

宜蘭地區自然通風建築木質材料霉菌生長之初步評估

Preliminary Evaluation of Mold Growth for Wooden Material of Natural Ventilated Buildings in Ilan

國立宜蘭大學
土木工程學系副教授

喻 新

Hsin Yu

國立宜蘭大學
土木工程學系助理教授

歐陽慧濤

Huei-Tau Ouyang

國立宜蘭大學
土木工程學系碩士班研究生

盧志晃

Chin-Huang Lu

摘 要

全世界的建築物均有潮濕損害的問題，也容易形成霉菌污染影響人體健康，宜蘭地區的全年相對濕度是全省最高的區域，若分析 2004 年每小時之氣象資料顯示除夏季高溫期相對濕度較低外，其餘時間相對濕度多超過 80%，且以 1 月底 2 月初最潮濕。本研究依據前人在實驗室對木材所作霉菌生長之實驗結果及數值模式、評估指標等方法，對宜蘭地區自然通風建築木質材料的霉菌生長情形進行評估，結果得到霉菌生長臨界相對濕度、適合霉菌生長時期比例、及最大可能霉菌生長指標的一年期間變化情形均受大氣環境之影響，即夏季 7 月至 9 月不適合霉菌生長，而在 1 月底 2 月初最適合霉菌生長。宜蘭地區一年間的霉菌生長情形依起始條件不同而有類似的變化情形，若能在一年中清理材料表面，則可明顯降低霉菌生長指標。依長期氣象資料所得到月份別之霉菌生長情形亦與一年期間的分析結果類似。未來將以本土建築材料及型式進行霉菌生長評估之研究，以建立本土化霉菌生長評估模式。

關鍵詞：自然通風，木質材料，霉菌生長。

ABSTRACT

All buildings of the world have problems of water damage that causes mold pollution and health risk in indoor environment. The annual relative humidity of Ilan area is the highest in Taiwan. Except the relative humidity of summer is in lower grade, relative humidity of the rest of the year is high and the highest value is at mid-winter according to the hourly meteorological data of 2004. We evaluated the mold growth of wooden material in natural ventilated buildings by the experimental results of mold

growth in wooden materials with mathematical models from previous researches. The annual variation of the critical relative humidity of mold growth, the time proportion of favorable condition for mold growth, the largest possible mold growth are affected by the atmospheric environment. It is showed that the period of unfavorable condition for mold growth is July to September at summer, whereas the most favorable condition happened at mid-winter within a year. The annual variation of mold growth results in a similar tendency although based on different initial conditions of mold growth. The annual mold growth is reduced if the surface of wooden materials is cleaned during the period of mold growth. The variation of mold growth from the monthly data of meteorology is similar as the variation of annual mold growth based on the hourly meteorological data. Future research will focus on the native building materials and construction types to derive the evaluation method of mold growth in local area.

Keywords: Natural ventilated buildings, Wooden materials, Mold growth.

一、前言

全世界的建築物包括住宅、學校、辦公大樓及醫院等均有潮濕損害(moisture damage)的問題。估計有潮濕問題的建築物在芬蘭佔 40%至 80%、美國約 44%、英國約 30%、在台灣約佔 47%至 73% (Li and Hsu, 1997; Nevalainen et al., 1998; Rautiala, 2004)。在芬蘭則約有 55%的獨棟住宅及 42%的公寓經評估後需要維修(Neva- lainen et al., 1998; Rautiala, 2004)。台灣則缺少此方面之調查評估，但是推測應與芬蘭之比率相當。

建築物的潮濕來源可分為四大類(Rautiala, 2004)：

1. 室外來源包括雨水從建築構造或地面水分上升所產生之滲漏(leakage)。
2. 人類及其活動，例如洗澡、炊事以及洗濯衣物等可能產生水分之來源。
3. 建築來源包括從建築材料或結構所產生水分。
4. 意外事件包括管線漏水、淹水等。

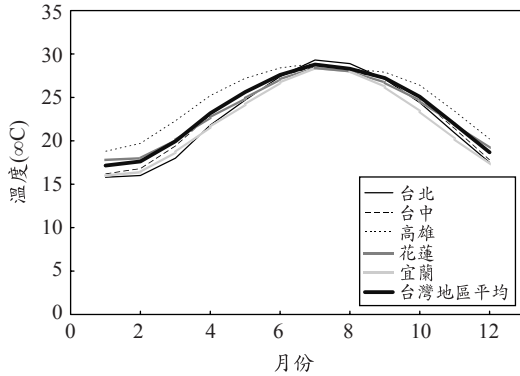
上述的潮溼來源若與建築物的結構缺陷結合，使建築物極易產生水害問題。

影響微生物生長因素包括基質組成、酸鹼(pH)值、氧氣的含量、營養、水分及溫度(Rautiala, 2004)，但是對室內環境(例如地下室空間)而言，

影響霉菌生長的最重要因素為溫度、溼度、養分及酸鹼(pH)值(Airaksinen, 2003)。

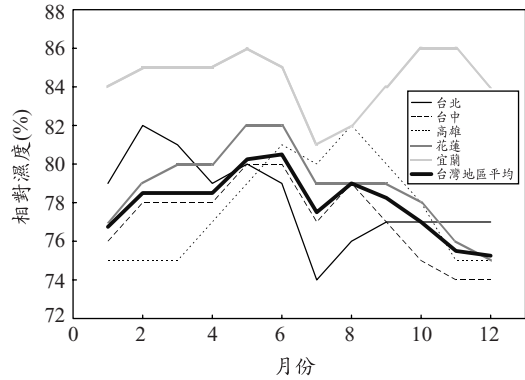
因為真菌(fungi)及感光放線菌(action-mycetes)在極大酸鹼度範圍均可生長，故酸鹼度對其生長僅有輕微影響(Rautiala, 2004)。只有在新澆置的混凝土表面，酸鹼值會成為霉菌生長的限制因素(Airaksinen, 2003)。氧氣及營養對微生物生長而言並非限制條件，因為在建築物內有充分的氧氣，建材表面的灰塵及碎屑則提供微生物生長的營養，也可使微生物在極少水分下生長(Airaksinen, 2003; Chang et al., 1995)。微生物需要適宜的溫度範圍才會生長，對適溫性(mesophilic)微生物的適宜範圍為 15°C至 37°C，而適熱性(thermophilic)微生物則可達 20°C至 45°C；部分適熱性病毒及真菌可忍受 50°C至 55°C或更高之溫度(Rautiala, 2004)。因為酸鹼度、養分及溫度在一般建築均適合霉菌生長，所以水分成為建材表面霉菌生長主要的控制因素。

在受潮濕損害的建材上容易導致微生物生長，包括霉菌、腐爛產生的真菌、酵母菌以及病毒。在建材表面的霉菌及其菌絲可能從微生物的生長而轉化為氣懸生物氣膠，進而會引起吸入性呼吸道疾病或皮膚接觸性疾病。雖然對產生的方法與機制並不明朗，但是許多研究已經證實建材潮濕以及霉菌生長會導致人類健康問題。暴露



資料來源：中央氣象局資訊服務網站

圖 1 台灣地區全年溫度變化圖



資料來源：中央氣象局資訊服務網站

圖 2 台灣地區全年相對濕度變化圖

在霉菌污染的環境中會引起呼吸道疾病例如咳嗽、氣喘，以及一般性疾病例如頭痛、疲倦等。建材上生長之霉菌亦可能引起過敏、毒性或者成爲機會感染源 (Rautiala, 2004)。

台灣的氣候環境爲高溫多溼的溼熱型氣候，大部分的建築物是以自然通風爲主，所以室內氣候環境及空氣品質與室外環境息息相關。台灣全島全年溫度變化依據中央氣象局 1971 年至 2000 年之統計資料 (中央氣象局資訊服務網站) 均有相同趨勢而相差有限 (圖 1)，原則上呈北低南高之情形；宜蘭的地理位置與台北相同，因位於台灣北部所以全年氣溫較低。台灣全年的溼度變化在夏季高溫期 (5 月至 9 月) 呈現南高北低之趨勢 (圖 2)，但其他季節北部則較潮溼，南部在 1 至 5 月份最乾燥，9 至 12 月則以中部最爲乾燥；宜蘭地區全年均較台灣各地區的溼度高，除了夏季 6 月至 9 月外其餘季節相對溼度均在 84% 以上，潮溼高溫的氣候提供霉菌適宜的生長環境。

消除室內霉菌的最佳方式爲改善霉菌產生及繁殖的建築物理環境，所以事先預測建築材料在何種環境、結構及氣候狀況下可能產生霉菌的生長爲最重要之建築環境設計方法。台灣地區因爲氣候潮溼，水害建築物的比率可達 47% 至 73% (Li and Hsu, 1997)，受建築物潮溼以及霉菌生長而引起的各種呼吸道疾病過敏反應以及一般性症狀也不在少數，所以室內霉菌生長與暴露評

估的研究有其必要性，以建立評估潮溼或水害建築霉菌曝露及健康危害風險的基本資料。本研究之目的即對溼熱氣候環境下，以台灣地區最常見之自然通風建築物爲對象，探討室內環境之木質建築材料受空氣溫度及相對溼度之變化影響，利用評估模式預測霉菌生長與溫溼度環境之關係，並據此評估霉菌暴露之可能性。

二、文獻回顧

Pasanen et al. (2000a) 收集 18 棟水害建築中 122 個材料樣本，並分爲水害進行中之材料及水害後已乾燥一段時間之材料兩組，希望瞭解材料的相對溼度或含水量與可培養真菌、感光放線菌、總孢子濃度或真菌種類在不同材料及不同水害時間之關係。結果發現木材、木製品及石膏板等之總孢子濃度與可培養真菌濃度相符合 (相關係數 $r > 0.47$)。在木材及隔熱材，總孢子或可培養真菌與材料相對溼度相關性高 (相關係數 $r > 0.79$)，但是與含水量相關性低 (相關係數 $r < 0.45$)。在水害進行中之材料微生物濃度與材料相對溼度相關 (相關係數 $r > 0.51$)，但是與在水害後已乾燥一段時間的材料則無關。真菌種類在水害進行中之材料分布極廣，但是在水害後已乾燥一段時間的材料，則以 *Penicillia* 及 yeasts 爲主要種類。

Pasanen et al. (2000b) 亦在實驗室調查真菌在 3 種建築材料的生長及變化情形。實驗材料取

自維修中建築，在實驗中不接種真菌並作四種不同處理（每種約 4 週至 8 週），包括毛細水分吸附、在相對溼度 30% 中乾燥、水分凝結及在相對溼度 50% 中乾燥。處理後材料每隔 1 至 2 週間量測其含水量、平衡相對溼度及可培養真菌、感光放線菌、總孢子數濃度。結果發現材料在毛細水分吸附時，真菌在木製材料含水量超過 20% 時生長快速且數量極大。但是在石膏板因為其為石膏板及面層紙的複合物，所以無法得到真菌污染的臨界值。快速乾燥（相對溼度 30%）可減少真菌生長種類，但是在相對溼度 50% 中乾燥則對真菌生長僅有輕微影響。

Andersson et al. (1997) 對水害建築的材料之細菌、霉菌及毒性物質作分析，發現在材料生長之各種微生物的種類及濃度，例如在水害建築的主要植株的種類及濃度為 *Stachybotrys chartarum* (10^3 至 10^5 visible conidia/cm²)，*Penicillium* 及 *Aspergillus* (10^4 CFU/mg)，gram-negative bacteria (10^4 CFU/mg)，以及 mycobacteria (10^3 CFU/mg)。

Chang et al. (1995) 在靜態實驗箱評估磁磚上的真菌生長（包括 *Penicillium* 及 *Aspergillus* spp）潛力，結果發現新材料可在相對溼度降至 85% 及含水量高於 2.2% 時支持真菌生長，且舊材料比新材料更容易生長真菌。潮溼材料在相對溼度 70% 的實驗箱中慢慢乾燥，但是只要溼度合宜真菌仍會快速繁殖。若潮溼材料快速且完全乾燥，則可限制真菌生長。

Clarke et al. (1999) 及 Rowan et al. (1999) 依據文獻資料，建立六個種類霉菌在建築材料表面受到溫度及相對溼度綜合影響下的生長限制曲線圖。六個種類之霉菌包括高度適乾性、適乾性、輕度適乾性、輕度適溼性、適溼性及高度適溼性，在各類曲線以下的溼度組合為不適合該類真菌生長，反之則適合生長，曲線並可以三次多項式方程式表示。這些數學式與建築能源及環境模擬模式（例如 ESP-r）結合，可以提供預測建築受到霉菌污染的可能性之技術。首先在特定區位及氣候環境下，可以利用建築環境模式模擬空間的溼度變化情形並與實際量測值做一比較；其次綜合空間的溼度變化情形以及霉菌生

長模式，可以歸納出霉菌在該區域生長的種類等情況。

有關木材表面的霉菌生長及模擬已有許多研究發表 (Viitanen, 1997; Hukka and Viitanen, 1999; Viitanen et al., 2000)，主要樹種是松木 (pine) 及雲杉 (spruce)，表面處理則包括原始乾燥 (original kiln-dried) 或再鋸 (resawn) 的表面。實驗時將樣本置於塑膠箱或實驗生長箱以控制其溼度，並接種典型的木材霉菌，在固定及變動的溼度環境下，以簡易的肉眼及顯微鏡評估霉菌生長情形及覆蓋面積為指標，建立霉菌在木材表面生長的數學模式。

依據 Li and Hsu (1997) 調查台北地區的氣懸真菌過敏性與居住特徵之研究，以問卷調查 46 戶氣喘兒童家庭、20 戶遺傳性過敏 (atopik) 兒童家庭以及 26 戶無症狀兒童家庭合計 92 戶住宅是否有潮濕 (dampness) 情形，包括產生霉菌、有固定霉味，建築受到水害或漏水、以及淹水等狀況，結果 92 戶中有 75% 的住宅顯示潮濕情形，在有遺傳性過敏幼童的 20 個家庭中，住宅潮濕的情形高達 85%。

在台灣南部地區相關研究則顯示 (Wu et al., 2000)，若以都市化顯著且氣喘盛行的台南市區 59 戶以及台南市郊氣喘最不盛行的 17 戶為樣本，發現住宅有水害 (water damage) 產生的情形較低，分別為都市 8.2%，以及市郊 9.6%，但是在建築表面發現霉菌的比率在都市為 31.2%，市郊則為 21.2%。

台北地區學童的氣喘盛行率在 1974 年為 1.3%，1985 年為 5.1% (Hsieh and Shen, 1988)，1992 年則成長為 5.8%，其中塵與真菌是其主要的過敏源。此外，超過 45% 的氣喘兒童對霉菌會有過敏反應（例如麴菌屬 *Aspergillus*，芽枝黴菌屬 *Cladosporium*，以及青黴菌 *Penicillium*）(Li and Hsu, 1997)。

在許多研究顯示兒童居住在潮濕建築，將會使呼吸道疾病更為盛行。在亞熱帶氣候的台灣，建築是否潮濕成為呼吸道疾病的強烈指標，在潮濕或有霉菌的建築內生活即會有較高的呼吸道疾病流行 (Li and Hsu, 1997)。

由前述資料顯示台灣從北至南，水害建築與霉菌生長受氣溫及相對溼度的影響而有不同程度之嚴重性，但是卻都成為污染室內空氣品質的來源，也會影響室內活動者或居住者的健康。但是因為它的影響進程是漸近的而非立即的，是緩慢的而非快速的，所以在台灣的群眾至今仍未能體認到潮濕與發霉的建築是呼吸道疾病的潛在危害因素（Li and Hsu, 1997）。因此，瞭解建築受潮濕損害的情形與霉菌生長的狀況，以進而避免霉菌污染室內空氣以及危害人體健康，是值得研究之課題。

三、評估模式

1. 霉菌生長評估指標

本研究所採用霉菌生長評估模式是依據 Hukka and Viitanen (1999) 所建立霉菌在木材表面生長之評估指標，評估模式建立之方式包括以顯微鏡觀察或以肉眼觀察；評估指標說明如下：

- 0 表示沒有霉菌生長
- 1 表示可用顯微鏡看到一些霉菌開始生長
- 2 表示可用顯微鏡看到輕度霉菌生長（覆蓋面積超過總暴露面積的 10%）
- 3 表示可用肉眼看到一些霉菌開始生長
- 4 表示可用肉眼看到覆蓋面積超過 10% 的霉菌生長
- 5 表示可用肉眼看到覆蓋面積超過 50% 的霉菌生長
- 6 表示可用肉眼看到覆蓋面積達到 100% 的霉菌生長

2. 霉菌生長之臨界相對溼度

Hukka and Viitanen (1999) 依據不同溫溼度情形霉菌生長實驗建立霉菌生長之臨界相對溼度數學模式如下：

$$RH_{crit} = -0.00267T^3 + 0.160T^2 - 3.13T + 100.0 \quad T \leq 20^\circ C$$

$$RH_{crit} = 80\% \quad T \leq 20^\circ C \dots (1)$$

其中 RH_{crit} ：霉菌生長臨界相對溼度[%]

T ：溫度[°C]

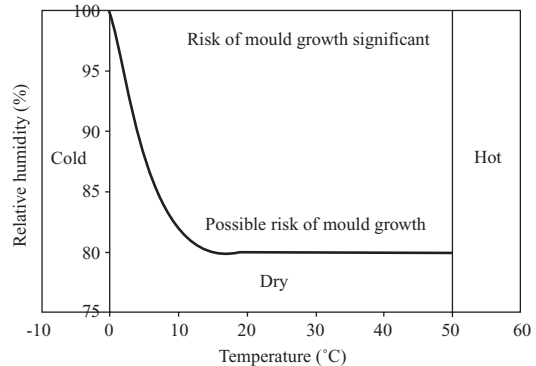


圖 3 木質材料適合霉菌生長起始條件之數學模式圖

其曲線如圖 3 所示，原則上溫度低於 0°C 或高於 50°C 時將不會有霉菌產生，溫度愈低相對溼度需愈高才能使霉菌生長；但是仍有少數真菌可在此溫度範圍或極低相對溼度生長 (Airaksinen, 2003)。

3. 最大可能霉菌生長

霉菌的最大可能生長極限是依據在固定溫溼度環境下，霉菌生長的最大可能狀況。霉菌從起始條件開始生長後，不必然會生長至視覺可見霉菌（visually detectable mold）的狀況為止，而是必須依喜好的溫溼度環境及暴露時間而定（Viitanen and Bjurman, 1995）。若建材置放於飽和相對溼度環境下，不論溫度為何（介於 0°C 至 50°C 之間），則霉菌最大生長情形可覆蓋至整個建材表面。在霉菌生長指標為 0 及 6 的兩種極限狀況之間，最大可能霉菌生長指標可依下列公式而得到 (Hukka and Viitanen, 1999)：

$$M_{max} = 1 + 7 \frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} - 2 \left(\frac{RH_{crit} - RH}{RH_{crit} - 100} \right)^2 \dots (2)$$

其中 M_{max} ：最大可能霉菌生長指標

RH ：相對溼度[%]

4. 霉菌在適合環境的生長速率

霉菌生長速率是依據實驗室的溫溼度環境與霉菌生長指標關連的結果，並以數學模式來描述兩者之關係，因為霉菌生長指標是以顯微鏡或肉眼觀測的結果，所以數學模式並未考慮任何生

物性的關連(Hukka and Viitanen, 1999)。Viitanen (1997)建立木質材料在適宜的溫溼度環境中，霉菌生長至起始評估指標 (M=1) 所需時間的數學模式如下：

$$t_m = \exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02) \quad \dots(3)$$

其中 t_m ：霉菌在木質材料達到有一些霉菌開始生長(M=1)所需要的反應時間[週]

W：木材種類；松木邊材=0(Pine sapwood)、雲杉邊材=1 (Spruce sapwood)

SQ：表面品質；鋸木表面(resawn surface)或一般養分含量= 0，爐乾表面(kiln-dried surface)或較高養分含量 = 1。

在達到起始評估指標之前 (M<1) 的霉菌生長速率為：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7(\exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02))} \quad \dots\dots\dots(4)$$

其中 M：霉菌生長指標

t：霉菌生長時間

但是在霉菌生長超過起始評估指標後，上述方程式已不適用，所以 Viitanen (1997)提出另一達到可見霉菌評估指標 (M=3) 所需時間的迴歸模式：

$$t_v = \exp(-0.74 \ln T - 12.72 \ln RH + 0.06W + 61.50) \quad \dots\dots\dots(5)$$

其中 t_v ：霉菌在木質材料生長至肉眼可見情形 (M=3)所需要的反應時間[週]

霉菌在適合環境的完整生長模式可將前述方程式合併而成為：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{K_1 K_2 \cdot 7(\exp(-0.68 \ln T - 13.9 \ln RH + 0.14W - 0.33SQ + 66.02))} \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$其中 K_1 = \begin{cases} 1 & M < 1 \\ 2 & \text{當} \\ t_v / t_m - 1 & M > 1 \end{cases}$$

$$K_2 = 1 - \exp(2.3M - M_{max})$$

5. 霉菌在不適合環境的生長速率

依據 Viitanen(1997)的實驗，在不適合霉菌生長的狀況與適合霉菌生長狀況互相交錯的情形下，霉菌生長會受到影響。在乾燥時間起始的6小時內，霉菌生長會減少，但是在6小時至24小時之間，此一減少並不明顯，直到乾燥時間超過24小時後，霉菌生長才又明顯減少。從乾燥起始的時間 (t-t₁) 起算的霉菌生長數學模式表示如下：

$$\frac{dM}{dt} = \begin{cases} -0.032 & t - t_1 \leq 6h \\ 0 & \text{當 } 6h \leq t - t_1 \leq 24h \quad \dots\dots(7) \\ -0.016 & t - t_1 \geq 24h \end{cases}$$

其中 t-t₁：從乾燥開始時間的時間歷程[小時]

四、結果與討論

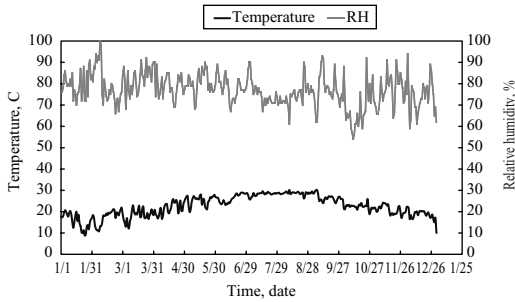
1. 溫溼度變化

根據中央氣象局宜蘭站 2004 年一整年的氣象資料顯示(圖 4)宜蘭地區的日平均氣溫介於 10℃至 30℃之間，冬季的 1 月底 2 月初則可低至 10℃，2、3 月時氣溫逐漸上升至夏季的 30℃，6 月至 8 月氣溫維持在 30℃左右，9 月起氣溫逐漸下降，12 月底時氣溫亦可降至 10℃。全年日平均相對濕度的變化約在 60%至 90%之間，僅有少數日數相對濕度超過 90%或低於 60%，其中 1 月底至 2 月初為高溼期，7、8 月因氣溫高，相對溼度可維持在 70%或更低，10 月至 12 月有較多日數相對溼度低於 80%。

2. 霉菌生長臨界環境

依據 Hukka and Viitanen (1999)的霉菌生長臨界相對濕度之數學模式以及宜蘭地區 2004 年溫溼度變化情形，可以建立霉菌生長臨界相對溼度如圖 5 所示。由圖可知宜蘭地區在 2004 年絕大多數時期的臨界相對溼度約為 80%，僅在冬季時期，因氣溫降至 20℃以下時，霉菌生長所需的臨界相對溼度較高，但最高僅達 83%，變化有限。

由霉菌生長臨界相對溼度與每小時大氣相



資料來源：中央氣象局宜蘭站

圖 4 宜蘭地區 2004 年日平均溫濕度變化情形

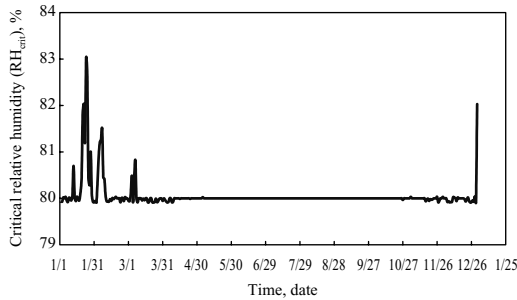


圖 5 宜蘭地區 2004 年霉菌生長臨界相對濕度變化情形

對溼度的比較，可以瞭解宜蘭地區在一年中每日適合霉菌生長時期之比例(圖 6)。此一比例與相對濕度是否超過臨界相對濕度成比例，且在冬季 1 月底 2 月初，3 月底及 5 月梅雨季，以及 11 月初冬均較高，表示適合霉菌生長時間較多，在 7、8 月夏季則較低，亦較不適合霉菌生長。

3. 最大可能霉菌生長

依據宜蘭地區 2004 年霉菌生長的臨界相對溼度可以建立宜蘭地區最大可能霉菌生長狀況指標的變化情形如圖 7 所示。此一指標與相對溼度呈比例變化，宜蘭地區 2004 年 1 月底 2 月初為高溼期，最大可能霉菌生長的指標在 2 月份亦多高出指標 4 而可達指標 6 (即 100%的面積因霉菌生長而被覆蓋)。2 月底，7、8 月及 10 月至 12 月因相對溼度多低於 80%，使得最大可能霉菌生長指標在低溼期降至 0 (表示沒有霉菌生長)。

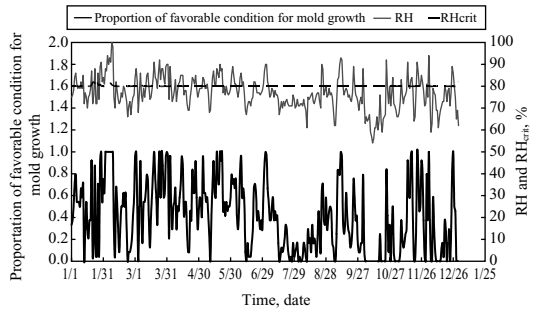


圖 6 宜蘭地區 2004 年每日適合霉菌生長之比例

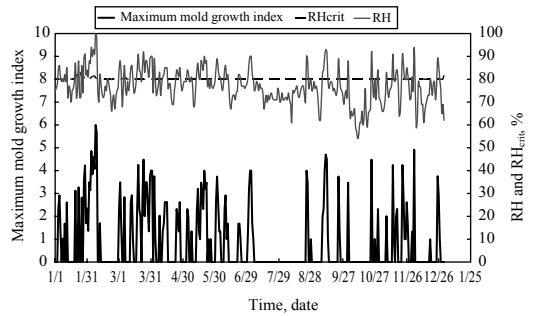


圖 7 宜蘭地區 2004 年最大可能霉菌生長指標

4. 一年期霉菌生長評估

依據 Hukka and Viitanen (1999)所建立的霉菌生長數學模式及評估指標可以推估宜蘭地區自然通風建築木質材料霉菌生長的情形如圖 8 所示。其中霉菌的起始生長情形分別定為指標 0、3 及 6，以瞭解不同起始條件的霉菌生長狀況。Hukka and Viitanen (1999)將霉菌生長分為適合及不適合霉菌生長的環境而分別建立其數學模式，若溫度介於 0°C 至 50°C，相對溼度在臨界值以上即適合霉菌的生長，否則即不適合霉菌生長。但是若霉菌的生長現況已超過霉菌生長的最大可能指標，則即使霉菌在適合生長的狀況下，霉菌生長指標應不可能繼續增加，故在本研究視為不適合的環境生長，而依不適合霉菌生長情形計算其生長速率。

在圖中因為宜蘭地區 2004 年全年氣溫均介於 0°C 至 50°C 之間，所以只要相對溼度低於臨界相對溼度，則霉菌生長指標下降；但是相對溼度高於臨界相對溼度時，須在生長指標尚未達到最大霉菌生長可能指標時，霉菌生長指標才會上

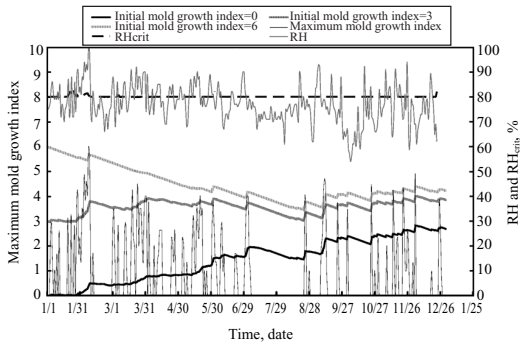


圖 8 宜蘭地區 2004 年霉菌生長變化情形

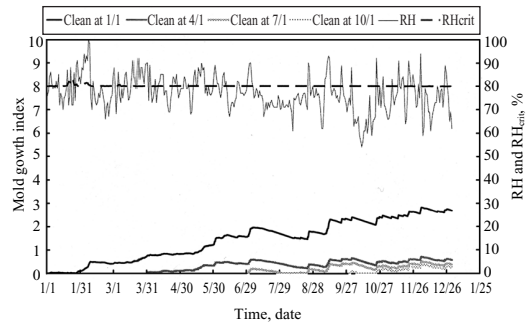


圖 9 宜蘭地區 2004 年木質材料多次清理之霉菌生長變化情形

升；若霉菌生長指標已超過最大可能霉菌生長指標時，霉菌生長指標仍然下降。宜蘭地區的自然通風建築在不同起始條件的霉菌生長情形在經過一年的氣候變化後，霉菌生長指標的變化情形說明如下：起始指標為 0 時，全年指標逐漸增加，指標最終會接近 3，在一年的變化中，溼度愈高，最大可能霉菌生長指標愈高，霉菌生長指標上升愈多，在乾燥不適合生長期，則指標下降；起始指標為 3 時，最終指標約接近 4，其變化情形與前者接近而幅度較小，所以全年霉菌生長情形均在指標 3 至 4 間；起始指標為 6 時，因多超過最大可能霉菌生長指標，所以霉菌生長指標會逐漸下降，至 9 月份時因指標已降至 4 以下，所以霉菌生長指標較有機會上升而與前二者之變化趨勢相似，最終可達 4.2 左右。

由一年期的霉菌生長狀況可知，如果自然通風住宅的木質材料若能在年初完全乾燥(指標 0)，即使在宜蘭地區如此潮溼地區，年終時霉菌的生長仍未達到肉眼可見的程度(指標 3)。若在年初即可見霉菌生長(指標 3)，則全年間可能會看到霉菌生長覆蓋面積在 0%至 10%間徘徊(指標 3 至指標 4)。若年初完全覆蓋霉菌(指標 6)，則最終霉菌的覆蓋面積可能降至稍微超過 10%(指標 4.2)。

5. 一年期多次清理之霉菌生長評估

若在霉菌一年的生長期中，增加清理次數，則霉菌生長的情形將更為縮減(圖 9)。例如年初即將木質材料清理乾燥，使霉菌無法生長(指標

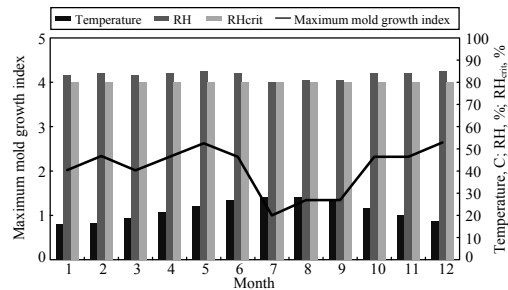


圖 10 宜蘭地區月別霉菌生長評估

0)，並在年中每隔 3 個月(即 4 月 1 日，7 月 1 日、10 月 1 日)分別清理乾燥，則在全年及最終的霉菌生長情形即使用顯微鏡也無法發現(小於指標 1)。若在年中(7 月 1 日)清理一次，則僅在 5、6 月間可以用顯微鏡看到霉菌生長，且覆蓋面積在 10%以下(介於指標 1 至 2 之間)，其他時期均無法用顯微鏡看到霉菌生長(小於指標 1)。

6. 月別霉菌生長評估

若以各月份之平均溫溼度來評估宜蘭地區的霉菌在木質材料的生長情形，依據中央氣象局 1971 年至 2000 年的長期月平均氣象資料可得到宜蘭地區的溫度、相對溼度，臨界相對溼度，及最大可能霉菌生長指標如圖 10 所示。由圖中發現除夏季 7 月至 9 月臨界相對溼度與大氣相對溼度較接近外，其餘月份之大氣相對溼度均明顯超過臨界相對溼度而適合霉菌生長，此一趨勢與最大可能霉菌生長指標亦相同，即夏季 7 月至 9 月最大可能霉菌生長指標約在 1 至 1.5 之間，其餘月份則介於指標 2 至指標 3 之間。

五、結論與建議

本研究的目的是利用實驗室的實驗結果來評估宜蘭地區自然通風建築木質材料的實際霉菌生長情形，各項評估指標與數學模式均是參考前人之研究成果(Hukka and Viitanen, 1999; Viitanen, 1997; Viitanen et al., 2000)，並將其應用於實際環境當中，以評估宜蘭地區的霉菌生長情形。依據中央氣象局的氣象資料，可以瞭解宜蘭地區是屬於高溫多溼的氣候型態，一年中夏季氣溫最高但相對溼度較低，其餘時間相對溼度多超過 80%，且以 1 月底 2 月初最潮溼。

依據溫溼度環境依次建立宜蘭地區之霉菌生長臨界相對溼度，適合霉菌生長時期比例，以及最大可能霉菌生長指標之一年期間變化情形均受大氣環境之影響而變化，即夏季 7 月至 9 月不適合霉菌生長，而在 1 月底 2 月初最適合霉菌生長。宜蘭地區一年間的霉菌生長情形依起始的霉菌生長情形而有不同的變化：起始指標為 0 時，全年霉菌生長逐漸增加至指標 3；起始指標為 3 時，全年霉菌生長情形與前者相近而由指標 3 增加至指標 4；起始指標為 6 時，霉菌生長情形會逐漸下降至指標 4 左右。若能在一年中清理材料表面數次，則可明顯降低霉菌生長指標。若以長期氣象資料為基礎觀察月份別霉菌生長情形，則與一年期之結果相當類似，即在夏季 7 月至 9 月不適合霉菌生長，而在其他月份則較適合霉菌生長。

本研究所以依據之霉菌生長數學模式因係在實驗室完成，所以是否能應用於現場的實際狀況仍有待進一步的驗證，但是應用此一模式仍可評估霉菌生長情形，以判斷在溼熱氣候的自然通風建築木質材料上，是否有霉菌生長的可能性與風險。此外，原有模式在實驗時並未考慮霉菌生長情形已超過最大可能霉菌生長指標的狀況時，霉菌會繼續生長抑或會減少生長至最大可能霉菌生長指標狀況，亦是未來值得探討的重點。台灣地區屬於高溫多溼氣候，且建築物的材料多係鋼筋混凝土構造，與北歐溼冷氣候下木造建築普遍的情況並不相似，如何建構適合本土建築的評估模式是未來努力的方向。

誌謝

本研究承蒙行政院國家科學委員會第四十二屆補助科學與技術人員國外短期研究(補助編號：42150F)補助部分經費才得以順利進行，特此謹致謝忱。

參考文獻

1. 中央氣象局資訊服務網站
<http://www.cwb.gov.tw/V4/index.htm>
2. Airaksinen, M. 2003. Moisture and fungal spore transport in outdoor air-ventilated crawl spaces in a cold climate. Helsinki University of Technology. Department of Mechanical Engineering. Laboratory of Heating, Ventilating and Air Conditioning. Report A7. Finland.
3. Andersson, M.A., Nikulin, M., Koljalg, U., Andersson, M.C., Rainey, F., Reijula, K., Hintikka, E-L. and Salkinoja-Salonen, M. 1997. Bacteria, mold, and toxins in water-damaged building materials. Applied and Environment Microbiology 63:387-393.
4. Chang, J.C.S., Foorde, K.K. and Vanosdell, D.W. 1995. Growth evaluation of fungi (*Penicillium* and *Aspergillus spp.*) on ceiling tiles. Atmospheric Environment 29:2331-2337.
5. Clarke, J. A., Johnstone, C. M., Kelly, N. J., McLean, R. C., Anderson, A. J., Rowan, N. J. and Smith, J. E. 1999. A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. Building and Environment 34:515-521.
6. Hsieh, K. H. and Shen, J. J., 1988. Prevalence of childhood asthma in Taipei, Taiwan, and other Asian Pacific countries. Journal of Asthma 25(2):73-82.
7. Hukka, A. and Viitanen, H. A. 1999. A mathematical model of mould growth on wooden material. Wood Science and Technology 33:475-485.

8. Li, C-S. and Hsu, L-Y. 1997. Airborne fungal allergen in association with residential characteristics in atopic and control children in a subtropical region. *Archives of Environmental Health* 52:72-79.
9. Nevalainen, A., Partanen, P., Jaaskelainen, E., Hyvarinen, A., Koskinen, O., Meklin, T., Vahteristo, M., Koivisto, J. and Husman, T. 1998. Prevalence of moisture problems in Finnish houses. *Indoor Air* 4:45-49
10. Pasanen, A-L., Rautiala, S., Kasanen, J-P., Raunio, P., Rantamaki, J. and Kalliokoski, P. 2000a. The relationship between measured moisture conditions and fungal concentrations in water-damaged building materials. *Indoor Air* 11:111-120.
11. Pasanen, A-L., Kasanen, J-P., Rautiala, S., Ikaheimo, M., Rantamaki, J., Kaariainen, H. and Kalliokoski, P. 2000b. Fungal growth and survival in building materials under fluctuating moisture and temperature conditions. *International Biodeterioration & Biodegradation* 46: 117-127.
12. Rautiala, S. 2004. Microbial exposure in remediation work. Doctoral dissertation, University of Kuopio, Finland.
13. Rowan, N. J., Johnstone, C. M., Mclean, R. C., Anderson, J. G. and Clarke, J. A. 1999. Prediction of toxigenic fungal growth in buildings by using a novel modelling system. *Applied and Environment Microbiology* 65(11): 4814-4821.
14. Viitanen, H. A. and Bjurman, J. 1995. Mold growth on wood at fluctuating humidity conditions. *Material und Organismen* 29(1): 27-46.
15. Viitanen, H. A. 1997. Modelling the time factor in the development of mould fungi-the effect of critical humidity and temperature conditions pine and spruce sapwood. *Holzforschung*. 51:6-14.
16. Viitanen, H. A., Hanhijarvi, A., Hukka, A. and Koskela, K. 2000. Modeling mould growth and decay damages. In: *Proceedings of Healthy Buildings*. 3:341-346. Espoo, Finland, August 6-10, 2000.
17. Wu, P-C., Su, H-J. and Lin, C-Y. 2000. Characteristics of indoor and outdoor airborne fungi at suburban and urban homes in two seasons. *The Science of the Total environment* 253:111-118

收稿日期：民國 94 年 5 月 12 日
 修正日期：民國 94 年 6 月 29 日
 接受日期：民國 94 年 7 月 19 日