

王灿, 席劲瑛, 胡洪营, 等. 2007. 气液环境下白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 在载体表面的附着性能研究 [J]. 环境科学学报, 27 (1): 53 - 58

Wang C, Xi J Y, Hu H Y, et al. 2007. Adherence performance of white rot fungus *phanerochaete chrysosporium* to the support materials in gas and liquid phases [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 27 (1): 53 - 58

气液环境下白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 在载体表面的附着性能研究

王灿, 席劲瑛, 胡洪营*, 文湘华, 于茵

清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084

收稿日期: 2006-04-06 录用日期: 2006-11-23

摘要:以白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 为研究对象, 考察了该菌种在液相和气相环境中在陶粒、颗粒炭、玻璃珠、竹子、聚丙烯多面空心球、沸石上的附着和生长情况. 研究表明, 在液相环境中, 白腐真菌 *Phanerochaete chrysosporium* 对竹子、沸石、陶粒、聚丙烯多面空心球有较好的附着能力, 但菌体的生长量和形态特征受载体的影响而产生明显差异. 在有玻璃珠和颗粒炭存在的液相环境中, 均出现一定数量的菌丝小球, 但在载体表面无附着现象. 将附有菌体的载体置于气相环境中, 发现白腐真菌在载体表面能够形成气生菌丝层. 同时, 显微镜下观察发现, 菌体在沸石、陶粒和多面空心球表面呈绒毛状, 质地松散, 在竹子表面的菌体有明显的交织结构.

关键词:白腐真菌; 黄孢原毛平革菌; 载体; 附着

文章编号: 0253-2468(2007)01-0053-06 中图分类号: X172 文献标识码: A

Adherence performance of white rot fungus *phanerochaete chrysosporium* to the support materials in gas and liquid phases

WANG Can, XI Jinying, HU Hongying*, WEN Xianghua, YU Yin

Department of Environmental Science and Engineering, Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084

Received 6 April 2006; accepted 23 November 2006

Abstract: The adherence performance of white rot fungus *Phanerochaete chrysosporium* to different support materials was studied by batch tests. The selected support materials were ceramsite agitator, granular activated carbon, glass beads, bamboo, polypropylene spheres and zeolite. The results indicated that *Phanerochaete chrysosporium* could adhere well to the surfaces of bamboo, zeolite, ceramic ball and polypropylene sphere in liquid phase. The amount of attached biomass and morphology of *Phanerochaete chrysosporium* showed great difference due to different support materials. *Phanerochaete chrysosporium* did not adhere on the glass beads and granular activated carbon, while some little hypha ball formed in the liquid. After the support materials with attached biomass were exposed in gas phase, mycelial cushions were observed to form on the support materials and showed different typical style.

Keywords: white rot fungus; *phanerochaete chrysosporium*; support material; adherence performance

1 引言 (Introduction)

白腐真菌 (White rot fungi) 是一类能够降解木质素的丝状真菌, 因其对多种不同结构的天然物质或异生物质具有强大的降解功能而受到人们广泛

的关注 (林刚等, 2001). 近年来, 不断有学者将白腐真菌应用到环境领域中, 挖掘它在去除难降解污染物方面的潜在能力 (李慧蓉, 2005). 根据白腐真菌的生长特点, 开发适合其附着生长的生物反应器成为白腐真菌应用技术的关键. 而在生物反应器的设

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863) (No. 2004AA601061)

Supported by the Hi-tech Research and Development Program of China (No. 2004AA601061)

作者简介: 王灿 (1981—), 男, 博士生, E-mail: wangcan04@mails.tsinghua.edu.cn; *通讯作者 (责任作者), E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

Biography: WANG Can (1981—), male, Ph.D candidate, E-mail: wangcan04@mails.tsinghua.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

计和运行中,白腐真菌菌体的附着和固定化是一个关键的技术环节 (Moreira *et al*, 1998),它将为菌体的良好生长和正常工作、控制生物量在反应器中的分布以及实现反应器的连续运行提供保障。因此,研究白腐真菌在不同载体上的附着和生长性能具有重要意义。

1994年 Ruckenstein (1994)和 Wang X B 等人 (1994)用浓缩的乳化聚合方法,制成一种多孔的聚苯乙烯-二乙烯基苯载体,并向含有该载体的液体培养基中接种 1.5×10^7 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 的黄孢原毛平革菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) 孢子。培养一定时间后,将生长的菌体用于降解 2-氯酚。结果表明,附着生长的菌体活性明显高于悬浮生长的菌体活性。Sayadi (1996) 等人将黄孢原毛平革菌野生型 BMK-F-1767 的孢子接入含 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$ 聚氨酯泡沫的培养液中,在 $120\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下培养 4d 后用于有色废水的处理。结果表明,相对于液体培养基中直接接种的菌体,附着在载体表面的菌体表现出更好的 COD 去除和脱色能力。

已有研究表明,多孔陶瓷、聚氨酯泡沫、烧结玻璃 (Alleman *et al*, 1995; Rogalski *et al*, 2006; Venkatadri *et al*, 1993) 等物质可以作为黄孢原毛平革菌的优良载体。但目前所研究的对象大多集中在人工合成的载体,对天然载体的研究较少。另外,需要重点指出的是,到目前为止,几乎所有的白腐真菌对载体附着性能的研究都是针对在液相环境中,而在气相环境中白腐真菌对载体的附着和生长情况少见报道。本文选取了几种常见的天然和人工载体,在考察黄孢原毛平革菌在纯液相环境中生长特性的基础上,比较了菌体对不同载体的附着性能,同时将附有菌体的载体置于气相环境中,进一步考察白腐真菌在该环境中的附着和生长情况。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 菌种

本研究中采用的白腐真菌菌种为清华大学保存的 *Phanerochaete chrysosporium* BMK-F-1767。

2.2 培养基

固体培养基采用 PDA 培养基,成分为:土豆浸出液 $200\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,无水葡萄糖 $20\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,琼脂 $10\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

液体培养基采用 2 种培养基,即限 N 培养基和土豆液体培养基。限 N 培养基的成分为:葡萄糖 $10\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,酒石酸铵 $0.2\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 $2.0\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,

MgSO_4 $0.5\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, CaCl_2 $0.1\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $20\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸-醋酸钠缓冲液 (pH = 4.4), MgSO_4 $0.21\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, MnSO_4 $0.035\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl $0.070\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, CoCl_2 $0.007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, CuSO_4 $0.007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ $0.0007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_3 $0.0007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $0.0007\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Nitribriacetate $0.105\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, $1.5\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 藜芦醇。接种前无菌过滤加入 VB1 溶液使其浓度为 $0.001\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。土豆液体培养基的成分与固体培养基相似,无需琼脂。

2.3 载体

竹子:圆筒状,高度约 2.0cm,内径 0.7~1.5cm,载体的投加量为 $140\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

多面空心球:球形,乳白色,聚丙烯材料,平均直径 2.5cm,载体的投加量为 $140\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

陶粒:球形,红褐色,平均直径 0.4cm,载体的投加量为 $450\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

玻璃珠:球形,透明,平均直径 0.3cm,载体的投加量为 $270\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

颗粒炭:圆柱形,黑色,长度约 0.5cm,直径约 0.2cm,载体的投加量为 $50\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

沸石:不规则块状,灰白色,长 2.0cm,宽 0.7cm,载体的投加量为 $440\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

2.4 培养条件

固体培养在 37℃ 生化培养箱中静态培养;液体培养采用 37℃、转速 $150\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的摇床培养。

2.5 试验方法

将斜面上的菌种接种至固体培养基平板上,在 37℃ 条件下培养 5d,用接种环挑取一定量的孢子于无菌水中得到均匀的孢子液。将 20mL 孢子液加入装有 100mL 液体培养基和一定量 (如 2.3 节所述) 载体的锥形瓶中。每瓶中最终的孢子个数约为 4.8×10^4 个 $\cdot \text{mL}^{-1}$ 。锥形瓶在 37℃、 $150\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下培养 7d,然后将附着良好的载体从液体培养基中取出,置于另一个气相环境中的无菌锥形瓶内。

附着在载体表面的菌体生物量测定采用干重测定法。将菌体、载体和锥形瓶在 105℃ 下烘干至恒重,所得结果减去载体和锥形瓶质量即为菌体干重。

在本试验中,采用光学体视显微镜观察白腐真菌在载体上的附着和生长特征,放大倍数为 30~50 倍。

3 实验结果 (Results)

3.1 白腐真菌在纯液相中的生长特性

白腐真菌的液体培养基种类很多,不同的研究

者根据白腐真菌菌种品系和各自的研究目的,采用了不同成分的培养基.从营养物质的角度来对白腐真菌的液体培养基进行分类,总体上可以分为富营养型培养基和营养限制型培养基.本研究对白腐真菌在 2 种不同类型纯液相培养基中的生长情况进行了比较.

将 *P. chrysosporium* 孢子接种在无载体的纯液体培养基中,考察 *P. chrysosporium* 的生长情况.同时,重点比较了不同培养基(限 N 培养基和土豆培养基)对 *P. chrysosporium* 菌体形态和产量的影响.图 1 是等量的 *P. chrysosporium* 孢子分别在土豆液体培养基和限 N 液体培养基中培养 3d 后的情况.

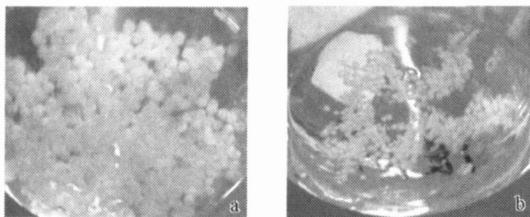


图 1 不同液体培养基中 *P. chrysosporium* 的生长形态 (a 土豆液体培养基; b 限 N 培养基)

Fig 1 Shape of *P. chrysosporium* in different liquid medium

从图 1 可以看到, *P. chrysosporium* 在土豆液体培养基和限 N 液体培养基中均产生菌丝小球,但两者产生小球的大小和数量均出现很大差别,土豆液体培养基中菌丝小球直径在 2.0~3.0mm,约为限 N 培养基中菌丝小球直径的 2 倍;另外,前者产生的生物量也明显要多于后者(表 1).在本研究的后续试验中,液体培养基均采用土豆液体培养基.

表 1 *P. chrysosporium* 在不同液体培养基中生成的菌丝小球的比较

Table 1 Comparison of the mycelia pellets of *P. chrysosporium* in different liquid medium

培养基种类	菌丝小球直径/mm	菌丝小球干重/g	菌丝小球个数
土豆液体培养基	2.0~3.0	2.4	多
限 N 培养基	1.0~1.5	0.2	少

注:菌丝小球干重是指每个培养瓶中的总质量.

3.2 白腐真菌在液相中对载体的附着性能

将等量的 *P. chrysosporium* 孢子接种在装有 100mL 液体培养基和载体的锥形瓶中,培养 5d 后的白腐真菌菌丝形态如图 2 所示.

从图 2 可以看到, *P. chrysosporium* 在不同载体表面的附着情况存在明显差异, *P. chrysosporium* 对

竹子、沸石、陶粒和多面空心球有附着现象.其中,在竹子、沸石和陶粒载体表面的附着生物量较多,但只有少量菌体附着在多面空心球表面.在以玻璃珠和颗粒炭为载体的培养基中,均出现菌丝小球或菌丝体,但菌体与载体之间处于明显分离的状态.

对于同一载体而言, *P. chrysosporium* 对不同部位的附着能力也表现出差异.在以竹子为载体的培养基中,菌体对竹筒内壁的附着情况明显好于对竹筒外壁的附着情况.

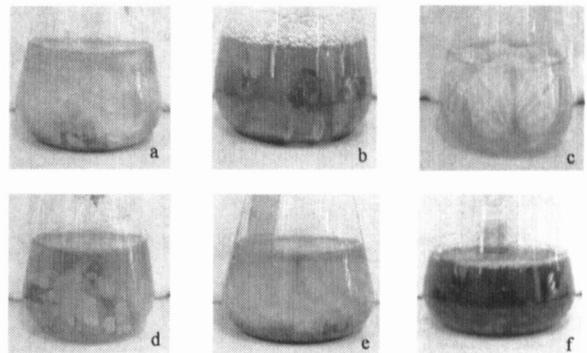


图 2 液体培养基中 *P. chrysosporium* 在不同载体表面的附着生长情况 (a 沸石; b 竹子; c 多面空心球; d 玻璃珠; e 陶粒; f 颗粒炭)

Fig 2 Adhesion of *P. chrysosporium* to the surfaces of different supports in liquid medium (a zeolite, b bamboo, c polypropylene sphere, d glass pellet, e ceramic ball, f granular carbon)

3.3 载体对白腐真菌菌体形态的影响

比较 *P. chrysosporium* 在无载体的培养基中和加入不同载体的培养基中的生长情况(图 1 和图 2)可以看出,载体的加入对 *P. chrysosporium* 孢子的萌发和菌体的生长产生了明显的影响.

在以沸石和陶粒为载体的培养基中(图 2a、2e),载体比重较大而沉于瓶底,液体中没有出现菌丝小球,在载体表面有菌丝附着,生长的菌丝数量较多,且长度较长,已经布及整个培养基.

在以竹子和多面空心球为载体的培养基中(图 2b、2c),载体比重较小而浮于液体中.在菌体的生长过程中,液体培养基中未出现悬浮的菌丝小球,菌体以膜状或团状形式附着于载体表面.

在以玻璃珠和颗粒炭为载体的培养基中(图 2d、2f),孢子经萌发后形成了与无载体情况下相似的菌丝小球,但菌丝小球的大小明显不同.

3.4 白腐真菌在气相中对载体的附着性能

将附着有菌体的载体从液体培养基中取出,置于一个相对干燥的无菌锥形瓶中,瓶口用封口膜封

闭,与外界大气相通,形成一个无杂菌的气相环境。*P. chrysosporium* 在气相环境中放置 7d 后的情况如图 3 所示。另外,在显微镜下观察了附着在不同载体表面上的白腐真菌菌丝体的形态(图 4)。

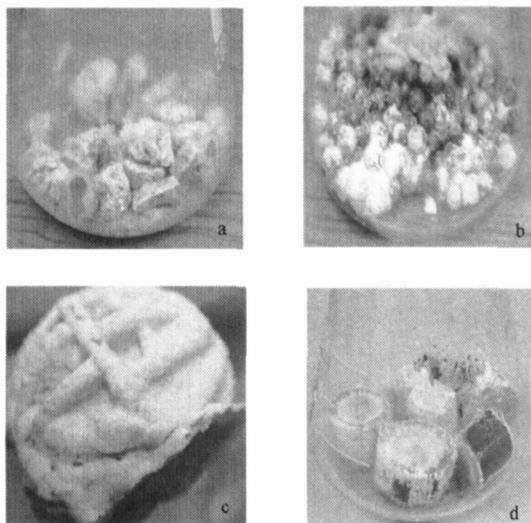


图 3 气相环境中 *P. chrysosporium* 在不同载体表面的附着情况 (a 沸石; b 陶粒; c 多面空心球; d 竹子)

Fig 3 Adhesion of *P. chrysosporium* to the surfaces of different supports in gas-phase environment (a zeolite, b ceramic ball, c polypropylene sphere, d bamboo)

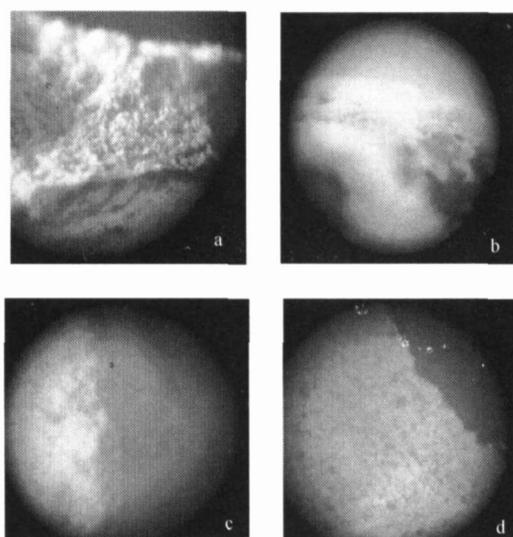


图 4 显微镜下观察不同载体表面的 *P. chrysosporium* 菌丝形态 (a 沸石; b 陶粒; c 多面空心球; d 竹子)

Fig 4 Micrographs of *P. chrysosporium* on the surfaces of different supports in gas-phase environment (a zeolite, b ceramic ball, c polypropylene sphere, d bamboo)

从图 3 和图 4 可以看出,气相环境中,在未加营

养的条件下,沸石、陶粒、多面空心球和竹子表面原来附着的菌体有进一步附着生长的现象,并形成干燥的白色菌丝层。通过显微镜下的观察发现,附着在不同载体表面的 *P. chrysosporium* 菌丝层也存在差异。在沸石、陶粒和多面空心球表面的菌丝层呈现绒毛状,质地疏松。而在竹子表面的菌丝层有明显的交织结构。菌丝体对竹子表面的附着强度要好于沸石、陶粒和多面空心球。另外,在本试验中,白腐真菌对竹子无明显的降解作用。

4 讨论 (Discussion)

4.1 白腐真菌在纯液相中生长特性的比较分析

图 1 的试验结果表明,白腐真菌孢子在纯液相培养环境下均形成一定数量的菌丝小球。这种菌丝小球的形成是真菌细胞自然发生的一种自固定化过程(李慧蓉, 2005)。在菌丝小球形成的过程中,小球直径的大小主要受营养物质和摇床振荡产生的水力剪切力的影响。本研究的结果表明,土豆液体培养基中菌丝小球直径约为限 N 培养基中菌丝小球直径的 2 倍(表 1)。这主要是因为,土豆液体培养基可以为白腐真菌的生长提供更多的营养物质,并能有效减少水力剪切力对菌丝小球的影响(土豆培养基糖类含量较多,黏性较大)。

另外,从白腐真菌生物量的比较结果来看(表 1),白腐真菌在富营养型的培养基中(如土豆培养基)可以在较短的时间内达到较高的生物量。一般认为,在限制 N 源的条件环境中,*P. chrysosporium* 容易产生木质素过氧化物酶(LiP)、Mn 过氧化物酶(MnP)等胞外酶(Tien *et al.*, 1983)。但从收获菌体的角度来看,宜采用土豆液体培养基来培养白腐真菌。

4.2 白腐真菌在液相对不同载体附着性能的比较

白腐真菌在液相对不同载体表面的附着情况如表 2 所示。

图 2 和表 2 表明,*P. chrysosporium* 对竹子、沸石、陶粒和多面空心球有良好的附着性能,但对玻璃珠和颗粒炭的附着性能较差。这说明,载体的表面材质对白腐真菌的附着有影响。白腐真菌在液相对不同的载体表现出了选择性附着的特点。

在以竹子为载体的培养基中,*P. chrysosporium* 的主要附着部位在竹筒内壁,而在竹筒外壁的附着菌体很少(表 2)。这主要是因为竹筒内壁相对于外

壁而言具有更粗糙的表面.因此,载体的表面性质(如粗糙度等)是又一影响菌体附着因素.

表 2 *P. chrysosporium* 对不同载体的附着情况

Table 2 Adhesion capacity of *P. chrysosporium* to the surfaces of different supports

载体	附着量	附着部位	附着形态
竹子	++	竹筒内壁	环形菌膜
多面空心球	+	球体缝隙	菌团
沸石	++	上表面	发散形菌丝
陶粒	++	球体表面	发散形菌丝
颗粒炭	—	—	—
玻璃珠	—	—	—

注:“++”表示附着量多;“+”表示附着量少;“—”表示没有附着现象.

4.3 载体对白腐真菌生长形态的影响分析

将 *P. chrysosporium* 孢子接种在无载体的液体培养基(限 N 培养基或土豆培养基)后 1d 即出现少量的菌丝小球.而加入上述 6 种载体后,除了以颗粒炭为载体的培养基外,其它的培养基到第 2d 才发现菌体.这说明,载体的加入干扰了孢子在液相培养基中的萌发和生长环境(如载体运动的机械作用和分泌物的化学作用),延迟了孢子萌发和菌体生长的过程.

从图 2 中 *P. chrysosporium* 在装有不同载体的液相培养基中的生长形态可以看到,当菌体能够附着在载体表面时,主要以菌膜形式生长.在不能附着的载体培养基中,则以菌丝小球的形式生长.这说明, *P. chrysosporium* 有附着生长的倾向.当生长环境中出现适宜的载体时,菌体往往选择附着生长的形式.当没有合适的载体存在时,菌体则形成菌丝小球.

在形成菌丝小球的液体培养基中(图 2d, 2f),玻璃珠由于比重大于水,而沉入瓶底,使得水面高度增加(水面直径减小).在相同转速的情况下,以玻璃珠为载体的瓶中液体离心半径减小,产生较小的水力剪切力,因此,菌丝小球的直径较大.颗粒炭由于粒径较小,在剧烈摇动的情况下可以随水流一起运动,运动的颗粒炭不断与菌丝小球发生碰撞和摩擦,限制了菌丝小球直径的增大.因此,载体的表面性质、大小和比重对白腐真菌的生长形态均会产生影响.

4.4 白腐真菌在气相中对载体的附着性能分析

白腐真菌作为一种气生型的微生物,考察其在气相环境中载体表面的附着和生长特性具有重要意义.在本研究中,附着在沸石、陶粒、多面空心球

和竹子表面的菌体在气相环境中逐渐形成干燥的菌丝层.同时,在没有额外投加碳源(竹子并未发生明显降解)的情况下,附着的菌体有进一步生长的现象.生长所需的营养物质主要来自于载体表面和菌体内部所残留的营养液.这说明,在气相环境中,较低水平的营养物质就可以维持一定量白腐真菌的生长.另外,从菌体在气相环境中对不同载体的附着强度来看,竹子是一种适合白腐真菌附着和生长的良好载体.

因此,在气相环境中,白腐真菌能附着在多种载体表面,并产生菌丝层.白腐真菌的这一特性为其在对气相污染物处理方面开辟了新的应用途径.

5 结论 (Conclusions)

1) 白腐真菌 *P. chrysosporium* 在无载体的纯液相环境中(振荡培养)以菌丝小球的形式生长.其中,土豆液体培养基中获得的白腐真菌生物量明显高于限 N 培养基.

2) 液相环境中, *P. chrysosporium* 对不同载体的附着性能存在明显差异:对竹子、聚丙烯多面空心球、陶粒和沸石表面有较好的附着性能,在玻璃珠和颗粒炭的表面无明显附着现象.载体的材质和表面性质(粗糙度等)是可能影响菌体在载体表面附着因素. *P. chrysosporium* 有附着生长的倾向.

3) 气相环境中,在不加营养的条件下,白腐真菌 *P. chrysosporium* 能够在多种载体表面附着,并能产生气生菌丝层.显微镜下观察发现,在沸石、陶粒和多面空心球表面的菌丝体呈现绒毛状,质地疏松,而在竹子表面的菌丝体有明显的交织结构.

责任作者简介:胡洪营(1963—),男,工学博士,教授,博士生导师.主要从事环境微生物技术、污水生物/生态处理技术、再生水水质安全评价与保障技术、污染水体水质净化与生态恢复技术等方面的研究.

References:

- Alleman R C, Logan B E, Gilbertson R L. 1995. Degradation of pentachlorophenol by fixed film of white rot fungi in rotating tube bioreactors [J]. *Water Research*, 29(1): 61—67
- Li H R. 2005. Immobilization of white-rot fungus [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 17—18, 169—170 (in Chinese)
- Lin G, Wen X H, Qian Y. 2001. The study progress on using white-rot fungus in treating refractory organics[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2(4): 1—8 (in Chinese)
- Moreira M T, Palma C, Feijoo G. 1998. Strategies for the continuous

- production of ligninolytic enzymes in fixed and fluidised bed bioreactors [J]. *Journal of Biotech*, 66(1): 27—39
- Rogalski J, Szczerbak J, Janusz G. 2006. Manganese peroxidase production in submerged cultures by free and immobilized mycelia of *Nematoloma frowardii* [J]. *Bioresour Technol*, 97(3): 469—476
- Ruckenstein E, Wang X B. 1994. Production of lignin peroxidase by *Phanerochaete chrysosporium* immobilized on porous poly(styrene-divinylbenzene) carrier and its application to the degrading of 2-chlorophenol [J]. *Biotechnol Bioeng*, 44(1): 79—86
- Sayadi S, Zargani F, Elbuz R. 1996. Decolorization of olive mill wastewater by free and immobilized *Phanerochaete chrysosporium* cultures - Effect of the high-molecular-weight polyphenols [J]. *Biotechnol Bioeng*, 56(3): 265—276
- Tien M, Kirk T K. 1983. Lignin-degrading enzyme from the hymenomycete *Phanerochaete chrysosporium* burds [J]. *Science*, 221(12): 661—663
- Venkatadri R, Irvine R L. 1993. Cultivation of *Phanerochaete chrysosporium* and production of lignin peroxidase in novel biofilm reactor system: hollow fiber reactor and silicone membrane reactor [J]. *Water Research*, 27(4): 591—596
- Wang X B, Ruckenstein E. 1994. Immobilization of *Phanerochaete chrysosporium* on porous polyurethane particles with application to biodegradation of 2-chlorophenol [J]. *Biotech Techniques*, 8(5): 339—344

中文参考文献:

- 李慧蓉. 2005. 白腐真菌的固定化技术 [M]. 北京: 化工出版社, 17—18, 169—170
- 林刚, 文湘华, 钱易. 2001. 应用白腐真菌技术处理难降解有机物的研究进展 [J]. *环境污染治理技术与设备*, 2(4): 1—8