^{Bd}	4.10±0.23 ^{Bb}	1.65
AS	23.95±0.34 ^{Ab}	15.23±0.57 ^{Ab}	8.72	10.99±0.22 ^{Ba}	4.67±0.32 ^{Bb}	6.32
PS1	11.00±0.62 ^{Ad}	10.74±0.28 ^{Ad}	0.27	5.32±0.31 ^{Bd}	4.65±0.07 ^{Bb}	0.67
PS2	24.24±0.44 ^{Ab}	14.89±0.57 ^{Ac}	9.35	6.58±0.39 ^{Bc}	5.15±0.27 ^{Ba}	1.44
CB	1.89±0.16 ^{Ah}	1.28±0.12 ^{Ah}	0.61	0.47±0.07 ^{Bf}	0.29±0.03 ^{Bf}	0.18
均值 Average	13.26	8.81	4.45	4.94	2.95	1.99

表中的数值为平均值±标准误 The data in the table indicates means±SE (n=3); 同行同一时期的不同大写字母表示两种落叶失重存在显著差异 The different capital letters of the same row in the same period indicate significant differences (P<0.05) between two litters; 同列不同小写字母表示菌种间存在显著差异 The different small letters in the same column indicate significant differences among fungi (P<0.05)

2.3 真菌分解能力

根据表 2~4 的测定结果,采用木质素失重百分率与重量失重百分率和木质素失重百分率与全碳化合物失重百分率的比值进一步说明不同真菌对叶片分解、利用能力。

从表 5 可以看出试验选用的 10 种真菌对 2 种凋落物的分解在分解前期和后期 L/W 和 L/C 的值差异较大,表明他们利用木质素和全碳化合物的程度不同。*Trichoderma* sp. 1 和 *Cladosporium berbarum* 菌株在 2 种凋落物上无论分解前期还是后期 L/W 和 L/C 的值都比其它菌株低,说明他们只能利用糖类和纤维素等,而对木质素的利用能力比较弱,可以认为这两种真菌是属于对全碳化合物有一定利用能力的分解菌。*Trichoderma* sp. 2、*Aspergillus fumigatus*、*Alternaria* sp.、*Penicillium* sp. 2 4 个菌株对 2 种叶片的分解过程中 L/W 和 L/C 比值基本有相似的规律,即 L₁/W₁ 和 L₂/W₂ 值都比较大(>1.0),而 L₁/C₁ 和 L₂/C₂ 的比值都比较小,且 L₁/C₁ 小于 L₂/C₂,说明这 2 种真菌在前期不仅利用全碳化合物,还在一定程度上分解了木质素,而且分解后期在一定程度上仍然有分解木质素的能力,结合两种叶片的失重率综合评价,可以认为这 4 种真菌是分解能力最强的真菌。*Chaetomium bostrychodes*、*Pestalotia* sp. 两个菌株接种的 2 种叶片在整个分解过程中 L/W 和 L/C 比值都比较高,说明他们对木质素的分解能力比较强,而对全碳化合物的利用能力较弱。接种 *Aspergillus niger*、*Penicillium* sp. 1 两个菌株的两种叶片 L/W 和 L/C 比值存在着相似的规律,即 L/W 和 L/C 的比值都比较小,且 L₁/W₁ 大于 L₂/W₂,而 L₁/C₁ 却小于 L₂/C₂ 的比值,这种现象说明这两个菌株在叶片分解前期对木质素和全碳化合物利用能力都较强,而在后期对它们的利用能力都减弱,分解能力也随之下降。

表 5 叶片分解前期及后期 L/W 和 L/C 的值

真菌 Fungi	栓皮栎 <i>Quercus variabilis</i>				山胡椒 <i>Lindera glauca</i>			
	前期 (1~5 周)		后期 (6~9 周)		前期 (1~5 周)		后期 (6~9 周)	
	Early stage (1 st ~5 th week)		Later stage (6 th ~9 th week)		Early stage (1 st ~5 th week)		Later stage (6 th ~9 th week)	
	L ₁ /W ₁	L ₁ /C ₁	L ₂ /W ₂	L ₂ /C ₂	L ₁ /W ₁	L ₁ /C ₁	L ₂ /W ₂	L ₂ /C ₂
TS1	0.52	0.35	0.66	0.21	0.74	0.18	—	—
TS2	1.15	0.47	1.64	1.03	1.05	0.55	1.00	0.98
ChB	1.36	1.15	1.41	1.22	1.00	0.94	1.22	1.02
PS	1.52	1.31	1.66	1.20	0.95	0.81	1.25	1.12
AN	0.78	0.45	0.46	0.54	0.22	0.20	0.35	0.25
AF	1.55	0.69	1.71	0.92	1.12	0.78	1.31	1.09
AS	1.55	0.75	1.82	0.88	1.09	0.82	1.46	1.31
PS1	0.80	0.24	0.68	0.40	0.65	0.32	0.52	0.49
PS2	1.43	0.82	1.60	0.90	1.22	0.88	1.20	1.36
CB	0.44	0.28	0.35	0.22	0.15	0.18	0.10	0.15

L/W=木质素失重百分率/重量失重百分率 L/W=lignin loss (%) / weight loss (%); L/C=木质素失重百分率/全碳化合物失重百分率 L/C=lignin loss (%) / carbohydrate loss (%)

3 讨论

3.1 不同凋落物对真菌分解能力的影响

比较 10 种真菌对栓皮栎和山胡椒分解能力发现,两者之间存在显著差异($p < 0.05$),所有真菌对栓皮栎分解能力都显著高于山胡椒(表 2)。其原因可能不仅是由于试验中选用的 10 种真菌的来源是以栓皮栎为建群树种的林型,更重要的原因可能是由于试验凋落物的性质对真菌分解能力有很大影响。叶片的初始化学成分的含量是影响凋落物降解速率的主要因素之一。Berg 等^[14]认为凋落物中的初始养分元素含量在分解初期对它们的释放起重要作用,而后期元素释放速率主要受木质素含量影响。Taylor^[15]认为叶片凋落物早期的降解速率大约有 80%是由碳素/氮素比决定的,氮通常在胺基化合物与碳直接接合($-C-NH_2$),所以氮的矿化是一个通过有机物质降解而使微生物获得能量和蛋白质合成的平衡过程,以满足微生物对营养的需求,因此富营养的枯落物腐烂得更快。木质素是一种带有芳香环的聚合物,只有一些特定的真菌才能分解它。这是由于木质素类的物质会在凋落物中的全纤维素类复合物周围形成阻碍分解的屏障^[16]。Mellilo 等人指出,叶片中木质素与氮素含量之比可以说明枯落叶分解速率快慢的指标,其比值越大,分解速率越慢,反之亦然^[17]。本研究供试的 2 种微生物分解凋落物中,栓皮栎叶片中的木质素浓度、木质素/氮和碳素/氮素的比值均低于山胡椒(表 1),根据叶片分解速率的测定结果进一步支持了 Taylor、Mellilo 等人的观点。

3.2 前期和后期分解速率差异产生的原因

为了更好的了解真菌对叶片的分解能力,把整个试验分为前期(前 5 周)和后期(后 4 周)两个阶段。根据叶片失重率结果(表 2)可以看出,2 种叶片在 10 种真菌的作用下,前期的平均失重率显著高于后期。从解剖学角度看,丝状真菌对叶片的分解是由细胞次生壁沿着纤维丝轴线向细胞中层腐解^[18],在这期间可溶性碳水化合物首先被利用^[19]。由于供试凋落物内初始可溶性糖较为丰富(表 1),因而试验中的 10 种腐生真菌在分解前期都能够定值在叶片上利用这些糖分,使叶片失重,并且平均失重率与叶片原始糖分浓度呈正比。真菌在叶片上的生长首先利用的是植物源性的可溶性碳水化合物以及分解纤维素释放的糖分,而后是利用分解木质素释放出的糖分^[20]。当可溶性物质被真菌利用到一定程度时,真菌就不得不利用难分解的综纤维素、木质素,分解速率下降。甚至有些真菌不能利用寄主的木质素,如 *Trichoderma* sp. 1 对山胡椒叶片的分解以及 *Cladosporium berbarum* 菌株,因而在分解后期使叶片失重率比较低甚至几乎没有失重,可见一些真菌在培养到第 5 周后已经不具备了解能力。

3.3 分解真菌分解能力的多样性

丝状真菌的分解能力多样性表现在不同森林类型中。本实验共持续了 9 周时间,分解菌使栓皮栎的失重率从 2.91%到 13.42%,山胡椒从 0.07%到 9.16%。而 Osono^[6]对 *Fagus crenata* 落叶接种培养 8 周,结果表明除一些大型真菌具有更快的速度外,丝状真菌的分解速度在 0.6%~14.4%之间。木质素失重率与质量失重率比值(L/W)和木质素失重率与全碳化合物失重率比值(L/C)对研究真菌对凋落物的利用模式以及真菌的分解能力是非常重要的指标^[6]。本研究利用 L/W 和 L/C 指标对其中 10 种真菌在 4 种叶片的分解前期和后期的分解能力进行了评价(表 5),通过数据分析得出 *Trichoderma* sp. 1 和 *Cladosporium berbarum* 是对全碳化合物有一定利用能力的分解菌,*Trichoderma* sp. 2、*Aspergillus fumigatus*、*Alternaria* sp.、*Penicillium* sp. 2 对木质素、全碳化合物都有分解能力但偏向全碳化合物的分解,*Chaetomium bostrychodes*、*Pestalotia* sp. 对木质素、全碳化合物都有分解能力但偏向木质素的分解,*Aspergillus niger*、*Penicillium* sp. 1 只在一定时期内对木质素、全碳化合物都有分解能力。可见不同真菌对叶片的分解能力不同,即使是同属真菌之间也有显著的差异。*Trichoderma* sp.、*Penicillium* sp.、*Aspergillus* sp. 等对难分解物质起主要作用^[21~23],而 Osono^[24]认为 *Trichoderma* sp.、*Penicillium* sp.、*Aspergillus* sp. 它们可能是纤维素的分解者或者是糖真菌,它们的生长只能依靠叶片内可溶性糖或没有木质化的综纤维素为能源。本研究通过 *Trichoderma*、*Penicillium*、*Aspergillus* 每个属内的两个种进行量化研究发现,它们的分解能力的确存在显著差异(表 2~4, $p < 0.05$),其原因有待于进一步研究。

References:

- [1] Huang J H, Chen L Z, Han X G. The getting along on defoliation of forest ecology system. in: chief, Li: ed. *Getting along on plant science*. Beijing: Higher Education Publishing Compony, 1998. 218~236.
- [2] Cooke R C, Rayner A D M. *Ecology of Saprotrophic Fungi*. London: Longman, 1984.
- [3] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1979.
- [4] Tian X J, Takeda H, Ando T. Application of a rapid thin section method for observations on the decomposing litter in the mor humus form in a subalpine coniferous forest. *Ecological Research*, 1997, 12(3): 289~300.
- [5] Takeda H. Interactions between plant and decomposer populations in forest ecosystems, a mechanism of biodiversity maintenance. *Jpn.*

- J. Ecol.*, 1994, **44**: 211~222.
- [6] Osono T, Takeda H. Comparison of litter decomposing ability among diverse fungi in a cool temperate deciduous forest in Japan. *Mycologia*, 2002, **94**(3): 421~427.
- [7] Osono T, Takeda H. Decomposing ability of interior and surface fungal colonizers of beech leaves with reference to lignin decomposition. *Eur. J. Soil Biol.*, 1999, **35**: 51~56.
- [8] Swift M J, Species diversity and the structure of microbial communities in terrestrial habitats. In: Anderson J. M., Macfadyen A. eds. *The Role of Terrestrial and Aquatic Organisms Publications*. Oxford, 1976. 185~222.
- [9] Tian X J, Takeda H, Azuma J. Dynamics of organic-chemical components in leaf litters during 3.5-year decomposition. *European Journal of Soil Biology*, 2000, **36**: 81~89.
- [10] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest ecosystems: concepts and management*. New York:Academ Press USA.,1985.
- [11] Song F Q, Tian X J, Li Z Q. Diversity of mycelial fungi in organic layer of two forests in Zijin Mountain. *Journal of Forestry Research*, 2004,**15**:273~279.
- [12] King H G C, Heath G W. The chemical analysis of small samples of leaf material and the relationship between the disappearance and composition of leaves. *Pedobiologia*, 1967, **7**:192~197.
- [13] Ning Z X. *Notebook for analysis of foodstuff composition*. Beijing: Light Industry Publishing Company in China, 1997.
- [14] Berg B K, Hannus T. Changes in organic chemical components of needle litter during decomposition. Long term decomposition in a Scots pine forest I. *Canadian Journal of Botany*, 1982, **60**:1310~1319.
- [15] Taylor B R, Parkinson D, Parsons W F J. Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates; a microcosm test. *Ecology*, 1989,**70**:97~104.
- [16] Stevenson F J. *Humus chemistry-genesis, composition, reactions*. New York, John Wiley & Sons, Inc. USA., 1982.
- [17] Mellilo J M, Aber J D, Muratore J F. Nitrogen and lignin control of hard wood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982,**63**:621~626.
- [18] Blanchette R A. Degradation of the lignocellulose complex in wood. *Can J. Bot.*, 1995, **73**: 999~1010.
- [19] Worrall J J, Anagnost S E, Zabel R A. Comparison of wood decay among diverse lignicolous fungi. *Mycologia*, 1997, **89**: 199~219.
- [20] Osono T, Takeda H. Organic chemical and nutrient dynamics in decomposing beech leaf litter in relation to fungal in growth and succession during three year decomposition processes in a cool temperate deciduous forest in Japan. *Eco. Res.*, 2001, **16**: 649~670.
- [21] Huang Q H, Yang S Z. Study on the quantity distributing and flora of forest soil microbe in natural reserve area of Minxi mountain club. *Transaction of Fujian Forestry Institute*, 1991, **11**(1):90~97.
- [22] Li Y Z, Zheng S L, Jiang G Z. The decomposition of poplar defoliation and the succession of the group of its small type fungal. *Transaction of Microbiology*, 1992, **32**(4):299~304.
- [23] Xu G H, Zheng H Y, Zhang D S. Study on the ecologic distributing and the chemical characters of forest soil microbe in natural protected flora of northern slope at mountain Changbai. *Acta Ecologica Sinica*, 1984, **4**(3): 207~223.
- [24] Osono T, Takeda H. Effects of organic chemical quality and mineral nitrogen addition on lignin and holocellulose decomposition of beech leaf litter by *Xylaria* sp. *Eur. J. Soil Biol.*, 2001, **37**: 17~23.

参考文献:

- [1] 黄建辉,陈灵芝,韩兴国. 森林生态系统落叶分解进展. 李承森主编,植物科学进展. 北京:高等教育出版社,1998. 218~236.
- [13] 宁正祥. 食品成分分析手册. 北京:中国轻工业出版社,1997.
- [21] 黄庆辉,杨淑专. 闽西梅花山自然保护区森林土壤微生物数量分布与区系的研究. 福建林学院学报. 1991, **11**(1):90~97.
- [22] 李越中,郑是琳,姜广正. 毛白杨落叶的分解及叶上小型真菌种群的演替. 微生物学报, 1992, **32**(4):299~304.
- [23] 许光辉,郑洪元,张德生,等. 长白山北坡自然保护区森林土壤微生物生态分布及其生化特性的研究. 生态学报, 1984, **4**(3): 207~223.