

學術論述

淺談真菌降解木材機制與環境友善型 木材防腐劑

陳永龍¹ 陳載永² 吳志鴻^{3*}

(收件日期：民國 98 年 8 月 28 日、接受日期：民國 98 年 10 月 26 日)

【摘要】長久以來，木材被廣泛應用於建築及製漿造紙等工業上；然而在適當的環境下，木材卻易受真菌等微生物的危害而造成生物降解，因而造成木材在應用上之困擾。雖然木材經防腐處理可降低微生物的危害，並延長木材的使用年限，但此亦會造成其對人體健康及環境等衝擊。因此，為滿足上述需求並開發對環境友善且對人體無害之木材防腐劑，瞭解真菌降解木材之機制為木材防腐劑開發之重要依據。早期僅知真菌可分泌纖維素分解酶等胞外酵素來降解木材，但近年來發現，除了胞外酵素之外，真菌亦會利用氫氧自由基等自由基來降解木材。因此，若能抑制真菌分泌的胞外酵素活性，或是捕捉真菌所產生的自由基，應可達到木材防腐之效果。

【關鍵詞】真菌、生物降解、木材防腐劑、環境友善

INTRODUCTION OF THE MECHANISM OF WOOD DEGRADATION BY FUNGI AND THE ENVIRONMENTALLY BENIGN WOOD PRESERVATIVE

Yong-Long Chen¹ Tsai-Yung Chen² Jyh-Horng Wu^{3*}

(Received: August 28, 2009; Accepted: October 26, 2009)

【Abstract】 Wood, widely utilized in building and paper-pulp manufacturing, is susceptible to fungal biodegradation under appropriate environment conditions. Thus, the biodegradation is supposed to be one of the major challenges in wood utilization. Proper preservative treatments can reduce the microbial damage and increase the service life of wood, but health and

¹ 國立中興大學森林學系研究生。

Graduate Student, Department of Forestry, National Chung Hsing University.

² 國立中興大學名譽教授。

Emeritus Professor, National Chung Hsing University.

³ 國立中興大學森林學系助理教授，通訊作者。

Assistant Professor, Department of Forestry, National Chung Hsing University. Corresponding Author, E-mail: eric@nchu.edu.tw

environment issues are also to be emphasized. Accordingly, in order to develop environment-friendly and health harmless wood preservatives, understanding the mechanism of wood biodegradation is very important. In the past, it was thought that wood biodegradation just caused by extracellular enzymes such as cellulose secreted by fungi. Recently, however, free radicals such as hydroxyl radical are also conformed to be involved in fungi biodegradation. Accordingly, wood biodegradation should be prevented by inhibiting the activity of extracellular enzymes and/or scavenging the free radicals secreted by fungi.

【Key words】 Fungi, Biodegradation, Wood preservative, Environment-friendly

I、前言

木材為一天然、可再生的生物性材料，其具有優異的強度性質、吸脫濕性及美觀的外表等優點，因此，自古以來廣泛受到人們喜愛與利用。在理想的環境下，木材可使用數十年至數百年之久，但是在現實生活中，木材會受到陽光、水分、大氣污染物、臭氧、二氧化硫及酸雨等環境因子影響，而加速劣化。然而，除了上述非生物性危害之外，木材亦會受到細菌、真菌、蛀蟲、白蟻及海蟲等生物性危害；其中，因真菌所導致的木材腐朽，據估計已造成數十億歐元的損失 (Martínez *et al.*, 2005)。因此，為了提升木材的耐腐朽性與耐久性，常會在木材表面塗裝，以避免木材受到陽光等非生物性危害；或是對木材進行防腐處理，以避免木材受到真菌等生物性危害 (Forest Products Laboratory, 1999)。早期使用的木材防腐劑多具有劇烈的毒性，其雖能有效提升木材的耐腐朽性，卻亦會造成環境污染並影響人體健康 (Hall, 2002; Katz and Salem, 2005)。因此，目前世界各國均致力於研究真菌降解木材之機制，並藉由抑制或阻斷真菌降解木材機制的運行，以開發對環境友善、不會影響人體健康且能有效提升木材耐腐朽

性的木材防腐劑。然而，現階段國內對真菌降解木材機制之介紹甚少，故本文將針對胞外酵素系統與自由基系統兩種真菌降解木材機制以及當前木材防腐劑的研究現況，進行概略性之整理及介紹。

II、木材腐朽機制-酵素系統

事實上，要開發新型木材防腐劑，首先需瞭解木材腐朽菌降解木材之機制。許多研究報告指出，部分微生物能利用酵素系統攻擊纖維素非結晶區 (Amorphous region) 與結晶區 (Crystalline region)，造成纖維素的降解。而木材腐朽菌主要係利用纖維二糖水解酶 (Cellobiohydrolase)、內切型葡萄糖分解酶 (Endoglucanase) 及外切型葡萄糖分解酶 (Exoglucanase) 等胞外酵素，攻擊木材纖維素。其中，內切型葡萄糖分解酶主要會水解纖維素非結晶區及結晶區中結晶度較低的區域而造成纖維素的斷裂，並形成寡糖 (Oligosaccharide)。而纖維二糖水解酶，則會從寡糖之非還原端往還原端反應而形成纖維二糖 (Cellobiose)，最後再藉由 β -葡萄糖苷酶 (β -Glucosidase) 將纖維二糖降解成葡萄糖 (圖 1) (Eaton and Hale, 1993; Pérez *et al.*, 2002)。

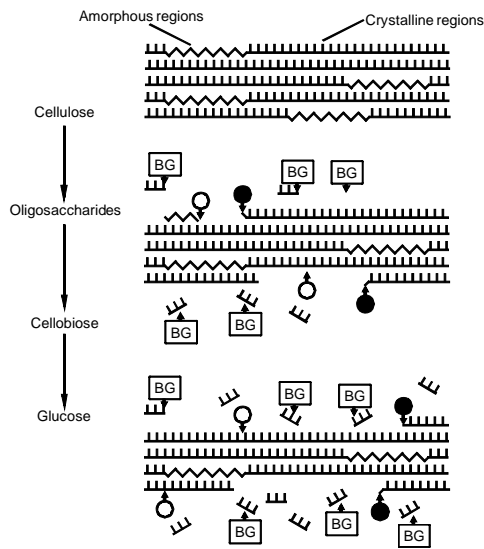


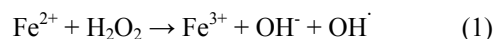
圖 1 酵素降解纖維素之機制 (○ : Endoglucanases ; ● : Cellobiohydrolase ; BG : β -Glucosidase) (Eaton and Hale, 1993)

Fig. 1 The mechanism of cellulose biodegradation by enzymes

此外，木材腐朽菌亦能利用木質素過氧化酶 (Lignin peroxidase, LiP) 及錳依賴型過氧化酶 (Manganese-dependent peroxidase, MnP) 等高氧化還原能力之木質素分解酶 (Ligninase) 來降解木質素。其中，LiP 能分解木質素中 90% 的非酚類單元，而 MnP 則會產生 Mn^{3+} ，並透過脂質過氧化的反應分解木質素中酚類及非酚類單元 (Martínez *et al.*, 2005 ; Pérez *et al.*, 2002)。而漆酶 (Laccase)、芳香醇氧化酶 (Aryl-alcohol oxidase, AAO)、乙二醛氧化酶 (Glyoxal oxidase)、芳香醇去氫酶 (Aryl-alcohol dehydrogenase, AAD) 及醌還原酶 (Quinone reductase) 等胞外酵素，均可分解木質素衍生物而造成木質素之降解 (Martínez *et al.*, 2005 ; Pérez *et al.*,

2002)。其中，漆酶會造成木質素的氧化而產生芳香環自由基 (Aromatic radical)，並促使 C4 醚鍵的斷裂、芳香環的開環、 C_{α} - C_{β} 的斷裂以及去甲氧基 (Demethoxylation) 等反應的發生。此外，真菌透過 AAO 及 AAD 的氧化還原反應，使得木質素因 C_{α} - C_{β} 的斷裂而釋出具芳香環之醛類化合物 (Aromatic aldehyde) 或使木質素降解產物重新合成。

至於 C4 位置斷裂所產生的酚自由基，如果沒有被 AAO 氧化成酚類化合物，則可能再聚合於木質素聚合物上；而被 AAO 氧化所產生之酚類化合物，則能被漆酶或木質素過氧化酶再次的氧化。另一方面，酚自由基也可能進一步產生 C_{α} - C_{β} 斷裂而生成醌類化合物 (Quinone)。而不論從何途徑所生成的醌類化合物，都可能進一步受到醌還原酶、漆酶及木質素過氧化酶影響，產生氧化還原反應而將木材中 Fe^{3+} 還原成 Fe^{2+} ，而此 Fe^{2+} 則可進一步促使芬頓反應 (Fenton reaction, Eq. 1) 的進行，而形成氫氧自由基 (Hydroxyl radical)。此外，木質素在降解過程中會生成過氧化氫 (Hydrogen peroxide) 及超氧自由基 (Superoxide radical)，而此兩種活性氧分子 (Reactive oxygen species, ROS) 彼此亦可藉由哈柏-魏斯反應 (Haber-Weiss reaction, Eq. 2) 形成氫氧自由基。這些反應所生成之氫氧自由基，其本身為強氧化劑，能對未腐朽木材之木質素進行攻擊進而造成木材的降解 (圖 2)。



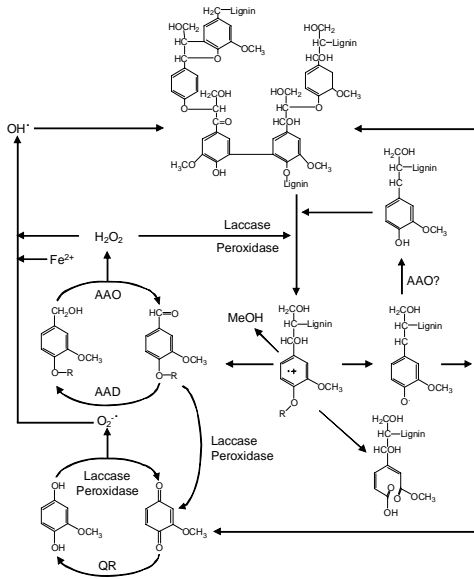


圖 2 酵素降解木質素之機制 (Martinez *et al.*, 2005)

Fig. 2 The mechanism of lignin biodegradation by enzymes

III、木材腐朽機制—自由基系統

雖然許多木材腐朽菌能分泌胞外酵素來降解纖維素、半纖維素及木質素，但目前普遍認為這些酵素分子太大而無法有效的穿透木材內部 (Blanchette *et al.*, 1996)。因此，這些木材腐朽菌需要利用其它更小分子的物質去進行木質纖維素的降解，其中活性氧即被視為木材腐朽菌利用的物質。事實上，Halliwell 於 1965 年即提出木材腐朽菌利用胞外活性氧降解木質纖維素的假說，後來更有許多研究顯示，木材腐朽菌在降解木質纖維素過程中會產生氫氧自由基、過氧化自由基 (Peroxyl radical) 及過氧化氫自由基 (Hydroperoxyl radical) 等活性氧 (Hammel *et al.*, 2002; Jellison *et al.*, 1997; Martinez *et al.*, 2005)。其中，

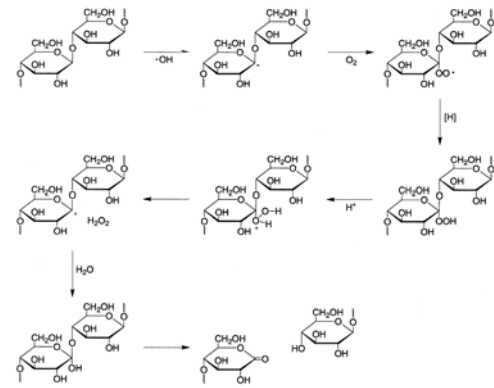


圖 3 自由基降解纖維素之機制 (Hammel *et al.*, 2002)

Fig. 3 The mechanism of cellulose biodegradation by free radicals

由於芬頓反應提供氫氧自由基一條明確且合理的生成途徑，因此氫氧自由基被普遍認為是較合理的物質。而 Kirk 等人 (1991) 亦指出，木材腐朽菌主要係利用氫氧自由基降解纖維素以產生小分子化合物。一般而言，氫氧自由基會捕捉纖維素上的氫原子，而在 C1 位置短暫形成自由基，且在有氧情況下迅速生成過氧化自由基，並經一連串的氧化還原反應後，造成纖維素的斷鏈而生成小分子化合物(圖 3) (Hammel *et al.*, 2002)。

此外，氫氧自由基亦會透過親電子加成反應 (Electrophilic addition reaction) 攻擊木質素之苯環，使其形成環己烷二烯自由基 (Cyclohexadienyl radical) 之中間產物。而依照氫氧自由基攻擊位置不同，除會使環己烷二烯自由基之中間產物進一步行去甲氧基反應或造成 C4 位置之醚鍵斷裂 (β -O-4 Ether cleavage) 而生成苯氧自由基之外，亦會造成木質素羥化 (Hydroxylation)。另一方面，氫氧自由

基也會捕捉木質素 C_α 位置的氫原子，而在有氧環境下進一步形成過氧化自由基，最後使木質素 C_α-Hydroxyl 轉變為 C_α-Carbonyl 類之產物 (圖 4) (Goodell *et al.*, 1997; Hammel *et al.*, 2002; Suzuki *et al.*, 2006; Yelle *et al.*, 2008)。

IV、木材防腐劑之發展現況

一般而言，木材防腐劑主要分為油性、水溶性及乳化性等三大類；其中，又以油性及水溶性木材防腐劑的使用最為常見 (Forest Products Laboratory, 1999; USDA, 2007)。早期常見的油性木材防腐劑包含雜酚油 (Creosote)、瀝青 (Bitumen) 及五氯酚 (Pentachlorophenol) 等，雖然此類木材防腐劑能有效避免木材受到真菌等生物性危害，但卻會造成木材外觀不佳等加工利用上的缺點，甚至對人體會造成中毒或致癌的可能性 (Hall, 2002; Katz and Salem, 2005; Schultz *et al.*, 2007)。而常見的水溶性或乳化性木材防腐劑，則包含鉻化砷酸銅 (Chromated copper arsenate, CCA)、銅烷基銨化合物 (Alkaline copper quaternary, ACQ) 以及銅、硼、唑化合物 (Copper azole, CuAz) 等；其中，依藥劑組成比例之不同，CCA 主要可分為 CCA-1~CCA-5 共 5 種類型 (表 1)，而 ACQ 則主要可分為 ACQ-1 及 ACQ-2 兩種類型 (表 2)。

由於上述兩種木材防腐劑不僅防腐效果佳、施工便利，且較不影響木材的外觀性質，因此廣受業者及消費者喜愛。然而，近年來許多研究報告指出，CCA 組成成分中之鉻、砷及銅為人體致癌與環境重金屬污

染之主要因子 (Hall, 2002; Katz and Salem, 2005)。有鑑於此，瑞士與德國等歐盟國家早已明令禁用 CCA，且密切注意廢棄的 CCA 處理材對環境及人體之影響 (Clausen, 2004a; 2004b; Helsen and Bulck, 2005; Hingston *et al.*, 2006; Kim and Townsend, 2007; Preston, 2000; Saxe *et al.*, 2007; Schultz *et al.*, 2007)。雖然現階段 CCA 處理材大多已被限制或禁止使用，但目前替代性的防腐藥劑主要仍以銅系木材防腐劑為主，對環境及人體仍會造成威脅及危害。因此，目前世界各國均積極尋求有效且對環境友善的木材防腐劑，以降低其對環境與生態之衝擊 (Gosselink *et al.*, 2004; Hill *et al.*, 2004; Kazi and Cooper, 2002; Palanti and Susco, 2004; Przewloka *et al.*, 2007; Tsunoda, 2001; Voda *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007; Zabielska-Matejuk and

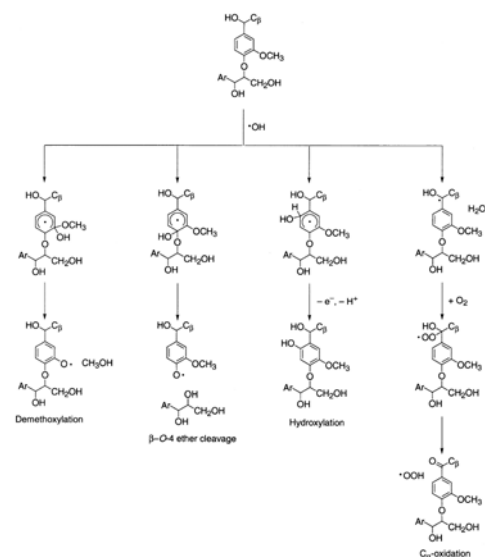


圖 4 自由基降解木質素之機制 (Hammel *et al.*, 2002)

Fig. 4 The mechanism of lignin biodegradation by free radicals

表 1 鉻化砷酸銅系木材防腐劑之類別 (CNS 14495)

Table 1 The types of wood preservatives containing chromated copper arsenate

Component	Composition of active ingredients (wt%)				
	CCA-1	CCA-2	CCA-3	CCA-4	CCA-5
Chromium compounds	59~69 (CrO ₃)	33~38 (CrO ₃)	45~51 (CrO ₃)	45.0 (K ₂ Cr ₂ O ₇)	41.0 (K ₂ Cr ₂ O ₇)
Copper compounds	16~21 (CuO)	18~22 (CuO)	17~21 (CuO)	35.0 (CuSO ₄ · 5H ₂ O)	32.6 CuSO ₄ · 5H ₂ O)
Arsenic compounds	15~20 (As ₂ O ₅)	42~48 (As ₂ O ₅)	30~38 (As ₂ O ₅)	20.0 (As ₂ O ₅ · 2H ₂ O)	26.4 (As ₂ O ₅ · 2H ₂ O)

表 2 銅、烷基銨系木材防腐劑之類別 (CNS 14495)

Table 2 The types of wood preservatives containing alkyl ammonium cupric compounds

Component	Composition of active ingredients (wt%)	
	ACQ-1	ACQ-2
Copper compounds ^a	53~59	62~71
BKC ^b	41~47	-
DDAC ^c	-	29~38

^a Calculated as CuO

^b N-alkyl benzyl dimethyl ammonium chloride

^c Didecyl dimethyl ammonium chloride

Czaczyk, 2006)。其中，Mihara 等人 (2005) 比較 *Acacia mangium* 與 *A. auriculiformis* 心材抽出物之抗氧化活性與抗真菌活性後發現，抽出物中具有強的自由基清除能力者，其亦具有較強的抗真菌活性；且當抽出物能有效抑制酵素活性時，亦能有效抑制真菌的生長。因此，近年來木材防腐劑發展的趨勢，除了以殺真菌的途徑防止木材腐朽外，亦有利用抗氧化劑或金屬螯合劑 (Metal chelator) 併用殺菌劑等複方處

理方式進行木材防腐處理。

Schultz 等人 (2004; 2006) 即利用抗氧化劑二丁基羥基甲苯 (Dibutyl hydroxy toluene, BHT) 及殺菌劑 Propiconazole 進行相關試驗，其結果發現，單獨以抗氧化劑 BHT 進行防腐處理者，並不具有防腐之效果；而利用抗氧化劑 BHT 混合殺菌劑 Propiconazole 進行防腐處理者，其對白腐菌 *Trametes versicolor* 及褐腐菌 *Gloeophyllum trabeum* 之抗性均具有明顯之提升。此外，Schultz 與 Nicholas (2000, 2002) 利用殺菌劑 Propiconazole 與抗氧化劑 BHT 及金屬螯合劑 Phenanthroline 共添加的方式進行防腐處理，以評估木材之耐腐朽性質。其試驗結果亦顯示，於殺菌劑中添加抗氧化劑或金屬螯合劑，除可減少殺真菌之木材防腐劑的使用量之外，亦能有效降低試材之重量損失，提升試材之耐腐朽性能。

誠如上述所言，早期木材防腐劑主要係透過殺真菌的途徑達到木材防腐之效果，然而隨著人們對木材腐朽菌降解機制的瞭解，近年來木材防腐劑發展的趨勢，除了以殺真菌的方式防止木材腐朽之外，

亦可透過酵素活性抑制、自由基捕捉與金屬螯合等策略，達到木材保存之目的。而藉由抗氧化劑捕捉木材腐朽菌所產生之自由基，或是以金屬螯合劑阻斷芬頓反應的進行，其不僅具有防止木材腐朽的可能性，且對人體及環境亦不會造成太大的負擔。此外，目前已知部分木材之二次代謝產物具有殺真菌、自由基捕捉及金屬螯合等活性，因此，若能利用木材之二次代謝產物作為木材防腐劑，透過上述幾種真菌降解機制之抑制，應能有效達到木材防腐之效果，同時並兼具環境友善之需求。

V、結語與展望

隨著科技文明的進步，人們對事物的要求也有逐漸改變，而木材防腐劑的發展，亦從僅要求效能的雜酚油、五氯酚及瀝青，演變成兼具效能及外觀品質的 CCA 及其他銅系木材防腐劑。近年來，更隨著木材腐朽機制的的神秘面紗逐漸被揭開，使得木材防腐劑的發展不再僅侷限於毒殺單一方式，腐朽菌中酵素活性的抑制或自由基的捕捉亦為當前發展的方向之一。然而，目前利用抑制機制開發木材防腐劑的研究仍十分有限，因此期望透過本文之介紹，使人們對此研究領域有更深入的了解。

VI、參考文獻

中華民國國家標準 CNS 14495 (2000) 木材防腐劑。經濟部標準檢驗局。

Blanchette, R. A., E. W. Krueger, J. E. Haight, M. Akhtar and D. E. Akin (1996) Cell wall alterations in loblolly pine wood

decayed by the white-rot fungus *Ceriporiopsis subvermispora*. *Journal of Biotechnology* 53: 203–213.

Clausen, C. (2004a) Improving the two-step remediation process for CCA-treated wood: Part I. Evaluating oxalic acid extraction. *Waste Management* 24: 401–405.

Clausen, C. (2004b) Improving the two-step remediation process for CCA-treated wood: Part II. Evaluating bacterial nutrient sources. *Waste Management* 24: 407–411.

Eaton, R. A. and M. D. C. Hale (1993) Chemistry and biochemistry of decay. *In: Wood: Decay, Pests and Protection*. Chapman & Hall, London. pp. 160–186.

Forest Products Laboratory (1999) *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Goodell, B., J. Jellison, J. Liu, G. Daniel, A. Paszczynski and F. Fekete (1997) Low molecular weight chelators and phenolic compounds isolated from wood decay fungi and their role in the fungal biodegradation of wood. *Journal of Biotechnology* 53: 133–162.

Gosselink, R. J. A., A. M. A. Krosse, J. C. van der Putten, J. C. van der Kolk, B. de Klerk-Engels and J. E. G. van Dam (2004) Wood preservation by low-temperature carbonisation. *Industrial Crops and Products* 19: 3–12.

Hall, A. H. (2002) Chronic arsenic poi-

- soning. *Toxicology Letters* 128: 69–72.
- Hammel, K. E., A. N. Kapich, K. A. Jensen Jr. and Z. C. Ryan (2002) Reactive oxygen species as agents of wood decay by fungi. *Enzyme and Microbial Technology* 30: 445–453.
- Helsen, L. and E. Van den Bulck (2005) Review of disposal technologies for chromated copper arsenate (CCA) treated wood waste, with detailed analyses of thermochemical conversion processes. *Environmental Pollution* 134: 301–314.
- Hill, C. A. S., M. R. M. Farahani and M. D. C. Hale (2004) The use of organoalkoxysilane coupling agents for wood preservation. *Holzforschung* 58: 316–325.
- Hingston, J. A., R. J. Murphy and J. N. Lester (2006) Monitoring losses of copper based wood preservatives in the Thames estuary. *Environmental Pollution* 143: 367–375.
- Jellison, J., J. Connolly, B. Goodell, B. Doyle, B. Illman, F. Fekete and A. Ostrofsky (1997) The role of cations in the biodegradation of wood by the brown rot fungi. *Int Biodeterior Biodegradation* 39: 165–79.
- Katz, S. A. and H. Salem (2005) Chemistry and toxicology of building timbers pressure-treated with chromated copper arsenate: a review. *Journal of Applied Toxicology* 25: 1–7.
- Kazi, F. K. M. and P. A. Cooper (2002) Rapid-extraction oxidation process to recover and reuse copper chromium and arsenic from industrial wood preservative sludge. *Waste Management* 22: 293–301.
- Kim, H. and T. Townsend (2007) Evaluation of pressure treated wood impact on landfill waste decomposition using a methane yield assay. *Chemosphere* 67: 1252–1257.
- Kirk, T. K., R. Ibach, M. D. Mozuch, A. H. Conner and T. L. Highley (1991) Characteristics of cotton cellulose depolymerized by a brown-rot fungus, by acid, or by chemical oxidants. *Holzfor-schung* 45: 239–244.
- Martínez, Á. T., M. S. Francisco, J. Ruiz-Dueñas, P. Ferreira, S. Camarero, F. Guillén, M. J. Martínez, A. Gutiérrez and J. C. del Río (2005) Biodegradation of lignocellulosics: microbial, chemical, and enzymatic aspects of the fungal attack of lignin. *International Microbiology* 8: 195–204.
- Mihara, R., K. M. Barry, C. L. Mohammed and T. U. Mitsunaga (2005) Comparison of antifungal and antioxidant activities of *Acacia mangium* and *A. auriculiformis* heartwood extracts. *Journal of Chemical Ecology* 31: 789–804.
- Palanti, S. and D. Susco (2004) A new wood preservative based on heated oil treatment combined with triazole fungicides developed for above-ground conditions. *Int Biodeterior Biodegradation* 54: 337–342.
- Pérez, J., J. Muñoz-Dorado, T. de la Rubia and J. Martínez (2002) Biodegradation

- and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International Microbiology* 5: 53–63.
- Preston, A. F. (2000) Wood preservation: trends of today that will influence the industry tomorrow. *Forest Products Journal* 50:13–19.
- Przewloka, S. R., B. Ahmed, P. Vinden, J. French and J. A. Hannl (2007) Biodegradation of treated *Pinus radiata* timber by Australian decay fungi and the termite *Coptotermes acinaciformis* in laboratory bioassays and field conditions. *Holzfor-schung* 61: 207–213.
- Saxe, J. K., E. J. Wannamaker, S. W. Conklin, T. F. Shupe and B. D. Beck (2007) Evaluating landfill disposal of chromated copper arsenate (CCA) treated wood and potential effects on groundwater: Evidence from Florida. *Chemosphere* 66: 496–504.
- Schultz, T. P. and D. D. Nicholas (2000) Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry* 54: 47–52.
- Schultz, T. P. and D. D. Nicholas (2002) Development of environmentally-benign wood preservatives based on the combination of organic biocides with antioxidants and metal chelators. *Phytochemistry* 61: 555–560.
- Schultz, T. P., D. D. Nicholas and A. F. Preston (2007) A brief review of the past, present and future of wood preservation. *Pest Management Science* 63: 784–788.
- Schultz, T. P., D. D. Nicholas and M. L. Prewitt (2004) Environmentally-benign wood preservatives based on organic biocide: antioxidant combination: Ground-contact efficacy ratings and BHT depletion after four years of exposure. *Holzfor-schung* 58: 300–304.
- Schultz, T. P., D. D. Nicholas, F. T. Kirker, M. L. Prewitt and S. V. Diehl (2006) Effect of the antioxidant BHT on repletion of chlorothalonil in treated wood after 54 months of ground-contact exposure. *Int Biodeterior Biodegradation* 57: 45–50.
- Suzuki, M. R., C. G. Hunt, C. J. Houtman, Z. D. Dalebroux and K. E. Hammel (2006) Fungal hydroquinones contribute to brown rot of wood. *Environmental Microbiology* 8: 2214–2223.
- Tsunoda, K. (2001) Preservative properties of vapor-boron-treated wood and wood-based composites. *Journal of Wood Science* 47: 149–153.
- USDA (2007) *The Encyclopedia of Wood*. Madison, WI: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
- Voda, K., B. Boh, M. Vrtačnik and F. Pohlevenb (2003) Effect of the antifungal activity of oxygenated aromatic essential oil compounds on the white-rot *Trametes versicolor* and the brown-rot *Coniophora puteana*. *Int Biodeterior Biodegradation* 51: 51–59.

