

國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

碩士論文

Graduate of Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

壁面貼附材料與空氣負離子對室內

生物氣膠控制效率的影響

Control Effectiveness of Wall Surface Materials
and Negative Air Ion on Indoor Bioaerosols



蕭儀禎

Yi-Chen Hsiao

指導教授：李慧梅 博士

Advisor: Whei-May Lee, Ph.D.

中華民國 101 年 7 月

July, 2012



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

壁面貼附材料與空氣負離子對室內
生物氣膠控制效率的影響

Control Effectiveness of Wall Surface Materials
and Negative Air Ion on Indoor Bioaerosols

本論文係蕭儀禎君(學號 p98541204)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之碩士學位論文，於民國一百零一年七月二十日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

張靜文

張靜文博士
國立台灣大學環境衛生研究所副教授

黃小林

黃小林博士
嘉南藥理科技大學 職業安全衛生系暨
產業安全衛生與防災研究所副教授

楊心豪

楊心豪博士
稻江科技暨管理學院環境暨
職業衛生研究所副教授

指導教授：

李群梅

所長：

張麗復

謝 誌

走過奇蹟般的三年研究所時光，回顧這一切，仍覺得不可思議，許多人的支持鼓勵與幫忙，應是能順利走完這追尋碩士學位之路最主要的原因，其中首要感謝的是指導教授 李慧梅教授的敦促、指導與關懷，每次的個別指導及研究群研討時間，總會透露一些文獻查找及研究修正方向，鼓勵我們主動探索；對論文完成的過程，給予支持、提醒及指正。感謝口試委員張靜文教授、黃小林教授、楊心豪教授，不厭其煩的檢視論文內容，提出諸多寶貴的建議，使得論文內容得以更充實及嚴謹。另亦感謝童心欣教授及其研究群黃馨、皓瑜對菌種鑑定的協助及低溫保存方法的提供。

回想這一路走來的點點滴滴，感謝吳木崑主任、鄭美雪主任於準備入學考試資料時，提供參考資料、協助推薦；入學後，總是關心蠟燭兩頭燒的我，常常釋出有需要可以找他們幫忙的訊息。也感謝王博弘校長及嚴淑珠校長的體諒及首肯，得以日間公假進修方式修習課程，後續並以留職停薪方式專心完成研究。在這艱辛的過程中，有許多同事的幫忙、鼓勵、提供意見甚至提供安親協助，昱至主任、惠珊、靜筠、晶滢、淑美、雅慧、敏玲、淑敏、范姜、警衛先生(張先生、甯先生)、錦華姐、家芄老師、淑玲、思輝.....，由於版面限制，上述個人的事蹟無法一一敘明，但將永誌我心。也有許多默默體諒與配合，或是打照面時關心近況的同事，在此一併致謝。

學業上，富玲、秀雯、榕淵對此領域的專業、求知的態度，及樂於助人的精神，令我受惠良多，也感謝同學相伴及相挺；研究上，感謝研究室前後期成員明俊學長、彥潔學姐，瑾杰、昶哲、安傑、彥鈞、炯文、冠沂，精煉了我操作器械的技術，豐富了原本孤獨的實驗操作過程，在需要你們幫忙的時候，總是二話不說的馬上行動。

最後，感謝家人的包容、體諒與支持，此過程中，你們的辛苦自然不在話下，有錢出錢、有力出力、自力自強，讓我能當不沾鍋，暫免處理家裡大小事務及賺錢養家，有時還得忍受我研究遇到瓶頸時的低氣壓。如今碩士生涯即將圓滿落幕，此榮耀歸於你們！

儀禎

2012年7月

摘要

許多研究證實負離子能控制室內生物氣膠，本研究除運用負離子控制技術外，設計運用聚丙烯不織布做為壁面貼附材料，並附加具殺菌效能之奈米矽片銀於材料上，貼附於內側直徑 38cm，內側柱長 79cm，體積約 90L 之橫向圓柱狀實驗艙，並於氣流入口相對應端設置以不鏽鋼針為電極之空氣負離子產生裝置，電壓設定 3.1KV，電流控制於<0.01mA。藉由材料貼附壁面與否、貼附材料噴附奈米矽片銀與否、負離子產生裝置開啟與否等各種組合，偵測施放於實驗艙中的四種生物氣膠—*E. coli*(細胞體)、*B. subtilis*(孢子體)、*C. famata*(細胞體)、*P. citrinum*(孢子體)的濃度變化狀況。生物氣膠濃度以 SKC Biosampler 採樣，經培養法計算菌落數換算取得。生物氣膠濃度數據另經計算可得控制效率及增進效率並藉以分析比較。

實驗呈現的結果顯示各種處理方式對 *E. coli* 的控制效率依序為僅開啟負離子(29.2%)、僅有聚丙烯不織布貼附材料(23.7%)、布材貼附艙壁搭配負離子(9.7%)、布材噴附奈米矽片銀(7.7%)。布材噴附奈米矽片銀並搭配負離子不具效果，各種處理方式比較可見同壁材有搭配負離子時，效率較差；*B. subtilis* 的控制效率差異較大，僅開啟負離子時效果可達 32.2%，同壁材搭配負離子時，效率較佳，其中，貼附材含矽片銀時，搭配施放負離子，效果可增進 27.0%；*C. famata* 的控制效率在壁面貼有聚丙烯不織布時，無論有無開啟負離子裝置，皆優於未貼附不織布(噴附奈米矽片銀且無開啟負離子裝置時除外)，其中以僅貼附聚丙烯不織布之控制效率最佳，可達 31.4%，其他處理方式效率接近，介於 18.4%~24.1%，僅貼附材含矽片銀無效果，但搭配使用負離子，效率可達 20.4%；*P. citrinum* 控制效率接近，介於 21.3%~41.0%，效果最佳為僅開啟負離子時，各種貼附材料搭配使用負離子裝置時，效果均比僅含貼附材時略降約 5~8%。各種菌種最佳的控制效果仍以僅使用負離子最佳，只有 *C. famata* 明顯不同於其他三者，在僅有壁面聚丙烯不織布環境下控制效果最好。

綜而言之，壁面貼附材質的差異會影響生物氣膠控制效率；奈米矽片銀噴附

於貼附材料，對壁面材質控制生物氣膠增進效率有限；含奈米矽片銀之貼附材料，可配合負離子的施放以增進生物氣膠控制效率(對 *E. coli*、*P. citrinum* 無效)；相同壁面貼附材質，開啟負離子產生裝置與否，會影響生物氣膠控制效率(*E. coli*、*P. citrinum* 會降低，*B. subtilis* 會增高)；負離子對生物氣膠控制效率明顯高於壁面貼附材時，負離子對此壁面材質的控制效率會有所貢獻(*B. subtilis*)；艙內高濃度負離子會影響不同壁面貼附材的控制效率(負電荷累積形成複雜狀況)；生物氣膠特性影響控制效率。

關鍵字：生物氣膠、空氣負離子、奈米矽片銀、壁面貼附材質、控制效率、增進效率



Abstract

It has been proved that negative air ions can control the indoor bioaerosols. In addition to renew this technology, in this study, we designed to use a polypropylene non-woven materials(PP-filter) as a wall attached material, and sprayed the bactericidal material–AgNPs/NSP(silver nanoparticles/nonoscale silicate platelets) onto the PP-filter. The PP-filter(AgNPs/NSP or non-AgNPs/NSP) was applied to the inner surface of a test chamber, and the ionizer was kept at 3.1 kV and <0.01 mA. Four bioaerosols—*Escherichia coli*(*E. coli*), *Bacillus subtilis* , *Candida famata*(*C. famata*), (*B. subtilis*) endospores, and the spores of *Penicillium citrinum*(*P. citrinum*), were used in this study. Bioaerosols were collected by SKC Biosampler and cultured for plate counts. Besides, we calculated the control efficiency and the enhanced efficiency.

This study which investigated the control efficiency of various treatments on *E. coli* in decreasing order is treated with the ionizer alone(29.2%), PP-filter attached materials alone(23.7%), and the PP-filter with negative ions (9.7%), PP-filter with AgNPs/NSP (7.7%). However, PP-filter with AgNPs/NSP and the ionizer used did not raise up the efficiency .The results showed the poor efficiency when the PP-filter (AgNPs/NSP or non-AgNPs/NSP) attached in the chamber with the ionizer. We got the great differences in control efficiency of *B. subtilis*. The results showed the best control efficiency which is about *B. subtilis* up to 32.2% was treated by negative air ions. This study showed better enhanced efficiency when the same wall material was treated with negative air ions, the enhanced efficiency can be improved to 27.0%; We showed the better control efficiency about *C. famata* which was treated with PP-filter (AgNPs/NSP or non-AgNPs/NSP) than stainless steel, no matter the ionizer opened or not. The best control efficiency which is up to 31.4% about *C. famata* was treated with PP-filter (non-AgNPs/NSP),and we had the close control efficiency of other methods, ranging from 18.4% to 24.1%, except PP-filter (AgNPs/NSP). But, if PP-filter

(AgNPs/NSP) was used with negative ionizer, than, 20.4%, the higher control efficiency can be obtained; the results indicated that the control efficiency of *P. citrinum* is between 21.3% and 41.0%, the best is only treated with negative ionizer. We got worse control efficiency when PP-filter (AgNPs/NSP or non- AgNPs/NSP) was used with the negative ionizer than those without negative ionizer. Different from the others ,we had the best control efficiency on *C. famata* which is treated with PP-filter (non- AgNPs/NSP) without negative air ions.

The following is a summary of our conclusions. The control effectiveness of PP-filter is different to the PP-filter which contains AgNPs/NSP ; the study showed the poor enhanced efficiency when AgNPs/NSP was sprayed on the PP-filter, but if the methods was treated with the negative air ion, the control efficiency could be enhanced(not including *E. coli* and *P. citrinum*); when we pasted the same material on the wall, the negative ionizer was turned on or not, will affect the control efficiency of bioaerosol (the control efficiency of *E.coli* and *P. citrinum* would reduced ,and *B. subtilis* increased); when the control efficiency of the bioaerosols which were treated with negative air ions is significantly higher than the wall attached material, it was contribute to the enhanced efficiency of negative air ion when the bioaerosols was treated with negative air ion and wall attached material in the chamber (*B. subtilis*).The control efficiency of the bioaerosols which were controlled by wall attached materials would be affected by higher concentration of negative air ions(it would become a complex situation when negative ions were accumulated to the wall); bioaerosol characteristics affect the control efficiency.

Keywords: bioaerosols, negative air ions, AgNPs/NSP, PP-filter ,control efficiency, enhanced efficiency

目錄

摘要.....	I
目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
表目錄.....	XI
符號說明.....	XIII
第 1 章 緒論.....	1
1-1 研究緣起.....	1
1-2 研究目的.....	3
1-3 研究內容與方法.....	3
1-4 研究流程.....	4
第 2 章 文獻回顧.....	5
2-1 室內生物氣膠.....	5
2-1-1 生物氣膠來源.....	8
2-1-2 常見於室內的生物氣膠.....	11
2-1-3 生物氣膠對人類生活的影響.....	14
2-1-4 生物氣膠採樣鑑定.....	16
2-2 室內空氣品質維護與控制.....	18
2-2-1 細菌及真菌濃度標準或建議值.....	18
2-2-2 抗菌材料應用.....	19
2-2-3 奈米銀抗菌材料.....	21
2-2-3-1 銀奈米化之發展.....	21
2-2-3-1 奈米矽片銀.....	24

2-2-4 室內生物氣膠控制技術	27
2-2-4-1 稀釋	28
2-2-4-2 過濾	28
2-2-4-3 紫外光	29
2-2-4-4 光觸媒	29
2-2-4-5 離子	29
2-2-4-6 其他控制技術	30
2-2-5 空氣負離子運用於控制生物氣膠	31
2-2-5-1 空氣負離子來源及產生方式	31
2-2-5-2 空氣負離子基本特性與影響因子	33
2-2-5-3 空氣負離對人類健康的影響	35
2-2-5-4 空氣負離子對室內生物氣膠的控制機制與效能	36
第 3 章 實驗設備與方法	37
3-1 實驗系統設備及材料	37
3-1-1 實驗設備	41
3-1-2 實驗菌種培養方法	44
3-1-3 生物氣膠產生單元	48
3-1-4 室內環境模擬及生物氣膠控制單元	49
3-1-5-1 實驗艙內空間位置標示	49
3-1-5-2 貼附艙壁材質處理及貼附實驗艙方式	49
3-1-6 負離子產生單元及濃度監測設備	52
3-1-7 生物氣膠採樣單元	52
3-1-8 前置實驗	52
3-1-8-1 生物氣膠初始濃度測試及實驗艙氣膠混合度測試	52
3-1-8-2 生物氣膠採樣間隔及採樣時間測試	53
3-1-8-3 負離子產生單元穩定度及使用電壓測試	53
3-1-9 生物氣膠控制效率之研究方法	54

3-1-10 生物氣膠增進效率之評估方式	54
3-2 實驗計算方法與指標參數	55
第 4 章 結果與討論	58
4-1 前置實驗測試結果	58
4-1-1 生物氣膠初始濃度及實驗艙生物氣膠濃度達穩定所需時間	58
4-1-2 決定生物氣膠採樣間隔及採樣時間	60
4-1-3 負離子產生單元所用放電電壓選擇及負離子空間分佈	62
4-2 生物氣膠剩餘率及控制效率	66
4-3 處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率	77
4-3-1 負離子產生裝置對壁面貼附材料控制生物氣膠之增進效率	77
4-3-2 壁面貼附材料噴附奈米矽片銀控制生物氣膠	82
4-4 壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率	87
4-5 小結	95
第 5 章 結論與建議	102
5-1 結論	102
5-2 建議	105
參考文獻	107

圖目錄

圖 1-1 研究流程圖	4
圖 2-1 生物氣膠採樣方式及鑑定技術	17
圖 2-2 奈米銀殺菌機制	22
圖 2-3 以針尖電極之電暈放電產生空氣負離子之反應過程	33
圖 3-1 實驗系統配置圖	39
圖 3-2 實驗流程圖	40
圖 3-3 奈米矽片銀模擬圖	43
圖 3-4 實驗艙內空間位置標示	49
圖 4-1 生物氣膠於實驗艙之穩定度測試- <i>E.coli</i> 及 <i>C.famata</i>	59
圖 4-2 生物氣膠於實驗艙之穩定度測試- <i>B.subtilis</i> 和 <i>P.citrinum</i>	60
圖 4-3 各菌種實驗流程、主要實驗單元開啟時段及預測生物氣膠濃度下降趨勢	62
圖 4-4 不同壁面貼附材質環境下，不鏽鋼針尖於不同電壓下產生空氣負離子 濃度之比較	63
圖 4-5 使用不同控制方法之 <i>E. coli</i> 控制效率	67
圖 4-6 <i>B. subtilis</i> 於不同時間之採樣結果(壁材:Stainless Steel)	68
圖 4-7 使用不同控制方法之 <i>B. subtilis</i> 控制效率	69
圖 4-8 使用不同控制方法之 <i>C. famata</i> 控制效率	70
圖 4-9 選擇使用斯丁尼不織布為壁面貼附材料之 <i>C. famata</i> 控制效率	71
圖 4-10 使用不同控制方法之 <i>P. citrinum</i> 控制效率	73
圖 4-11 真菌氣膠顯微攝影顯示之外觀	74
圖 4-12 在施放負離子之不鏽鋼壁材環境下，可能影響控制效率之各作用力	75
圖 4-13 在施放負離子之壁面含有奈米矽片銀之聚丙烯不織布貼附材環境下， 可能影響控制效率之各作用力	75
圖 4-14 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>E. coli</i> 的增進效率	79
圖 4-15 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率	79

圖 4-16 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>C. famata</i> 的增進效率	79
圖 4-17 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率	79
圖 4-18 負離子對於噴附奈米矽片銀之不同材質壁面貼附材控制 <i>C. famata</i> 的增進效率	81
圖 4-19 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>E. coli</i> 的增進效率	84
圖 4-20 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率	84
圖 4-21 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>C. famata</i> 的增進效率	84
圖 4-22 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率	84
圖 4-23 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一分鐘之表面電荷 (表面電荷值為負值)	86
圖 4-24 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一小時之表面電荷 (表面電荷值為負值)	86
圖 4-25 壁面貼附材料對負離子控制 <i>E. coli</i> 的增進效率	89
圖 4-26 壁面貼附材料對負離子控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率	89
圖 4-27 壁面貼附材料對負離子控制 <i>C. famata</i> 的增進效率	89
圖 4-28 壁面貼附材料對負離子控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率	89
圖 4-29 各測量階段聚丙烯不織布表面電荷變化情形-垂直位置比較	91
圖 4-30 各測量階段聚丙烯不織布表面電荷變化情形-水平位置比較	91
圖 4-31 距離電極針尖 5 公分、10 公分、15 公分處，垂直位置不同其電量比 變化趨勢之比較	92
圖 4-32 正下方、正上方、側邊三個壁面位置，距離電極針尖水平距離不同電量 比變化趨勢之比較	93
圖 4-33 負離子裝置開啟次數對負離子於聚丙烯不織布負電荷累積狀況之影響	94
圖 4-34 實驗系統開啟後，自 20 分鐘後，每隔 15 分鐘 <i>C. famata</i> 生物氣膠濃度 累積增加幅度	96
圖 4-35 <i>B. subtilis</i> 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖	100
圖 4-36 <i>C. famata</i> 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖	100

圖 4-37 *E.coli* 及 *P.citrinum* 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖..... 101



表目錄

表 2-1 世界各國(地區、組織)室內細菌及真菌標準或建議值彙整表	18
表 3-1 奈米矽片銀規格	43
表 3-2 選用菌種之外形及粒徑	44
表 4-1 生物氣膠採樣濃度與微生物懸浮液濃度對照表	58
表 4-2 四種生物氣膠於不同採樣間隔時間剩餘率之比較	61
表 4-3 不鏽鋼貼附材質環境下，不鏽鋼針尖產生空氣負離子濃度空間分佈	64
表 4-4 聚丙烯不織布貼附材質環境下，不鏽鋼針尖產生空氣負離子 濃度空間分佈	64
表 4-5 實驗控制條件	65
表 4-6 使用不同控制方法之 <i>E.coli</i> 剩餘率及控制效率	66
表 4-7 使用不同控制方法之 <i>B. subtilis</i> 剩餘率及控制效率	68
表 4-8 使用不同控制方法之 <i>C. famata</i> 剩餘率及控制效率	69
表 4-9 選擇使用斯丁尼不織布為壁面貼附材料之 <i>C. famata</i> 控制效率	71
表 4-10 使用不同控制方法之 <i>P. citrinum</i> 剩餘率及控制效率	72
表 4-11 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>E. coli</i> 的增進效率(%).....	78
表 4-12 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率(%)....	78
表 4-13 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>C. famata</i> 的增進效率(%)....	78
表 4-14 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率(%)..	78
表 4-15 負離子對於噴附奈米矽片銀之不同材質壁面貼附材控制 <i>C. famata</i> 的增進效率	81
表 4-16 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>E. coli</i> 的增進效率(%)	83
表 4-17 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率(%).....	83
表 4-18 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>C. famata</i> 的增進效率(%).....	83
表 4-19 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率(%).....	83
表 4-20 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一分鐘之 表面電荷(表面電荷值為負值).....	85

表 4-21 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一小時之 表面電荷(表面電荷值為負值).....	85
表 4-22 壁面貼附材料對負離子控制 <i>E. coli</i> 的增進效率(%)	88
表 4-23 壁面貼附材料對負離子控制 <i>B. subtilis</i> 的增進效率(%).....	88
表 4-24 壁面貼附材料對負離子控制 <i>C. famata</i> 的增進效率(%).....	88
表 4-25 壁面貼附材料對負離子控制 <i>P. citrinum</i> 的增進效率(%).....	88



符號說明

RH:相對溼度(%)

$Q_{\text{Biosampler}}$:採樣流量(LPM)

$t_{\text{biosampler}}$:採樣時間(min)

$V_{\text{biosampler}}$:採樣液體積(ml)

N:菌落數(CFU)

$C_{\text{background}, t}$:生物氣膠於霧化器開啟 n 分鐘之背景濃度

$C_{\text{background}, t30}$:生物氣膠於霧化器開啟 30 分鐘之背景濃度

$C_{\text{background}, t60}$:生物氣膠於霧化器開啟 60 分鐘之背景濃度

R(%):生物氣膠剩餘率

C_0 :生物氣膠之背景濃度 (CFU/m³)

C_n :採樣第 n 次時系統內生物氣膠之濃度(CFU/m³)

η :生物氣膠控制效率(%)

$\eta_{\text{NAI(Stainless Steel)}}$:負離子開啟時(壁面未貼附聚丙烯不織布材質)之控制效率(%)

η_{PP} :壁面貼附聚丙烯不織布材質時(負離子未開啟)之控制效率(%)

$\eta_{\text{NAI/material}}$:負離子開啟且壁面貼附材料時之控制效率(%)

$\eta_{\text{enhanced, treated}}$:處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率(%)

$\eta_{\text{enhanced, material}}$:壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率(%)

第1章 緒論

1-1 研究緣起

隨著生活型態改變及產業類別的多元發展，人們在室內的時間增長，國內一項有關國民健康風險評估研究中調查花蓮、高雄地區民眾於室內活動時間，皆高於 85%，在家中的時間均超過 70%(蘇慧貞，2002)，人口密集之都市化地區更是如此，針對歐洲七個大都市室內生活所佔時間的調查研究結果顯示，在室內的時間均超過92%，其中在家中的時間比例最高，均超過50% (Schweizer et al., 2006)，香港的上班族及學生在室內的時間無論假日與否更接近 100%(Guo et al, 2004)，除上學、上班、家中及轉移至各室內空間所使用的交通工具外，也有越來越多設施設置於室內，如室內遊樂場、健身中心(游泳池)、市場(賣場)...等，其設置之初衷均為便民或讓民眾處於更舒適的環境下活動。然而，近年來，國內外的研究均發現，部分公共空間或居家空間，其空氣品質不佳，甚至使人出現輕重不一的不適症狀，而有 BRI(building related illnesses)、SBS(Sick building syndrome)等詞之出現。專家學者進而研究室內空氣品質與疾病的相關性，並有我國、韓國、美國、瑞士等國及歐盟正視此問題而立法管制室內空氣品質或提出室內空氣品質建議值，鼓勵機關行號自主管理。

室內空氣品質不佳，除造成健康上的威脅與危害外，身體的不適將造成生產力的下降及醫療支出及照護成本增加，因此如何能潔淨室內空氣成為重要課題，除建築結構、室內裝修、通風換氣須考量外，許多控制技術已有市售產品並繼續研發更新技術，如紫外光、光觸媒、負離子、濾材過濾、臭氧、靜電集塵……等，各項技術亦可經過整合後運用。前述技術有部分可去除懸浮微粒、部分可去除揮發性有機物質，而許多空氣清淨機標榜除菌功能，因微生物會直接或間接造成健康上的威脅。生物氣膠為緣自於生物的微粒，而微生物本身或代謝產物及降解建材產生的物質或生物破碎後殘片結構上的成分都可能影響人體健康。

前述各種控制技術雖有其效能及適用範圍，部分仍有使用限制或待改進之處，如紫外光控制技術有造成皮膚及角膜結膜傷害之虞，大部分發展出的光觸媒技術

目前須搭配紫外光，濾材控制須考慮微粒吸附後效能減低，及生物氣膠吸附後因無法殺菌而於濾材生長進而又進入室內空氣中的問題(Lee, 2011)。負離子控制技術為近年來受歡迎的控制技術，推究其原因除具有移除微粒、去除揮發性有機物的功能外，適當濃度範圍對人體有益，並往微型化或個人防護之方向發展，使用方便。

微生物分解建材藉以生長的問題亦漸受重視，國內外均有研究指出木材、合板、複合材(如水泥外附壁紙、混凝土外塗佈水泥漆)、塑膠板等建材及填縫劑中，存在著如 *Penicillium*、*Aspergillus* 等微生物，並生長於其中(Pietarinen et al., 2008；紀碧芳，2003；羅時麒、姚志廷，2008)，若建材含有微生物或移除含有微生物之建材，將影響室內中生物氣膠濃度(吳佩芝，2010；紀碧芳，2003)。抗菌壁材或塗料的使用，除不利微生物於壁面生長，亦可減少具活性微生物自壁面逸散至空氣中。

因此本研究除運用負離子控制技術外，設計壁面貼附材料，並附加具殺菌效能之奈米矽片銀於材料上，比較不同貼附狀況負離子的控制效能及評估奈米矽片銀對控制效能的影響。希望以負離子控制技術將生物氣膠移至貼附特殊材質之壁面，而此壁面發揮減少活性微生物再度逸散至空氣及降低微生物於壁材生長或經由人類碰觸壁面接觸到菌種而感染的風險。

1-2 研究目的

本研究將四種生物氣膠分別接觸不同壁面貼附材料及高濃度負離子，偵測生物氣膠濃度變化，並分析數據，希望藉此研究能達到以下目的：

1. 了解壁面貼附材質的改變對生物氣膠控制效率的影響。
2. 評估壁面貼附材質噴附奈米矽片銀對生物氣膠控制效率改變的狀況。
3. 探討不同壁面貼附材質環境下開啟負離子產生裝置與否，生物氣膠控制效率的差異。
4. 比較不同壁面貼附材料及高濃度負離子的組合，其控制生物氣膠之增進效率。

1-3 研究內容與方法

本研究設置內側直徑 38cm，內側柱長 79cm，體積約 90L 之橫向圓柱狀實驗艙模擬室內環境，選擇現有市售布材及奈米矽片銀溶液製作出抗菌壁面貼附材料，大面積貼附於實驗艙中，並於氣流入口相對應端設置以不鏽鋼為電極之空氣負離子產生裝置，電壓設定 3.1KV，電流控制於 $<0.01\text{mA}$ 。藉由材料貼附壁面與否、貼附材料噴附奈米矽片銀與否、負離子產生裝置開啟與否等各種組合狀況，偵測施放於實驗艙中的四種生物氣膠濃度變化狀況，生物氣膠濃度以 SKC Biosampler 採樣，經培養法計算菌落數換算取得。生物氣膠濃度數據另經計算可得控制效率及增進效率並藉以分析比較。

1-4 研究流程

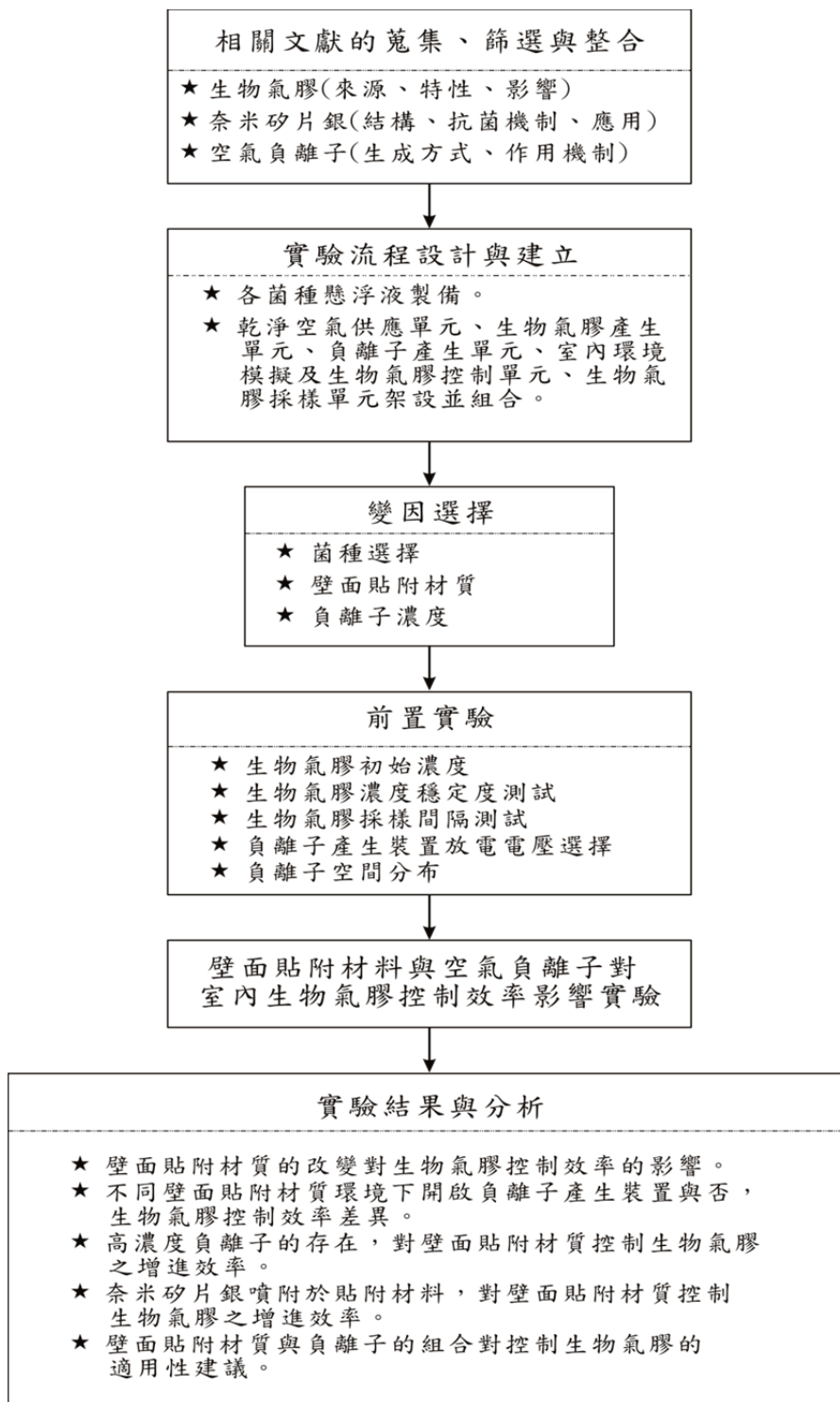


圖 1-1 研究流程圖

第2章 文獻回顧

2-1 室內生物氣膠

生物氣膠定義為生物性來源的氣膠微粒，其來源與種類多樣，包含常見及常被討論的病毒、細菌、真菌及它們破碎後的殘片，此定義也經常延伸其範圍至藻類、原蟲等生物、昆蟲的排泄物或斷肢殘片、較大型動物的毛髮、皮屑、唾液，或源自於生物體的構造、殘餘物或產物，如內毒素(endotoxins)即源自於革蘭氏陰性菌細胞壁構造中的脂多醣(lipopolysaccharide)，真菌的真菌毒素 (mycotoxins)、花粉、孢子等，代謝的產物及降解物質產生的微粒亦可包含在內(Grinshpun, 2011, Max et al., 2004)。

室內生物氣膠種類及濃度隨所處環境氣候條件、季節、室內空間性質、室內外環境條件等而有差異，以下分項舉例。

環境氣候條件、季節

吳佩芝等人(2011)研究國內六大類 226 棟建築內細菌及真菌濃度，發現細菌及真菌濃度有地域上差異，以南部較高，亦具有季節上的顯著差異，以冬季較高，研究結果與較早之相關研究一致(Su et al., 2001； Li, 1995； Li, 1997)。一個針對全球室內真菌多樣性的研究發現，真菌菌種多樣性在溫帶地區較熱帶國家地區高 (Amend, 2010)。

氣候變遷導致的極端氣象變化，可能導致室內居住或工作空間環境劣化，如暴雨造成淹水使室內空間產生黴害；也可能產生建築物構造上及空調系統設計的變革。美國環保署請求國家科學院醫學研究所召開專家委員會，委員會成員專長領域包含氣候學，氣溶膠物理，建築，真菌學，醫學(環境醫學、免疫病理等)，傳染病，暴露評估，及流行病學等。會議陳述及討論當前科學所了解氣候變化對室內空氣和公眾健康的影響，並確認優先因應措施，相關內容集結成冊於 2011 年出版” Climate Change, the Indoor Environmental and Health”(Spengler, 2012)。與生物氣膠相關之重點如氣候變遷將導致病蟲害地理分布的變化、花粉的增加，使得部分地區過敏原增加；極端降水、颱風的增加，海平面上升，使建物被破壞、

分解，而水害、洪水，導致水媒、蟲媒疾病增加，與潮濕、真菌有關的疾病或不適。其因應措施主要在於建議美國 EPA 及政府應跨部會跨領域、並與美國冷凍空調協會、建築技術組織及私人單位合作，對於人類健康、室內戶外空間、建築及空調、產品生命週期評估納入溫濕度及生物影響造成的物質釋放量等，進行更深入的研究、訂定新的標準並執行，對大眾的宣導亦在建議中。

從以上可見所在緯度、季節、氣候變遷造成的環境變化，會影響室內空間之生物氣膠種類及濃度。

室內空間性質

國內有多項關於室內空間細菌、真菌濃度及種類的研究，地點包含國內線班機、捷運站、醫院、住家、辦公室等，發現真菌以 *Penicillium*、*Cladosporium*、*yeasts*、*Aspergillus*、*Non-Sporulating fungi* 較多，細菌以 *Micrococcus spp.*、*Staphylococcus spp* 較為普遍，而不同種類的室內空間，或同一種類，所處位置不同，菌種濃度及優勢菌種有所差異(潘致弘、張靜文，2009；于台珊、何雨芳，2007；林文海、黃彬芳，2007)，如醫院較常見感染性生物氣膠。

依人類生活需求設立之不同生活空間，會有共同菌種，亦會因空間用途的差異而有不同的菌種生活其中。

室內外環境條件

大自然環境普遍存在許多的菌種，如 *Penicillium*、*Cladosporium*、*Bacillus* 等，當採用自然通風，室內外空氣會相互流通，若使用空調系統，室內空氣品質與換氣率有關，因此會有外氣引入，室外空間的氣膠因而會進入室內，若室內空間建材、空調系統、浴室廚房、紙張書籍、盆栽等處適合某些微生物生長，濃度可能持續累積。Amend(2010)等人用分子生物學及數值分類的方法，從大尺度的全球地理空間來看室內真菌組成的差異，從樣本中鑑定出超過 4 千種不同基因序

列，其中只有 31 種在半數的樣品中能找到，*Alternaria*、*Cladosporium*、*Epicoccum*、*Penicillium*、*Aspergillus* 等菌為常見菌種，而主要造成室內空間真菌差異在於所處緯度，其研究從蒐集到的物種，推測某些菌種具耐乾燥的生殖構造、含黑色素的孢子，使它們能在室外有較高的生存機會；有些菌種顯然從室外引入，如 *Amanita*(屬於擔子菌門)、*Glomus*(屬於接合菌門)原本附在寄主植物，*Rozella* 則在水域環境才能生存。

室內環境潮濕常導致微生物生長，最常被研究的是不同種類建材中微生物生長的濃度或物種多樣性。有研究顯示，*Penicillium*、*Aspergillus*、*Paecilomyces* 為常見菌種，而合板、石膏板、木材、紙、塑膠、填料、絕緣材料、複合材等壁材中，菌種的種類最多，平均濃度最高，其次為絕緣材、合板。屬於細菌的 *Streptomyces* 也發現普遍存在建材中，推測可能有些細菌與真菌存在於建材的生活史與成長史類似。此研究中，普遍存在於室內的 *Cladosporium* 僅在少數建材中存在，且濃度不顯著，因此引用多篇文獻推測，此菌在狀況良好的建物內也普遍存在，可能是戶外的孢子傳進室內所導致(Pietarinen et al., 2008)。因此室外環境加上室內狀況，影響室內空間內的生物氣膠種類與濃度。

有關室內生物氣膠來源、種類、對人類生活的影響、目前採樣鑑定技術詳述如後。

2-1-1 生物氣膠來源

與生命有關如人類活動、存在於室內空間的密度、生活習慣、食物、寵物、盆栽；與室內物品或硬體有關，如、地毯、建材、家具(陳設品)及填料、暖氣、除濕機、空調系統；與室內微氣候或溼度有關，如空氣濕度、壁材濕度、房屋滲水漏水狀況；與室外環境有關，如外氣引入等，都可能影響室內生物氣膠種類及濃度，以下將較重要、較受重視與為人討論的生物氣膠來源及相關研究整理及說明。

人類活動:

國內有研究指出，醫療場所人員出入較多的地方細菌濃度也較高(洪柏宸，2011)。工業生產以外的室內環境，細菌氣膠來源重要來源之一為在此環境中的人員，無論說話、咳嗽、打噴嚏，或在其中活動時，都可能產生生物氣膠，如走動、清潔、上廁所沖馬桶等(Stetzenbach, 1997)。此外，於人類皮膚可分離出之菌種，如 *Propionibacterineae*, *Staphylococcus*, *Enterobacteriaceae*, 和 *Corynebacterineae*，於生物氣膠採樣鑑定時同時也曾被分析出，並且列為室內細菌氣膠濃度排名前 16 名內，其中以 *Propionibacterineae* 排名第一(Qian et al., 2012)。

源自於人類的菌種被發現在室內灰塵中如白色念珠菌(*Candida albicans*)，因此人類也對室內真菌有所貢獻(Amend, 2010)。

室外引入:

許多研究常以 I/O ratio 判斷真菌源自於室外或是室內。國內有關醫療院所室內空氣品質與員工健康關聯性的研究，發現有些醫院總真菌濃度 I/O ratio 小於一，室內真菌可能源自室外；有些則呈現不同部門 I/O ratio 不一致的情況，以小於一居多(洪柏宸 2011；潘致弘、張靜文，2008)，因此以室外引入為多。

暖氣、空調系統、空氣清淨機:

國內一項有關醫療院所室內真菌與員工健康關聯性研究發現，中央空調出風口與室內環境主要真菌種類相符(潘致弘、張靜文，2008)，也有研究指出，中央空調系統經過改善，可使室內生物氣膠濃度降低(吳佩芝等人，2011)，因此，空調系統、冷氣、清淨機未定期保養，更換或清潔可能使微生物繁殖的環境，將使室內生物氣膠濃度升高。

國內外有許多關於退伍軍人菌的研究，包含流行病學調查、檢測技術研發。此菌如此受重視之原因為氣膠化的退伍軍人菌可能進入人體，使人感染退伍軍人症及龐蒂亞克熱。退伍軍人症疫情爆發常與人造之水域環境有關，如冷卻水塔、熱水供應系統、淋浴設備、水療中心等，因為這些環境或設備能釋放出呼吸粒徑的退伍軍人菌氣膠(Stout et al., 1997)，因此設有中央空調的機構若未注意定期清洗監測與消毒冷卻水塔，進氣口設置位置接近冷卻水塔，就有爆發疫情的危險。

建材家具家飾逸散:

壁材、沙發、地毯等，常藏有微生物，有可能氣膠化進入人類呼吸範圍。

潘致弘、張靜文(2008)研究醫療院所室內真菌與員工健康關聯性，選擇建材上有霉斑水漬痕跡處採樣、分析，並與採樣處空氣中真菌濃度比較，發現多處呈現相關性；也有研究指出，潮濕環境下，不同材質建材會有不同程度的真菌及細菌增生，除菌體外，其孢子、菌體分解後的組織、代謝產生物質一併逸散入空氣中。

室內植物:

蔡榮賢(2003)研究四種職場員工的真菌暴露狀況，發現花店員工的真菌暴露顯著較高，數據中較特別的是在早上進貨時，空氣中的真菌濃度有明顯的增加。

寵物飼養:

有研究指出，臥室中真菌濃度較低與吸塵器使用頻度、環境有無黴斑、有否寵物等因素相關，室內貓的存在為影響真菌總濃度最大因素(Dharmage, 1999)。

管線破裂，房屋結構損害而滲水或潮溼，水害:

環境潮濕使得 *Cladosporium*、*A. versicolor*、*Stachybotrys* 濃度較高(Meklin et al., 2002)，水害使得 *Penicillium*、*Aspergillus*、*Chaetomium*、*Stachybotrys* 所占比例較高，因此有研究將其做為室內環境潮濕程度的指標。潮濕環境下不僅會有產毒的真菌生成，也有細菌如 *Bacillus*、*Streptomyces* (Gravesen et al., 1997)，會在潮濕建材上生長，產生毒素(Mikkola et al., 2007；Andersson et al., 1998)。

生物氣膠有可能遭刻意釋放，如美國在 911 恐怖攻擊後曾發生郵件內藏炭疽菌孢子造成染病的生物戰劑攻擊事件，此後促使即時採樣檢測技術的研究如雨後春筍般蓬勃發展。



2-1-2常見於室內的生物氣膠

生物氣膠的粒徑約為直徑 0.3~100 μm ，其中需注意的粒徑範圍為可呼吸粒徑，為 1.0~10 μm (Wathes, 1995)。一般較常維持於空氣中的生物氣膠的粒徑在 1.0~5 μm ，而更大的粒子會沉降在表面(Mohr, 2007)。Stetzenbach 等人 (2007)整理生物氣膠進入呼吸道之狀況，較大的生物氣膠在鼻、鼻咽部等上呼吸道被排除，直徑 5 μm 以下藉由打噴嚏、呼出、擤或擦鼻子移除，未被移除的將沉積在咽頭，直徑約 2~4 μm ，藉由黏膜纖毛作用有部分可被去除。直徑 1.0~5 μm 粒子可進入肺中，會滯留在肺泡中約為 1.0~2 μm 大小的粒子。Sturm(2011)整理大小、形狀差異的生物氣膠沉積於呼吸道的相關研究，發現極微小 (<100nm) 和大型 (> 5 μm) 的顆粒往往積聚在胸腔外、氣管、支氣管，中等大小的顆粒反而能進入更深處，進而堆積在肺泡。由於其沉積在肺部深處，難以清除，可能會引起嚴重的肺部疾病，包括感染，過敏和毒性反應的癌症。細菌的粒徑範圍約 0.1~10 μm ，相對較為潔淨的室內空間細菌的氣動粒徑約為 0.1~3 μm (Grinshpun, 2011)，真菌孢子的粒徑範圍約 2~50 μm (Nuntiis, 2003)，大部分室內真菌孢子氣動粒徑約為 2~4 μm (Grinshpun, 2011)範圍內，兩者皆在可呼吸粒徑範圍及較常維持於空氣中的粒徑，也較容易對人體健康產生影響，以結核桿菌為例，含結核桿菌的飛沫核，表面水分蒸發後，大小約直徑 1 μm 至 5 μm ，能懸浮於空氣中，並可進入肺中或滯留肺泡中致病；導致麴菌病的重要菌種之一 *Aspergillus fumigatus*(薰煙色麴菌)其孢子大小約 2 μm 至 3.5 μm ，在靜止的空氣中沉降速率約為 0.03cm/sec，懸浮性極佳，亦屬可進入肺中的大小(洪柏宸，2011)。

有關室內空間中生物氣膠存在與人類健康關係之研究，多針對細菌與真菌，各國之室內空氣品質標準或建議值，所列出與生物氣膠直接相關之項目亦僅細菌與真菌，因此以下主要探討之生物氣膠種類為細菌及真菌。

細菌

細菌學家革蘭運用細胞壁構造不同造成複染結果呈現兩種顏色而將細菌分類為革蘭氏陽性與格蘭氏陰性菌，此亦為目前常用之分類方式。細菌之細胞壁及細胞膜為與環境接觸的部位，因此抗菌材料及微生物控制技術的研發也從觀察微生物表面結構著手。細胞壁的成分中，革蘭氏陽性與陰性菌都具有 peptidoglycan，差異在於陰性菌較薄，且此層外，尚有外膜，成分包含 lipoprotein、porin protein、lipopolysaccharide、phospholipids 等，帶有負電荷；陽性菌另具有 lipoteichoic acid 此結構延伸至細胞膜上，亦帶有負電(Poortinga et al., 2002)。

細菌的細胞膜傾向帶負電荷，如格蘭氏陰性菌中的大腸桿菌，其細胞膜有 50%~80%的 phosphatidyletholamine(PE)及 20%~50%的 phosphatidylglycerol(PG) 和 cardiolipin(CL)，其中 PG 和 CL 帶負電，PE 帶有兩性離子(在中性環境下，無靜電荷)；革蘭性陽性菌的枯草桿菌，其細胞膜主要含有 CL、PG、PE，因此帶負電。

部分細菌在惡劣環性下可形成內孢子，如 Bacillus，它們可在極惡劣的環境下生存，如缺乏營養、水分，紫外線較強之環境，對熱及化學物質具一定程度之耐受力，因此曾被製成生物戰劑，也成為被研究之模式菌種，有研究指出其表面結構帶負電荷(Chen, 2010；Lee, 2004)。

革蘭氏陰性菌對人類健康的影響常被討論的除了菌種本身、其孢子具致病性外，其產生的內毒素也廣受討論及研究。

真菌

真菌的細胞壁最外層為無定型的 polysaccharides 構造，包含纖維狀的組成及膠狀間質，不同種類的菌種成分有差異，如不完全菌纖維狀的組成具有 chitin 及 β -(1,6)-glucans、 β -(1,3)-glucans，接合菌則具有 chitin 及 chitosan；膠狀間質的部分，不完全菌具有 polyglucuronic acid、glucuronomannoproteins，接合菌則具有 α -(1,3)-glucan; galactomannoproteins (Deacon, 1997)，細胞壁往內尚有 glycoprotein、protein layer、chitin microfibril、plasma membrane。有些真菌細胞延伸產生菌絲、發展分支。具單細胞型態的酵母菌，其細胞壁有 80~90% 是 polysaccharides(如 glucans、mannans 及少量的 chitin)，其餘為蛋白質、脂質、無機磷。

室內常見菌種，如 *Penicillium*、*Aspergillus*，有部分列入不完全菌門，部分列入子囊菌門，*Cladosporium* 屬子囊菌門，此外有研究指出，真菌對健康的影響除菌體造成外，菌體產生的物質、孢子及菌體分解產生的斷片，亦是元凶。有研究指出擔子菌和子囊菌的孢子及斷片存在於室內濃度及盛行狀況較以往認為的高(Green et al., 2009；Fröhlich-Nowoisky et al., 2009；Pitkäranta et al., 2008)，Green(2011)整合自己與多人之研究，說明真菌斷片之形成，導因於分解部位本身的因素及環境因素。老化的菌絲由於菌體老化、死亡或水解酶活性等內在因素，及營養源、水分有限或風、震動、擾動等非生物壓力等外在因素，使其自體分解，抗張強度、硬度降低，細胞壁通透而釋放出胞內物質，菌絲從細胞間分隔接點分開。真菌斷片除菌絲分解產生外，真菌菌體、其產生之孢子、子實體等源自於真菌分解成之非生殖型態微粒(小於 0.1 μ m 至 2.5 μ m)均可稱之。

室內真菌的問題受重視，除菌體、孢子、上述真菌斷片導致人類健康上危害外，其代謝產生的物質，如真菌毒素、揮發性有機物也可能影響健康。有研究指出，*Penicillium*、*Aspergillus* 在產孢、釋放孢子過程中，因能量的需求、生態區位的競爭等原因，會釋放出毒素(Larson et al., 1994；Wicklow et al., 1983)。真菌產生的揮發性有機物統稱為 MVOCs，常被研究討論的如 2-ethylhexanol、1-octen-3-ol 等，有相關研究指出 2-ethylhexanol 較常發生於潮溼環境，與病態症

候群可能有關；1-octen-3-ol 在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 濃度下，會引起眼睛、鼻子、呼吸道的急性症狀(Wälinder et al., 1999)，但即使是潮濕或黴菌存在問題嚴重的建築，其值往往低於職業暴露限值(occupational exposure limits；OELs)(Korpi et al., 2009)。

2-1-3 生物氣膠對人類生活的影響

室內生物氣膠除了對人類健康帶來危害，造成生產力下降，還會造成其他損失。美國由於潮溼環境和黴害導致的氣喘佔所有氣喘病例數的 21%，國家每年因居家環境潮濕和黴菌暴露導致氣喘之花費估計為 35 億美元(Mudarri et al., 2007)，而經濟上的損失尚須加上醫療照護費用，生產力降低而造成的損失，建物去除黴害或建材家具更新的支出。此外，黴害也會影響建物美觀，降低視覺美感，古蹟文物、書籍受損，造成文化資產的損失。大部分的民眾及本研究首要關注，在於健康的維護，因此以下主要探討生物氣膠對人體健康的影響。

人類因呼吸、攝入、皮膚接觸等途徑與空氣中致病微生物接觸，呼吸為主要的途徑。探討對人體健康時，多將其分為感染、過敏、中毒三類討論，病態大樓症候群(SBS)及建築相關症狀(BRI)也常被提出。室內真菌、細菌暴露之流行病學調查，國內外相關文獻極多，有研究整理國內外文獻並整理列表，如劉芸汶(2003)表列自 1992 年至 2002 年相關文獻並摘要敘述，吳佩芝(2011)蒐集自 2000 年至 2009 年資料，從其整理之資料顯示，影響之年齡層包含小孩、成人，出現包含喘鳴、過敏性鼻炎、過敏性皮膚炎、呼吸道症狀、呼吸急促、病態大樓症候群等徵候，述及的菌種包含 *Streptococcus*(與氣喘有關)、*Penicillium*(與氣喘有關)、*Aspergillus*(與過敏、病態大樓症候群有關)、*Cladosporium*(與過敏有關)，以下另舉其他文獻所述，以補充或對照。

感染:

國內一項室內空氣品質與醫院內員工健康關聯性研究發現，感染呼吸道疾病與 *Candida albicans*、*Fusarium*、*Penicillium*、*Yeast* 濃度有顯著相關，與總真菌濃度有顯著正相關，總細菌數超過 $500\text{CFU}/\text{m}^3$ 時，也呈顯著正相關 (洪柏宸, 2011)。

真菌除造成呼吸道感染外，也較容易感染皮膚及黏膜(Hardin et al., 2003)，而

細菌感染更為人熟悉，如結核桿菌導致肺結核，退伍軍人菌導致退伍軍人症、龐蒂亞克熱，金黃色葡萄球菌感染鼻腔、皮膚傷口等。

過敏:

暴露於真菌濃度較高環境下易引發過敏性氣喘、過敏性鼻炎(Hardin et al., 2003)，有研究針對特定菌種研究，發現 *Alternaria*(鏈格菌) 引發過敏的閾值為每立方米 100 個孢子(Gravesen et al., 1986)。洪柏宸(2011)研究醫療院所室內空氣品質與員工健康關聯性發現，過敏(氣喘、異位性皮膚炎、過敏性鼻炎)與 *A.fumigatus*、*A.niger* 有顯著正相關(單變項及多變項)，而總細菌數超過 300CFU/m³ 時，也呈顯著正相關。

Ross(2000)檢視 1991~1997 五篇研究，歸納出室內革蘭氏陰性菌細胞體、細胞壁成分、內毒素，都可能使氣喘的病徵更嚴重，而其研究亦發現，室內革蘭氏陰性菌細胞體的濃度與氣喘病徵嚴重度呈現關聯性。細菌的內毒素也有可能誘導局部或全身性發炎反應，最終導致氣喘、慢性阻塞性肺病(Michel, 2000)。

綜上所述可知，部分細菌、真菌及它們產生的物質都有可能造成過敏反應。

毒性反應:

Stachybotrys chartarum 為常被提及會造成中毒反應的真菌菌種，會造成上下呼吸道的細胞毒性，在老鼠試驗發現具神經毒性，而孢子的毒性會造成肺部損傷，也有針對此菌種可能造成基因毒性做研究(Pestka et al., 2008)。

病態大樓症候群(SBS):

此名詞定義最早 WHO 提出，在建物內的人群，發生非特異性症候盛行率增加，最常見的症狀為疲勞、頭痛、眩暈，噁心，眼睛、鼻子、咽喉感到刺激，皮膚和粘膜乾燥，皮膚潮紅，高頻率的呼吸道感染和咳嗽，聲音嘶啞，喘鳴，瘙癢和非特異性過敏，當在此建築內症狀越趨嚴重，離開後即症狀減輕或消失(WHO, 1983；WHO, 2005)。造成此症候群的原因仍有許多研究持續進行中，WHO(2009)整合多項研究指出在空調系統環境下比自然通風狀況容易出現此症候群，推測部

分原因在於空調系統中真菌的污染，提升換氣率能獲得改善。另 Straus(2011)整合有關真菌與 SBS 的關係發現中央空調系統風扇、管道及冷卻盤管容易存在真菌，存在於室內的 *Chaetomium globosum*，會在建材上產生兩種真菌毒素(mycotoxins)，在人體體液及組織中能檢測到。

有研究指出，室內環境中，*Aspergillus*(麴菌)濃度達每立方米 50 個菌落時，病態大樓症候群盛行率會有升高的趨勢(Mandal, 2011)；另有人研究真菌所產生之揮發性有機物質發現”2-ethylhexanol”會引起頭痛、疲勞、腸道不適、頭昏眼花等症狀(Hill et al., 2001)，與病態大樓症候群可能有關(Van Lancker et al., 2008)；另二項與 ”2-ethylhexanol”研究針對有類似 SBS 症狀發生之個人或群體診斷其辦公環境，並檢驗血液，發現有症狀者 2-ethylhexanol 濃度高於無明顯症狀者(Kondo et al., 2007)，移除可能污染源，空氣中不再偵測到 2-ethylhexanol，人員症狀也顯著改善(Tuomainen et al., 2004)。

建築相關症狀(BRI):

可歸因於特定的疾病來源，如室內的細菌、真菌，其診斷時所依據的症狀中常有鼻炎、氣喘、過敏性肺炎等症狀，或併發鼻竇炎。常見的 BRI 有退伍軍人症、龐蒂亞克症歸因於退伍軍人菌的暴露，肺結核歸因於結核桿菌的感染(Redlich et al., 1997)。

2-1-4 生物氣膠採樣鑑定

衝擊器採集(impaction)、衝擊瓶採集(impingement)、過濾捕集(filtration)為常用的三種採樣方式，而較晚發展出之靜電沉積式採集(electrostat. precipitator)頗具潛力，正往降低採樣流量及電荷發展以減少生物氣膠失活或死亡研發。另有以微量流量抽吸式方式(suction)之採樣器，常用在真菌、孢子的收集(Fernández et al., 2011；鄭尊仁等人, 2007)；以旋風式採樣(cyclone)限於較小範圍粒徑採集；也有研究先讓水凝結在生物氣膠上，再採集或檢測生物氣膠(Park et al., 2011)，此法可在使用衝擊器採樣時配合運用以減小因衝擊造成菌體死亡的比率(Caruana, 2011)。

若要取得未失活且可培養的菌種樣本，以前述之各種採樣方法均可；若要鑑

定目前無法培養出或盡可能了解所有採到之菌種(含已死亡菌種或斷片)，或分析內毒素等物質可用非培養法。採樣後，可用分別選用適合的方法鑑定或計量，各種採樣技術適用鑑定方法見圖 2-1:

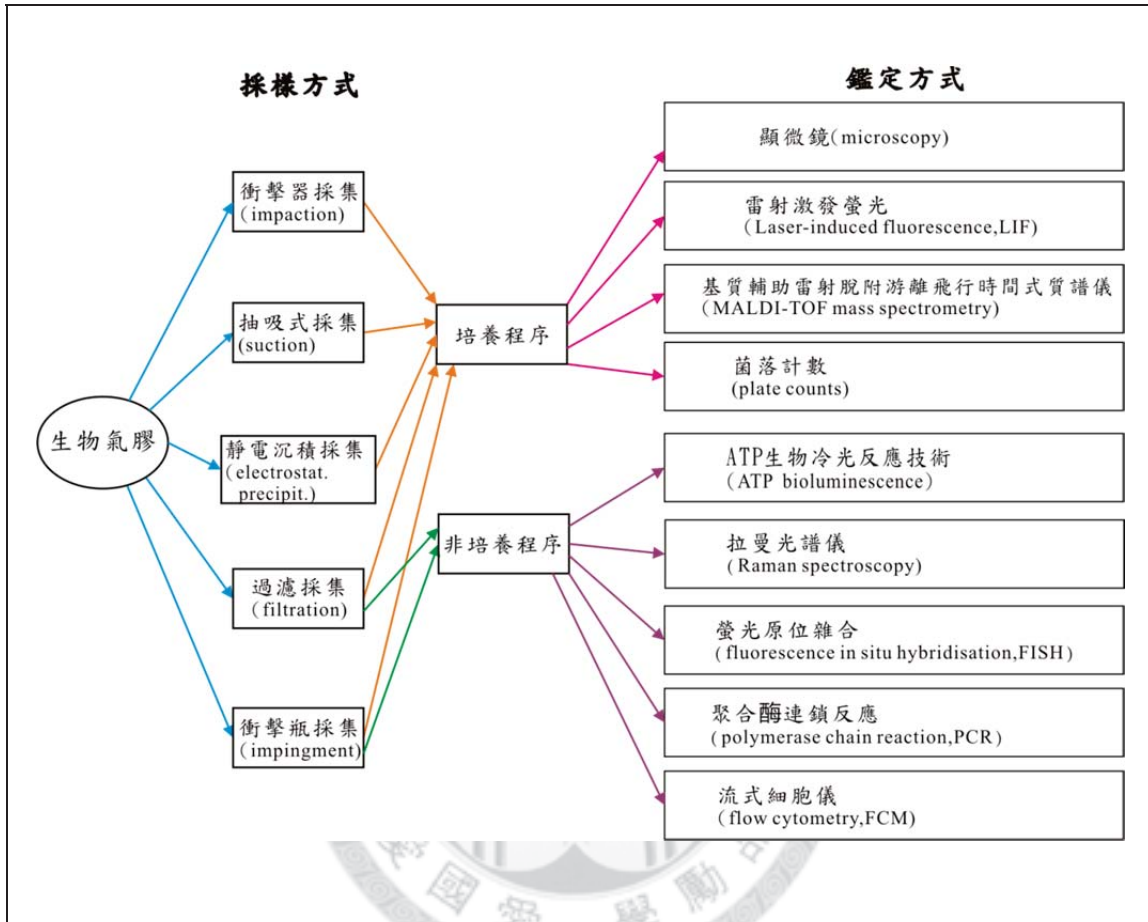


圖 2-1 生物氣膠採樣方式及鑑定技術(Mandal,2011)

我國目前室內空氣品質建議值有關生物氣膠項目分為總細菌數及總真菌數，採樣方式依環保署環境檢驗所公告之”室內空氣中總細菌數檢測方法(編號 NIEA E301.11C)”及”室內空氣中總真菌數檢測方法(編號 NIEA E401.11C)”，使用衝擊器採集，經過培養程序，細菌以 TSA(Tryptic Soy Agar)培養基培養，真菌以 MEA(Malt Extract Agar)培養基培養，細菌於 $30\pm 1^{\circ}\text{C}$ 環境下培養 48 ± 2 小時，真菌於 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 環境培養 4 ± 1 天，待菌落長出後，採菌落計數方式計算菌落數並換算濃度為每立方公尺菌落數(CFU/m³)。

2-2 室內空氣品質維護與控制

2-2-1 細菌及真菌濃度標準或建議值

目前各國未有統一標準，所用詞彙及定義不同，有些國家針對不同場所或針對特定菌種訂定標準，Mandal 等人(2011)整理包含國際重要組織及歐洲、亞洲、美洲內，定有相關標準或建議值之資料，另外，吳佩芝等人(2011)亦整合數國相關資料，茲將兩研究整合如表 2-1:

表 2-1 世界各國(地區、組織)室內細菌及真菌標準或建議值彙整表

(Mandal et al., 2011; 吳佩芝等人, 2010)

國別 (或組織名稱)	Bacteria (CFU/m ³)	Fungi (CFU/m ³)	備註
WHO	500	-	
美國	-	1000	
加拿大	-	150	
歐盟	10000	10000	私宅
	2000	2000	非工業室內空間
芬蘭	4500	-	
挪威	-	NS	未明示，但規定不可有目視可見菌群或有氣味產生
俄羅斯	-	2000~10000	特定菌種
瑞士	10000	1000	好氧嗜溫菌
	1000	-	革蘭氏陰性菌
荷蘭	10000	-	另有訂細菌及真菌總和上限值 10000
葡萄牙	-	500	
德國	10000	10000	
巴西	-	750	
中國	2500~7000	-	依公共場所屬性不同，其值不同
韓國	800	-	立法規定，適用於 17 項公共場所
新加坡	500	-	
香港	500	-	低於此值為卓越級
	1000	-	低於此值為良好級
台灣	500	1000	細菌濃度建議值分為特別需求場所及一般公共場所及辦公大樓兩類
	1000		

備註: “-” 表示未訂標準。

我國室內空氣品質管理法已於民國 100 年 11 月 23 日公布，將於 101 年 11 月 23 日開始實施，施行細則草案、室內空氣品質標準也將提出。

2-2-2 抗菌材料應用

真菌在室內生長較多主因為濕度及碳源的取得，因此預防真菌於室內生長首重濕度控制與有機污染物的降低，從房屋設計、建造、絕緣材設置過程都需注意 (Mandal, 2011)。

室內空間抗菌材料的妥善運用可維持較佳之空氣品質，從建材的選擇，到空氣清淨機的運用，都可選擇抗菌材料。建材可使用取得綠建材標章之防黴抗菌建材或調濕材料，美國綠色防護環境協會建立之 GREEN GUARD 標章驗證項目中，包含建材的防黴性能，依標準檢驗方式 (ASTM Standard D 6329) 進行檢驗，針對地板、天花板、接著劑、過濾材、壁紙等 10 種建材測試於建材上三週後黴菌生長量，共分四級；日本工業標準協會 (JISC) 發展出建材吸放濕量、調濕力、含水率的測試方法及評價基準，均分為三級。我國目前無室內建材防黴性能的檢驗及評定基準，江哲銘、邵文正 (2009) 研究國外綠建材及標章評定項目的發展趨勢，評估國內使用綠建材之效益，並建議將防霉、調濕及吸附建材納入健康綠建材性能評定基準。

常被討論且用於室內裝修材料的抗菌或吸濕材料有光觸媒 (抗菌)、珪藻土 (吸濕) 等，光觸媒的抗菌效能已被證實，會破壞細菌及真菌的細胞壁和細胞膜及細菌所產生的毒性物質，目前已有實場應用，如用在大理石、木材、磁磚等建材，也用在生醫材料、紙張、口罩等 (Foster et al., 2011)；此外亦研發新技術，有研究針對室內設計在可見光或光線較少之環境，研究新的光觸媒複合性材料，如將奈米級 Cu_xO 接枝在 TiO_2 上， Cu_xO 中的一價銅在黑暗中、 Cu_xO 中的二價銅在可見光下具抗菌效果 (Qiu et al., 2011)，其他尚有染料敏化和耦合半導體運用在二氧化鈦以增強效能 (Pelaez, 2012)。珪藻土源自於水中矽藻礦化形成，具有許多微孔、吸附性強 (約為木炭的 6,000 倍左右)，目前已應用在建材如天花板、塗料、隔熱材等 (洪明瑞、曾昱菱、陳瑞鈴、李文忠, 2008)。除天然的吸濕調濕材料，人

造材料正發展中，如丙烯酸酯共聚物塗料(Wang et al., 2011)。



2-2-3奈米銀抗菌材料

2-2-3-1銀奈米化之發展

銀很早就用於人類生活中，具不同用途，早期銀的抗菌效能尚不為人知時，就已開始使用，如蒙古游牧民族很早就使用銀製容器保存馬奶，延緩酸化；十八世紀時，西方人發現使用銀湯匙餵食的嬰兒，健康狀況最佳 (蘇明德，2007)；十九世紀倡導手術室消毒滅菌，使術後感染病例大幅下降的李斯特(Joseph Lister)發明銀絲縫口針於手術使用(鍾金湯、劉仲康，1997)。殺菌能力被確認後，陸續發展出含銀之藥品、抗菌材，如硝酸銀用以治療結膜炎，磺胺銀藥膏用於燙傷處理。而後，隨科技進步，將銀粒子縮小至介於 1nm 至 100nm 之間的奈米級尺度，且用途更為廣泛，直至 2009 年，超過 800 項產品上市，從紡織品、化妝品到 3C 產品都可能含有奈米銀，存在的形式可能是液態、粉狀、固態或膠體(Quadros et al., 2010)。雖奈米化之後其物理、化學性質有所不同，卻具更佳之抗菌效果，表面積增加對抗菌性能提升也有幫助。

奈米銀的殺菌機制(圖 2-2)如下:

與菌體表面接觸後

- 1.與細菌表面的膜蛋白與其結合，使膜蛋白變性；
- 2.細胞壁正負離子量發生不平衡的現象，因而產生拉力，當細胞壁被拉破後通透性增加，使菌體破裂。

進入菌體後

1. 與含有硫氫鍵的酵素作用，使酵素失去活性；
- 2.與體內的陰離子結合，影響體內許多正常生化反應的進行；
- 3.DNA 上的磷酸根與奈米銀鍵結，使 DNA 受損，也使複製發生問題；
- 4.會形成活性氧化物(reactive oxygen species, ROS)而損傷 DNA、細胞膜及膜蛋白(Marambio, 2010)(Marambio-Jones & Hoek, 2010)。

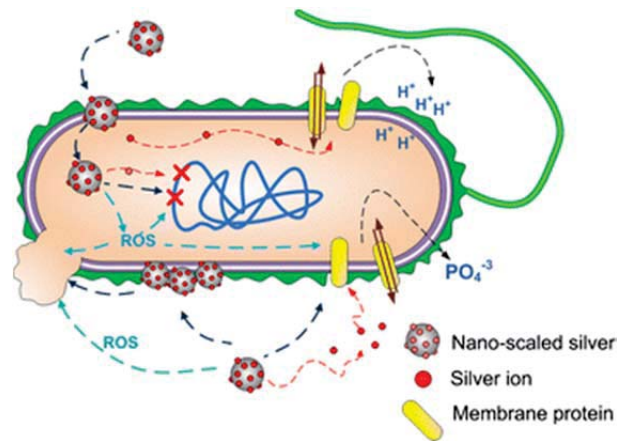


圖 2-2 奈米銀殺菌機制(Marambio et al., 2010)

當菌體死亡崩離析後，奈米銀會與其他尚未死亡的菌體繼續進行上述同樣步驟，部分銀離子會脫離奈米銀粒子形成自由態的銀離子與奈米銀形成接近之殺菌作用。雖然目前抗藥性問題較抗生素低，但使用較多時會有累積人體組織產生毒性反應的疑慮，且已發現有細菌質體或染色體帶有輸出幫浦基因，會將銀離子排出，因此對銀具抗藥性(Silver, 2006)，此外，有許多研究對於廣為使用之奈米銀粒子，若流佈於環境中對環境、生態及人類的影響正評估中(Quadros, 2010)，前述抗藥性的問題也同樣受重視。目前已有研究往奈米銀均質分散、保留或增強殺菌功能但不影響人體發展。為了避免膠結，若選用有機化學物質做為分散劑，除影響環境、對人體可能造成傷害，抗菌效能也可能降低。目前有研究以無機物如黏土材料或天然聚合物如幾丁聚醣做為載體。

黏土材料可經脫層作用使其形成奈米片狀結構，且具有極強負電荷，因此吸附奈米銀於其上，不易脫落，而附於其上的奈米粒子不會受到離子間作用力及凡得瓦力造成奈米粒子相互影響(Su et al., 2009);以幾丁聚醣(chitosan)做為載體時，可運用其具有正電荷的特性，以吸附菌體(Banerjee et al., 2010)。

以脫層之黏土材料或幾丁聚醣做為載體其優點如下:

- 1.均質分散：使奈米銀可在較低濃度即有較佳效果。
- 2.穩定性高：奈米銀幾乎不會從載體脫附，降低進入人體細胞內的濃度，避免於體內累積導致銀質沉著病(Argyria)的發生。

3.維持效能：與有機分散劑包覆處理的奈米銀比較，效能較高，前者雖然經過包覆可減少奈米銀的聚集，但因為奈米銀被包覆，使效能降低，使用劑量需增加。

4.載體對環境及人體傷害較小(林江珍，2009)：

原料可取自天然。蒙脫土、幾丁聚醣常用在生醫材料，因其對人體幾乎不產生毒性，甚至對人體健康有益。

5.不會讓細菌對其產生抗性:因其不會進入細胞體，輸出幫浦功能無法發揮。

從以上可知，其抗菌機制，會因為使用分散劑而不同，Banerjee 等人(2009)以幾丁聚醣為載體，製作含碘幾丁聚醣奈米銀(CS-AgNP)，Su 等人(2009)以黏土礦脫層產生的奈米矽片為載體，製作奈米矽片銀(AgNP/NSP)，其共同之抗菌機制如下：

- 1.載體黏附菌體表面，其上的奈米銀會破壞細胞壁，干擾局部細胞膜的完整；
- 2.被破壞的細菌增殖受到抑制；
- 3.造成 ROS 產物大量產生，菌體無法負荷，使在膜中的蛋白質（通道、孔隙、受器）的功能受影響，DNA 受損。

含碘幾丁聚醣奈米銀(CS-AgNP)將三個具有殺菌功效的物質結合，並充分發揮其各自的功能，使其比單獨存在其一殺菌物質更有效用，幾丁聚醣用於吸附菌體使之貼於細胞壁，留於壁上及膜上的奈米銀對菌體發動攻勢，且幫助碘形成碘原子，從奈米銀產生的破洞進入菌體，進入後，會破壞部分官能基鍵結狀態，使得結構改變功能受損，被破壞的包含蛋白質、DNA，並產生大量 ROS 產物，進而使細胞死亡，幾丁聚醣上的奈米銀雖然不會進入細胞，但也會產生 ROS 產物。

奈米矽片銀(AgNP/NSP)為國人研發出對人體細胞及基因毒性極低之抗菌材，動物實驗發現有助預防傷口感染，並促進傷口癒合(洪達任，2007)，具製成傷口(含

燒燙傷)抗菌敷料之潛力,對革蘭氏陽性菌及陰性菌皆具抗菌效果(林江珍,2009),也能抑制真菌孢子發芽(包翊絹,2007),目前已有商品上市。

2-2-3-1 奈米矽片銀

由國立台灣大學高分子所林江珍教授策劃並執行”台大促進產學合作先導計畫”研發出之奈米矽片銀,經跨領域合作以了解其特性,合作單位包含台大醫學院毒理所及台大醫院皮膚部等,確認其效能優於奈米銀,且對人體幾乎無健康之影響,有關奈米矽片銀相關研究持續發展中。以下主要以林江珍等人(2009)、Su等人(2009,2011)所做與奈米矽片銀相關之製成方式、結構、殺菌機制探究。

1.製成方式:

一般奈米銀製成方式有固態物質裂解、氣化成氣態再冷凝、氧化還原,奈米矽片銀主要以氧化還原法形成奈米銀,矽片的原料選擇容易形成奈米片狀結構的無機矽酸鹽黏土(inorganic phyllosilicate clays),如天然礦物組成的蒙脫土(montmorillonite, MMR)、合成的斯皂土(lucentite SWN)等,於水中膨脹、分散且陽離子交換能力強,使銀離子能交換進入矽片結構中。

其製法順序為:黏土加入去離子水中,使其成為泥漿化;硝酸銀加入泥漿中,充分攪拌,加入還原劑(NaBH_4 或 ethanol),使銀離子成為銀原子。製作過程須持續以約 300~600rpm 轉速攪拌。溶液溫度控制在 80°C ,製作時間約四小時,還原成銀原子所需時間較黏土脫層長,製作完成取決於顏色變化,當溶液顏色從黃色變成紅棕色表示銀離子已還原。若要取得銀原子較均勻分布且原子大小較平均,可選擇 ethanol 還原劑及使用氙氣燈(Xenon light)照射。

2.結構:

矽酸鹽黏土分層作用後,形成之矽片大小約 $80 \times 80 \times 1 \text{nm}^3 \sim 100 \times 100 \times 1 \text{nm}^3$,每片帶有負電荷約 12000~20000 個,表面積可達 $700 \sim 800 \text{m}^2/\text{g}$,附於其上的銀離子隨處理狀況不同,聚集附著矽片上的圓形銀粒子大小不同,隨研發技術的進步,密度增加,粒徑減小,以目前市售產品為例,銀粒子直徑約 25nm,每個粒子約有 250 個銀原子,已有研究製作出的銀粒子直徑可達 6.6nm 左右。

3.實驗室觀察之發現及據以推測殺菌機制:

為了解殺菌機制，研究方式包括以 β -galactosidase 含量測試細胞內膜洩漏狀況；以 DiBAC4(3)⁺(膜電位螢光染料)測試細胞膜電位發生之變化；以 2-NBDG 檢測細菌的葡萄糖攝入量；以 DCFH 被氧化形成會發出螢光 DCF 的變化狀況及加入抗氧化酵素後螢光變化的差異，了解 ROS 的形成是否與接觸奈米矽片銀有關；藉由抗氧化酵素加入與否細菌菌落數的生長狀況了解 ROS 的形成與細菌的死亡是否有關；以 PI/syto9 ratio 比較添加奈米矽片銀前後菌體存活狀態，亦可用於與具抗銀離子特性的菌種比較菌體存活狀態是否有差異。

此外為了解奈米矽片銀形成之結構外觀、與菌體接觸發生的變化(是否穿入菌體、或附著狀況)、接觸後菌體產生外觀上的改變等，使用場發射掃描式電子顯微鏡(FE-SEM)觀察。

Su 等人(2011)研究以同樣方法測試奈米矽片銀、奈米矽片、銀離子，以比較其差異，確認三者對殺菌效能的貢獻，並做細菌培養比較三者存在狀態下菌種生長差異。

細菌生長數及外觀差異:

奈米矽片銀、銀離子隨施加的濃度增加，菌種生長數降低；矽片銀影響極小，加入奈米矽片銀六小時後整體外觀與原形狀接近，但外表呈現皺縮狀，放大後可見奈米矽片銀貼在菌體表面，相較之下，奈米銀則被發現會進入菌體中。

細胞膜狀況:

細胞內膜破裂 β -galactosidase 會洩漏，可加入 ONPG(無色)，與其反應水解成 ONP(黃色)，以分光光度計偵測濃度改變之差異，證實奈米矽片銀會使細胞內膜破裂，矽片略有變化。

DiBAC4(3)⁺測試細胞膜電位發生變化(須配合流式細胞儀)之結果，細胞

破裂使膜電位去極化，DiBAC4(3)⁺保留在菌體內，表示失去了膜電位，奈米矽片銀保留的比例最高，其次為奈米銀離子，矽片略有影響，顯示矽片雖然沒有明顯的抑菌效果，但會破壞 LPS 或使所接觸的外膜的蛋白質失去功能而使膜的滲透性短暫的發生暫時性的變化。

細胞膜被破壞後的後續影響：

細胞破壞後影響菌體的營養攝取，葡萄糖攝入量可以流式細胞儀檢測 2-NBDG 的方式進行。接觸奈米矽片銀與接觸含矽片其葡萄糖攝入量，前者明顯極低，後者略微降低，因此確實能影響營養攝取。

ATP 合成減少也可代表細菌死亡，以 ATP 會與冷光酶反應產生冷光，因此冷光強度可確認 ATP 濃度狀態，接觸奈米矽片銀與接觸含矽片菌體內含有 ATP，前者明顯極低，後者降低幅度較小，顯示奈米矽片銀導致細菌死亡量極多。

是否添加及添加抗氧化劑、抗氧化酵素，觀察 ROS 的形成，發現添加相同濃度奈米矽片銀，再添加等濃度抗氧化酵素及脂質過氧化物抑制劑後培養菌種之結果，ROS 均明顯低於未做抗氧化處理者，證明接觸奈米矽片銀會使菌體產生 ROS；固態基含有奈米矽片銀，再加上抗氧化劑後培養，發現加上抗氧化劑者明顯菌落數較多顯示 ROS 的形成與細菌的死亡有關。

此外，為確認會有毒性累積之虞的銀離子是否從奈米矽片銀中釋出，因此離心後取上清液測試，無論是否以稀硝酸氧化溶液中的銀原子後測試，釋放量極少，不到 400ppb(取自奈米矽片銀濃度為重量百分比 1%的溶液)，存儲 6 個月亦同。

有研究以穿透式顯微鏡(TEM)觀察經過奈米矽片銀處理的細菌，無法正常以細胞分裂方式繁殖，因為分裂過程中，細胞膜與細胞壁無法擴張(洪達任，2007)。

奈米矽片銀對抗銀離子物種殺菌效能

抗銀離子物種的測試均顯示，奈米矽片銀仍具抗菌能力，且有無對銀離子具抗性無明顯差異，比較內容包括菌落培養與計數、PI/syto9 ratio、葡萄糖攝入量、ROS 生成量、ATP 生成量。

Su 等人(2011)研究指出，其研究之細菌菌種包含革蘭氏陽性及陰性菌，均有極佳抗菌效果，在好氧與厭氧狀態下均能抑制菌種生長。

殺菌機制:

從相關的實驗推論出殺菌機制為，奈米矽片銀吸附細菌，銀仍留在矽片上以多個原子聚集形成奈米粒子的狀態。有矽片銀附著的細胞壁 LPS 結構、穿膜蛋白(孔性蛋白、通道、受體)受影響，進而抑制細胞生長，也使細胞膜破裂，膜上呼吸鏈受損妨礙了電子及內外膜間質子的傳遞，電子的累積干擾 complex I，使得氧變成了氧自由基，再形成過氧化氫，ROS 大量產生的結果，使得菌體無法急速排除 ROS，ROS 使膜(特別是脂質的部分)被破壞，進而使細菌死亡。此外，膜的破損使膜電位發生改變，影響 ATP 合成、離子傳遞；奈米矽片銀的貼附，阻擋小分子及離子進入菌體，使菌體呈現不穩定狀態。有研究指出奈米矽片銀吸附細菌的狀況之下，細菌攝取碳源的能力會下降，此與 ATP 合成有關(林秀鴻，2010)。

2-2-4 室內生物氣膠控制技術

目前較普遍的技術有稀釋(Dilution)、過濾(Filtration)、紫外光(UVGI)、光觸媒(Photocatalytic oxidation)、離子(Plasmacluster ions、negative ions)、奈米技術(Nanotechnology)等(Bolashikov et al.,2009)，以下分項擇要說明。

2-2-4-1 稀釋

最容易、最廣為人知的方法，為降低室內空氣中微生物，可以經過通風、換氣的方式，稀釋微生物濃度，減少感染風險，空調系統的管線配置會影響空間中不同位置的稀釋程度。目前亦有發展個人空調系統，亦即空調進氣口在個人座位附近，可對個人形成保護(Muhič et al., 2006)，但缺點是，當人移動時，即無法發揮功用。

2-2-4-2 過濾

常配合空調系統或空氣清淨機使用，相對於高效率微粒空氣濾心(HEPA)，濾網過濾相對之下較為便宜。在實驗室研究中過濾材往往具有一定的移除功能，材質、孔隙、材質塗布抗菌材都會影響控制效率，使用時須注意更換時機，因濾網上的沈積會造成清淨效率降低及病原滋生。

目前過濾材的研究很多，包含濾材、塗布材的選擇和濾材改質，呈現出多樣化，如小蘗鹼(黃連萃取物)載負於纖維濾材表面(楊心豪、翁堉翔，2009)、薄荷萃取物塗佈於高週波電漿改質棉布(林翰君，2011)，防風萃取物塗佈於經過高週波低溫氧電漿改質的聚丙烯不織布(林振宏，2011)，所選用的塗佈物質取自中藥材；以聚苯胺塗佈於高週波氧氣電漿改質聚丙烯濾材(林毅，2011)，以奈米銀濾材披覆於紡綿不織布(曾國璋，2006)，將人工合成抗菌肽固定於濾材(楊心豪、陳林祈，2011)，此三項研究採用人工合成塗佈材；為求提升塗佈率及持久性，使濾材效用更高更穩定，於是有改質技術的研究，如前述高週波電漿改質技術。亦有研究從濾材(濾網)的改變並採用複合技術比較其效用，如研究帶電與不帶電濾材在電暈放電系統下其控制效率的差異(黃小林、蔡政賢，2010)，另有研究經過熱處理的奈米纖維濾網，在不同功率微波系統下的控制效率(Zhang et al., 2010)。

2-2-4-3 紫外光

其殺菌效果受其強度、持續時間影響，也受微生物細胞壁、外膜厚度影響。主要放置位置有天花板（牆面）、管線內兩種，裝設或使用時若能配合提升光的強度、氣流混合、向上氣流增強、氣流流速適中、相對濕度降低，可更為有效，殺菌範圍為受照射之空間及物品表面，使用時須注意避免人類暴露其照射下，紫外光一般常述及對人體的傷害有皮膚變紅、眼睛受傷如結膜炎等，造成影響主要以 UVB 及 UVC 為主(張振平，2008)，因此目前有將紫外光設置於中央空調通風管內，並於管內設計反射光源之材料，使紫外光照射無死角。微生物有 DNA 的修補機制，在有光且濕度較高的情況下會進行某些酵素反應，使其 DNA 得以修補，所以使用時要注意環境濕度(葉純宜、林明滢、陳小妮、王復德，2005)。

2-2-4-4 光觸媒

顧名思義，有些觸媒(催化劑)，透過光而使反應加速，如 TiO_2 在紫外光下，會產生電子-電洞對，波長較短之紫外光效果更佳(婁嘉玲，2005)，氧分子會接受電子，使電子無法歸位，此時若有水在 TiO_2 上，會使水發生反應產生氫氧自由基，氫氧自由基為氧化劑，會降解有機物質，若被充分將降解，最終產物為 CO_2 和 H_2O ，降解過程的中間產物有可能會堵塞光觸媒，降低效能，此狀況同理可推至分解病菌上，因此有研究再加上銀離子以提高控制效率。氫氧自由基有形成二次化學污染物質如醛、酮的疑慮。

2-2-4-5 離子

有些產生裝置會產生正負離子，有些則經過設計，目標使其僅產生負離子。以下分別敘述。

1. 離子簇技術(PCI):

離子產生器具有兩個電極，經過放電使空氣中的水分子反應形成帶正電的氫離子和帶負電荷的氧，此氫離子會與氧離子形成具有高反應性的氫氧自由基，將與病菌細胞壁的聚醣及其上的蛋白質或其他表面結構作用，造成菌體損傷、死亡。

2. 負離子

研究常用且較穩定產生較高濃度的方式為陰極放電，放電過程中，電子與空氣分子反應形成空氣負離子。釋出之負離子會附著於微生物表面並使其往壁面、天花板、地面漂移，而降低室內生物氣膠濃度，至於其抗菌能力則尚有爭議。有關更深入之空氣負離子產生方式、基本特性、抗菌機制與效能的探討請見章節 2-2-5。

2-2-4-6 其他控制技術

如臭氧、精油、矽膠吸濕旋轉輪(Desiccant rotor)、奈米技術等，有些尚待確認其對人體的影響，有些則是新技術的嘗試，需更多的研究加以確認及證實。

室內品質控制技術除考慮減低人員交互感染的機率，也需考量控制技術的操作便利性、低耗能、低噪音、美觀、符合人體工學、使生活於其間的人感覺舒適、成本等項目。



2-2-5 空氣負離子運用於控制生物氣膠

離子，一般常用於形容帶電分子或分子團簇，而前述的離子帶有負電荷時稱為負離子，反之，則稱為正離子(Fletcher et al., 2008)。目前的研究中，負離子被認為對人類健康有幫助，而對正離子則持負面的看法，雖然目前有研究同時以正離子及負離子之抗菌效果(Fletcher et al., 2007)之主題，但正離子對人體負面影響的顧慮，如會使人體釋放血清素、使人情緒受影響、降低警覺及注意力、睡眠障礙、記憶力減退、易焦慮等(Skromulis et al., 2012)，使得有關室內之生物控制技術傾向於運用負離子，並觀察其效能。

2-2-5-1 空氣負離子來源及產生方式

負離子會自然產生，為研究正負離子產生機制、其化學結構、對人體的影響等，發展出人造的產生方法。宇宙射線、雷電、暴風雨、植物、放射物質(土壤、岩層、空氣中)、水作用(產生衝擊、霧化至空氣等)都可能是負離子產生來源，有研究指出，具不同林相的森林，負離子濃度不同，以檜木林最多，平均可達 2×10^4 ions/cm³ 以上，最低的杉木林，可達近 3×10^3 ions/cm³ 左右；而正負平均濃度比值，也以檜木林最佳(值最低)，若與瀑布區相比，其他區域則相形失色，瀑布區負離子濃度可達 4×10^4 ions/cm³ 以上，正負平均濃度比值，更低於檜木林(吳致呈、顏麗鳳，2004)。楊心豪等人(2009)於八個森林遊樂區採樣探討空氣負離子濃度，平均濃度介於 $1 \times 10^3 \sim 6.2 \times 10^5$ ions/cm³ 左右，因此政府鼓勵民眾親近大自然；而人造瀑布設於庭院造景，同樣可以產生較高濃度的負離子，Wu 等人(2012)研究瀑布產生負離子空間及時間的濃度變化，發現距離瀑布越近，濃度越高；季節的差異以 6、7 月濃度最高，1 月最低，另加上三處灑水設備，以增高庭園負離子濃度，大部分的區域全年可達約 2×10^3 ions/cm³，夏天接近瀑布處可超過 1×10^4 ions/cm³。因此，人造負離子方式多從水及電研究。

人造負離子常運用電暈放電方式產生，此方式需要電源供應及電極，研究使用多需製造較高濃度負離子，因此電源通常為高壓電源，並須電極，當電壓梯度超過臨界值，發生電暈放電，產生電漿。在此電場中，電子有足夠的電能，使能

與在其路徑中的中性氣體分子發生碰撞而離子化。也有研究使用水滴破碎形成含有氧分子的帶負電小水滴，其依據的原理為“Lenard effect”(Yamada et al., 2006; Laza, 2009)，在大自然狀態下，大量的水彼此撞擊，或撞擊石頭等物質，會產生高濃度負離子，前述瀑布週邊負離子濃度較高原因在此，目前有運用水與空氣撞擊原理，讓高速流量的空氣，與集中的水霧碰撞的負離子產生儀器。與電暈放電產生的負離子(稱為 electrically generated negative ions, ENI)比較，水滴破碎產生的負離子(稱為 water-generated negative ions, WNI)，有明顯較長及較穩定的生命週期，負離子數 $1 \times 10^3 \text{ ions/cm}^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ ions/cm}^3$ 可維持 3 分鐘以上，ENI 維持不到 20 秒(Yamada et al., 2006)。負離子的產生裝置朝向降低電壓，提升濃度產生量、微型化、複合材料或技術研究。

室內空氣中的離子濃度，特別是正離子，與氡的衰變有關，在窗戶關閉前後，明顯的，正離子濃度與氡濃度成正相關，老舊房子若地板非水泥鋪面，氡濃度會較高，一樓會比較高樓層高，可能源自地表、地層，也可能源自建材，而氡本身對人體健康有不良影響已被證實，因此須注意其於室內的濃度。室內空氣中所含氧氣、氮氣、二氧化碳、水，也都會影響負離子的組成種類，形成負離子後，會漸向穩定態變化，有許多的中間產物會產生，當負離子與水形成負離子簇時，會更為穩定，停留於空氣中時間較長，但正離子與水吸引形成離子簇的量更多於負離子，因此負離子的移動力較高，電性發生中和的狀況較普遍，因此在室內空間中，正負平均濃度比值常高於 1(Kolarž et al., 2009)。

2-2-5-2 空氣負離子基本特性與影響因子

空氣負離子成分複雜，有些較穩定、有些不穩定而會反應生成其他產物，且其產生的種類、含量、生命週期會隨者空氣組成、濕度、空氣中含有負離子、微粒的濃度、和離子產生源的距離、高度有所變化(Parts et al., 2004; Wu et al., 2006)。

一般初級負離子有： O_2^- 、 O^- 、 OH^- ，其中含量最多的是 O_2^- ；次級陰離子有 CO_3^- 、 $O_2^-(H_2O)_n$ 、 NO_2^- 等，源自初級陰負離子及空氣中其他成分，如 $O_2^-(H_2O)_n$ 、 $OH^-(H_2O)_n$ 的生成與空氣中的水有關， $NO_3^-(HNO_3)_m(H_2O)_n$ 與 O_3 、 NO_x 、 H_2O 的存在有關，當 O_3 濃度高於 25ppmv 時，幾乎全用於形成 O_2^- (Skalny et al., 2004)。Sekimoto 等人(2011)檢視自己團隊研究及相關文獻，整理出室內主要空氣成分產生反應形成負離子的過程，如圖 2-3，反應過程會產生圖內包含 O_3 、 HNO_3 、 NO_2 等分子，將與負離子發生反應，產生其他負離子。

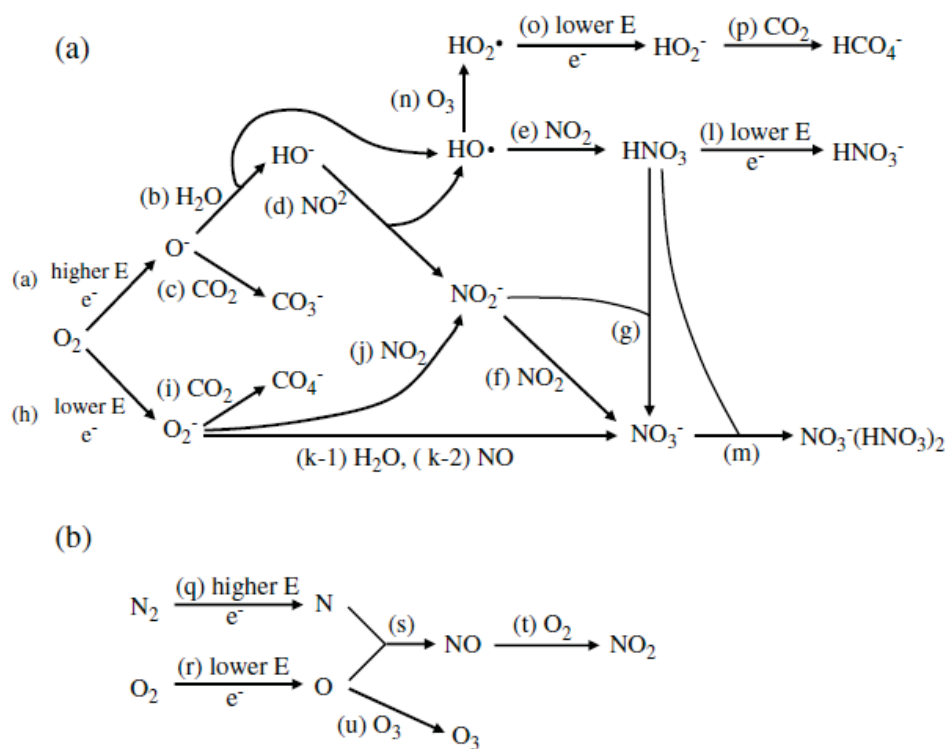


圖 2-3 以針尖電極之電暈放電產生空氣負離子之反應過程(Sekimoto et al.,2011)

其中， O_2^- 、 OH_2^- 、 OH^- 生命週期小於 10^{-3} 秒，以 O_2^- 最短；而 NO_3^- (HNO_3)₂、 NO_3^- 生命週期約 10 秒左右，以前者較高； CO_3^- 、 NO_2^- 生命週期接近 1 秒。這些負離子會和水產生團簇，少則 2 個水分子，多則可達 16 個分子。

電暈放電於實驗艙中，若空氣組成接近真實環境， $N_2O_2^-$ 含量最高，其次為 NO_3^- 。 $N_2O_2^-$ 來自於 O_2^- 、 O_3^- 分別與 N_2O 反應， O_3^- 來自於 O^- 、 O_2^- 分別與 O_3 反應，及電子與 O_3 反應、 O^- 與 O_2^- 反應。負離子濃度較高時，負離子的生命週期會因為碰撞機會增加而變短；濕度可增進穩定性因而生命週期增加(吳致呈，2006)。



2-2-5-3 空氣負離對人類健康的影響

負離子的研究範圍極廣如醫學、材料科學、污染控制等，有關醫學的研究如負離子對身體、心理健康的影響。一項關於負離子對心理神經內分泌免疫網絡的影響，其研究包含短時間(2.5 小時)接觸及較長時間(兩週，每天 2.5 小時)接觸，並做生理測量，包含肝、腎功能，血液檢查，脈搏等基本項目、壓力指標如 IgA 等、自主神經系統相關參數、免疫相關參數，如 IL-2、血液黏性、NK cells 活性等，發現，短期暴露狀況下，IL-2、IL-4、血液黏性、心跳速度有顯著變化，IL-2 改變特別大；經公式計算及迴歸統計，發現其值明顯高於對照組；長期暴露時，僅明顯增加 NK cells 活性，而 NK cells 活性對與腫瘤免疫及對抗病原、病毒來說，極為重要，因此短期、中期接觸負離子對健康有益，此研究推估長期接觸將持續活化 NK cells，可減低癌症發生，減少罹患傳染病(Otsuki et al., 2009)。

另有一動物實驗即與負離子濃度抑制癌症腫瘤效果有關之研究有關，此研究發現，對自然殺手細胞(NK cells)有活化作用，且隨吸入負離子時間增長，活化比例越高，若未再提供負離子，NK cells 活化比例會再降低；且有吸入負離子之老鼠，其腫瘤生長較慢，存活時間較長，若與其他治療方式配合，有加乘效果，與前一實驗之推論，部分接近(Yamada et al., 2006)，對胃潰瘍的實驗鼠，以低劑量負離子治療，具效果(Deleanu et al., 2005)。

經前症候群常困擾婦女，有研究針對具有此困擾、年齡介於 19 至 26 歲女性，每天接受 1.7×10^4 ions/cm³ 的負離子劑量 15~20 分鐘，持續至少 20 天，症狀明顯緩解，確認與生理系統中血清素與腦內啡的濃度有關(Laza, 2009)。

負離子對於心肺系統功能有良好影響，年輕人在運動的時候，若處在有負離子的環境中，運動後心跳、脈搏及呼吸狀況恢復較快(Laza, 2009)。現代人常使用電腦，負離子可緩解因操作電腦產生的不適症狀(Nakane et al., 2002)。Skromulis 等人(2012)整理負離子對人類健康的影響有促進深入和持久性睡眠、減少焦慮、改善記憶、提高疼痛的耐受性增加、改善腦部功能等。

2-2-5-4空氣負離子對室內生物氣膠的控制機制與效能

目前確定的空氣負離子對室內生物氣膠的控制機制為使負離子生物氣膠的表面帶有負離子並產生電移動，負離子本身是否具有殺菌作用則有爭議。有一說是負離子開啟後會產生臭氧，臭氧已證實具殺菌作用；另一說是細菌的細胞膜因負離子供應許多電荷，膜產生向外靜電壓力，其表面變得粗糙，當超過其抗張強度，細胞崩解(Mendis et al., 2000)。有研究指出負離子裝置開啟時，發現實驗所用的七種菌中，只有 *Mycobacterium parafortuitum* 會死亡，其研究針對具殺菌功能可能的原因設計，負離子、電場、臭氧都可能是原因，因此設計讓三者分別單獨與菌體接觸(分別擋住其他兩個)，以確認真正的原因。結果發現主因為臭氧，次要因素為細胞表面電穿孔，穿孔主要是電場造成(Fletcher et al., 2007)。

在有負離子存在的環境下，菌種培養出之菌落數，與給予的營養基、菌體處於對數生長期或穩定期、暴露於負離子的時間、菌的種類等有關，如以培養於培養基 4 小時做比較，營養基的營養較多元的 TSA、NA，菌種減少量比 King's media(單一碳源-glycerol)多；穩定期的菌體，菌種減少量明顯多於對數生長期之菌體；有關暴露時間與可培養量減少的比例，需超過 12 分鐘(與負離子尖端距離 3cm，濃度大於 2×10^6 ions/cm³)，可培養量才減少 1%，至 250 分鐘，*Pseudomonas fluorescens* 減少 40%左右，*E.coli* 減少約 32%，需時極長(Tyagi et al., 2008)。

黃建賓(2008)研究以針尖黏著奈米碳管與否，討論不同放電電壓及濕度環境下，生物氣膠的控制效率及差異，針狀電極沾附奈米碳管狀態下，可使產生負離子效率較佳，但奈米碳管會耗損使濃度無法長時間穩定，且隨時間衰減，青黴菌(孢子)及酵母菌在濕度 70%時，大腸桿菌及枯草桿菌在濕度 50%時控制效率較佳，總控制效率以細菌優於真菌，最佳的為枯草桿菌，最差的為酵母菌。濕度 50%，負離子濃度平均 1.04×10^6 ions/cm³ 時，枯草桿菌控制效率可達近 50%。為了解微型負離子產生裝置配戴於胸前，對呼吸範圍生物氣膠的控制效率及空間上的差異；陳彥潔(2009)同樣對針尖黏著奈米碳管與否效率上的差異做研究，結果發現，負離子濃度最高值在面部高度，前方 5cm 處，控制效率最佳位置在面部高度，前方 5~12cm 處，與負離子濃度正相關，控制效率最佳的菌種為青黴菌(孢子)，可達近 50%。

第3章實驗設備與方法

3-1 實驗系統設備及材料

本實驗系統由乾淨空氣供應單元、生物氣膠產生單元、負離子產生單元、室內環境模擬及生物氣膠控制單元、生物氣膠採樣單元組成。另外，並使用數種監測儀器。

各單元使用儀器設備如下：

- 一、乾淨空氣供應單元：包含空氣壓縮機 (air compressor)、過濾裝置 (含 active carbon 及 HEPA filter)、擴散乾燥管 (diffusion dry)、質量流量控制器 (mass flow controller)、增濕裝置 (含曝氣瓶 humidifier 及恆溫水浴槽 water bath)。
- 二、生物氣膠產生單元：包含氣膠產生器 (Collison Three-jet Nebulizer, BGI Inc.)、質量流量控制器 (mass flow controller)、擴散乾燥管 (diffusion dry)、電性中和器 (Kr-85 Particle Charge Neutralizer, Model 3077, TSI, USA)。
- 三、負離子產生單元：包含高壓電源供應器 (Model SL300, SPELLMAN, USA)、絕緣材料包覆之耐高壓電線、不鏽鋼針。
- 四、室內環境模擬及生物氣膠控制單元：包含不鏽鋼實驗艙、白色聚丙烯 (PP) 薄板及所貼附之布材。負離子產生單元將與此單元相接。
- 五、生物氣膠採樣單元：包含衝擊瓶型式之採樣器 ” SKC Biosampler ” (SKC inc., Eighty Four, PA)，搭配採樣抽氣幫浦。
- 六、相關監測儀器儀器有：空氣離子偵測器 (Model ITC-201A, ANDES, Japan)、溫濕度偵測器 (Temperature and Humidity Analyzer, Q-trak, Model 18551, TSI, USA)。

各單元配置儀器設備及架設位置如圖 3-1，實驗流程如圖 3-2。

將氣閥打開後，空氣壓縮機即啟動，氣流進入系統，依序經過前述過濾、乾燥裝置去除氣流中的微粒及水分後，分為三道氣流，第一道氣流流經生物氣膠產生單元後進入實驗艙；第二道和第三道氣流分別為再經過一支乾燥管的乾空氣及

經過增濕裝置的濕空氣，此兩道氣流會合後，進入實驗艙。三道氣流均可以質量流量控制器調整流量，以控制生物氣膠進入量、乾淨氣流進入量及實驗艙中氣體的相對濕度。實驗艙以透明壓克力板封口，並於其上開兩個直徑 1.5cm 圓孔以裝設負離子產生單元之不鏽鋼針尖及供生物氣膠採樣使用，開孔位置如圖 3-4。



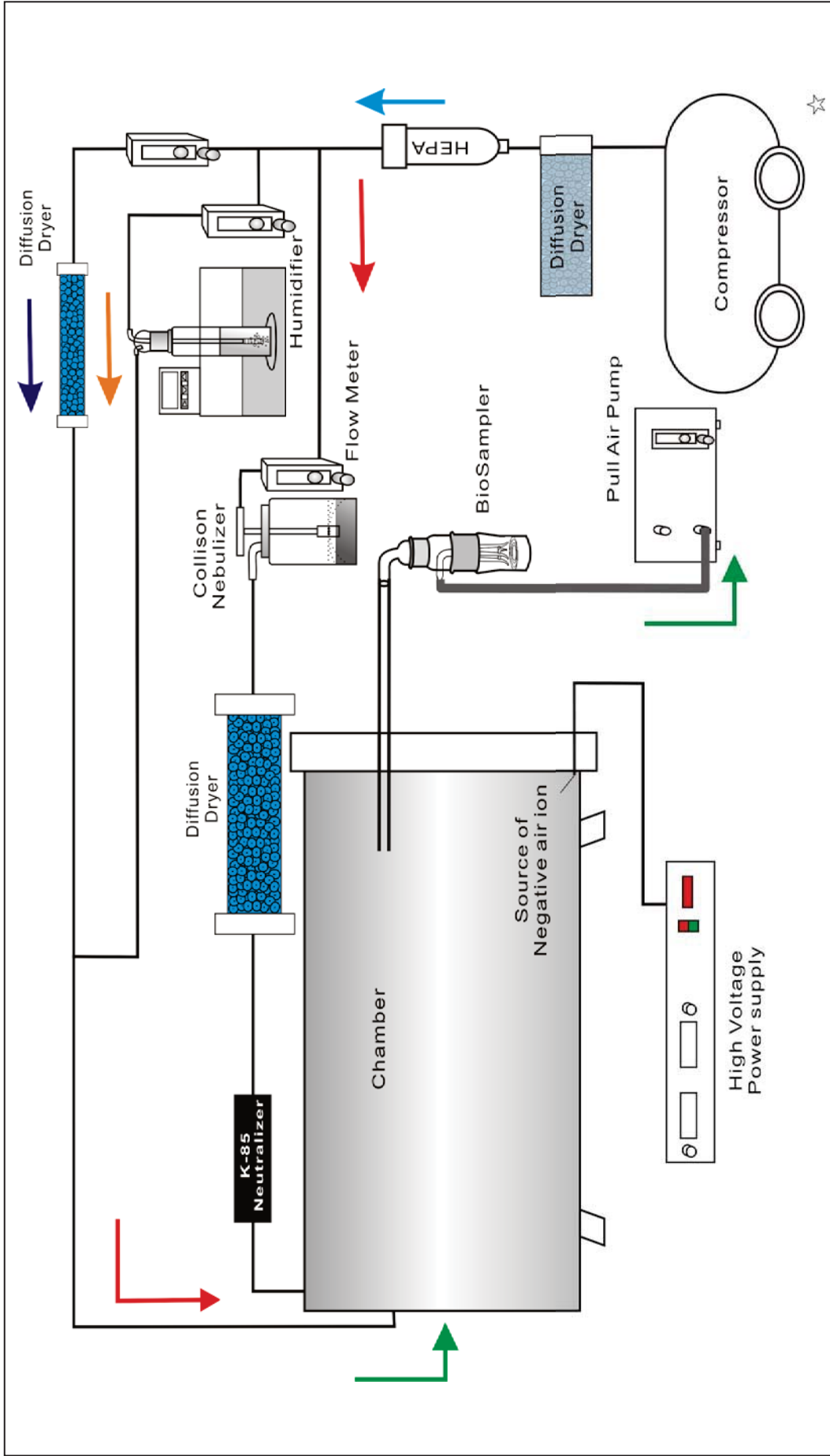


圖 3-1 實驗系統配置圖

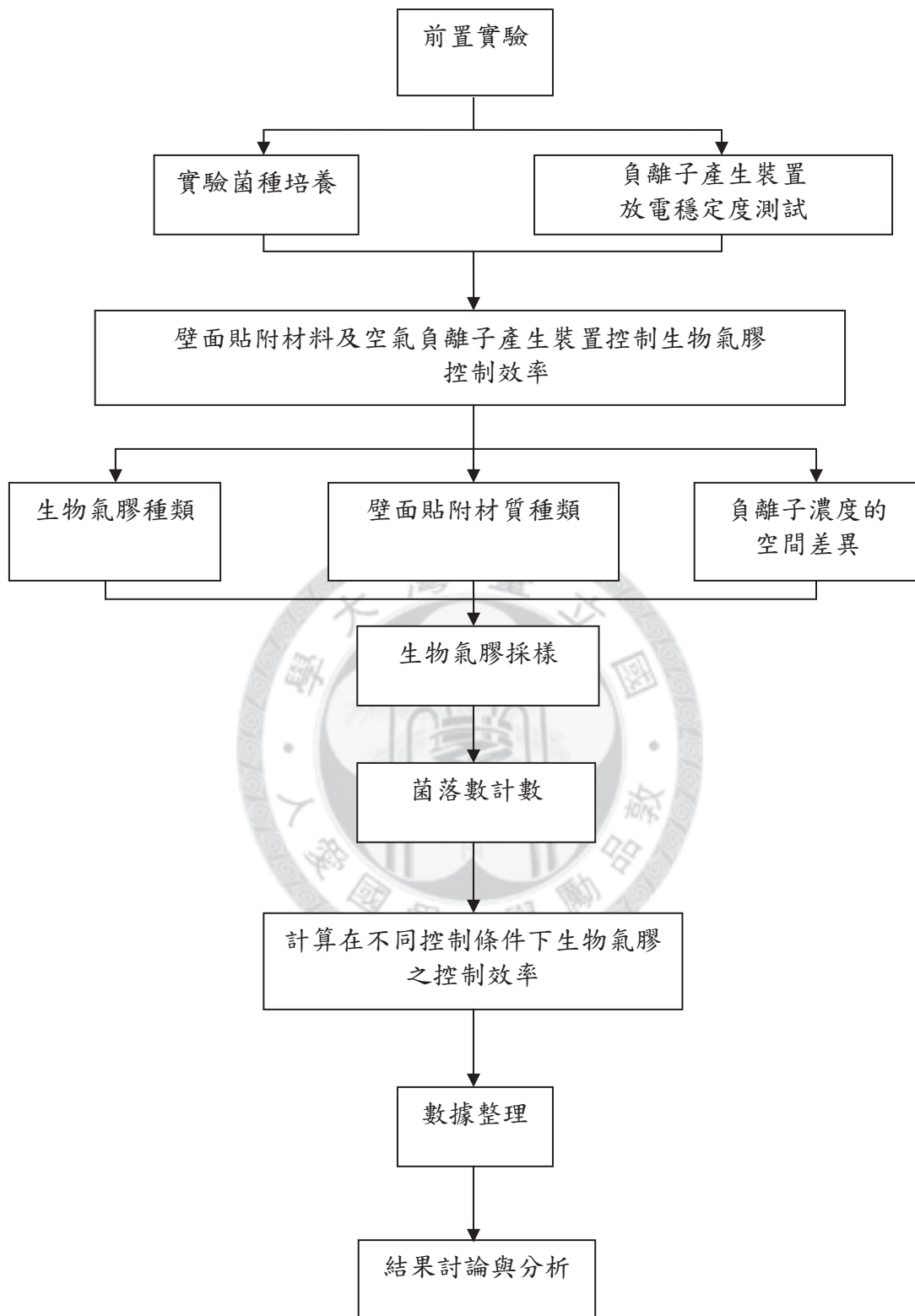


圖 3-2 實驗流程圖

3-1-2 實驗設備

1. 氣膠產生器(Collison Three-jet Nebulizer,BGI Inc.)

利用高壓載流氣體，將液相微生物懸浮液霧化，產生生物氣膠。此為細緻的雙流霧化過程，將液體吸入音速噴射氣流，以形成液滴(droplet)。

2. 擴散乾燥管(Diffusion Dryer,Model 306200,TSI,USA)

經由氣膠產生器所產生之生物氣膠，為富含水分之液滴，易受重力影響下沉，需經過乾燥處理，使微生物能繼續懸浮於空氣中。

3. Kr85 電性中和器(Kr-85 Particle Charge Neutralizer, Model 3077, TSI,USA)

帶電荷之生物氣膠容易在傳輸過程中減損，微生物經本實驗系統霧化、乾燥後會帶有電荷，因此利用含有 Krypton-85 放射物質的電性中和器，藉由此放射性物質在衰變過程中釋放出來的粒子，使周邊空氣分子解離形成正、負離子之後，迅速附著到生物氣膠的表面，進入到實驗艙中的生物氣膠即可呈現電中性的狀態。

4. 生物氣膠採樣器-SKC Biosampler (SKC inc.,Eighty Four, PA)

屬高速衝擊瓶，有研究整理指出針對部分菌種採樣效率較 AGI-30 sampler 佳，酵母菌運用衝擊瓶其採樣效率較濾紙高，枯草桿菌採樣使用衝擊瓶或衝擊器較濾紙佳(Jyotshna Mandal et al., 2011)。本研究採樣時於採集瓶段加入 20ml 無菌去離子水，搭配調整好流量為 12.5 L/min 的採樣抽氣幫浦，採樣時瓶中流速約 340 m/s。採樣時間最高 5 分鐘。

此採樣器採樣原理為，採樣開啟抽氣幫浦後，空氣中的生物氣膠因負壓而被抽入採樣器中。採樣時，因為噴嘴的特殊設計，使微生物跟著旋轉的氣流進入採樣液，減輕因衝擊造成死亡而低估生物氣膠濃度。

5. 負離子產生單元

負離子產生裝置包含提供空氣離子化所需電能來源的 DC 高壓電源供應器 (Model SL300, SPELLMAN, USA)、做為產生空氣負離子放電電極的不鏽鋼針，及連接前兩者之電線。高壓電源供應器，其電壓與電流有轉鈕可供調整，電壓最高可達 30.0kV，電流最高可達 10mA，供電模組可提供正電，經更換亦可提供負電；不鏽鋼針尖做為放電電極，可使電性集中於針尖，在較低電壓的狀態下，進行有效的放電；連接前兩者之電線，需為具極佳絕緣材料包覆之耐高壓電線，使負離子產生單元開啟時，能將能量有效傳遞並保障機器及人員安全。

此單元開啟後，負極經過暗放電裝置 (dark discharge)，使不鏽鋼針尖釋放出電子，周圍空氣發生離子化，形成負離子。

6. 室內環境模擬及生物氣膠控制單元

此控制單元包含不鏽鋼實驗艙、白色聚丙烯 (PP) 薄板及所貼附之布材，負離子產生單元將與此單元相接。

不鏽鋼實驗艙為圓柱狀，內側直徑為 38cm，內側柱長 79cm，開口截面積約 1134 cm²，體積約 90L。含生物氣膠氣流由後側上方進入，乾淨氣流由後側中央進入 (詳見圖 3-1)。

為了解壁面貼附不同布材對生物氣膠控置效率之影響，布材直接貼附實驗艙有其困難，因此先將布材貼以白膠貼附於博士膜，再將博士膜有黏性的一側貼於抗張力高、彈性大特性之白色聚丙烯 (PP) 薄板，薄板捲成圓柱狀並相嵌使其能緊貼實驗艙壁，內側後方亦以前述方式貼附，整個艙體內側僅前端透明壓克力板面未貼附材料。

貼附之布材除材質不同，亦分為有噴附奈米矽片銀及無噴附奈米矽片銀兩種。奈米矽片銀水溶液為國立台灣大學林江珍教授發明 (商品名: 銀彈 900, 先進國際醫藥奈米技術股份有限公司製造，白蓮士科技有限公司總代理)，將天然黏土脫層精粹成一片片奈米矽片，並將奈米銀粒子結合於其上，每片矽片上有 6~8 個奈米銀粒子，每個銀粒子估計含有 250 個銀原子。奈米矽片銀規格如表 3-1 所示，模

擬圖如圖 3-3 所示。

表 3-1 奈米矽片銀規格

奈米矽片銀	尺寸
奈米矽片	$100 \times 100 \times 1 \text{ nm}^3$
銀粒子	直徑 25 nm

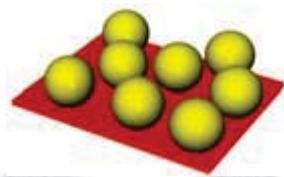


圖 3-3 奈米矽片銀模擬圖(林，2009)

7. 空氣負離子偵測器

本研究以空氣離子偵測器(Model ITC-201A, ANDES, Japan)偵測實驗艙中空氣負離子濃度。空氣離子帶有電荷，所以在電場下具有電移動性，當空氣正負離子的電移動度大於 $0.5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 時，可被此儀器量測到。

此儀器可量測出的離子濃度範圍為 $10 \sim 1.236 \times 10^6 \text{ ions/cm}^3$ ，解析度為 $\pm 10 \text{ ions/cm}^3$ ，除了能分別量測正負離子濃度外，同時也能測量環境溫度及濕度。使用時可選擇連續記錄時間，至多 30 分鐘，開啟後每 0.5 秒鐘記錄一個數據於偵測器中，經連接附加軟體可輸出偵測器所記錄的資料。

8. 溫濕度偵測器(Temperature and Humidity Analyzer, Q-trak, Model18551, TSI, USA)

本實驗主要運用其能偵測並記錄溫度、相對濕度的功能。此儀器溫度、相對濕度偵測範圍分別為 $0\text{-}60^\circ\text{C}$ (誤差 $\pm 0.6^\circ\text{C}$)、 $5\text{-}95\% \text{ RH}$ (誤差 $\pm 3\% \text{ RH}$)。Q-trak 同時也能偵測環境中 CO_2 、 CO 的濃度及風速。

3-1-3 實驗菌種培養方法

1. 選用菌種

實驗菌種考量環境中存在普遍性、相關研究是否常選擇使用，且所選菌種能涵蓋明顯不同特性(如細胞膜結構不同，產孢與否)。共計選擇細菌菌種及真菌菌種各兩種。革蘭氏陰性菌-大腸桿菌(*Escherichia coli*, 細胞體)，會產生內孢子的革蘭氏陽性菌-枯草桿菌(*Bacillus subtilis*, 孢子體)，酵母菌(*Candida famata var. flareri*, 細胞體)，青黴菌(*Penicillium citrinum*, 孢子體)，為本次實驗所用菌種，其外形與粒徑整理於表 3-2。

表 3-2 選用菌種之外形及粒徑

Species	Shape and size(μm)	Aerosol Size(μm)	Reference
bacteria			
<i>E.coli</i>	rod-shaped 0.3 to 1 by 1 to 6	GMAD: 0.87 GSD :1.16	Chen and Li(2005) Jung et al (2012)
<i>B.subtilis</i>	rod-shaped 0.89 to 1.53 by 0.4 to 0.67	CMD: 0.91 GSD :1.4	Carrera et al(2007) Agranovski et al(2003)
fungal			
<i>C.famata</i>	spheroidal 2.0 to 10(in diameter)	GMAD :2.44 GSD :1.15	Chen and Li(2005)
<i>P.citrinum</i>	subspheroidal to spheroidal 2.0 to 3.6(in diameter)	GMAD : 2.32 GSD :1.26	張靜文(2002)

* GMAD: geometric mean aerodynamic ; GSD: Geometric standard deviation

CMD: Count median diameters

2. 菌種來源及活化

本研究使用的四種菌種，大腸桿菌、枯草桿菌、酵母菌、青黴菌，均購自於財團法人食品工業發展研究所生物資源保存及研究中心(英文縮寫為 BCRC)，菌種編號依序為 10675、12145、21681、33168，中心提供此四種菌種均為冷凍乾燥管保存之型式。菌種取得後，依該中心隨菌所附說明進行開瓶及活化。無菌開瓶後加入滅菌去離子水，分別取適當的菌液量置於固態培養基及液態培養基中活化，取用量為，每盤固態培養基均置入 0.1ml 菌液，以無菌玻璃材質塗抹棒塗抹於固態培養基上，其餘置於液態培養基中。前兩種菌種置於固態培養基 TSA(Tryptic Soy Agar) 及液態培養基 LB(Lysogeny Broth) 中，酵母菌置於液態培養基 YMB(YM Broth) 及固態培養基 MEA(Malt Extract Agar)，青黴菌置於固態培養基 MEA，培養溫度細菌為 37°C，真菌為 25°C。存於固態培養基之酵母菌培養兩天，青黴菌培養一週，上述其餘菌種培養一天，即完成活化。液態培養基須以 80 rpm 之轉速振盪培養。

3. 菌種保存

於液態培養基活化後的菌種將取一部分於固態培養基中繼續培養。置於固態培養基前先做一系列之倍數稀釋，分別取 0.1ml 菌液，以無菌玻璃材質塗抹棒塗抹於固態培養基上。大腸桿菌於一天後，枯草桿菌於 18 至 24 小時內，酵母菌於 2 天後，以滅菌之接種環取一個菌落於 40ml 液態培養基中，置於適當溫度環境下(細菌為 37°C，真菌為 25°C)，以 80 rpm 之轉速振盪培養 5 小時後，取 0.85 ml 的菌液及 0.15 ml 已滅菌處理之甘油，放入螺旋蓋離心管保存瓶(容量 2ml)，以試管振盪器將菌液及甘油混合均勻，放入-80°C 環境下保存。

青黴菌活化培養一週後，滴入濃度為 0.05% 之 Tween 溶液，以便收集孢子。每盤含青黴菌的培養皿收集 10ml，共收集 20ml。調整離心機轉速至 7500rpm，進行離心 5 分鐘，取出後將上清液去除，加入無菌去離子水至 20ml，以試管振盪器將菌液與去離子水均勻混合後，重複前述離心步驟，共計離心 3 次。離心完成後，取 0.85 ml 的菌液及 0.15 ml 已滅菌處理之甘油，放入螺旋蓋離心管保存瓶(容

量 2ml)，以試管振盪器將菌液及甘油混合均勻，放入 -80°C 環境下保存。

4. 實驗所需懸浮液之調製

大腸桿菌懸浮液

將菌種於 -80°C 環境取出置於室溫下，待解凍後，取 0.1ml 菌液，置入 40ml 液態培養基(LB)中，於 37°C 環境下，以 80 rpm 之轉速振盪培養 24 小時後，取出 0.1ml 做倍數稀釋，培養於固態培養基(TSA)。24 小時後，以滅菌之接種環取一個菌落於 50ml 液態培養基中，置於 37°C 環境下，以 80 rpm 之轉速，振盪培養 24 小時。為使實驗採樣之樣本，菌落計數能符合統計上有效之數據，亦即樣本取 0.1ml 塗抹於每盤固態培養基上，菌落數能介於 30 至 300 個範圍內，需將菌液濃度調整至適當範圍；為使菌種能分散於液體中不膠結並去除干擾實驗之較小懸浮微粒，且所用液體不至於汙染實驗設備，需將菌液離心並以無菌去離子水替換。

已活化的大腸桿菌液取 10ml 進行離心 5 分鐘(離心機轉速為 2500 rpm)，取出後將上清液去除，加入無菌去離子水至 10ml，以試管振盪器將菌液與去離子水均勻混合後，重複前述離心步驟，共計離心 3 次。離心完成的菌液需調整至適當濃度。前述菌液量包含調整濃度所需之量。菌液最終濃度以分光光度計微調，菌液量調整至 60ml。

枯草桿菌懸浮液

將菌種於 -80°C 環境取出置於室溫下，待解凍後，取 0.1ml 菌液，於 15ml 液態培養基(LB)中，置於 37°C 環境下，以 80 rpm 之轉速振盪培養 5 小時後，取 0.2ml 菌液，以無菌玻璃材質塗抹棒塗抹於固態培養基(TSA)上。

一週後，以滅菌之接種環刮取 1/2 盤含內孢子之菌株，置入 10ml 無菌去離子水，於 37°C 恆溫培養箱中，以 45rpm 之轉速振盪培養，使菌株均質分散，24 小時後，置於 80°C 恆溫水浴槽中 30 分鐘，以殺死菌體。取出後進行離心 10 分鐘(離心機轉速為 3500 rpm)，取出後將上清液及介於孢子及上清液之間已破碎的細胞體層(白色混濁狀)去除，加入無菌去離子水至 10ml，以試管振盪器將菌液與去離子水均勻混合後，重複前述離心步驟，共計離心 3 次。離心完成的菌液需調整至適

當濃度。前述菌液量包含調整濃度所需之量。菌液最終濃度以分光光度計微調，菌液量調整至 60ml。

酵母菌懸浮液

將菌種於-80°C環境取出置於室溫下，待解凍後，取 0.1ml 菌液，放入 40ml 液態培養基(YMB)中，於 25°C 恆溫培養箱中，以 80 rpm 之轉速振盪培養 24 小時後，取出 0.1ml 做倍數稀釋，培養於固態培養基(MEA)。48 小時後，以滅菌之接種環取一個菌落於 50ml 液態培養基中，置於 25°C 環境下，以 80 rpm 之轉速，振盪培養 24 小時。

已活化的酵母菌液取 10ml 進行離心 5 分鐘(離心機轉速為 2500 rpm)，取出後將上清液去除，加入無菌去離子水至 10ml，以試管振盪器將菌液與去離子水均勻混合後，重複前述離心步驟，共計離心 3 次。離心完成的菌液需調整至適當濃度。前述菌液量包含少量調整濃度所需之量。菌液最終濃度以分光光度計微調，菌液量調整至 60ml。

青黴菌懸浮液

將菌種於-80°C環境取出置於室溫下，待解凍後，取 0.2ml 菌液，以無菌玻璃材質塗抹棒塗抹於固態培養基(MEA)上，置於 25°C 環境下培養一週。

一週後，取出一盤滴入濃度為 0.05%之 Tween 溶液，每次滴入 1ml，將部分青黴菌洗下後，置入 15ml 離心管，約累積至 8~10ml 且菌液呈現深綠色為止。無菌去離子水補足至 10ml 後，調整離心機至 7500rpm，進行離心 5 分鐘，取出後將上清液去除，加入無菌去離子水至 10ml，以試管振盪器將菌液與去離子水均勻混合後，重複前述離心步驟，共計離心 3 次。離心完成的菌液需調整至適當濃度。前述菌液量包含調整濃度所需之量。菌液最終濃度以分光光度計微調，菌液量調整至 60ml。

3-1-4 生物氣膠產生單元

1. 實驗系統滅菌

菌液濃度調整完成、倒入氣膠產生器前，為避免實驗系統內有雜菌或有菌種殘留，先將九十五度酒精，取 50ml，倒入氣膠產生器，開啟空氣供應系統 30 分鐘。

2. 實驗系統流量、空氣濕度調整

實驗系統以酒精滅菌後，取出剩餘酒精，加入少量無菌去離子水，開啟空器供應系統 1 分鐘後取出去離子水並清洗氣膠產生器。加入 50ml 無菌去離子水，並以無菌去離子水加入曝氣瓶(調整空氣濕度所需)中，至適當水位高度。開啟空氣供應系統，以皂泡式流量計校正系統流量，連接氣膠產生器的管線空氣流量為 4LPM，另一連接實驗艙的管線空氣流量為 11LPM。以溫濕度偵測器(Q-track)測定實驗艙濕度，並分別調整連接乾濕空氣管線之流量控制器，使初始濕度控制在 50%~55%。

完成校正後，繼續保持空氣供應系統開啟 1 小時，使殘留於實驗系統中的酒精揮發完全。

3. 實驗系統產生生物氣膠

前述步驟完成後，將氣膠產生器置換成已調整好濃度之菌液 50ml，開啟空氣供應系統，進行生物氣膠相關測試及實驗。

3-1-5 室內環境模擬及生物氣膠控制單元

3-1-5-1 實驗艙內空間位置標示

為清楚表示實驗艙設備設置位置、採樣位置，故設定標示方式，標示方式如圖 3-4。

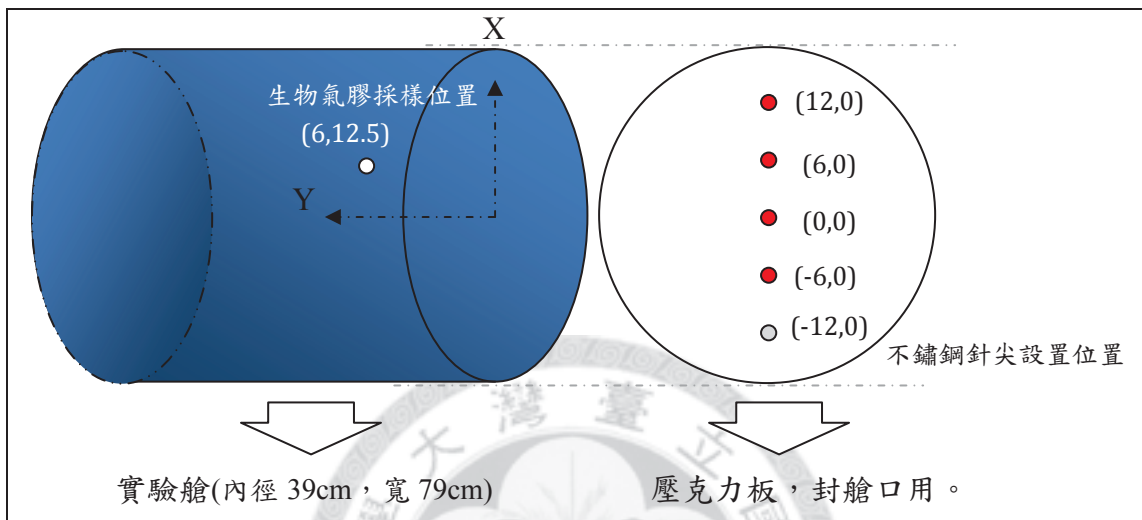


圖 3-4 實驗艙內空間位置標示

3-1-5-2 貼附艙壁材質處理及貼附實驗艙方式

貼附材質及選擇

已知具濾除微塵功能的濾網為優先選擇，最後選定之濾網為”淨呼吸靜電空氣濾網”(3M 台灣子公司製造)，等級為淨化級，材質為聚丙烯不織布。另擇一般市售之白色斯丁尼不織布(100%Acrylic fiber)，厚度 2mm，以及厚度同為 2mm 之棉質不織布(100% cotton)，於壁材對其有較佳控制效果之菌種，進一步進行增進效率研究。

奈米矽片銀塗布處理

將博士膜及所選用之布材裁剪成長 143cm，寬 79cm 之大小，以白膠分別貼附不同材質於博士膜光滑面，待白膠乾後，取奈米矽片銀水溶液(商品名: 銀彈 900，先進國際醫藥奈米技術股份有限公司製造，白蓮士科技有限公司總代理)200ml，以美術用噴槍搭配空壓機，將奈米矽片銀水溶液均勻噴塗於

布材上；另取博士膜及所選用之布材裁剪成直徑 39cm 之圓形，中間挖取直徑 2.5cm 之圓形，貼附布材方式及噴塗方式同前，唯所取奈米矽片銀水溶液為 30ml。噴塗完成後，開啟除濕機，選擇乾衣模式，將布材陰乾。

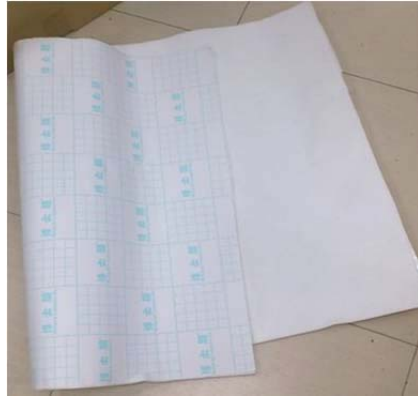
布材貼附實驗艙

選擇具抗張力高、彈性大特性之白色聚丙烯(PP)薄板，裁剪成長 124cm，寬 79cm 之大小，將完成上述處理之欲貼附材料貼於薄板上，捲好，薄板相疊處於前中後段各往內剪兩道 1cm 長以做為相扣部位，以膠帶貼牢，並於後側上方剪出直徑 2.5cm 之圓形，以便氣流通入實驗艙。另取薄板裁剪成直徑 39cm 之圓形，中間挖取直徑 2.5cm 之圓形，將布材貼於其上。將前述含布材之圓筒形薄板及圓形薄板置入實驗艙，關閉透明壓克力艙口，完成實驗艙內部裝置。壁面材料處理、組織及置入實驗艙過程顯示於圖 3-5。

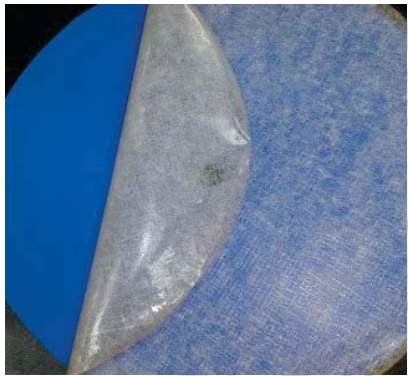




將聚丙烯不織布貼於博士膜上。
(左:已貼上不織布；右:尚未貼不織布)



不織布完整貼於博士膜上。
(左:背面，將貼上聚丙烯薄板；右:正面，接觸氣膠面)



將聚丙烯不織布背面博士膜具黏性的那一面貼於聚丙烯薄板上。



聚丙烯不織布貼上聚丙烯薄板後，將薄板捲成圓筒狀並固定。



含貼附材料之聚丙烯圓筒放入實驗艙中。



壁面貼附材料設置完成。

圖 3-5 壁面材料處理、組織及置入實驗艙過程。

3-1-6 負離子產生單元及濃度監測設備

負離子產生裝置包含高壓電源供應器、不鏽鋼針，及連接前兩者、具極佳絕緣材料包覆之耐高壓電線。使用前，針尖裝設於實驗艙(-12,0)之位置並固定仰角。電流控制於 $<0.01\text{mA}$ ，電壓可於開啟前後調整。開啟電壓後，負極經過暗放電，使不鏽鋼針尖釋放出電子，周圍空氣發生離子化，形成負離子。

負離子濃度測試直接於實驗艙中進行，運用空氣離子偵測器偵測，包含測試背景值及同一電壓下，不同位置及不同電壓下，同一位置之負離子濃度，以了解背景值影響程度及決定實驗使用電壓。

3-1-7 生物氣膠採樣單元

本實驗選用 SKC Biosampler 進行生物氣膠濃度相關測試及進行實驗。此採樣器為全玻璃材質製造，具三段構造(進氣口段、出氣口段、採集瓶段)，每次使用前先經過滅菌處理、組裝後，於採集瓶段加入 20ml 無菌去離子水，搭配調整好流量為 12.5 L/min 的採樣抽氣幫浦，採樣時瓶中流速約 340 m/s。採樣時間最高 5 分鐘，不同菌種採樣時間經測試後確定。採樣時，因為噴嘴的特殊設計，使微生物跟著旋轉的氣流進入採樣液，減輕因衝擊造成死亡而低估生物氣膠濃度。本研究無論前置實驗或生物氣膠控制效率之實驗均取採集瓶段中的菌液 0.1ml 塗抹於適當之固態培養基中，觀察菌種生長狀況並計算及比較。

3-1-8 前置實驗

3-1-8-1 生物氣膠初始濃度測試及實驗艙氣膠混合度測試

菌種粒徑及於實驗艙中之自然衰減將影響本研究調製微生物懸浮液濃度，菌種粒徑資料已整理於表 3-2，各菌種自然衰減狀況參考婁嘉玲(2005)研究紫外光與光觸媒濾材殺菌效果中之自然衰減常數測試結果。此外，亦需考量貼附壁材及負離子釋放可能減少的生物氣膠濃度預估加入霧化器之菌液濃度。經測試及調整，

務使所調製的菌液濃度，經過以 Biosampler 採樣之樣本取 0.1ml 塗抹於每盤固態培養基上，菌落數能介於 30 至 300 個範圍內。確認出各菌種之初始菌液濃度範圍後，可依此進行實驗，並可計算出實驗艙內實際生物氣膠濃度範圍。

測試過程同 3-1-4 生物氣膠產生單元及 3-1-7 生物氣膠採樣單元，亦即模擬實際實驗之流程。測試時，分別於系統開啟時及開啟後不同時間採集背景濃度，可計算混合係數以得知生物氣膠於系統中達到穩定狀態所需時間，以便能同時完成實驗艙氣膠混合度測試。

3-1-8-2 生物氣膠採樣間隔及採樣時間測試

不同生物氣膠在採樣後，不鏽鋼實驗艙內生物氣膠濃度回復至原採樣前濃度所需時間不同，因此需測試以確認各菌種之採樣間隔及採樣時間。測試時模擬實際實驗之流程，待艙內生物氣膠濃度穩定後，先預設採樣時間為五分鐘，測試不同採樣間隔時間，生物氣膠濃度下降趨勢後，確認實際實驗採樣間隔及採樣時間。採樣得到之樣本取 0.1ml 塗抹於每盤固態培養基上(枯草桿菌及大腸桿菌塗抹於 TSA，酵母菌及青黴菌塗抹於 MEA)，於適合該菌種之溫度環境下培養(細菌為 37℃，真菌為 25℃)，細菌類菌種培養一天、真菌類菌種培養兩天後計數並比較不同採樣間隔時間，生物氣膠濃度下降趨勢。

3-1-8-3 負離子產生單元穩定度及使用電壓測試

生物氣膠控制效率實驗時間內，需使負離子濃度維持與開啟初相同或在一定的濃度範圍內，因此需進行負離子產生單元穩定度測試，此測試直接於實驗艙中進行，模擬實際實驗之流程，運用空氣離子偵測器偵測，並根據輸出之數據判斷實驗採用之電壓。

3-1-9 生物氣膠控制效率之研究方法

實驗系統滅菌 30 分鐘後，加入 50ml 無菌去離子水，調整系統流量至 15LPM、濕度能維持在 45%~55%，保持空氣供應系統開啟 1 小時。前述步驟完成後，將氣膠產生器置換成已調整好濃度之菌液 50ml，開啟空氣供應系統，待生物氣膠濃度穩定，開始進行生物氣膠控制效率實驗。

採樣時，不同的生物氣膠依前置實驗結果於不同採樣間隔採樣，採樣得到之樣本取 0.1ml 塗抹於適當之固態培養基上(枯草桿菌及大腸桿菌塗抹於 TSA，酵母菌及青黴菌塗抹於 MEA)，以同方式製作三個樣本，於適合該菌種之溫度環境下培養(細菌為 37°C，真菌為 25°C)，細菌類菌種培養一天、真菌類菌種培養兩天後計數、計算平均數並換算濃度及計算控制效率。每次完整實驗共計採樣五次，第一次採樣數據為分母，第五次採樣數據為分子，計算在有無開啟負離子、艙內貼附不同材質時，生物氣膠下降幅度，比較不同壁面貼附材料及負離子開啟與否其生物氣膠控制效率。

3-1-10 生物氣膠增進效率之評估方式

本研究除計算剩餘率及控制效率外，亦評估增進效率，希望了解壁面貼附聚丙烯不織布材料後，施加負離子於空氣中使其對控制不同生物氣膠的效率增高的程度；此外，奈米矽片銀披覆於聚丙烯不織布並貼於壁面的控制效率是否高於未含奈米矽片銀聚丙烯不織布控制生物氣膠的效率，其增進幅度如何？以上兩者之增進效率於本研究中稱為”處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率”，公式舉例如(式 3-6)。

負離子的使用目前極為廣泛，舉凡電扇、桌燈、冷氣機、空氣清淨機等電器用品，有些品牌標榜能釋放負離子，因此在本研究中，另列式計算，在開啟負離子狀態下，壁面貼附材料的加設，是否對生物氣膠的控制，具有增進效果。此計算出之增進效率於本研究中稱為”壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率”，公式如(式 3-7)。

3-2 實驗計算方法與指標參數

前置實驗與生物氣膠控制效率實驗分析使用到的公式與指標參數有採樣濃度、混和係數、生物氣膠剩餘率、生物氣膠控制效率及處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率。

1.採樣濃度換算：

$$C\left(\frac{CFU}{m^3}\right) = \frac{\frac{N(CFU)}{0.1(ml)} \times V_{biosampler}(ml)}{Q_{biosampler}(LPM) \times t_{biosampler} \times 10^{-3}\left(\frac{m^3}{L}\right)} \times \text{稀釋倍數} \quad \dots \text{(式 3-1)}$$

$Q_{Biosampler}$ ：採樣流量(LPM)

$t_{biosampler}$ ：採樣時間(min)

$V_{biosampler}$ ：採樣液體積(ml)

N：菌落數(CFU)

2.混和係數(Mix Factor, MF)：

枯草桿菌及青黴菌使用 MF_{30} , 大腸桿菌及酵母菌使用 MF_{60} (黃建賓, 2008)。

$$MF_{30} = \frac{C_{background, t_n}\left(\frac{CFU}{m^3}\right)}{C_{background, t_{30}}\left(\frac{CFU}{m^3}\right)} \quad \dots \text{(式 3-2)}$$

$C_{background, t}$ ：生物氣膠於霧化器開啟 n 分鐘之背景濃度

$C_{background, t_{30}}$ ：生物氣膠於霧化器開啟 30 分鐘之背景濃度

$$MF_{60} = \frac{C_{background, t_n}\left(\frac{CFU}{m^3}\right)}{C_{background, t_{60}}\left(\frac{CFU}{m^3}\right)} \quad \dots \text{(式 3-3)}$$

$C_{background, t}$ ：生物氣膠於霧化器開啟 n 分鐘之背景濃度

$C_{background, t_{60}}$ ：生物氣膠於霧化器開啟 60 分鐘之背景濃度

3. 生物氣膠剩餘率:

$$R(\%) = \frac{C_5}{C_1} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (式 3-4)$$

C_1 : 生物氣膠之背景濃度 (CFU/m³) * 採樣第 1 次時系統內生物氣膠之濃度

C_n : 採樣第 5 次時系統內生物氣膠之濃度 (CFU/m³)

4. 生物氣膠控制效率:

$$\eta(\%) = \frac{C_1 - C_5}{C_1} \times 100\% \quad \dots \dots \dots (式 3-5)$$

C_1 : 生物氣膠之背景濃度 (CFU/m³)

C_5 : 採樣第 5 次時系統內生物氣膠之濃度 (CFU/m³)

5. 處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率:

分為使用負離子的增進效率及噴附奈米矽片銀的增進效率，其計算方式為增加此處理方法的控制效率減去未增加此處理方法的控制效率。以負離子對聚丙烯不織布貼附材質控制生物氣膠的增進效率計算方法為例，計算式如下:

$$\eta_{\text{enhanced, NAI/PP}} = \eta_{\text{NAI/PP}} - \eta_{\text{PP}} \quad \dots \dots \dots (式 3-6)$$

$\eta_{\text{NAI/PP}}$: 負離子開啟且壁面貼附聚丙烯不織布材質時之控制效率(%)

η_{PP} : 負離子未開啟且壁面貼附聚丙烯不織布材質時之控制效率(%)

6. 壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率:

$$\eta_{\text{enhanced,material}} = \eta_{\text{NAI/material}} - \eta_{\text{NAI(Stainless Steel)}} \dots\dots (式 3-7)$$

$\eta_{\text{NAI/material}}$: 負離子開啟且壁面貼附材料時之控制效率(%)

$\eta_{\text{NAI(Stainless Steel)}}$: 負離子開啟且壁面未貼附材料時之控制效率(%)



第4章結果與討論

4-1 前置實驗測試結果

4-1-1 生物氣膠初始濃度及實驗艙生物氣膠濃度達穩定所需時間

本研究採樣後之樣本取 0.1ml 塗抹於每盤固態培養基上，菌落需調整至介於 30 至 300 個範圍內，要達到前述目標，可調整空氣系統流量、採樣時間及流量、菌液濃度，前述三項均已確認並設定，因此只需使實驗艙內氣膠濃度介於 9.6×10^4 至 9.6×10^5 (CFU/m³) 之間即可。調整方式為將活化及離心完成的微生物懸浮液調整至適當濃度範圍，分別將稀釋倍數不同的菌液，模擬實際實驗流程進行採樣，依據與實際實驗相同之採樣及培養方法，參考培養出的菌落數調整菌液稀釋倍數至所需濃度。調整完成之生物氣膠初始濃度及盛裝於霧化器中之菌液濃度如表 4-1。表中所列生物氣膠初始濃度範圍即為正式實驗第一次採樣時實驗艙內生物氣膠之濃度範圍。

表 4-1 生物氣膠初始濃度與微生物懸浮液濃度對照表

菌種名稱	$C_{nebulizer}$ (CFU/ml)		$C_{background}$ (CFU/m ³)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
<i>E.coli</i>	2.5×10^7	3.4×10^7	2.5×10^5	8.0×10^5
<i>B.subtilis</i>	7.5×10^5	1.3×10^6	4.0×10^5	5.8×10^5
<i>C.famata</i>	2.7×10^7	7.3×10^7	2.7×10^5	6.4×10^5
<i>P.citrinum</i>	1.3×10^6	3.3×10^6	3.3×10^5	6.4×10^5

上述測試結果顯示，使用細胞體的 *E. coli* 及 *C. famata* 菌液所需濃度較高，進入實驗艙的生物氣膠濃度差異較大；*B. subtilis* 菌液調製之濃度穩定度最高，產生的生物氣膠濃度差異最小，其次為 *P. citrinum*，穩定度較高者皆為孢子體，推測因細胞體為活體，每次培養都會有所差異，因此，即便依照測定出的稀釋倍數處理，加上分光光度計的使用，還是不如孢子體穩定。孢子體的 *B. subtilis* 穩定度高於 *P. citrinum*，推測因 *B. subtilis* 孢子體粒徑較小，懸浮於水中及空氣中的狀況較佳。調製 *P. citrinum* 菌液時發現，注入菌體或無菌去離子水調整濃度時，須沿瓶壁小量注入，推測直接注入會擾動菌液，使 *P. citrinum* 孢子聚集、下沉，測

定出的濃度會被高估。

生物氣膠初始濃度測試時，分別於系統開啟時及開啟後不同時間取得生物氣膠背景濃度，並計算混合係數以得知生物氣膠於系統中達到穩定狀態所需時間。黃建賓(2008)研究不鏽鋼艙壁環境下負離子對生物氣膠控制效率，為使生物氣膠濃度維持穩定，設計混合係數，其研究發現 *E. coli* 及 *C. famata* 在開啟霧化器後 1 小時可達穩定，其餘菌種於 30 分鐘即可達穩定。因此本研究將菌種分為兩組進行測試，*E. coli* 及 *C. famata* 的穩定度測試於開啟系統後，每隔 20 分鐘進行一次採樣，直至 80 分鐘為止，以 60 分鐘時所採樣之濃度為基準，結果如圖 4-1；*B. subtilis* 和 *P. citrinum* 的穩定度測試以系統開啟 30 分鐘時所採樣之濃度為基準，開啟 30 分鐘前後採樣之數據與其比較，結果如圖 4-2。為避免生物氣膠累積造成後續實驗之第一次採樣濃度高估，因此除決定生物氣膠產生單元開啟後至開始進行實驗採樣所需時間，在開始進行實驗採樣前，先以 SKC Biosampler 抽取生物氣膠兩次，此兩次不計入實驗結果(採樣方法及採樣間隔時間與實際進行採樣相同)。

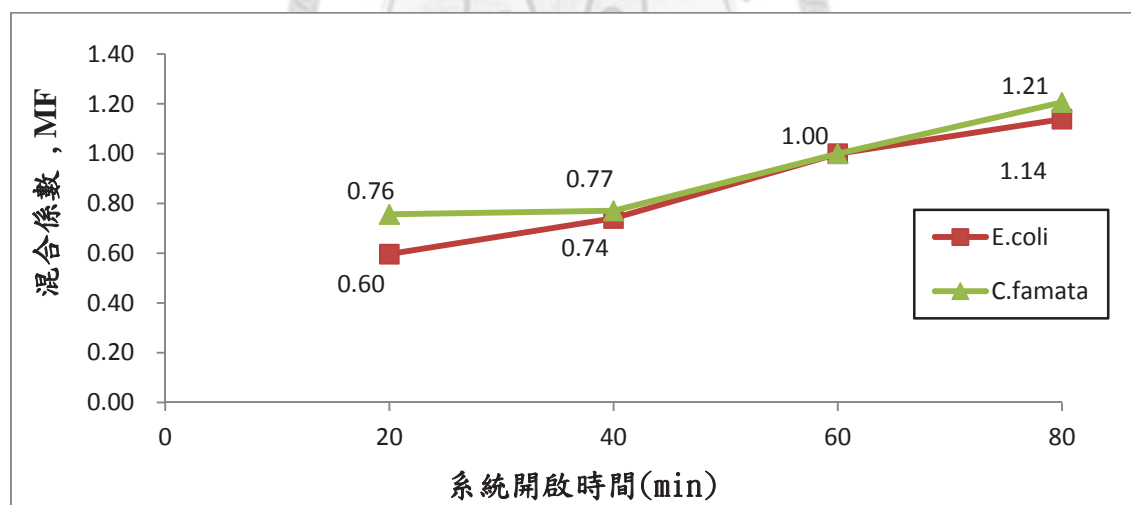


圖 4-1 生物氣膠於實驗艙之穩定度測試-*E. coli* 及 *C. famata*

由上圖可知，系統開啟後 60 分鐘，採樣濃度略升，其幅度小於開啟後 40 分鐘，因此 *E. coli* 及 *C. famata* 兩種菌種控制效率實驗於系統開啟後 60 分鐘，先採樣兩次後進行。

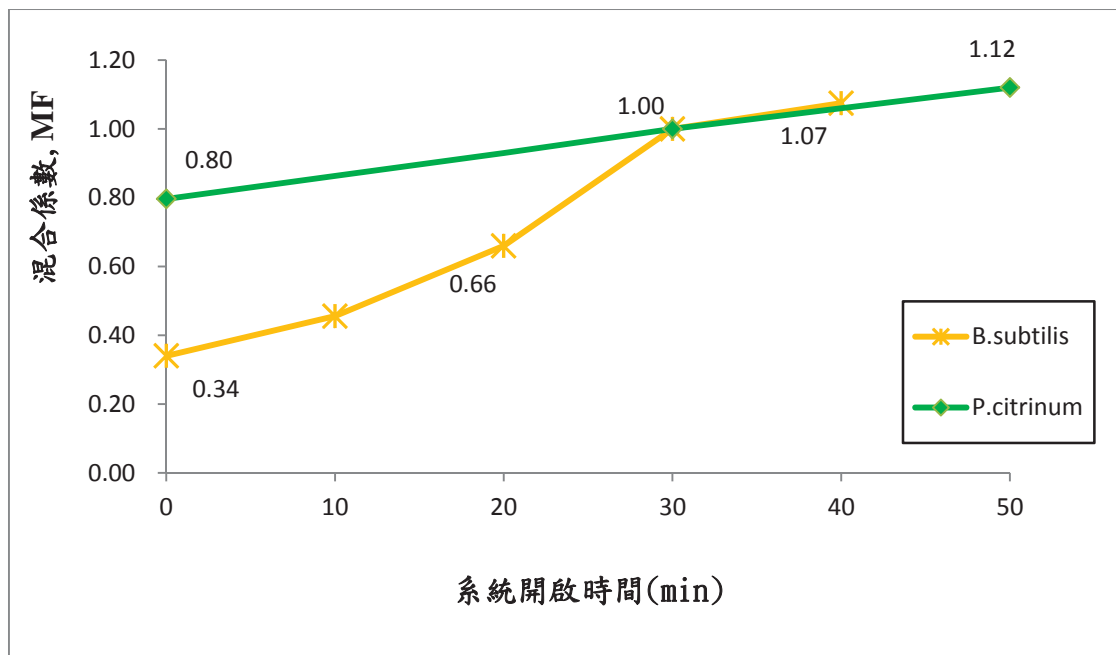


圖 4-2 生物氣膠於實驗艙之穩定度測試-*B. subtilis* 和 *P. citrinum*

由圖 4-2 可知，系統開啟後 30 分鐘，採樣濃度略升，其幅度小於剛開啟時，因此 *B. subtilis* 和 *P. citrinum* 兩種菌種控制效率實驗於系統開啟後 30 分鐘，先採樣兩次後進行。

4-1-2 決定生物氣膠採樣間隔及採樣時間

測試時模擬實際實驗之流程，待艙內生物氣膠濃度穩定後，先預設採樣時間為五分鐘，測試不同採樣間隔時間，生物氣膠濃度下降趨勢後，確認實際實驗採樣間隔及採樣時間。*E. coli*、*C. famata* 實驗所用均為細胞體，經測試，實驗結束後，霧化器內之菌液濃度高於開始實驗前；*B. subtilis* 為孢子型態，懸浮於滅菌去離子水的狀況優於前兩者，從運用分光光度計測量菌液濃度時，菌液震盪與否其數值的差異可證；*P. citrinum* 為孢子型態，霧化器中不會有新的孢子生成，甚至可能會有孢子黏附霧化器玻璃瓶壁或因孢子為疏水性，使霧化過程浮於懸浮液上方的孢子多於下方且聚集成孢子團，霧化的氣膠濃度將較快速下降，因此，前三種菌種採樣時間為五分鐘，*P. citrinum* 的採樣實驗為四分鐘。

此測試之採樣方式為，系統開啟並達生物氣膠濃度穩定後，進行第一次採樣，並依所設計之採樣間隔接續再採樣四次後，將第五次採樣所得菌落數與第一次採

樣所得菌落數比較，計算出各生物氣膠剩餘率，計算式為

$$R(\%) = \frac{C_5}{C_1} \times 100\%$$

C₁:採樣第 1 次時系統內生物氣膠之濃度
C₅:採樣第 5 次時系統內生物氣膠之濃度

不同採樣間隔時間菌種剩餘率之比較如表 4-2。

表 4-2 四種生物氣膠於不同採樣間隔時間剩餘率之比較

菌種	採樣間隔時間(分鐘)	平均剩餘率	標準差	備註
<i>E. coli</i>	12	79%	24.2%	
	13	88%	6.9%	*
	14	89%	7.3%	
<i>B. subtilis</i>	4	98%	11%	*
	5	165%	-	
<i>C. famata</i>	8	87%	4%	*
	9	99%	-	
	10	>120%	-	
<i>P. citrinum</i>	7	79%	14.2%	
	8	96%	21.4%	*
	9	106%	5.3%	

*表示最終採用之間隔時間

最終採用之間隔時間以生物氣膠剩餘率接近 100%且未超過前述數值，若有兩個採樣間隔時間所測得剩餘率的值接近時，優先選擇標準差較低者。若採樣過程中，其剩餘率值有明顯高於 100%者，亦不採用，因此 *E. coli* 採樣間隔為 13 分鐘，*B. subtilis* 採樣間隔為 4 分鐘、*C. famata* 採樣間隔為 8 分鐘，*P. citrinum* 採樣間隔為 8 分鐘。

從此結果可推論各菌種於不鏽鋼壁面材質環境下之自然衰減，需越高之菌種補充時間，表示其自然衰減較高，因此可知，自然衰減由高而低排列依序為 *E. coli*、*C. famata*、*P. citrinum*、*B. subtilis*。其中 *E. coli* 遠高於其他值，*C. famata*、*P. citrinum*

較接近，與婁嘉玲(2005)之研究結果一致，氣動粒徑較小之 *E. coli* 其自然衰減較快，有可能隨著在系統中停留時間的增加，造成其死亡率升高，或其漸失活性，於採樣後不易培養；也可能此菌對環境溫濕度較其他菌種敏感。另有可能其生物氣膠狀態下容易形成菌體聚集的狀況，亦即一個生物氣膠所含不只一個 *E. coli*。

由此兩者之測試結果，可確立各菌種實驗流程及時間，顯示於圖 4-3。

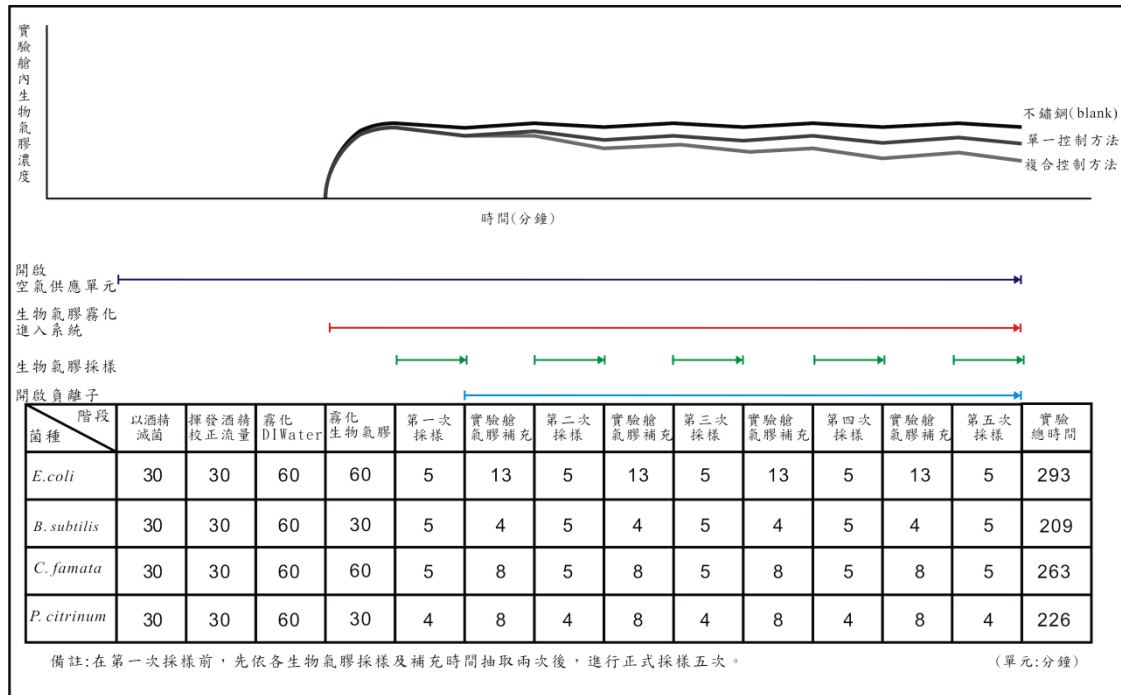


圖 4-3 各菌種實驗流程、主要實驗單元開啟時段及預測生物氣膠濃度下降趨勢

4-1-3 負離子產生單元所用放電電壓選擇及負離子空間分佈

生物氣膠控制效率實驗選擇以負離子及壁面貼附不同材質以控制生物氣膠，期望在實驗進行中，有高濃度之負離子在立體之實驗館空間中穩定存在。因此須先測試不同壁面貼附材質環境下，負離子可達 1.236×10^6 (ion/cm³) 以上所需電壓。測試結果如圖 4-4。

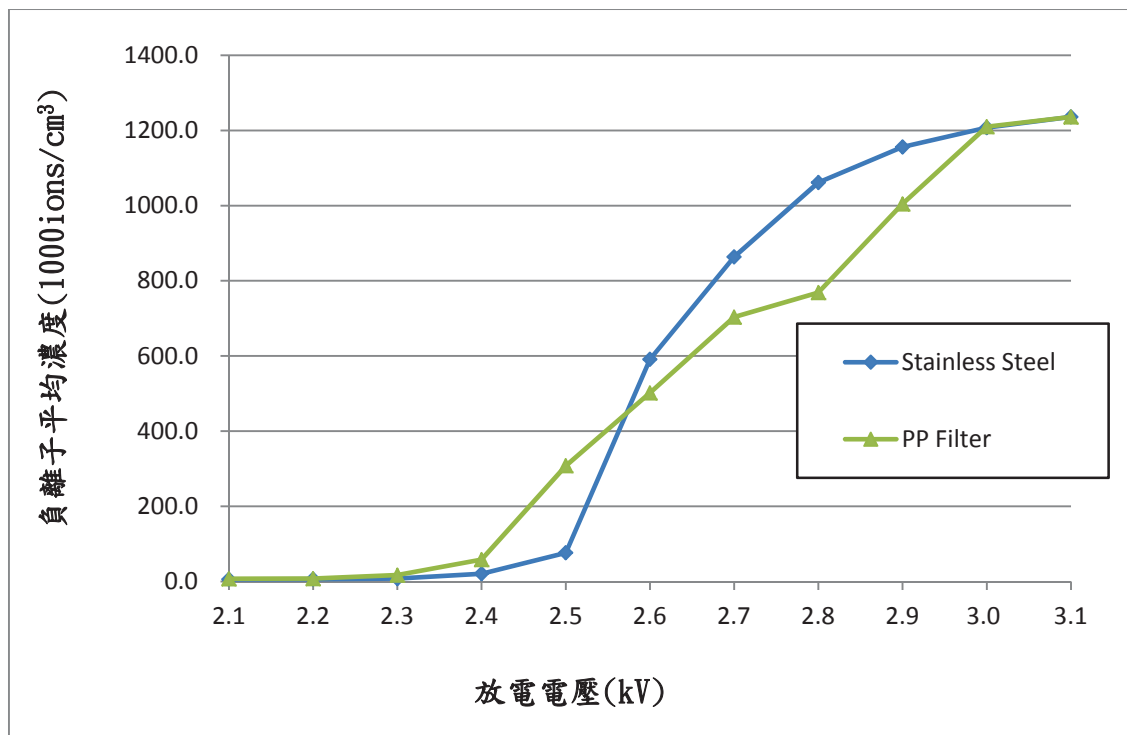


圖 4-4 不同壁面貼附材質環境下，不鏽鋼針尖於不同電壓下產生空氣負離子濃度之比較。

電壓於 3.1kV 時，二種不同壁材環境下均可達到負離子監測器的偵測極限 1.236×10^6 (ion/cm³)，因此選擇使用此電壓為本研究之放電電壓。

為了解負離子濃度在實驗艙中不同位置的濃度差異，開啟高壓電源供應器，調整放電電壓至 3.1kV，測試於不鏽鋼針尖前方四個不同距離(Y 軸)及四個不同高度(X 軸)的負離子濃度值。不鏽鋼針尖設置於(-12,0)，因此實驗艙下方較能維持高濃度負離子狀態，而上方於 15cm 左右亦可達高濃度，在兩道氣流進入艙前及生物氣膠採樣位置(6,12.5)前形成屏障，濃度分佈狀況如表 4-3、表 4-4。

表 4-3 不鏽鋼貼附材質環境下，不鏽鋼針尖產生空氣負離子濃度空間分佈

放電電壓:3.1kV
負離子濃度單位: 10^3ions/cm^3

Y (cm) \ X (cm)	0	5	10	15	備註: 濃度下降至低於 1236 之距離
12	<1	<1	167	>1236	20cm
6	<1	>1236	>1236	>1236	25cm
0	>1236	>1236	>1236	>1236	25.5cm
-6	>1236	>1236	>1236	>1236	20cm

表 4-4 聚丙烯不織布貼附材質環境下，不鏽鋼針尖產生空氣負離子濃度空間分佈

放電電壓:3.1kV
負離子濃度單位: 10^3ions/cm^3

Y (cm) \ X (cm)	0	5	10	15	備註: 濃度下降至低於 1236 之距離
12	<1	<1	229	>1236	19cm
6	<1	401	>1236	>1236	25cm
0	395	1172	>1236	>1236	26.8cm
-6	>1236	>1236	>1236	>1236	29cm

許多的研究顯示負離子產生裝置在產生負離子的過程中，會產生臭氧。吳致呈(2006)研究密閉空氣中負極放電產生臭氧之關係，其反應器規格近似本實驗，使用之負離子產生裝置放電原理相同，放電電極均為不鏽鋼針。研究發現，在乾淨空氣環境下設定負離子產生裝置之放電電壓為 15 kV 並開啟 1 小時，所生成的臭氧量低於 $0.5\mu\text{g h}^{-1}$ ，而實驗艙約 90L，經計算臭氧濃度遠低於我國室內空氣品質建議值第一類場所 0.03ppm 及第二類場所 0.05ppm(8 小時算術平均數或 8 小時累計採樣測值)，且本實驗所用電壓遠低於 15 kV，因此推估可忽略臭氧於此實驗中對生物氣膠控制效率的干擾。而吳致呈(2006)亦整理出負極放電產生臭氧與放電設備的電流或能量具高度相關之佐證研究文獻，因此本研究所採電流小於

0.01mA，使臭氧產生的濃度盡可能降低，另從圖 4-4、表 4-3、表 4-4 可見，當電壓於 3.1kV 時，三種不同壁材環境下均可達到負離子監測器的偵測極限 1.236×10^6 (ion/cm³)，因此選擇使用此電壓為本研究之放電電壓。經前置實驗建立之實驗控制條件，說明如表 4-5。

表 4-5 實驗控制條件

實驗參數	實驗條件
生物氣膠控制方法	負離子 壁面貼附材料
負離子	
電極材料	不鏽鋼針
電極位置(x,y)	(-12,0) 仰角 56°
放電電壓及電流	3.1kV, <0.01mA
壁面貼附材料	PP Filter(3M) 噴附奈米矽片銀、未噴附奈米矽片銀
生物氣膠	
種類	<i>B. subtilis</i> 、 <i>E. Coli</i> 、 <i>C. famata</i> 、 <i>P. citrinum</i>
生物氣膠流量	4 LPM
採樣位置(x,y)	(6,12.5)
採樣時間	5 分鐘 (<i>P. citrinum</i> 為 4 分鐘)
採樣流量	12.5 LPM
系統總流量	15 LPM
溫度	25°C
相對濕度	45~55%

備註:採樣位置及電極位置單位為 cm

4-2 生物氣膠剩餘率及控制效率

本研究以六種不同控制方式測試四種菌種之控制效率，每種控制方式結果均來自於三次控制條件及流程相同之重複實驗，結果分述如下。

E. coli 剩餘率及控制效率

E. coli 為革蘭氏陰性菌，於前置實驗可知其於不鏽鋼艙壁環境下，自然衰減狀況較明顯，氣膠動力值徑小於 1 μ m，從實驗結果可知控制效率以僅運用負離子控制時效率最高，其次為僅使用聚丙烯不織布，且此兩種控制效率遠高於其他處理方式。剩餘率及控制效率說明如表 4-6、圖 4-5。有關控制效率及增進效率各圖表所列控制方式之名稱以英文名稱或縮寫表示，Stainless Steel 代表不鏽鋼艙壁(未貼附材料)；Stainless Steel &NAI 代表不鏽鋼艙壁環境下開啟負離子裝置；PP 代表壁面已貼上聚丙烯不織布；PP&NAI 代表艙壁已貼聚丙烯不織布環境下開啟負離子裝置；PP&AgNPs/NSP 表示貼上艙壁的為含有奈米矽片銀的聚丙烯不織布；PP&AgNPs/NSP&NAI 表示在艙壁貼含有奈米矽片銀的聚丙烯不織布的環境下，開啟負離子裝置。

表 4-6 使用不同控制方法之 *E. coli* 剩餘率及控制效率

壁材及負離子開啟否	剩餘率(%)	控制效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel	100.0	0.0	6.9
Stainless Steel &NAI	70.8	29.2	8.2
PP	76.3	23.7	10.4
PP&NAI	90.3	9.7	13.9
PP&AgNPs/NSP	92.3	7.7	3.7
PP&AgNPs/NSP&NAI	101.3	-1.3	10.8

從實驗結果可見，只有聚丙烯不織布噴附奈米矽片銀加上空氣中含有高濃度負離子不具效果，可能的原因有將奈米矽片銀噴附於壁材的過程中改變了壁材狀態之外，奈米矽片銀具吸引較小粒子能力，但聚丙烯不織布帶負電量較高，因此電移動度較低、自然衰減較高的 *E. coli* 聚集在艙底前端附近，無法附於壁面，採樣時因採樣器連接抽氣幫浦，使其一起被採樣器抽入採樣瓶。其他二種控制效率明顯較低者推測也是因為聚丙烯不織布帶負電使近端 *E. coli* 無法附於壁面，其差異僅程度上的不同。

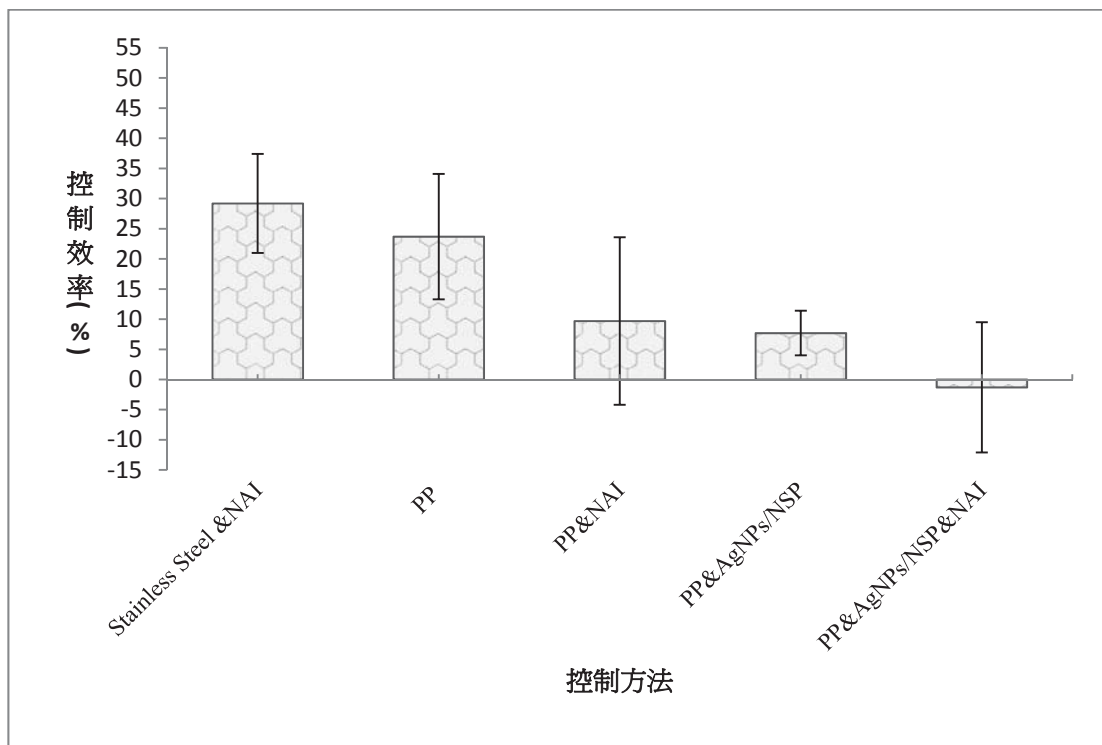


圖 4-5 使用不同控制方法之 *E. coli* 控制效率

B. subtilis 剩餘率及控制效率

B. subtilis 為革蘭氏陽性菌，產生之內孢子懸浮於空中的狀態極穩定(見圖 4-6)。從下列有關剩餘率及控制效率圖表中可見，控制效率最佳為僅運用負離子控制 *B. subtilis*，與 *E. coli* 同，對照比較後發現負離子對 *B. subtilis* 的控制效率高於 *E. coli*，結果與吳致呈(2006)同。

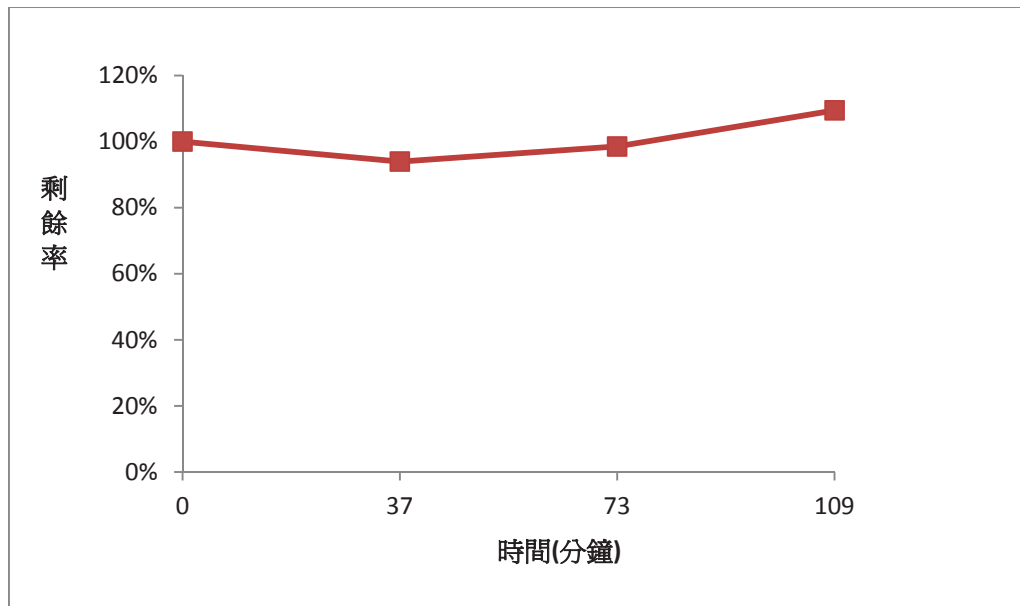


圖 4- 6 *B. subtilis* 於不同時間之採樣結果(壁材:Stainless Steel)

表 4- 7 使用不同控制方法之 *B. subtilis* 剩餘率及控制效率

壁材及負離子開啟與否	剩餘率(%)	控制效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel	100.0	0.0	8.9
Stainless Steel &NAI	67.8	32.2	4.5
PP	89.8	10.2	8.8
PP&NAI	82.3	17.7	8.8
PP&AgNPs/NSP	97.3	2.7	2.1
PP&AgNPs/NSP&NAI	70.3	29.7	11.0

此實驗結果發現負離子對 *B. subtilis* 影響較壁材種類大，控制效率差異可達 22%。從實驗結果可見，無論壁材為何，只要有施放負離子於空中，控制效率均較高。聚丙烯不織布壁材雖然效果不如負離子，但加上負離子的開啟，效果更佳，噴附奈米矽片銀於壁材，效果甚至可接近僅使用負離子控制 *B. subtilis*。

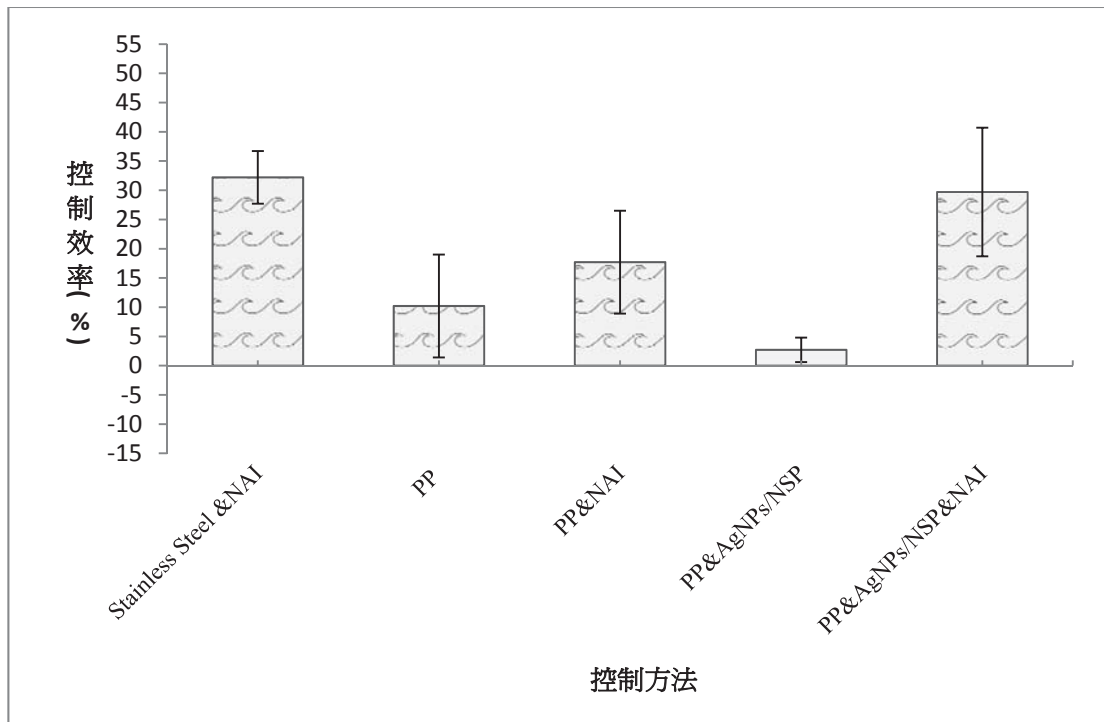


圖 4-7 使用不同控制方法之 *B. subtilis* 控制效率

C. famata 剩餘率及控制效率

C. famata 較易受到壁面材質的影響，從表 4-8、圖 4-8 可見，壁面影響明顯高於負離子，且效率差異可達 13%，與前兩種菌種不同。

表 4-8 使用不同控制方法之 *C. famata* 剩餘率及控制效率

壁材及負離子開啟否	剩餘率(%)	控制效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel	100.0	0.0	3.8
Stainless Steel /NAI	81.6	18.4	7.5
PP	68.6	31.4	20.3
PP&NAI	75.9	24.1	16.0
PP&AgNPs/NSP	99.7	0.3	4.8
PP&AgNPs/NSP&NAI	79.6	20.4	10.6

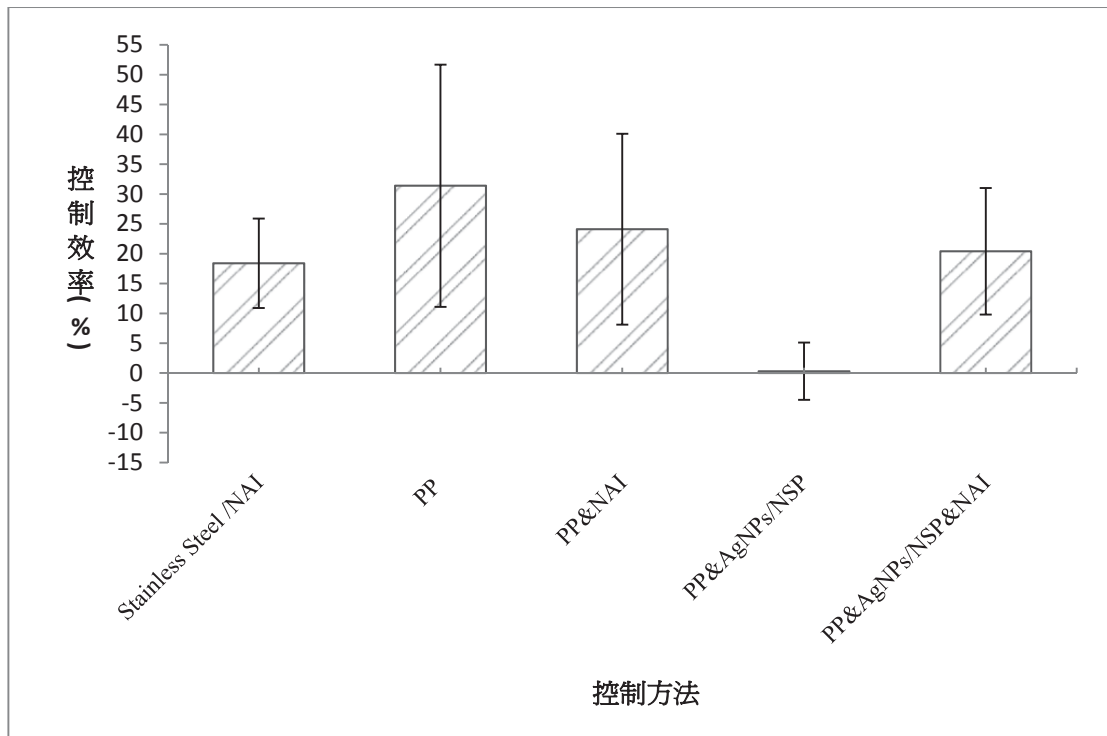


圖 4-8 使用不同控制方法之 *C. famata* 控制效率

另以白色 100% 斯丁尼 (Acrylic) 不織布測試，控制效率僅 2%，其表面與聚丙烯 (PP) 不織布比較，聚丙烯 (PP) 不織布分為兩層，表層為網狀結構，下層不織布密度較一般不織布低，粗糙度明顯較斯丁尼不織布及不鏽鋼高，比較控制效率，貼附聚丙烯不織布之控制效率遠高於斯丁尼不織布及不鏽鋼，因此推論此菌較容易受壁面粗糙度影響。

控制效率其次為聚丙烯不織布貼附材料加上施放負離子，再其次為貼附材上噴附奈米矽片銀加上負離子技術配合，雖效率不及僅存在壁材時，但推測壁材具粗糙度對負離子控制 *C. famata* 有幫助，包含以白色 100% 斯丁尼 (Acrylic) 不織布測試結果亦同，控制效率接近甚至高於實驗艙內僅含高濃度負離子 (不鏽鋼艙壁) 時，特別是同樣含有矽片銀時，控制效率增加幅度極為明顯。

不織布在噴附奈米矽片銀後若未使用負離子加以配合，控制效率明顯較低，以 100% 斯丁尼 (Acrylic) 不織布測試甚至無效，推測噴附過程影響不織布表面特性，如粗糙度、電荷分布等，經測試，噴附奈米矽片銀的布材，均帶正電，表面電荷隨布材及噴附之矽片銀濃度不同有差異。因此即使奈米矽片銀帶正電荷，推測能

吸引菌種，Su(2011)、Lin(2009)研究證實奈米矽片銀能附於細菌上，且具殺菌效能，在本研究中使用於控制生物氣膠仍無法產生較佳控制效果。斯丁尼(Acrylic)不織布控制 *C. famata* 效率如表 4-9、圖 4-9 所示。為標示方便，圖表中斯丁尼不織布以 PAN 縮寫表示，因其成分為 polyacrylonitrile。

表 4-9 選擇使用斯丁尼不織布為壁面貼附材料之 *C. famata* 控制效率

壁材及負離子開啟否	剩餘率(%)	控制效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel &NAI	81.6	18.4	7.5
PAN	98.4	1.6	8.3
PAN&NAI	82.7	17.3	7.3
PAN&AgNPs/NSP	106.8	-6.8	9.9
PAN&AgNPs/NSP&NAI	79.4	20.6	26.7

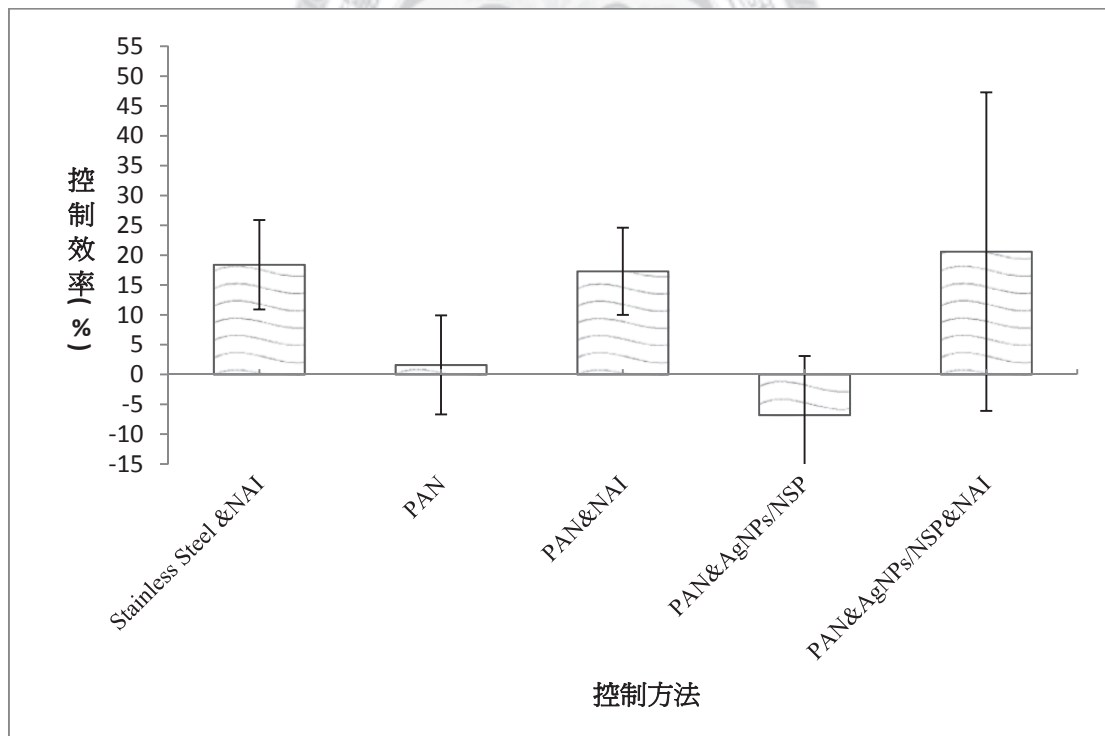


圖 4-9 選擇使用斯丁尼不織布為壁面貼附材料之 *C. famata* 控制效率

P. citrinum 剩餘率及控制效率

P. citrinum 孢子，其氣動粒徑大於 *B. subtilis* 內孢子，懸浮於空氣中的濃度穩定狀況僅次於 *B. subtilis*，在不鏽鋼壁材環境下，自然衰減較 *E. coli*、*C. famata* 小，使用壁面貼附材料與採用高濃度負離子的控制效率接近，仍以負離子的影響較高，此菌不同處理方法的控制效率均極為接近，未出現效率特別低的結果。控制效率介於約 21%~41%。

雖然 *B. subtilis* 的採樣間隔為 *P. citrinum* 的 1/2，以負離子控制兩種孢子，兩者的控制效率僅差 8.8%，因此推測對 *B. subtilis* 的控制效率高於 *P. citrinum*，結果與吳致呈(2006)同。另判斷聚丙烯不織布的控制效果 *P. citrinum* 高於 *B. subtilis*，聚丙烯不織布對 *B. subtilis* 的控制效率僅約 10.2%，對 *P. citrinum* 的控制效率可達 33.6%，相差 3 倍以上。各種處理方式對 *P. citrinum* 的控制效率說明如表 4-10、圖 4-10。

表 4- 10 使用不同控制方法之 *P. citrinum* 剩餘率及控制效率

壁材及負離子開啟否	剩餘率(%)	控制效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel	100.0	0.0	4.1
Stainless Steel &NAI	59.0	41.0	11.3
PP	66.4	33.6	6.5
PP&NAI	74.0	26.0	2.8
PP&AgNPs/NSP	73.6	26.4	2.6
PP&AgNPs/NSP&NAI	78.7	21.3	7.7

氣膠在空間中會歷經傳播及沉降，傳播時會因為氣流、氣膠濃度及重量產生擴散現象；重力對氣膠作用產生沉降，重力沉降可用史托克斯定律了解，氣膠重力沉降速度與氣膠密度、氣膠直徑的平方、重力加速度成正比，與空氣黏度呈反比，因此粒徑較大的真菌氣膠，其重力沉降影響大於粒徑較小的細菌氣膠。

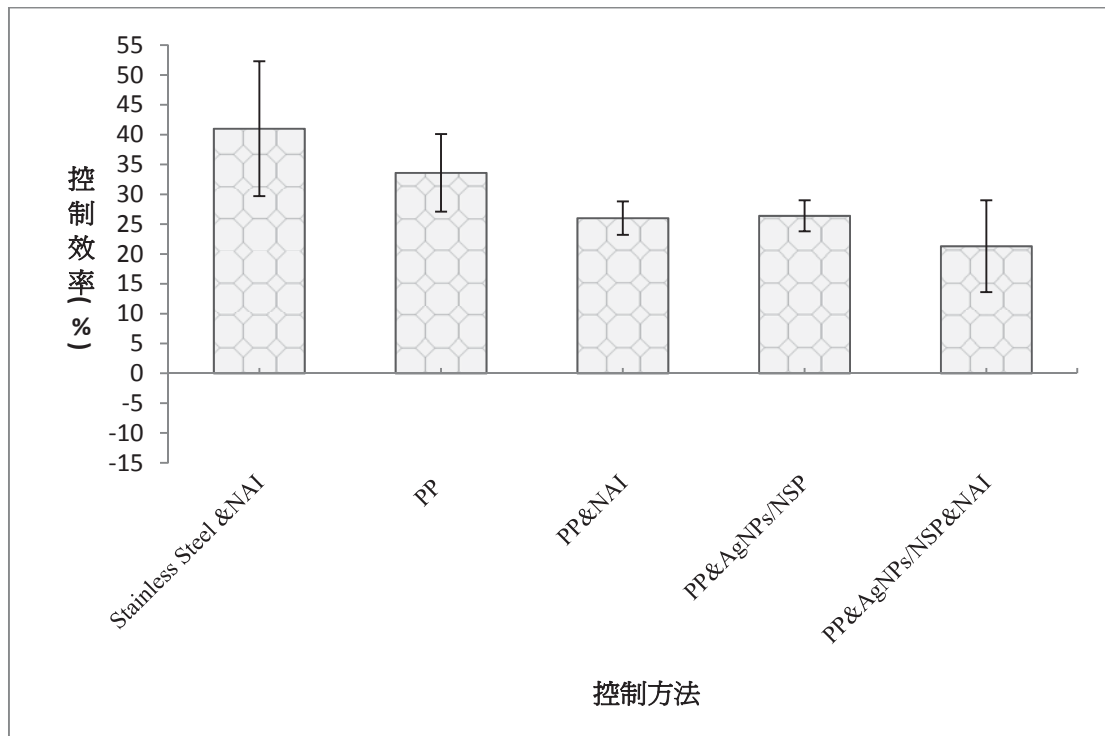


圖 4-10 使用不同控制方法之 *P. citrinum* 控制效率

氣膠經過電場充電和擴散充電而帶電後，其沉降就會受到所帶電荷及其本身粒徑影響，一般為表示氣膠在電場移動容易與否，常以電力移動性 Z_p (electrical mobility) 比較不同氣膠在電場移動快慢。帶電量越大且粒徑越小的氣膠，在電場中越容易移動。溫度梯度也會影響氣膠傳輸，本研究因實驗艙中溫度保持相同，氣膠移動不受溫度梯度影響。

負離子對微粒的充電機制主要有二，一為電場充電 (field charging)，一為擴散充電 (diffusion charging)，粒徑大於 $1\mu\text{m}$ 以電場充電為主；粒徑小於 $0.3\mu\text{m}$ 時，負離子與氣膠的布朗運動 (Brownian motion)，使兩者相互碰撞而帶電，所以較小粒徑氣膠以擴散充電為主；粒徑介於兩者間，則兩種影響程度接近。本研究中，細菌與真菌的粒徑大小，與前述對照，充電機制略有差異，*C. famata*、*P. citrinum* 粒徑大於 $2\mu\text{m}$ ，因此以電場充電為主；其他兩者氣動粒徑略小於 $1\mu\text{m}$ ，但其為桿狀，較長端超過 $1\mu\text{m}$ ，推測以電場充電影響較大，擴散充電的影響比重略高於 *C. famata* 和 *P. citrinum*。

但即使接觸負離子量大，碰撞、接觸時間長，氣膠表面積較大，氣膠帶電量仍有其極限，當氣膠表面負電和累積到極限時，多餘的電子會被排出。氣膠帶電之極限公式如下(Sheldin et al., 1960):

$$N_{max} = \frac{d_p^2 E_n}{4e}$$

其中

N_{max} : 氣膠所能帶有之最多電子數

d_p : 氣膠之粒徑(μm)

E_n : 自然發射電子需要的表面電場強度(負離子為 $3 \times 10^4 \text{ stV cm}^{-1}$)

e : 基本電荷單位($=4.8 \times 10^{-10} \text{ stC}$)

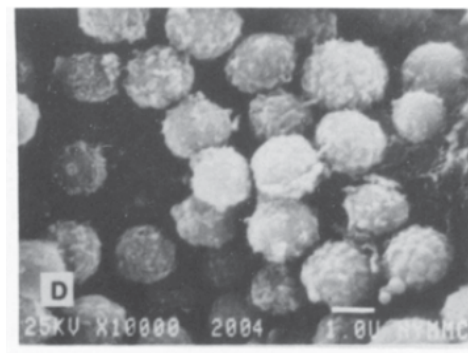
(此所列公式計算運用之單位依 CGS-esu 制)

從以上式子可知，氣膠帶電之極限與氣膠粒徑的平方成正比，若環境溼度等因素影響，仍會使實際帶電量無法達到公式所計算之理論最高帶電量。本研究中，*P. citrinum* 與 *C. famata* 粒徑較 *B. subtilis* 及 *E. coli* 大，因此真菌類氣膠在同樣環境因素下帶電較多。此外，與前述電力移動性綜合比較，*E. coli* 與 *B. subtilis* 粒徑接近，但 *B. subtilis* 為孢子體，推測表面粗糙較易吸附負離子，因此帶電量較大，電力移動性較大；*P. citrinum* 孢子與 *C. famata* 直徑比較接近，*P. citrinum* 因表面較粗糙帶電較多，因此電力移動性較強(圖 4-11)。



(A) *C. famata*(cell)

(<http://www.lip-sas.fr/nos-produits/levures>)



(B) *P. citrinum*(spores)

(Wei,1993) [1]

圖 4-11 真菌氣膠顯微攝影顯示之外觀

氣流中生物氣膠被壁面收集的機制主要為慣性衝擊、重力沉降及靜電沉降，本研究中四種生物氣膠粒徑均大於 $1\mu\text{m}$ ，受到布朗運動影響較不明顯，擴散影響較小。在不鏽鋼壁材及壁面含有奈米矽片銀之聚丙烯不織布貼附材之環境下，開啟負離子後，可能影響控制效率之各作用力說明如圖 4-12、圖 4-13。

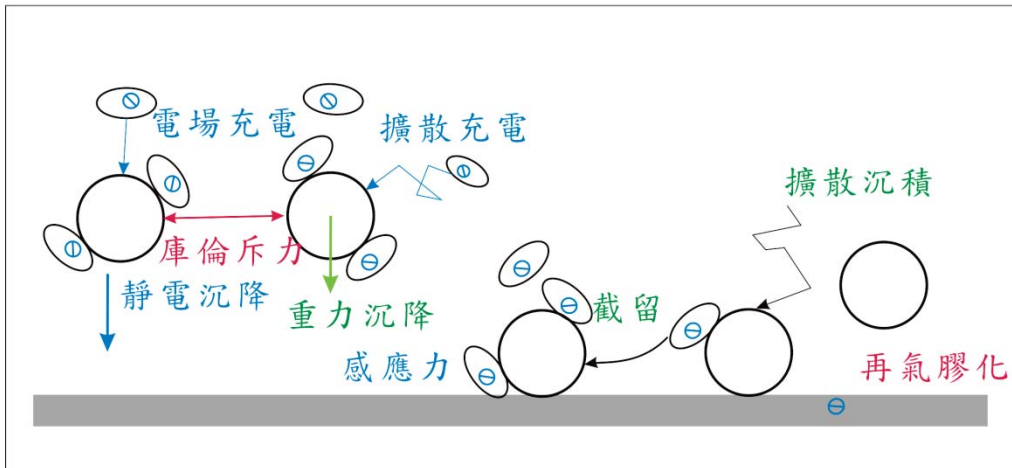


圖 4-12 在施放負離子之不鏽鋼壁材環境下，可能影響控制效率之各作用力

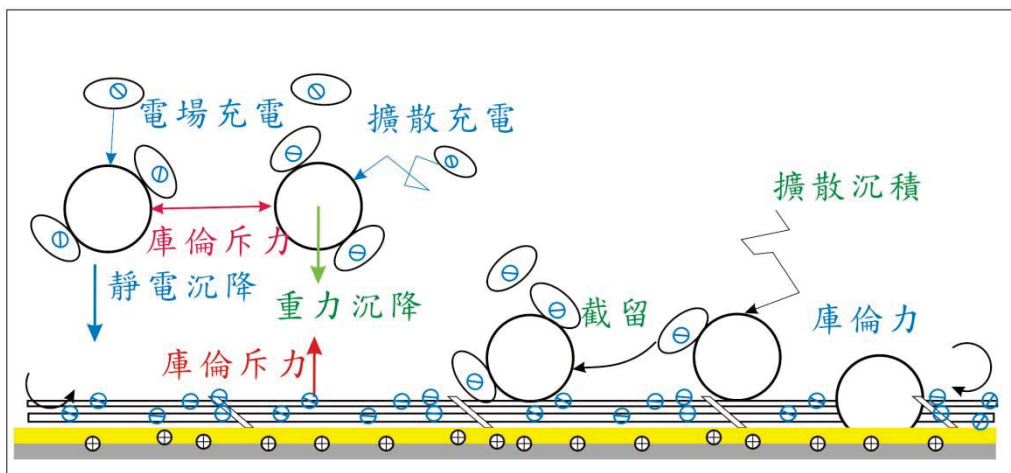


圖 4-13 在施放負離子之壁面含有奈米矽片銀之聚丙烯不織布貼附材環境下，可能影響控制效率之各作用力

以上四種菌種的剩餘率及控制效率可先以聚丙烯不織布及單獨使用負離子此兩種方式之結果，分為三類，第一類包含較小粒徑的 *B. subtilis*，負離子對其控制效率的影響大於壁面貼附材-聚丙烯不織布，且差異大於 20%；第二類包含粒徑較大、表面較粗糙的 *P. citrinum* 及粒徑、特質截然不同的 *E. coli*，雖負離子對其控制效率的影響大於壁面貼附材-聚丙烯不織布，但此兩種處理方式的控制效率差異較小，對 *P. citrinum* 控制效率的差異 < 8%，對 *E. coli* 控制效率的差異 < 6%；第三類含粒徑較細菌大、表面較平滑、於不銹鋼壁材環境下自然衰減較高的 *C. famata*，結果不同於其他三種菌種，壁面貼附材控制效率明顯高於施放負離子 13%。其他處理方法也由於生物氣膠之特性、材質表面的特性、負離子產生裝置開啟後各種力量之間的作用，使得前述分成三類的菌種，各有著不同的控制效果。同樣屬於粒徑較小的 *E. coli*、*B. subtilis* 氣膠，在後續其他處理方法的控制效率更顯示出明顯的差異，其差異推測與 *B. subtilis* 氣膠因電移動度較大能推移到較遠端，相對之下，*E. coli* 仍留在較近端，此氣膠的重力沉降和靜電沉降無法與聚丙烯不織布帶電產生斥力抗衡的影響有關。

聚丙烯不織布在未施放負離子時，會帶微量負電荷，然而微生物多帶負電荷，此材質卻能使微生物附於其上，可能原因為

1. 此不織布纖維上同時具有正電荷和負電荷，產品說明內介紹其具有正負向永久性電荷。市售靜電濾材大多同時帶正負兩種電荷，稱為 Line-dipole fiber(楊心豪，2005)，即使不織布上淨電荷為負，但正電荷的位置仍能吸引氣膠。
2. 此不織布兩層構造各具功能，推測其差異可能在於材質不同、粗糙度不同、電荷相反、保留微粒的量不同。上層應為聚丙烯材質，較為粗糙，提高與微粒的摩擦力而停留其上，下層為天然抗菌纖維，能吸引並保留微粒。
3. 負離子會累積於不織布使其帶負電量增加，表示附有負離子的生物氣膠應該也能累積於不織布，只是不同力量的作用，使不同氣膠能累積於不織布上的量有差異。

4-3 處理方法對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率

國內外已多有研究證實負離子對生物氣膠具有控制效能，但實驗室內設計之完整系統，其實驗艙多為不鏽鋼製，而實際室內空間壁材少用此材質，且濾材控制生物氣膠實驗，常討論到濾材上附著的微生物是否仍具活性及尋找適用於濾材上之抗菌物質，因此本研究將負離子產生裝置開啟與否、壁面貼附聚丙烯不織布否、不織布上噴附奈米矽片銀抗菌物質否，三者搭配運用，希望能增進控制生物氣膠之效率，本節將各菌種控制效率經公式計算出各處理方法之控制生物氣膠增進效率，並討論之，因各菌種採樣間隔時間不同，無法整理於同一圖表中，但以上下並排方式，以期能相互對照。

4-3-1 負離子產生裝置對壁面貼附材料控制生物氣膠之增進效率

前述有關負離子實驗，實驗艙多為不鏽鋼製，本實驗使用的貼附材料特性與不鏽鋼不同，因此可能影響實驗結果，有研究探討負離子在不同壁材環境下控制懸浮微粒的效能(吳致呈，2006；王首文，2009)，發現壁材的導電度(electrical conductivity)、相對介電常數(relative dielectric constant)、表面電阻(Surface resistance)、粗糙度等特質，會影響微粒濃度的衰減。導電度與表面電阻呈現負相關，導電度越小，表面電阻越高，不鏽鋼為導體，導電度高，表面電阻低；聚丙烯不織布表面電阻係數高，約 $10^{16} \Omega/\text{sq}$ (PAN 約 $10^{12} \sim 10^{16} \Omega/\text{sq}$)(張勝善，2009)。織物、紡織品表面抗靜電性質分級依 AATCC 76 分為三級， $10^{12} \Omega/\text{sq}$ 以上定義為絕緣， $10^5 \sim 10^{12} \Omega/\text{sq}$ 為抗靜電，小於 $10^5 \Omega/\text{sq}$ 具導電性，因此聚丙烯不織布導電度極低；相對介電常數高之材質，表示它具有高電容能力和低衰減的特性。

負離子會附於不鏽鋼、及聚丙烯不織布上，但不鏽鋼的導電度高，因此其表面不會帶電，而聚丙烯不織布上電荷會持續增加，因此，同樣使用聚丙烯不織布的狀況下，也帶著負電荷的生物氣膠其帶電量(與壁面的斥力)及其重力和負離子或電場形成的推力三者之間的合力，最終影響生物氣膠的控制效率。使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制生物氣膠的增進效率，說明如表 4-11~4-14，圖 4-14~4-17。

表 4- 11 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *E. coli* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel &NAI	29.2	8.2
PP&NAI	-14.0	13.6
PP&AgNPs/NSP&NAI	-9.0	9.6

表 4- 12 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *B. subtilis* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel &NAI	32.2	8.5
PP&NAI	7.5	6.0
PP&AgNPs/NSP&NAI	26.9	7.0

表 4- 13 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *C. famata* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
Stainless Steel &NAI	18.4	6.7
PP&NAI	-7.3	22.4
PP&AgNPs/NSP&NAI	20.1	10.0

表 4- 14 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *P. citrinum* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率	標準差
Stainless Steel &NAI	41.0	3.3
PP&NAI	-7.6	5.3
PP&AgNPs/NSP&NAI	-5.2	7.2

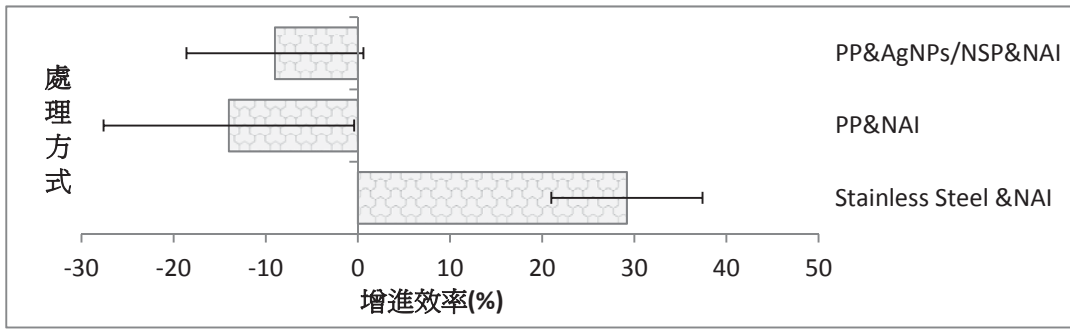


圖 4-14 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *E. coli* 的增進效率

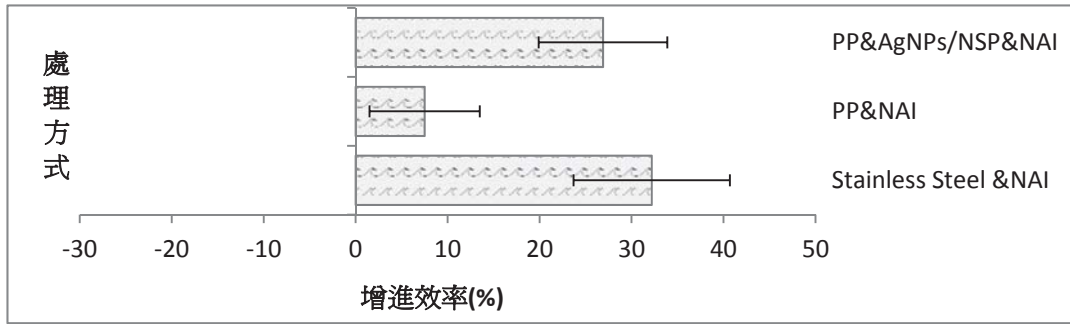


圖 4-15 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *B. subtilis* 的增進效率

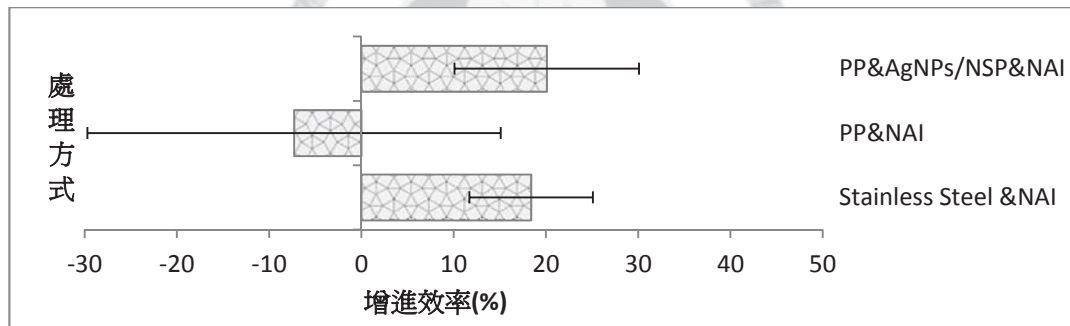


圖 4-16 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *C. famata* 的增進效率

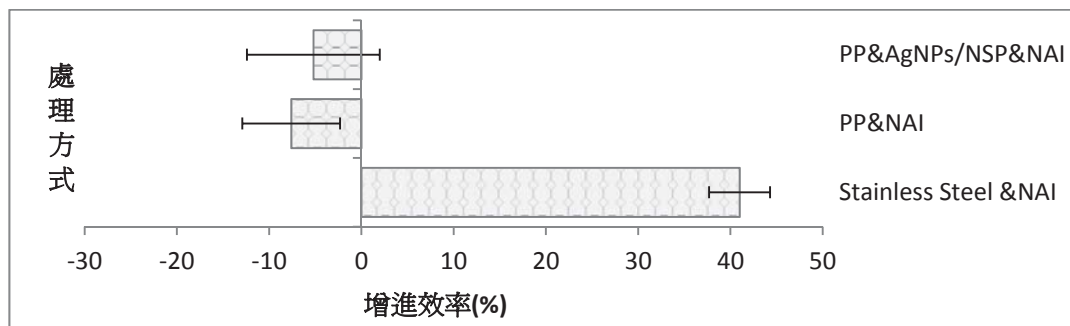


圖 4-17 使用負離子產生裝置對壁面貼附材料控制 *P. citrinum* 的增進效率

前述有關負離子的施放是否能增加控制生物氣膠的效果，在不鏽鋼壁面狀況下，施放負離子都能增進效果，與陳彥潔(2009)，黃建賓(2008)、吳致呈(2006)研究一致，但聚丙烯不織布貼附於壁面再加上負離子裝置的開啟，對大部分的菌種來說，效果卻不如表面為不鏽鋼材質，與吳致呈(2006)研究不同壁材下負離子對懸浮微粒的控制結果不同。在其研究中，表面粗糙度較高、表面電阻較高者，控制效率較高，本研究與之比較主因生物氣膠屬懸浮微粒之一種，可用控制懸浮微粒之技術控制生物氣膠，其控制原理與機制接近，差異在於生物氣膠特性較其他懸浮微粒複雜，部分具生命週期，表面構造隨菌種及生命形態不同有差異，表面電荷亦隨菌種有所不同，因此控制效率的穩定性可能不如其他懸浮微粒。本研究呈現不同控制效果推測主因可能有三，一為生物氣膠特性與其研究之懸浮微粒特性不同，吳致呈(2006)之研究所用之氯化鈉懸浮微粒粒徑為 30nm 及 300nm，小於此研究中四種生物氣膠，且生物氣膠依不同菌種其表面構造、帶電狀況較複雜；二為本實驗艙空間小，使負離子施放位置、採樣位置與壁面的距離都極接近，有可能負離子尚未與菌種接觸就附於附近的壁面，反而使負電的生物氣膠會與帶負電壁面互斥，被互斥而帶有負離子的菌種於採樣時一併被採樣；三為可供負離子吸附的表面積小，使單位面積累積負電荷較大，不利生物氣膠附著。

唯一於此節中增進效率均為正值的為 *B. subtilis*，更能確認負離子對控制 *B. subtilis* 效果極佳；相對而言在不鏽鋼環境下使用負離子效果較差的 *C. famata*，聚丙烯不織布加了奈米矽片銀，效果更差，但加了奈米矽片銀後，配合使用負離子，反而效果勝過不鏽鋼環境下使用負離子。另以 100% 棉質不織布、100% 斯丁尼不織布兩種不同材之貼附材噴附奈米矽片銀後，對照有無開啟負離子裝置比較，發現同樣具有增進效率的效果，推測奈米矽片銀需與負離子復合同時使用才具效用，且未必適合所有菌種，或是某些狀況導致對部分菌種無效。負離子對三種含奈米矽片銀壁面貼附材質的增進效果，結果如表 4-15、圖 4-18。圖表中 Cotton 代表 100% 棉質不織布，PAN 代表 100% 斯丁尼不織布，PP 代表聚丙烯不織布，均含有奈米矽片銀。

表 4-15 負離子對於噴附奈米矽片銀之不同材質壁面貼附材控制 *C. famata* 的增進效率

貼附材料材質	增進效率(%)	標準差(%)
PP	20.1	17.1
PAN	27.4	24.7
Cotton	1.7	13.2

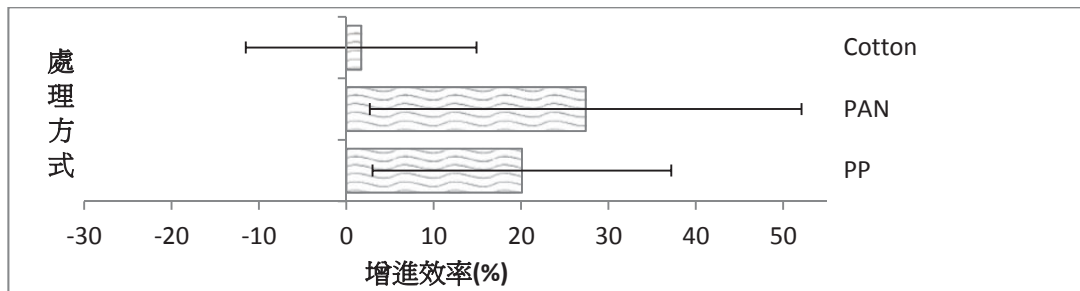


圖 4-18 負離子對於噴附奈米矽片銀之不同材質壁面貼附材控制 *C. famata* 的增進效率

E. coli 和 *P. citrinum* 雖然包含粒徑、形態、表面特性差異很大，但此節中呈現的結果卻接近，有可能與此兩種氣膠的電移動度都較小，但附於壁面的狀況較差，前端生物氣膠濃度較高的結果導致被採樣器採集，此推論與陳彥潔(2009)有關負離子控制實驗艙內 *E. coli* 和 *P. citrinum* 於不同空間位置呈現出的控制效率差異一致，此兩者的控制效率隨與負離子產生源距離的增加而升高，亦即在距離較近處，控制效果較差。對於控制 *E. coli* 的方式，非不鏽鋼壁材無論搭配使用奈米矽片銀或負離子，複合技術效果均變差，推測原因，已於前節“*E. coli* 剩餘率及控制效率”說明，*P. citrinum* 的部分推測因粒徑較大，且其表面粗糙，不是平滑狀態，所以空氣負離子與 *P. citrinum* 因碰撞而接觸時，負離子附於其上，加上粗糙表面與負離子摩擦，使 *P. citrinum* 帶電量增加；雖然帶電量增加，無助於貼附壁面，因電場推力及重力使孢子有向下之作用力。但不如壁面向上的靜電排斥力。*P. citrinum* 電移動度較差使其留在較近端，推測加上奈米矽片銀後對其吸引力不但不足以使孢子留在布面，卻使孢子移動度更差，因此可能停留在採樣抽氣時會抽到的範圍內的 *P. citrinum* 較多，使控制效率較低。

4-3-2壁面貼附材料噴附奈米矽片銀控制生物氣膠

表 4-16~表 4-19 及圖-19~圖-22 顯示，在其他處理方法相同，差異僅在有無噴附奈米矽片銀的狀況下，呈現出幾乎均為反效果，推測不具增進效果的原因可能受到噴附方式改變布材表面粗糙度及奈米矽片銀吸附及抗菌功能無法發揮，表面電荷分布改變三項因素所致。僅粒徑較小，電移動度較大，負離子控制效果極佳，不織布貼附材效果有限的 *B. subtilis*，在負離子控制方式的搭配下，呈現出具增進效果。

C. famata 的部分另測試 100%斯丁尼不織布，發現搭配負離子的施放，噴附奈米矽片銀於布材上具增進效率，其值為 3.3%。*E. coli* 和 *P. citrinum* 在此節中呈現的結果仍接近，皆不具增進效果。

奈米矽片銀雖然經測試，噴附此物質的不織布表面帶有正電荷，會使不織布表面電荷發生變化，應有機會吸附帶負電的菌種，並執行其殺菌功能。有關奈米矽片銀吸附菌體及殺菌作用之研究，均限於將奈米矽片銀加入固態培養基或液態培養基測試取得菌種生長的差異比較，接觸菌種的機會及作用時間較長，因此呈現非常好的抗菌效果，生物氣膠則有所不同，需各種作用使氣膠接近奈米矽片銀，且壁材對生物氣膠靜電斥力有限，或壁材粗糙度足以留住氣膠，才有機會吸引生物氣膠，進而執行抗菌機制。

目前機能型紡織纖維發展一日千里，因應高科技產業場區安全及產品品質維護或進行工作程序會產生靜電累積危險之職業環境，設計導電(抗靜電)纖維，運用添加導電性聚合物或導電性強物質如銀、奈米碳管等使此種纖維布料表面電阻降低，以日本東麗(Toray)公司生產之抗靜電纖維為例，加入碳黑以改質斯丁尼纖維，電阻可降至 $10^5 \Omega/\text{cm}$ (張勝善，2009)，使斯丁尼纖維從非導體變成靜電消散材料，推測較小的實驗艙使用導電纖維做為壁面貼附材料，對於生物氣膠的控制會因為壁面貼附材料導電能力佳同時具有較粗糙的表面而提升效率。

在此實驗中所用方法雖然無法因貼附材噴附奈米矽片銀而使其變成導電材料，但也會使材料表面電荷發生變化，推測對部分菌種可以有效增進吸引力量。

表 4- 16 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *E. coli* 的增進效率(%)

壁材及負離子開啟否	增進效率(%)	標準差(%)
PP&AgNPs/NSP	-16.0	7.6
PP&AgNPs/NSP&NAI	-11.0	15.3

表 4- 17 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *B. subtilis* 的增進效率(%)

壁材及負離子開啟否	增進效率(%)	標準差(%)
PP&AgNPs/NSP	-7.4	6.1
PP&AgNPs/NSP&NAI	12.0	7.1

表 4- 18 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *C. famata* 的增進效率(%)

壁材及負離子開啟否	增進效率(%)	標準差(%)
PP&AgNPs/NSP	-31.1	18.0
PP&AgNPs/NSP&NAI	-3.6	16.6

表 4- 19 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *P. citrinum* 的增進效率(%)

壁材及負離子開啟否	增進效率(%)	標準差(%)
PP&AgNPs/NSP	-7.1	5.5
PP&AgNPs/NSP&NAI	-4.7	7.1

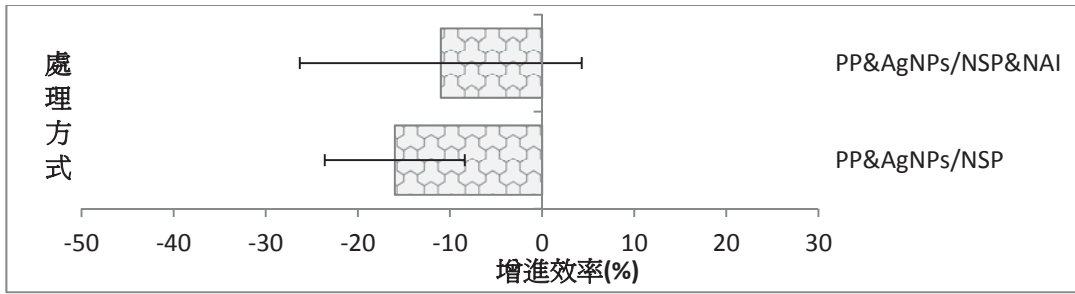


圖 4-19 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *E. coli* 的增進效率

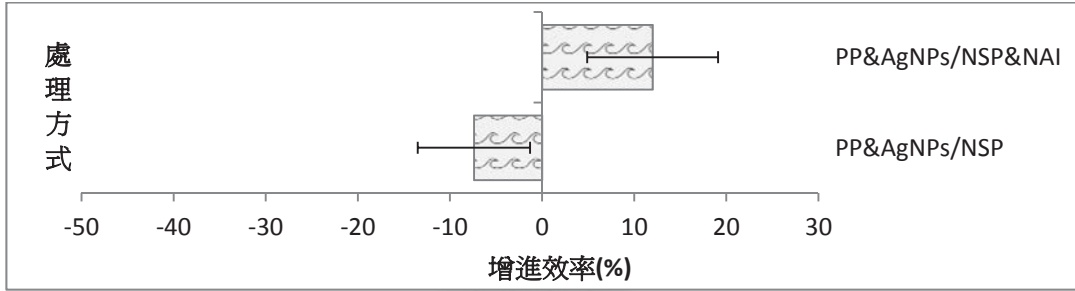


圖 4-20 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *B. subtilis* 的增進效率

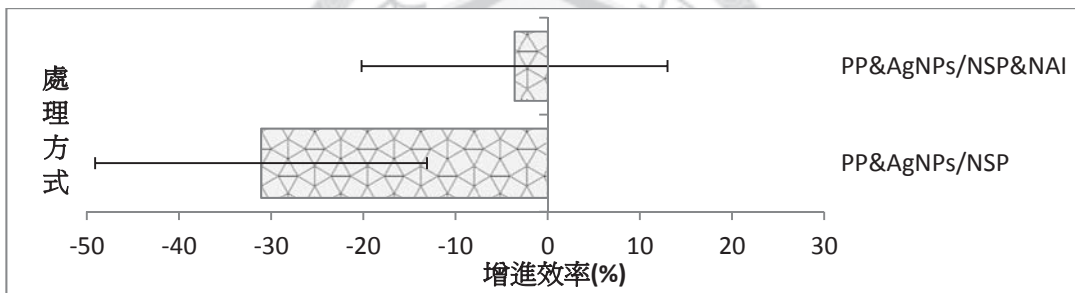


圖 4-21 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *C. famata* 的增進效率

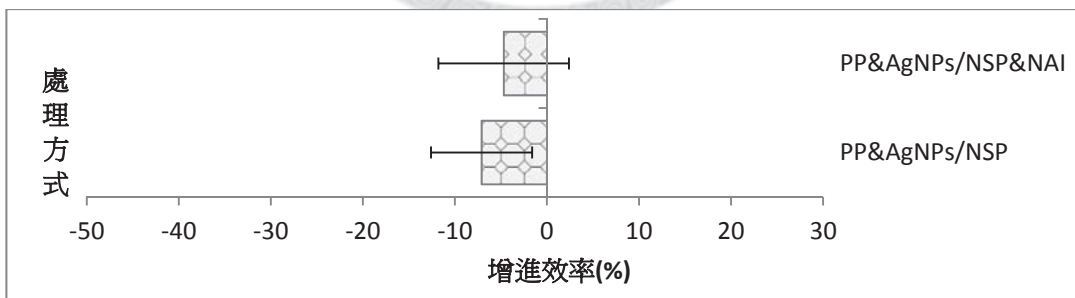


圖 4-22 噴附奈米矽片銀對壁面貼附材料控制 *P. citrinum* 的增進效率

測試有無噴附奈米矽片銀表面電荷變化差異所用之聚丙烯貼附材料大小為4cm×4cm，未進入實驗艙時測量，含奈米矽片銀之表面電荷為正值，未含奈米矽片銀之表面電荷為負值，值均極低，約10V。放入實驗艙前壁面先貼附不易累積負電荷，且電荷容易移除的100%棉質不織布，測試時，有無奈米矽片銀均同時放入相同對應位置，並排擺放。採用電壓為3.1kV。

表 4- 20 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一分鐘之表面電荷(表面電荷值為負值)

與針尖之距離 (cm) 奈米 矽片銀含量(ml)	5	12.5	25
0	53	34	26
1	25	11	10

(表面電荷單位:V)

表 4- 21 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一小時之表面電荷(表面電荷值為負值)

與針尖之距離 (cm) 奈米 矽片銀含量(ml)	5	12.5	25
0	186	146	113
1	171	127	103

(表面電荷單位:V)

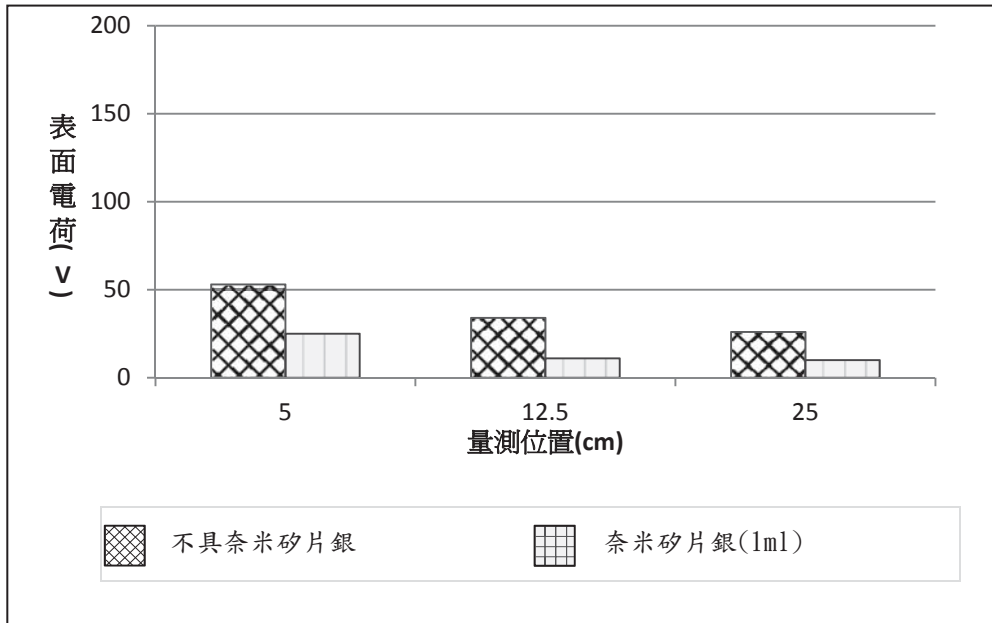


圖 4- 23 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一分鐘之表面電荷(表面電荷值為負值)

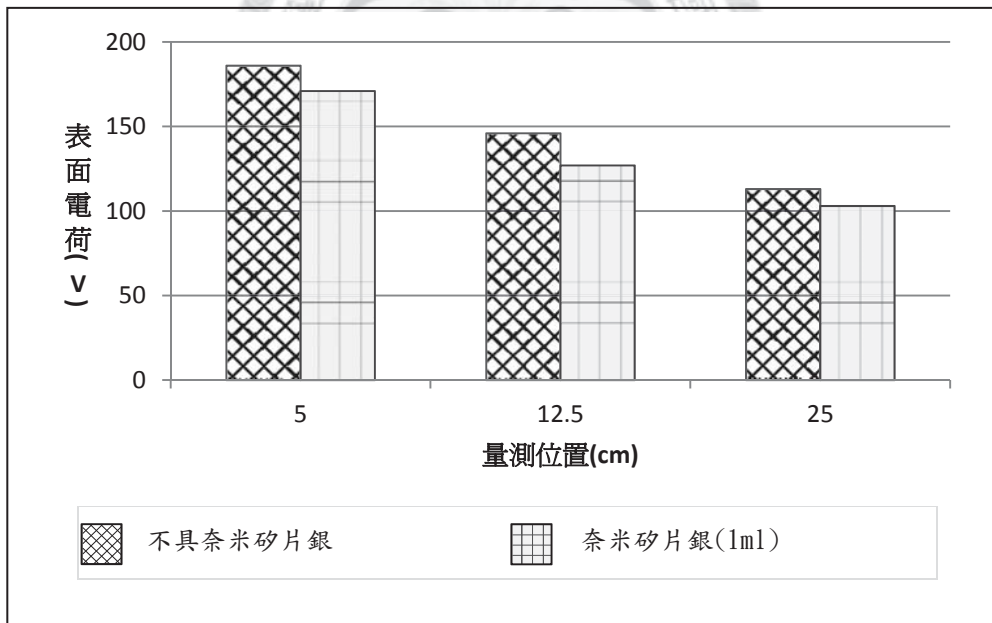


圖 4- 24 聚丙烯貼附材料置於實驗艙內不同位置開啟負離子一小時之表面電荷(表面電荷值為負值)

圖 4-23 及圖 4-24 相對照，顯示負離子產生裝置開啟後，隨著時間增加負離子累積於貼附材料上的量會增加，而貼附材料有無含有奈米矽片銀其累積負離子量有明顯的差異。

4-4 壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率

在本研究中，以不銹鋼壁材做為對照，因此壁面貼附材料對負離子控制生物氣膠的增進效率是以同樣開啟負離子裝置，僅艙內壁面不同材質形成的控制效率做比較，表 4-22~4-25 及圖 4-25 ~4-28 相關圖表資料顯示，僅 *C. famata* 數據均為正值，表示負離子對壁材控制生物氣膠有效，其餘菌種皆為負值，亦即不具增進效率。

從本研究實驗結果之表 4-8 已知 *C. famata* 受壁材影響明顯大於負離子，因此，壁材的改變對其影響較大，負離子造成的效應影響較小，即使負離子使壁材控制效果變差，但是比起不銹鋼壁材下施放負離子，效果還是較佳，此可解釋圖 4-27 壁面貼附材質對負離子控制 *C. famata* 具增進效果。

B. subtilis 受負離子影響明顯大於壁材，所以壁材只要搭配負離子，效率可提升 5.5%~27%，但反過來看控制效果本來就有限的壁材，即使負離子對其有幫助，仍不如不銹鋼壁材下施放附離子的效果。

不銹鋼壁材與壁面貼附材料最大的差異在於壁面粗糙度及導電度(表面電阻)，壁面粗糙度對增進生物氣膠控制效率有效，但艙壁貼附聚丙烯不織布施放負離子時控制效率卻不及不銹鋼壁面搭配施放負離子，推測與不織布上電荷累積有關。

聚丙烯不織布的電荷易累積，表示負離子可吸附其上，但經過測試發現，累積量會隨時間減緩，且電荷衰減的速度極慢，會影響後續負離子的吸附，對此實驗來說，生物氣膠的吸附會受到電荷影響。電荷累積不僅隨負離子施放時間增加，其分布也會有差異，距離較放電的針尖較近，負離子濃度會較高，不均值的分布狀況也會使生物氣膠控制效率有空間上的差異。陳彥潔(2009)之研究可證，負離子的控制效率隨其分布狀況而有差異，且其效率隨菌種的不同，有些隨與放電針尖越近而越高，有些則相反，*E. coli* 和 *P. citrinum* 此兩者的控制效率隨與負離子產生源距離的增加而升高，*C. famata* 則相反。本實驗因為加上貼附導電性較低的材料於壁面，控制機制更為複雜。

表 4- 22 壁面貼附材料對負離子控制 *E. coli* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
PP&NAI	-19.5	12.6
PP&AgNPs/NSP&NAI	-30.5	10.1

表 4- 23 壁面貼附材料對負離子控制 *B. subtilis* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
PP&NAI	-14.5	3.3
PP&AgNPs/NSP&NAI	-2.5	7.2

表 4- 24 壁面貼附材料對負離子控制 *C. famata* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
PP&NAI	5.7	15.4
PP&AgNPs/NSP&NAI	2.1	11.1

表 4- 25 壁面貼附材料對負離子控制 *P. citrinum* 的增進效率(%)

處理方式	增進效率(%)	標準差(%)
PP&NAI	-15.0	1.7
PP&AgNPs/NSP&NAI	-19.8	6.9

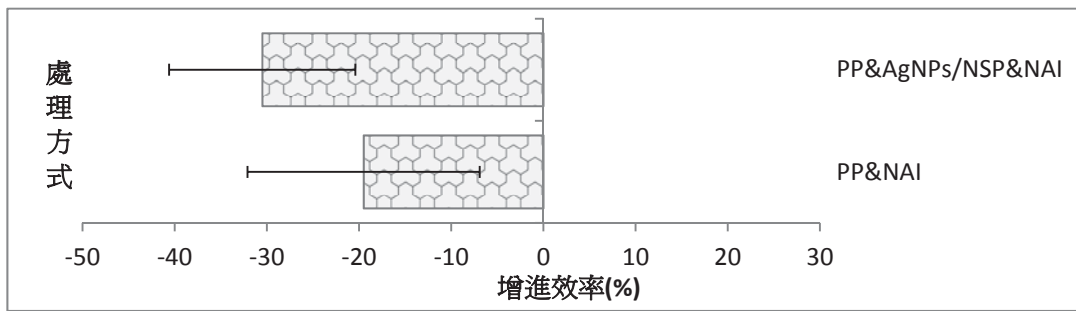


圖 4-25 壁面貼附材料對負離子控制 *E. coli* 的增進效率

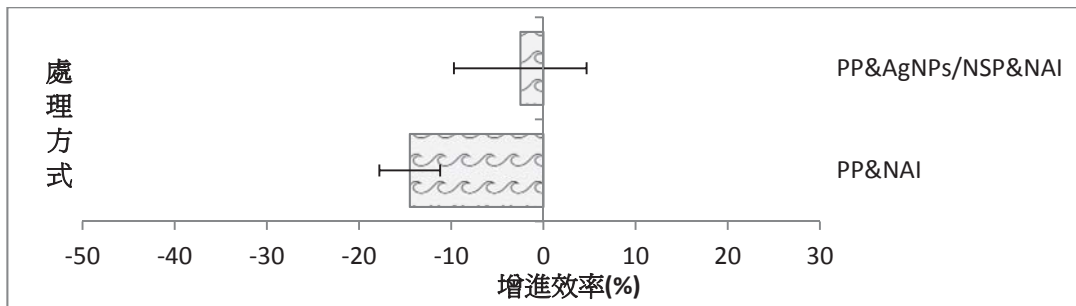


圖 4-26 壁面貼附材料對負離子控制 *B. subtilis* 的增進效率

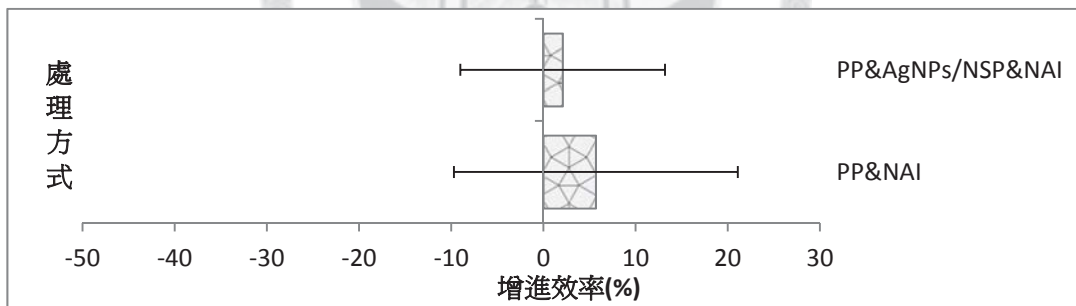


圖 4-27 壁面貼附材料對負離子控制 *C. famata* 的增進效率

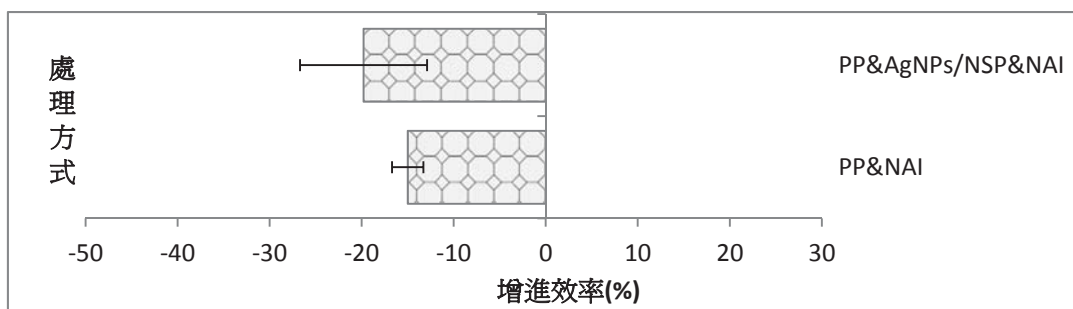


圖 4-28 壁面貼附材料對負離子控制 *P. citrinum* 的增進效率

為了解聚丙烯不織布貼附材料於負離子開啟前後表面電荷變化狀況，以模擬實際實驗程序測量，每次實驗程序開槍測量上方、側面、下方之表面電荷，另包含距離負離子裝置之針尖放電位置前方 5cm、12.5cm、25cm，亦即每個開槍階段測量 9 個位置；每個實驗程序共計六個測量階段。測量數據(1)包含未開啟乾淨空氣供應單元前、(2)酒精滅菌一小時後、(3)酒精揮發清除管線酒精一小時後、(4)霧化器霧化去離子水一小時，接續開啟負離子並採樣 5 次後、(5)霧化器霧化去離子水一小時後、(6)開啟負離子並採樣 5 次後。

為能使貼附材料表面電荷變化狀況統計資料做比較，因此以當次實驗最低值做為對照基準，自行設計出計算式，並將計算所得數據名稱定為電量比，計算方式為：

$$SEC_{(x,y)}=(V_{(x,y)}-V_{\min})/V_{\min}$$

$SEC_{(x,y)}$: (x,y)位置之電量比(V/V)

$V_{(x,y)}$: (x,y)位置之表面電荷值(V)

V_{\min} : 當次實驗所有數值中最低之值(V)，均為階段(3)側面 25cm 位置。

數值經此方式計算後，不但可比較同次實驗不同位置電荷量的差異，亦可比較不同測量時間，不同位置表面電荷變化的程度差異。

數值經計算統計後，結果如圖 4-29~4-33。

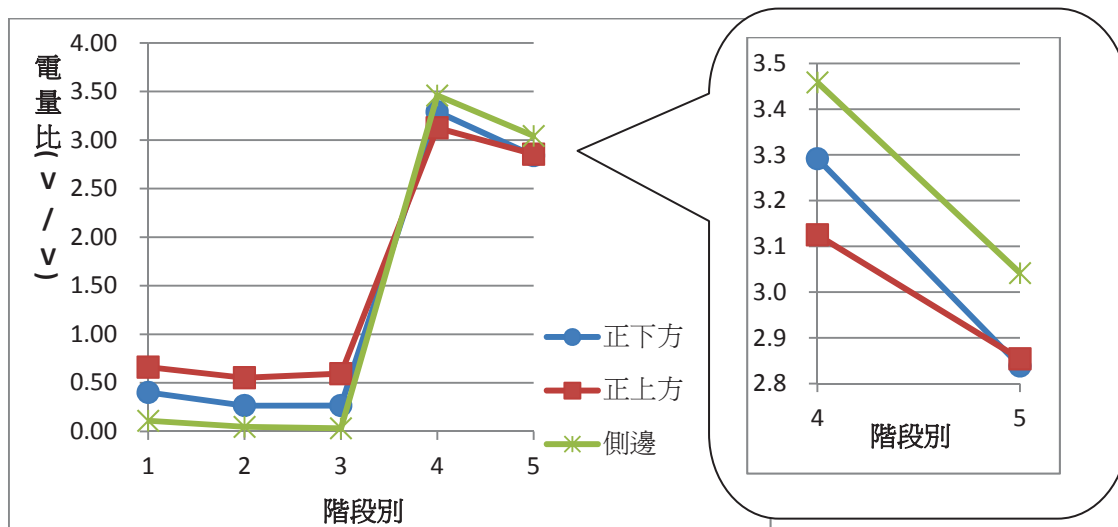


圖 4-29 各測量階段聚丙烯不織布表面電荷變化情形-垂直位置比較

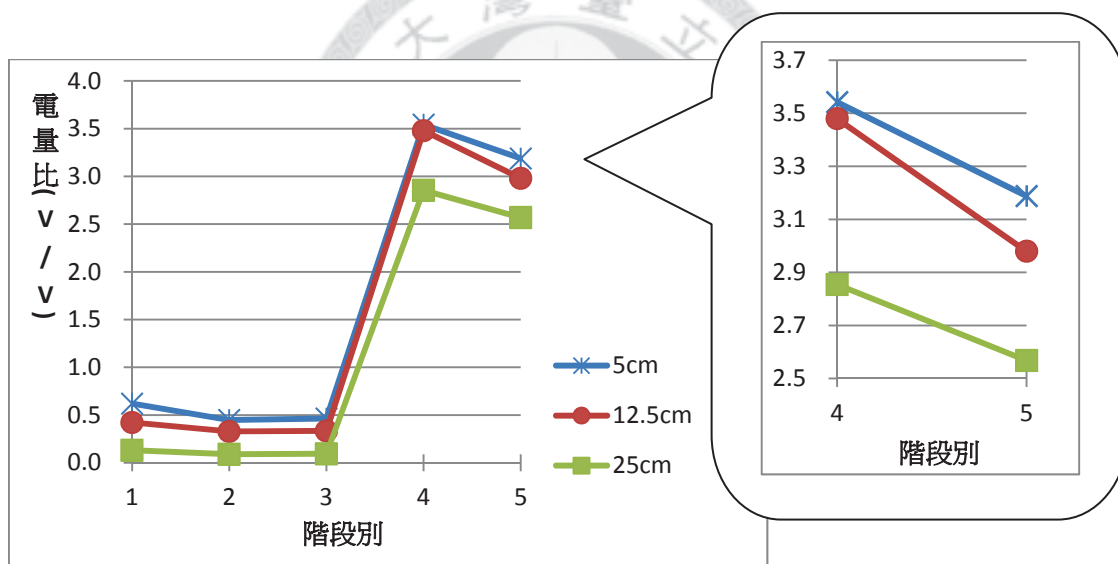


圖 4-30 各測量階段聚丙烯不織布表面電荷變化情形-水平位置比較

由以上兩圖可知在氣流通入系統過程，不織布表面負離子會緩速下降，負離子開啟後表面電荷會明顯累積，且不同位置表面電荷的量及變化有所不同，可明顯看到距離放電針尖越近，平均的表面電荷量越大，垂直方向的表面電荷增加幅度，以側面最明顯，平均電荷最高處也在側面，最低則在上方；不織布表面負離子量，在負離子裝置關閉後，會下降，下降幅度以最下方及距針尖 12.5 公分處下降最快。詳細的表面電荷變化顯示於圖 4-31、圖 4-32。

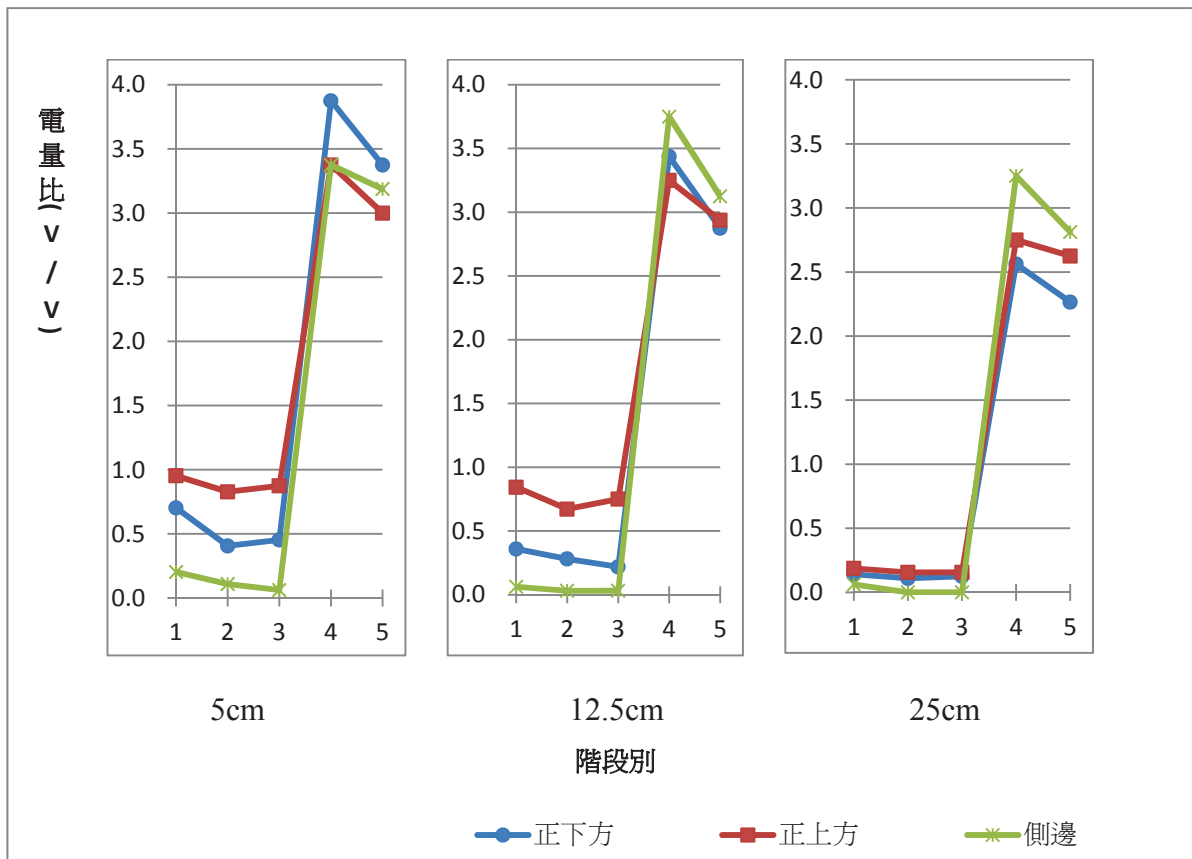


圖 4-31 距離電極針尖 5 公分、10 公分、15 公分處，垂直位置不同其電量比變化趨勢之比較

從前圖可見距離 5 公分處以正下方電荷量最高，12.5 公分位置及 25 公分處以側面電荷量最高，濃度隨距離遞減，僅側面最高值在 12.5 公分處，且 12.5 公分處垂直面電荷量最平均。

另比較垂直高度相同、與針尖相距遠近其表面電荷之改變狀況。

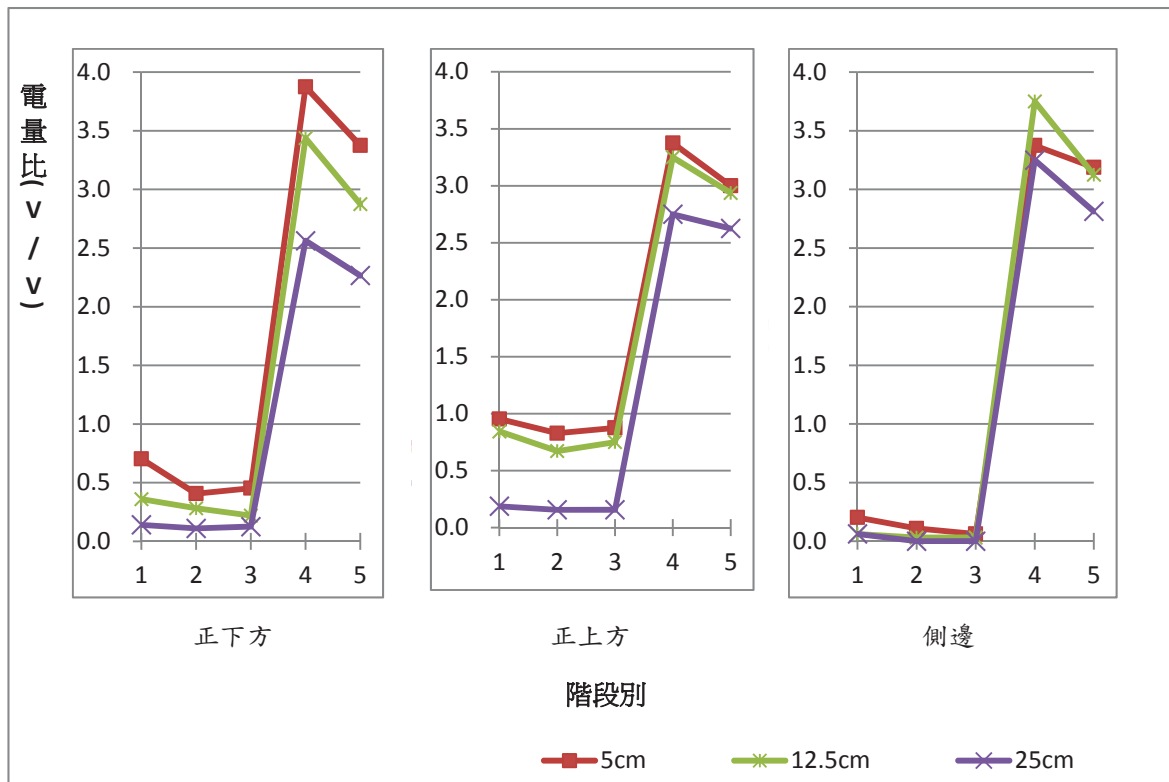


圖 4-32 正下方、正上方、側邊三個壁面位置，距離電極針尖水平距離不同電量比變化趨勢之比較

上圖顯示，正下方及正上方距離電極針尖水平距離越遠，其值越低，且正下方位置不同，表面電荷差異大，側邊的表面電荷值介於其他兩者間，且水平距離的表面電荷差異較其他兩者小。

若表面已帶有較高電荷，後續若再一次開啟空氣負離子裝置，表面電荷累積幅度會變緩，結果顯示於圖 4-33；此外，噴附奈米矽片銀後，偵測到表面電荷的增加狀況也會趨緩。

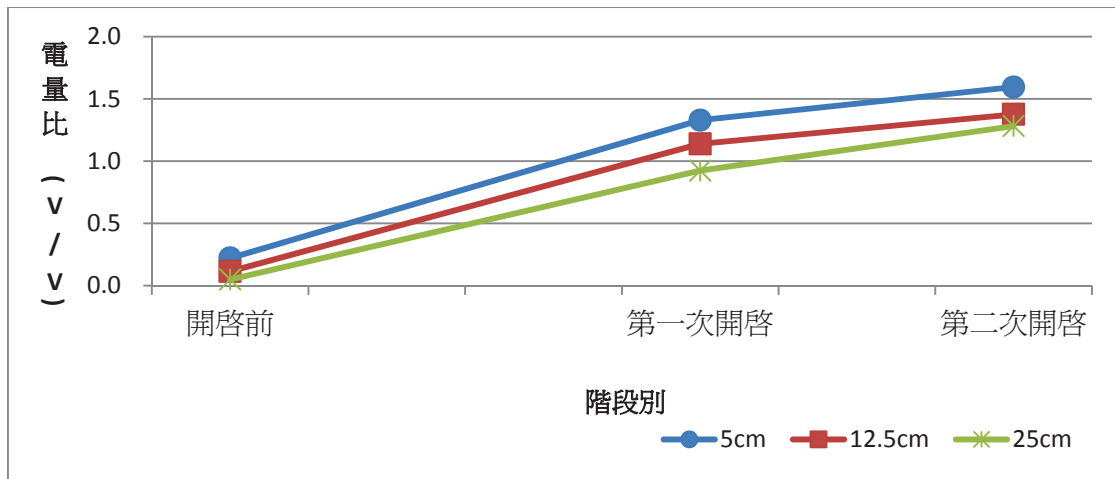


圖 4-33 負離子裝置開啟次數對負離子於聚丙烯不織布負電荷累積狀況之影響

圖 4-29~圖 4-33 顯示實驗艙內聚丙烯不織布表面電荷的變化趨勢，及不同空間位置的差異，此會影響生物氣膠的控制效率，如電荷累積於壁上幅度趨緩，表示能吸附於壁面上的生物氣膠也會減少，正上方累積電荷平均而言最少，表示相對而言生物氣膠累積量可能也較少。另前端(近針尖處)雖然負電荷明顯較多，有可能負離子在附於生物氣膠上之前就已附於壁面，反而使其後附著於生物氣膠的負離子因為壁面已累積一定電荷，而遭排斥。因此能推移到較遠處的菌種，附於壁面的機會較大，因為此實驗艙寬達 79 公分，因此後端壁面尚未累積大量負離子，較有吸附菌種的空間。

另於前置實驗測試得知空氣中負離子的濃度分布，其呈現濃度最高區段為針尖前端直線延伸到實驗艙上方艙壁，因此在實驗艙前端菌種可能被揚升，後端會被往下推，因此電移動度較高的菌種，較快推移到後端，控制效率可能較高，電移動度低效果則相反。粒徑比較小，近壁面的菌種，可能會同時受到聚丙烯不織布內的負電荷部位排斥和正電荷部位吸引，影響負離子對或電場對其的水平推力造成電移動度較低，留在前端的微生物因而較多。菌種表面電荷密度較低，可能受電荷影響也較小，因此壁材表面粗糙，有助於此類菌種附於其上；對負離子來說，若負離子能將氣膠推移至粗糙壁材，控制效果應會更高於推向較平滑壁材，本實驗只看到 *C. famata* 有此效果，陳彥潔(2009)研究(放電針尖相同，電壓為 2.7kV)發現 *C. famata* 和 *P. citrinum* 相比，負離子對 *C. famata* 效果較差與本實驗一致；其受重力影響高於本實驗兩種細菌，受電荷影響低於 *P. citrinum*。在本研究中，

更換不同壁材材質，*C. famata* 的控制效率變化差異大，只要有運用負離子，控制效率都能控制在 17%~24% 左右，因此推測壁面粗糙度影響為控制此氣膠的主因，負離子能提高控制率的穩定。開啟負離子裝置即便是造成一些 *C. famata* 與壁面的斥力，然而影響有限，若能維持表面粗糙度，又能提升壁面電荷移除能力，效果更佳。

4-5 小結

控制效率比較

除 *C. famata* 在貼附聚丙烯不織布材質且未開啟負離子產生裝置時控制效果最佳外，其他菌種均以不鏽鋼實驗艙內施放負離子的控制效果最佳，且 *B. subtilis* 受負離子影響明顯高於單獨使用各種聚丙烯不織布壁面貼附材料。

此外，*B. subtilis*、*C. famata* 以外的菌種均為貼附聚丙烯不織布材質且未開啟負離子產生裝置時控制效果次佳，推測壁材可能因表面粗糙度高於不銹鋼因而對生物氣膠產生控制效果，吳致呈(2006)的研究發現，壁材表面粗糙度較高會使懸浮微粒自然衰減係數增高。聚丙烯不織布粗糙度明顯高於不銹鋼。

壁面貼附材質與控制效率

有研究發現壁面的表面導電度越低，懸浮微粒的有效清靜速率(ECR)會越高(王首文，2009；吳致呈，2006)，因此壁材其電性特性也可能影響控制效率。此聚丙烯不織布材質之壁面貼附材料據其所附產品說明了解其具靜電力，且同時帶有正負電，實測狀況得知其表層帶負電，其帶電狀況可能影響控制效率，也造成了開啟負離子後控制的複雜度。未開啟負離子裝置前，粗糙度對控制效率的影響大於表面電荷，因為雖然氣膠與壁面同具有負電荷，卻仍有控制效果，對 *P. citrinum* 及 *C. famata* 之控制較率均可達 30% 以上，且可能在此研究中壁材粗糙度造成的控制效率被低估，因為實驗過程中，負離子的施放可隨時更動電壓及濃度，但壁材無法在實驗過程中移除或置入系統，因此可能因菌種進入艙中有部分已附著於壁材，使菌種初始濃度降低，若同濃度菌液進入兩相同生物氣膠控制系統，差異僅在有無壁面貼附材，初始濃度採樣自無貼附壁材實驗艙，以此濃度值為分

母，所得之控制效率較接近實際狀況。本實驗假設，若壁材或負離子控制效率較高，在實驗裝置開啟，生物氣膠進入實驗艙後，其氣膠濃度上升幅度會較平緩，希望據此對照實際實驗結果，因此於開啟後 20 分鐘、40 分鐘、60 分鐘、80 分鐘採樣、培養，以了解膠濃度上升幅度，但實際結果與假設不符，例如施加負離子應該會使控制效率明顯高於未有負離子之狀態，但此三組僅斯丁尼不織布的結果與正式實驗結果一致，可能因為實驗艙尚未到達穩定狀態造成(顯示於圖 4-34)，實驗艙未達穩定，不僅生物氣膠濃度空間分布不均，負離子濃度亦呈現不穩定，易受進氣口氣流影響。

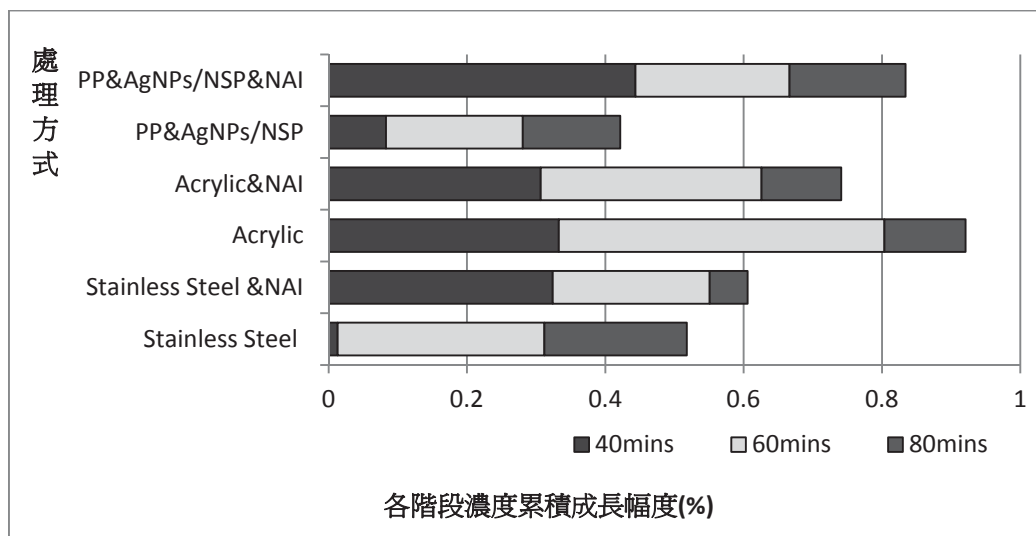


圖 4-34 實驗系統開啟後，自 20 分鐘後，每隔 15 分鐘 *C. famata* 生物氣膠濃度累積增加幅度

壁面貼附聚丙烯不織布材質時，開啟負離子除 *B. subtilis* 外，其他菌種控制效率均降低，推測因為負離子會飄移並附於聚丙烯不織布材質上，持續累積，使菌體與其排斥，而留在空氣中，飄移能力較強者，如 *B. subtilis*，會被推移至負離子尚未累積處，因此仍具控制效果，且效果更佳。Lee(2004)研究指出，當負離子濃度過高時，會在牆面產生靜電屏蔽(electrostatic shield)，妨礙帶電氣膠沉積於牆面，特別是低導電性的牆面，印證本實驗發生之狀況，聚丙烯不織布材質應為低導電性的材料，電荷會累積，且負離子裝置關閉後，也不容易下降。

壁面噴附矽片銀後，只要未施加負離子，菌種控制效果都會降低，可能原因如下：

- 1.噴附過程造成貼附材料粗糙度或表面電荷分布改變。壁材的表面電位並非均值(Shimada, 1990)，若加入奈米矽片銀，表面電複雜度更高；
- 2.矽片銀噴附量不足或其電荷不足以將空氣中的生物氣膠吸引至壁面上；

過去從未有奈米矽片銀控制生物氣膠相關實驗，目前研究以菌種同時加入含有不同濃度奈米矽片銀之培養液及培養基，觀察其菌種生長差異推估殺菌效能，或先將菌種加入含有奈米矽片銀的培養液中，經過不同時間後取出，培養於未含奈米矽片銀的固態培養基並比較菌落生長數量。在液態環境下，奈米矽片銀具吸附的特性，可使矽片銀飄移至菌體周圍使其包覆較大量的奈米矽片銀，因此菌體周圍矽片銀濃度明顯較高。奈米矽片銀在固態環境下其移動性受限，生物氣膠即使附於其上，菌體周圍奈米矽片銀包覆量顯然不如在液體環境下，因此所需奈米矽片銀之含量需增高。此外，本研究中，系統開啟後持續有生物氣膠進入實驗艙中，附於壁材上的菌體，與奈米矽片銀接觸的時間不一，抗菌效能受接觸時間影響，因此推測效果亦有所差異，再氣膠化的生物氣膠，其失去活性的量有限。孢子環境耐受性極高，推測奈米矽片銀對其控制效果不如對微生物之細胞體，且採樣時即使在氣膠化的孢子附有矽片銀，其量極少，因此推估將孢子塗佈於培養基培養時，仍有孢子萌發。在本研究中，奈米矽片銀的抗菌效果對生物氣膠的控制效率影響有限推測部分原因如上。

但 *C. famata* 及 *B. subtilis* 在壁材含有奈米矽片銀狀況下，開啟負離子的效果會比未開啟還要好，分別增近 20%、27%，因此，推論矽片銀對空間中生物氣膠吸附能力有限，需負離子或電場造成的靜電沉積、加上重力沉積等將生物氣膠推移至其附近始能產生效用，或是附於壁上後，因其具有抗菌效果，降低吸附之菌體或孢子再氣膠化，*B. subtilis* 孢子增進效果更顯著可能因為粒徑較小，較容易受電荷包含負離子、奈米矽片銀及電場影響，因此使用負離子及奈米矽片銀相較於其他菌種較為有效，機制模擬如圖 4-35。

對其他菌種來說壁材累積負離子，使負電荷累積持續增加，而菌體或其孢子

大部分均帶負電荷，與壁面的靜電斥力大於奈米矽片銀及不織布上部分區域的正電吸引力、氣膠受到的重力，負離子靜電沉降力因此無法附於壁材上。

以貼附材料與負離子的控制效率相比較，此兩者差異較大時，呈現較不一樣的狀況，以下分述：

1. 壁面貼附材料效果明顯較高：

對貼附材料而言，貼附材料控制效果若明顯高於負離子，負離子的加成效果可能較有限甚至較低，受表面帶電狀況影響；若從負離子為控制基礎來看，壁面貼附材的使用可能隨生物種類不同，效果會增加，而使控制效率高於僅使用負離子未使用壁材者，從此實驗中 *C. famata* 之結果可證。機制模擬如圖 4-36。

2. 負離子效果明顯較高時：

控制效果負離子高於壁面貼附材時，若使用此貼附材再加上負離子於空氣中，可能增進控制效率，如 *C. famata* 實驗中使用斯丁尼不織布及 *B. subtilis* 實驗中使用聚丙烯不織布時，同時開啟負離子產生裝置，控制效果較佳，因此負離子的控制效能和壁面材質的控制效能會彼此受影響。

貼附材料與負離子的控制效率兩者差異較大時，負離子的使用會縮短控制效率的差異。

負離子的控制機制主要以移除為主

此研究可證明負離子對微生物的控制主要以移除為主，若以殺菌為主，壁面貼聚丙稀不織布加上開啟負離子裝置的處理方式，控制效率應該至少與僅有負離子時相同，因為前置實驗測試，聚丙稀不織布壁面環境下，艙中負離子濃度與不鏽鋼壁材環境下差異極小，加上表面粗糙度增加，負離子負責殺菌，布材負責使氣膠附於其上，但實際狀況不是如此，在此實驗統計結果可見以複合方式處理，控制效率幾乎都是更差，最高降幅可達 30%，且吳致呈(2006)研究負離子的抗菌

效能，結合 APS(aerodynamic particle sizer)及衝擊瓶(AGI-30)採樣生物氣膠，APS 可測未移除之生物氣膠濃度，AGI-30 可計算可培養生物氣膠濃度，將數據代入存活因素(Survival Factor, SF)公式中計算，評估反應時間 15.5 分鐘內殺菌效能不明顯。另 Tyagi(2008)，以負離子直接施放於 agar plate 上，研究負離子對 *E.coli* 的殺菌效果，發現接觸距離 3cm，負離子濃度高於 2×10^4 ions/cm³，暴露 40 分鐘，菌種減少比例不到 10%，暴露 75 分鐘，菌種減少比例約 15%，本研究過程各種生物氣膠暴露於負離子的時間約 36~72 分鐘，加上生物氣膠分布於整個艙體，接觸距離平均遠高於 3cm，因此推測此研究中，負離子對生物氣膠的控制應以移除為主。負離子會以電場充電(diffusion charging)及擴散充電(diffusion charging)的方式，使生物氣膠帶電，後續由電極產生的電場提高氣膠電移動度，使氣膠移動至牆面。

以下圖 4-35 至圖 4-37 為各菌種不同處理方式下控制效率差異之模擬圖，其中○代表生物氣膠，□代表實驗艙，○代表採樣範圍，艙內藍色深淺代表負離子濃度分布狀況，壁面灰色表示貼附聚丙稀不織布，呈現黃色表示貼附含奈米矽片銀的聚丙稀不織布。壁面紅色顏色深淺表示負離子累積於壁面分布狀況。各種顏色若顯示不同深淺度，表示顏色越深，濃度越高。

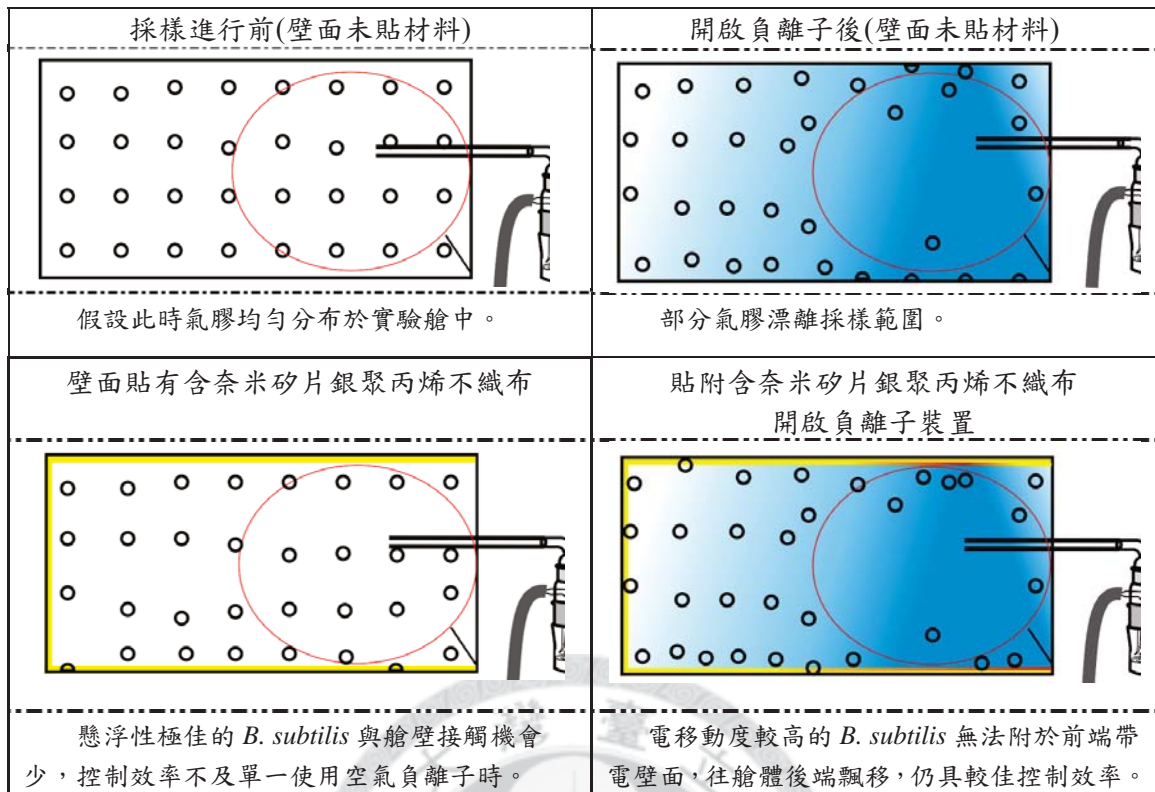


圖 4-35 *B. subtilis* 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖

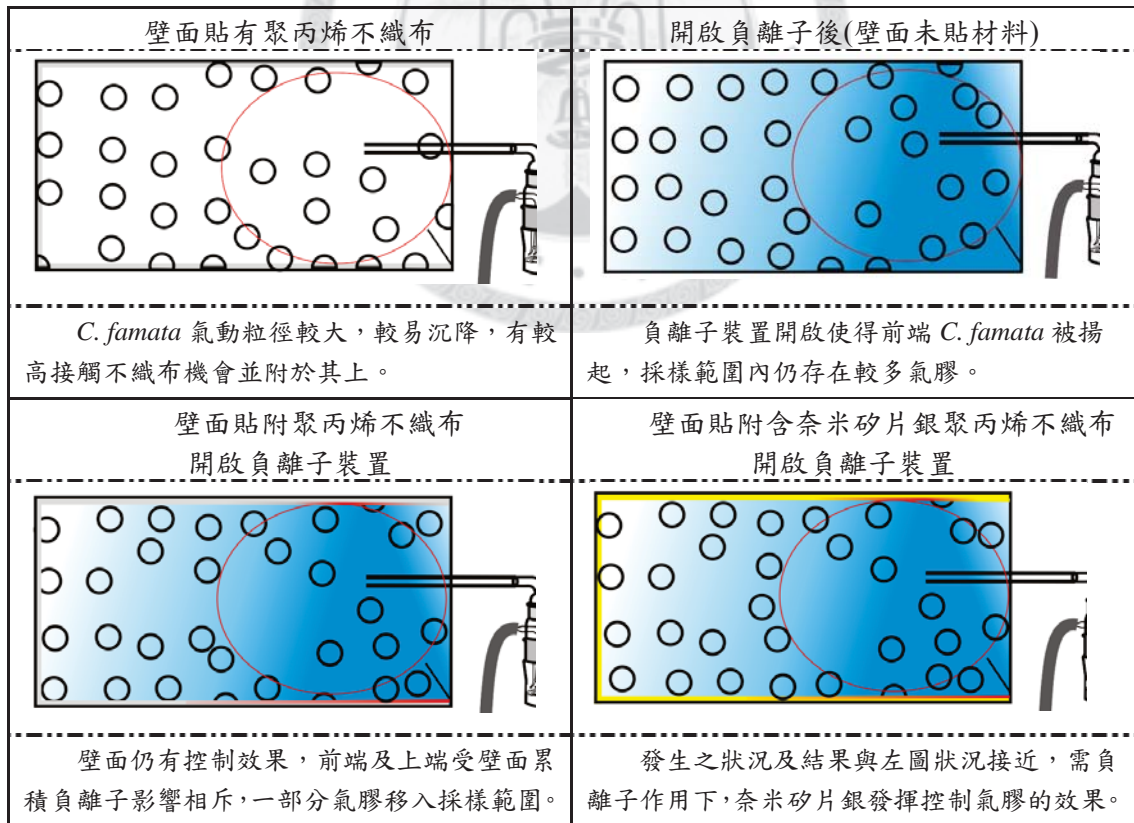


圖 4-36 *C. famata* 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖

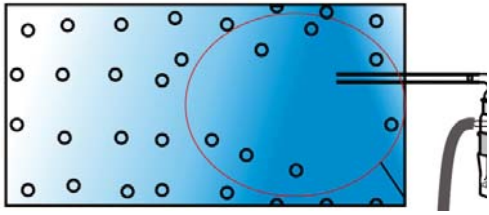
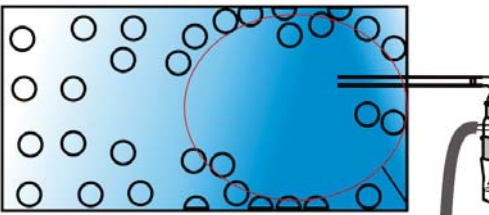
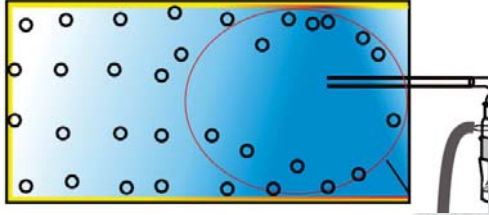
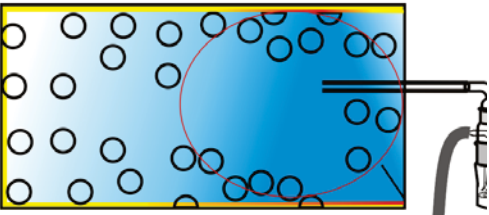
<p>開啟負離子後(壁面未貼材料)</p> 	<p>開啟負離子後(壁面未貼材料)</p> 
<p>開啟負離子，部分 <i>E.coli</i> 會被推離採樣範圍，推移距離少於 <i>B.subtilis</i>。</p>	<p>開啟負離子，部分 <i>P.citrinum</i> 會被推離採樣範圍，推移距離少於 <i>B.subtilis</i>。</p>
<p>壁面貼附含奈米矽片銀聚丙烯不織布 開啟負離子裝置</p>	<p>壁面貼附含奈米矽片銀聚丙烯不織布 開啟負離子裝置</p>
	
<p>前端及上端壁面會累積負離子，本應附於壁面之 <i>E.coli</i>，因壁面與氣膠帶相同電荷相斥，進入採樣範圍。</p>	<p>電移動度不如 <i>B.subtilis</i> 的 <i>P.citrinum</i>，移動狀況接近左圖。</p>

圖 4- 37 *E.coli* 及 *P.citrinum* 於不同處理方式下控制機制差異模擬圖

第5章 結論與建議

5-1 結論

1. 壁面貼附材質的差異會影響生物氣膠控制效率

推測由於表面粗糙度，及壁面能吸附負離子或導離負離子的能力，影響生物氣膠控制效率。粗糙度越高，控制效果越佳；壁面吸附負離子或導離負離子能力有限，效果越低。壁面粗糙對粒徑較大、較重的 *C. famata*、*P. citrinum*，控制效率較佳，分別為 31.4%、33.6%。

2. 奈米矽片銀噴附於貼附材料，對壁面材質控制生物氣膠增進效率有限

以噴附方式將奈米矽片銀附於壁片貼附材料上，會改變材料物理性質，使效果變差，可嘗試改變製備方法，或增加載附之濃度，藉以改善。

3. 含奈米矽片銀之貼附材料，可配合負離子的施放以增進生物氣膠控制效率

含奈米矽片銀之貼附材料其控制效率，可配合負離子的施放得到改善，其原理可能為貼附材需要藉助負離子將生物氣膠推移至壁材附近或其上，再藉由奈米矽片銀的吸引微生物或殺菌能力使微生物無法再氣膠化。部分菌種會有反效果，推測是負離子放電點過於接近貼附材料，使菌種雖然被推移至壁面附近，且因含奈米矽片銀，有更多氣膠接近壁面，但無法附在材料上，因此被吸入採樣器。

4. 相同壁面貼附材質，開啟負離子產生裝置與否，會影響生物氣膠控制效率

開啟負離子產生裝置與否，會影響相同壁材的控制效率，至於影響是正面或負面，受壁面貼附材質本身特性、負離子作用於壁面貼附材質的狀況、生物氣膠特性等影響。

5. 負離子對生物氣膠控制效率明顯高於壁面貼附材時，負離子對此壁面材質的控制效率會有增強效果。

此研究可見三種狀況，分別為負離子對生物氣膠控制效率明顯高於壁面貼附材、負離子對生物氣膠控制效率稍高於壁面貼附材、負離子對生物氣膠控制效率

低於壁面貼附材，同時使用此兩種控制方式後，呈現兩種結果，前者之控制效率比單純使用貼附材料高，後兩者則相反，推測前者對貼附材料的控制效果的增進主因於負離子對生物氣膠產生的推力加上氣膠的重力高於貼附材對其的斥力。

6. 艙內高濃度負離子會影響不同壁面貼附材的控制效率

壁材的選擇，會影響負離子對生物氣膠的控制效率；負離子的施放，有可能使壁材的控制效率增高，亦可能減低，因此若在居家環境中使用負離子，須注意附近週遭之壁材，是否會因為氣膠接近壁材卻無法附上，使壁材附近的氣膠濃度反而較高，在此附近活動時反而將氣膠吸入呼吸道。

使用壁材不同，控制效率差異大，若在運用壁材時，亦同時使用負離子，會使控制效率接近。

7. 生物氣膠特性影響控制效率

B. subtilis 孢子體粒徑較小，懸浮空氣狀況穩定，負離子對其有明顯的控制效率，達 32.2%。聚丙烯不織布效果不如負離子，僅 10.2%，但配合施放負離子，無論不織布是否含矽片銀，效果都比僅具聚丙烯不織布佳，且不織布含有奈米矽片銀效果更佳，控制效率可達 29.7%，推測矽片銀所帶電荷對其有影響。

P. citrinum 孢子體粒徑大於 *B. subtilis*，雖帶負電荷較高，但電移動度較低，因此負離子控制效率低於 *B. subtilis*；受重力影響高於 *B. subtilis*，因此聚丙烯不織布對其影響高於 *B. subtilis*。各種處理方式對此菌的控制效率差異極小，介於 21.3%~41.0%之間。

E. coli 細胞體，氣動力徑小於真菌，不鏽鋼艙內自然衰減較高，電移動度低於 *B. subtilis*，負離子對其控制效率高於聚丙烯不織布，但差異小(5.5%)，壁面貼附材只要與負離子裝置同時使用，*E. coli* 的控制效果均會降低，推測僅能推移至較近端而累積於壁面附近的 *E. coli*，又因聚丙烯不織布帶負電量增加而無法附在不織布上之故。

C. famata 細胞體，此研究中氣動力徑最大者，於不銹鋼牆壁環境之自然衰減低於 *E. coli* 而與 *P. citrinum* 孢子體接近，聚丙烯不織布對此菌的控制效率最高，遠高於僅使用負離子，約高於 13%，不織布噴附奈米矽片銀效果最差，但有負離子存在時，效率可提升至接近僅使用負離子的控制方式。

本實驗所用四種菌種，在壁面貼附材同為聚丙烯不織布、安置在同位置，使用同電壓放電產生的負離子的生物氣膠控制方法下，氣膠氣動力徑越小，受負離子影響越大，負離子控制效果越佳；不銹鋼壁材環境下自然衰減越高，受壁面貼附材影響越大，壁面貼附材料之控制效果越佳；最終受上述因素綜合影響呈現出本實驗之結果。

奈米矽片銀在負離子存在的狀態下，有可能因其具吸附菌體能力、帶有正電荷及具殺菌功能，而有提升控制效率的作用，能否發揮需視壁材特性及生物氣膠特性而定。



5-2 建議

1.設計能避免低估壁材控制效率的實驗

本研究因為安全的考量，實驗過程中若開艙更換壁面貼附材料會有生物氣膠外流之危險，因此壁面貼附材料無法在實驗過程中移除或置入系統。此實驗在菌種進入艙中，採樣進行實驗前，有部分氣膠已附著於壁材，使菌種初始濃度被低估，因而低估控制效率。為避免代入控制效率計算公式後使控制效率被低估，若設計兩相同實驗艙，同樣濃度菌液進入兩相同生物氣膠控制系統(空氣供應單元及生物氣膠產生單元相同)，差異僅在有無壁面貼附材，初始濃度採樣自無貼附壁材實驗艙，以此濃度值為分母，所得之控制效率會較接近實際狀況。

2.負離子濃度及設置位置

實驗設計將生物氣膠及負離子調整在較高濃度狀態，希望能明顯看出不同處理方式的差異，但在此實驗中，因實驗艙空間有限，壁面與負離子距離較近，使負離子雖然接觸壁材較快速，卻因負離子在貼附材上累積，且累積濃度最高位置在前方位置之艙底，接近採樣位置，使氣膠因與貼附材表面同樣帶負電荷而留在採樣範圍內，以致控制效能不如預期。負離子濃度若降低使壁面電荷累積減緩或設置位置改在上方，使負離子往下移動，與生物氣膠重力沉降同方向，控制效率推測會比本研究佳。此外，以較大之實驗艙進行研究，採樣位置選擇未受壁面靜電累積干擾之範圍，所得結果將更接近於一般室內空間使用時之效果。

3.壁面貼附材選擇及抗菌物質運用

壁面貼附材料的選擇會影響負離子的控制效率，雖然在本研究未發現貼附材料與負離子的控制方式結合後比單純使用壁面貼附材及單純時用負離子還高的狀況，但若有一種具粗糙度的壁材同時具極佳吸附負離子能力或導電性極佳，應有可能會有良好的加乘效果；欲使用於貼附材上之抗菌物質，需注意避免破壞貼附材的表面特性，若帶有與微生物相反電荷之抗菌物質均勻分布後導致其電荷較弱，或可增加濃度，若擔心劑量影響人體健康，可嘗試將此物質集中於幾個適當

位置。

4.採樣間隔一致使各菌種能相互比較

此研究為避免不同菌種於不鏽鋼壁艙自然沉降速度較快，使得採樣取得菌落數差距過大而無法計算控制效率，或懸浮空氣能力極佳可能導致生物氣膠濃度迅速累積，因此每種菌種的採樣間隔不同，使菌種間較無法直接比較，建議先測試得知各菌採樣間隔，以最短之間隔時間為實驗採樣間隔，採樣濃度下降較快者，從配置菌液濃度著手，採樣時稀釋後培養或濃縮再培養。亦可尋找及時偵測濃度系統或運用分生技術了解濃度變化。

5.了解負離子在空間中的變化與壁材電荷變化對控制效率的影響

了解菌種控制效率在空間上的變化，有助於了解菌種控制效率受負離子及貼附材料電荷影響的情形，可用以提出負離子裝置及貼附材料、抗菌物質最佳配置方式。



參考文獻

- Agranovski, V., Ristovski, Z., Hargreaves, M., Blackall, P. J., & Morawska, L. (2003). Real-time measurement of bacterial aerosols with the UVAPS: performance evaluation. *Journal of Aerosol Science*, 34(3), 301-317.
- Amend, A. S., Seifert, K. A., Samson, R., & Bruns, T. D. (2010). Indoor fungal composition is geographically patterned and more diverse in temperate zones than in the tropics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(31), 13748-13753.
- Andersson, M., Mikkola, R., Kroppenstedt, R., Rainey, F., Peltola, J., Helin, J., Salkinoja-Salonen, M. (1998). The mitochondrial toxin produced by *Streptomyces griseus* strains isolated from an indoor environment is valinomycin. *Applied and environmental microbiology*, 64(12), 4767-4773.
- Banerjee, M., Mallick, S., Paul, A., Chattopadhyay, A., & Ghosh, S. S. (2010). Heightened Reactive Oxygen Species Generation in the Antimicrobial Activity of a Three Component Iodinated Chitosan-Silver Nanoparticle Composite. *Langmuir*, 26(8), 5901-5908
- Bolashikov, Z. D., & Melikov, A. K. (2009). Methods for air cleaning and protection of building occupants from airborne pathogens. *Building and Environment*, 44(7), 1378-1385.
- Carrera, M., Zandomeni, R. O., Fitzgibbon, J., & Sagripanti, J. L. (2007). Difference between the spore sizes of *Bacillus anthracis* and other *Bacillus* species. *Journal of Applied Microbiology*, 102(2), 303-312.
- Caruana, D. J. (2011). Detection and analysis of airborne particles of biological origin: present and future. *Analyst*, 136(22), 4641-4652.
- Chen, G., Driks, A., Tawfiq, K., Mallozzi, M., & Patil, S. (2010). *Bacillus anthracis* and *Bacillus subtilis* spore surface properties and transport. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 76(2), 512-518.
- Chen, P. S., & Li, C. S. (2005). Bioaerosol characterization by flow cytometry with fluorochrome. *Journal of Environmental Monitoring*, 7(10), 950-959.
- Cox, C. S., & Wathes, C. M. (1995). *Bioaerosols handbook*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Deacon, J. W. (1997). *Modern mycology* (Vol. 7): Wiley-Blackwell.

Dharmage, Bailey, Raven, Mitakakis, Thien, Forbes, Walters. (1999). Prevalence and residential determinants of fungi within homes in Melbourne, Australia. *Clinical & Experimental Allergy*, 29(11), 1481-1489.

Fernández Rodríguez, S., Tormo Molina, R., Silva Palacios, I., & Gonzalo Garijo, Á. (2011). Two sampling methods for the Petri dish detection of airborne fungi. *Grana*, 50(3), 202-207.

Fletcher, L., Gaunt, L., Beggs, C., Shepherd, S., Sleight, P. A., Noakes, C., & Kerr, K. (2007). Bactericidal action of positive and negative ions in air. *BMC microbiology*, 7(1), 32-40.

Fletcher, L., Noakes, C., Sleight, P., Beggs, C., & Shepherd, S. (2008). Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and Built Environment*, 17(2), 173-182.

Foster, H., Ditta, I., Varghese, S., & Steele, A. (2011). Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 90(6), 1847-1868.

Fröhlich-Nowoisky, J., Pickersgill, D. A., Després, V. R., & Pöschl, U. (2009). High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 12814-12819.

Gravesen, S., Larsen, L., Gyntelberg, F., & Skov, P. (1986). Demonstration of Microorganisms and Dust in Schools and Offices. *Allergy*, 41(7), 520-525.

Gravesen, S., Nielsen, P. A. & Nielsen K. F. (1997) "Microfungi in water damaged buildings", SBI Report Number 282, Danish Building Research Institute, Copenhagen: Denmark.

Green, B. J., Tovey, E. R., Beezhold, D. H., Perzanowski, M. S., Acosta, L. M., Divjan, A. I., & Chew, G. L. (2009). Surveillance of fungal allergic sensitization using the fluorescent halogen immunoassay. *Journal de Mycologie Médicale / Journal of Medical Mycology*, 19(4), 253-261.

Grinshpun, S. A. (2011). Biological Aerosols. *Aerosols-Science and Technology*, 379-406.

Guo, H., Lee, S. C., Chan, L. Y., & Li, W. M. (2004). Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments. *Environmental Research*, 94(1), 57-66.

Hardin, B. D., Kelman, B. J., & Saxon, A. (2003). Adverse human health effects associated with molds in the indoor environment. *Journal of occupational and*

environmental medicine/American College of Occupational and Environmental Medicine, 45(5), 470-478.

Hill, S. S., Shaw, B. R., & Wu, A. H. B. (2001). The clinical effects of plasticizers, antioxidants, and other contaminants in medical polyvinylchloride tubing during respiratory and non-respiratory exposure. *Clinica Chimica Acta*, 304(1-2), 1-8.

Kolarž, P. M., Filipović, D. M., & Marinković, B. P. (2009). Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(11), 2062-2067.

Kondo, F., Ikai, Y., Goto, T., Ito, Y., Oka, H., Nakazawa, H., Torii, S. (2007). Two sensitive sick-building syndrome patients possibly responding to p-dichlorobenzene and 2-Ethyl-1-hexanol: Case Report. *Journal of health science*, 53(1), 119-123.

Korpi, A., Järnberg, J., & Pasanen, A. L. (2009). Microbial volatile organic compounds. *Critical Reviews in Toxicology*, 39(2), 139-193.

Larsen, T., Frisvad, J., Samson, R., Flannigan, B., Flannigan, M., Verhoeff, A., Hoekstra, E. (1994). Production of volatiles and presence of mycotoxins in conidia of common indoor penicillia and aspergilli. *Health implications of fungi in indoor environments*, pp. 251-279.

Laza, V. (2009). Enhancing the Human Reactivity by Using the Negative Air Ions Generators. *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology*. 26, 151-156.

Lee, B. U. (2011). Life Comes from the Air: A Short Review on Bioaerosol Control. *Aerosol and Air Quality Research*, 11, 921-927.

Lee, S. A., Willeke, K., Mainelis, G., Adhikari, A., Wang, H., Reponen, T., & Grinshpun, S. A. (2004). Assessment of Electrical Charge on Airborne Microorganisms by a New Bioaerosol Sampling Method. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(3), 127-138.

Li, C. S., & Hsu, L. Y. (1997). Airborne fungus allergen in association with residential characteristics in atopic and control children in a subtropical region. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 52(1), 72-79.

Li, C. S., Hsu, L. Y., Chou, C. C., & Hsieh, K. H. (1995). Fungus allergens inside and outside the residences of atopic and control children. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 50(1), 38-43.

Jung, J. H., Park, S. Y., Lee, J. E., Lee, B. U., & Bae, G. N. (2012). Distinguishing Biotic and Abiotic Particles Using an Ultraviolet Aerodynamic Particle Sizer for

Real-Time Detection of Bacterial Bioaerosols. *Journal of Gynecologic Surgery*, 37, 39.

Luts, A., Parts, T.-E., Laakso, L., Hirsikko, A., Grönholm, T., & Kulmala, M. (2009). Some air electricity phenomena caused by waterfalls: Correlative study of the spectra. *Atmospheric Research*, 91(2-4), 229-237.

Mandal, J., & Brandl, H. (2011). Bioaerosols in Indoor Environment-A Review with Special Reference to Residential and Occupational Locations. *Open Environmental & Biological Monitoring Journal*, 4, 83-96.

Marambio-Jones, C., & Hoek, E. (2010). A review of the antibacterial effects of silver nanomaterials and potential implications for human health and the environment. *Journal of Nanoparticle Research*, 12(5), 1531-1551.

Max, H. g., Mervi, H.-K., Janet, M., & Maire, H. (2004). *Bioaerosols Aerosols Handbook*: CRC Press.

Meklin, T., Husman, T., Vepsäläinen, A., Vahteristo, M., Koivisto, J., Halla-Aho, J., Nevalainen, A. (2002). Indoor air microbes and respiratory symptoms of children in moisture damaged and reference schools. *Indoor Air*, 12(3), 175-183.

Mendis, D. A., Rosenberg, M., & Azam, F. (2000). A note on the possible electrostatic disruption of bacteria. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 28(4), 1304-1306.

Michel, O. (2000). Systemic and local airways inflammatory response to endotoxin. *Toxicology*, 152(1-3), 25-30.

Mikkola, R., Andersson, M. A., Teplova, V., Grigoriev, P., Kuehn, T., Loss, S., Veijalainen, P. (2007). Amylosin from *Bacillus amyloliquefaciens*, a K⁺ and Na⁺ channel-forming toxic peptide containing a polyene structure. *Toxicon*, 49(8), 1158-1171.

Mohr, A., Hurst, C., Crawford, R., Garland, J., Lipson, D., Mills, A., & Stetzenbach, L. (2007). Fate and transport of microorganisms in air. *Manual of environmental microbiology*(Ed. 3), 961-971.

Mudarri, D., & Fisk, W. J. (2007). Public health and economic impact of dampness and mold. *Indoor Air*, 17(3), 226-235.

Muhič, S., & Butala, V. (2006). Effectiveness of personal ventilation system using relative decrease of tracer gas in the first minute parameter. *Energy and Buildings*, 38(5), 534-542.

Nakane, H., Asami, O., Yamada, Y., & Ohira, H. (2002). Effect of negative air ions on

computer operation, anxiety and salivary chromogranin A-like immunoreactivity. *International Journal of Psychophysiology*, 46(1), 85-89.

Otsuki, T., Takahashi, K., Mase, A., Kawado, T., Kotani, M., Maeda, M., Chen, Y. (2009). The biological effects of negatively-charged indoor air conditions. *Kawasaki Medical Journal*, 35(3), 205-214.

P. De Nuntiis, O. M., P.Mandrioli, G. Ranalli, C. Sorlini. (2003). monitoring the biological aerosol. *Cultural heritage and aerobiology*.

Park, C. W., Yoon, K. Y., Kim, Y. D., Park, J. H., & Hwang, J. (2011). Effects of condensational growth on culturability of airborne bacteria: Implications for sampling and control of bioaerosols. *Journal of Aerosol Science*, 42(4), 213-223.

Pelaez, M., Nolan, N. T., Pillai, S. C., Seery, M. K., Falaras, P., Kontos, A. G., Dionysiou, D. D. (2012). A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications. *Applied Catalysis B: Environmental* 125(0), 331-349.

Pestka, J. J., Yike, I., Dearborn, D. G., Ward, M. D. W., & Harkema, J. R. (2008). Stachybotrys chartarum, Trichothecene Mycotoxins, and Damp Building-Related Illness: New Insights into a Public Health Enigma. *Toxicological Sciences*, 104(1), 4-26.

Pietarinen, V.-M., Rintala, H., Hyvarinen, A., Lignell, U., Karkkainen, P., & Nevalainen, A. (2008). Quantitative PCR analysis of fungi and bacteria in building materials and comparison to culture-based analysis. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(5), 655-663.

Pitkäranta, M., Meklin, T., Hyvärinen, A., Paulin, L., Auvinen, P., Nevalainen, A., & Rintala, H. (2008). Analysis of fungal flora in indoor dust by ribosomal DNA sequence analysis, quantitative PCR, and culture. *Applied and environmental microbiology*, 74(1), 233-244.

Poortinga, A. T.; Bos, R.; Norde, W.; Busscher, H. J., Electric double layer interactions in bacterial adhesion to surfaces. *Surface Science Reports* 2002, 47, (1),3-32.

Qian, J., Hospodsky, D., Yamamoto, N., Nazaroff, W. W., & Peccia, J. (2012). Size-resolved emission rates of airborne bacteria and fungi in an occupied classroom. *Indoor Air*, 22(4),339-351.

Qiu, X., Miyauchi, M., Sunada, K., Minoshima, M., Liu, M., Lu, Y., . . . Hashimoto, K. (2011). Hybrid CuxO/TiO₂ Nanocomposites As Risk-Reduction Materials in Indoor Environments. *ACS Nano*, 6(2), 1609-1618.

Quadros, M. E., & Marr, L. C. (2010). Environmental and human health risks of aerosolized silver nanoparticles. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(7), 770-781.

Redlich, C. A., Sparer, J., & Cullen, M. R. (1997). Sick-building syndrome. *The Lancet*, 349(9057), 1013-1016.

Ross, M. A., Curtis, L., Scheff, P. A., Hryhorczuk, D. O., Ramakrishnan, V., Wadden, R. A., & Persky, V. W. (2000). Association of asthma symptoms and severity with indoor bioaerosols. *Allergy*, 55(8), 705-711.

Schweizer, C., Edwards, R. D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W. J., Ilacqua, V., Juhani Jantunen, M., Kunzli, N. (2006). Indoor time-microenvironment-activity patterns in seven regions of Europe. *J Expos Sci Environ Epidemiol*, 17(2), 170-181.

Sekimoto, K., & Takayama, M. (2011). Observations of different core water cluster ions Y-(H₂O)_n (Y = O₂, HO_x, NO_x, CO_x) and magic number in atmospheric pressure negative corona discharge mass spectrometry. *Journal of Mass Spectrometry*, 46(1), 50-60.

Silver, S., Phung, L., & Silver, G. (2006). Silver as biocides in burn and wound dressings and bacterial resistance to silver compounds. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 33(7), 627-634.

Skalny, J. D., Mikoviny, T., Matejcek, S., & Mason, N. J. (2004). An analysis of mass spectrometric study of negative ions extracted from negative corona discharge in air. *International Journal of Mass Spectrometry*, 233(1-3), 317-324.

Skromulis, A., & Noviks, G. (2012). Atmospheric light air ion concentrations and related meteorologic factors in Rezekne city, Latvia. *Journal of Environmental Biology*, 33, 455-462.

Spengler, J. D. (2012). Climate change, indoor environments, and health. *Indoor Air*, 22(2), 89-95.

Stetzenbach, L., Hurst, C., Crawford, R., Garland, J., Lipson, D., & Mills, A. (2007). Introduction to aerobiology. *Manual of environmental microbiology*(Ed. 3), 925-938.

- Stout, J. E., & Yu, V. L. (1997). Legionellosis. *New England Journal of Medicine*, 337(10), 682-687.
- Straus, D. C. (2011). The possible role of fungal contamination in sick building syndrome. *Frontiers in bioscience (Elite edition)*, 3, 562.
- Su, H. L., Chou, C. C., Hung, D. J., Lin, S. H., Pao, I., Lin, J. H., Lin, J. J. (2009). The disruption of bacterial membrane integrity through ROS generation induced by nanohybrids of silver and clay. *Biomaterials*, 30(30), 5979-5987.
- Su, H. L., Lin, S. H., Wei, J. C., Pao, I. C., Chiao, S. H., Huang, C. C., Lin, S. Z. & Lin, J. J. (2011). Novel Nanohybrids of Silver Particles on Clay Platelets for Inhibiting Silver-Resistant Bacteria. *PloS ONE*, 6(6), e21125.
- Tuomainen, A., Seuri, M., & Sieppi, A. (2004). Indoor air quality and health problems associated with damp floor coverings. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77(3), 222-226.
- Tyagi, A. K., Nirala, B. K., Malik, A., & Singh, K. (2008). The effect of negative air ion exposure on Escherichia coli and Pseudomonas fluorescens. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43(7), 694-699.
- Van Lancker, F., Adams, A., Delmulle, B., De Saeger, S., Moretti, A., Van Peteghem, C., & De Kimpe, N. (2008). Use of headspace SPME-GC-MS for the analysis of the volatiles produced by indoor molds grown on different substrates. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(10), 1127-1133.
- Wålinder R, Ernsgård L, Gullstrand E, Johansson G, Norbäck D, Venge P. et al. 1999. Acute effects of experimental exposure to four volatile compounds associated with water-damaged buildings and microbial growth. In: Proceedings of Indoor Air '99, Vol.2, 8–13 August 1999, Edinburgh, Scotland. Watford, UK: Building Research Establishment Ltd, 606–611.
- Wang, R.-M., Wang, J.-F., Wang, X.-W., He, Y.-F., Zhu, Y.-F., & Jiang, M.-L. (2011). Preparation of acrylate-based copolymer emulsion and its humidity controlling mechanism in interior wall coatings. *Progress in Organic Coatings*, 71(4), 369-375.
- Wei, D.-L., Chen, J.-H., Jong, S.-C., & Shen, H.-D. (1993). Indoor airborne Penicillium species in Taiwan. *Current Microbiology*, 26(3), 137-140.
- WHO (1983). Indoor air pollutants: exposure and health effects. *EURO Reports and Studies*, 78, 1-42.
- WHO (2005) Housing: Sick Building Syndrome (Pamphlet No. 2) · Copenhagen,

World Health Organization Regional Office for Europe

World Health Organization (2009). WHO Guidelines on Indoor Air Quality: Dampness and Mould. Copenhagen, WHO Regional Office for Europe. (http://www.euro.who.int/InformationSources/Publications/Catalogue/20090629_4)

Wicklow, D., & Shotwell, O. (1983). Intrafungal distribution of aflatoxins among conidia and sclerotia of *Aspergillus flavus* and *Aspergillus parasiticus*. *Canadian journal of microbiology*, 29(1), 1-5.

Wu, C. C., Lee, G. W. M., Cheng, P., Yang, S., & Yu, K. P. (2006). Effect of wall surface materials on deposition of particles with the aid of negative air ions. *Journal of Aerosol Science*, 37(5), 616-630.

Wu, C. F., & Lin, W. H. (2012). Designing a Negative Air Ions Distribution Pattern for Human Health in a House Garden by Using Geostatistical Approach and a Negative Air Ion Generates Experiment. *Applied Mechanics and Materials*, 121, 2648-2652.

Yamada, R., Yanoma, S., Akaike, M., Tsuburaya, A., Sugimasa, Y., Takemiya, S., Imada, T. (2006). Water-generated negative air ions activate NK cell and inhibit carcinogenesis in mice. *Cancer Letters*, 239(2), 190-197.

Zhang, Q., Damit, B., Welch, J., Park, H., Wu, C.-Y., & Sigmund, W. (2010). Microwave assisted nanofibrous air filtration for disinfection of bioaerosols. *Journal of Aerosol Science*, 41(9), 880-888.

于台珊、何雨芳(2007)。醫療院所中央空調系統生物氣膠濃度特性調查研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫報告(編號 IOSH95-H312)。

王首文(2009)。壁面材質對室內環境中空氣負離子控制懸浮微粒影響之研究。臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。

包翊絹(2008)。奈米銀脫層黏土之抗菌機制及應用。中興大學生命科學研究所碩士論文。

江哲銘、邵文正(2009)。擴大健康綠建材性能與效益評估計畫。內政部建築研究所。

吳佩芝(2010)。室內生物性污染物之預防與空氣品質維護。室內空氣品質管理-徽害污染改善研習會，行政院環保署環境檢驗局主辦。

吳佩芝、蘇慧貞、李家偉、曾昭衡、張立德(2011)。室內空氣品質標準檢討及自主管理診斷機制建立與推動。行政院環境保護署專案計畫(編號 EPA-98-FA11-03-D151)。

吳致呈、顏麗鳳(2004)。森林林相與瀑布區之空氣正負離子特性探討，第八屆全國大專院校登山運動研討會論文集。

吳致呈(2006)。空氣負離子控制室內空氣污染物之研究。臺灣大學環境工程學研究所博士論文。

林文海、黃彬芳(2007)。大眾運輸工具之生物氣膠特性暴露調查。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫報告(編號 IOSH96-H101)。

林江珍(2009)。層狀天然黏土分散奈米銀粒子新組成之安全性、抑制細菌生長機制及促進傷口癒合應用之研究。台灣大學促進產學合作先導性研究計畫。

林江珍、王映樵、董睿軒、蔡韋政(2009)。新型梳狀雙性高分子及其黏土插層複合型分散劑合成與應用於奈米顏料粒子之分散研究。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告(編號 NSC 95-2221-E-002-207-MY3)。

林秀鴻(2010)。奈米銀脫層黏土抗菌機制之探討。中興大學生命科學研究所碩士論文。

林振宏(2011)。中藥塗佈電漿改質聚丙烯不織布之抑菌活性探討。中原大學土木工程研究所碩士論文。

林毅(2011)。電漿改質濾材塗佈聚苯胺去除生物氣膠之研究。中原大學土木工程研究所碩士論文。

林翰君(2011)。低溫電漿改質棉織物塗佈中藥萃取物對抑菌研究之影響。中原大學土木工程研究所碩士論文。

洪達任(2007)。含高濃度奈米銀粒子的脫層黏土之抗菌能力分析。中興大學生命科學研究所碩士論文。

洪明瑞、曾昱菱、陳瑞鈴、李文忠(2008)。主動型綠建材的健康概念與發展趨勢。技師月刊，51，68-81。

洪柏宸(2011)。醫療院所空氣品質及通風情形與感染性氣膠分佈研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫報告(編號 IOSH99-H312)。

紀碧芳(2003)。受黴菌污染建材上之黴菌種類研究。成功大學環境醫學研究所碩士論文。

婁嘉玲(2005)。紫外光與光觸媒濾材對生物氣膠殺菌效率之研究。臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。

張靜文(2002)。空氣中嗜肺性退伍軍人菌殺菌效能評估。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫報告(編號 IOSH91-H371)。

張振平(2008)。作業環境非游離輻射-紫外線為害評估技術探。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所計畫報告(編號 IOSH96-H309)。

張勝善(2009)。抗靜電纖維及應用。臺灣人纖工業會訊，62，8-18。

陳彥潔(2009)。奈米碳管產生空氣負離子裝置控制生物氣膠效率空間分布之研究。臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。

曾國璋(2006)。奈米銀濾材處理生物氣膠之研究。臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。

黃小林、蔡政賢(2010)。應用低溫高週波電漿於室內生物氣膠控制之研究。行政院國家科學委員會計畫報告(編號 NSC96-2221-E041-007-MY3)。

黃建賓(2008)。奈米碳管空氣負離子產生裝置控制生物氣膠之研究。臺灣大學環境工程學研究所碩士論文。

葉純宜、林明滢、陳小妮、王復德(2005)。紫外線殺菌效能探討。感染控制雜誌，15(5)，293-300。

楊心豪(2005)。帶電濾材對室內懸浮微粒去除效能之研究。臺灣大學環境工程學研究所博士論文。

楊心豪(2009)。森林環境負離子空氣保健指標建立之研究。行政院國家科學委員會計畫(編號 NSC97-2221-E464-001)。

楊心豪、翁堉翔(2009)。中藥-黃連萃取物抗菌濾材之研發。行政院國家科學委員會計畫(編號 NSC97-2622-E464-001-CC3)。

楊心豪、陳林祈(2011)。應用抗菌胜肽濾材去除生物氣膠之研究。行政院國家科學委員會計畫(編號 NSC100-2622-E464-001-CC3)。

劉芸汶(2003)。一般辦公大樓空氣及灰塵中活性真菌濃度與病態大樓症候群之相關性探討。國立成功大學環境醫學研究所碩士論文。

潘致弘、張靜文(2008)。醫療院所真菌菌屬對員工健康影響評估研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告(編號 IOSH96-M304)。

潘致弘、張靜文(2009)。醫療院所細菌與真菌對員工健康影響評估研究。行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所研究報告(編號 IOSH97-M304)。

蔡榮賢(2003)。不同職業場所中真菌暴露評估。臺北醫學大學公共衛生研究所碩士論文。

鄭尊仁、李崇德、趙馨、蘇大成、郭育良(2007)。微粒空氣污染特性、毒性和健

康風險之研究。環保署/國科會空污防制科研合作計畫(編號 NSC 96-EPA-Z-002-002)。

鍾金湯、劉仲康(1997)。緬懷一位濟世救人的外科醫師—李斯特。科學月刊，28(330)。

羅時麒，姚志廷(2008)。濕熱氣候建材防黴性能評估之研究。內政部建築研究所自行研究報告。

蘇明德(2007)。銀的自述。科學發展，420，52 ~ 57。

蘇慧貞(2002)。室內/室外空氣污染物之國民健康風險評估及管制成本效益分析。行政院環境保護署專案計畫報告(編號 EPA-98-FA11-03-D151)。

蘇慧貞(2003)。居住環境中生物性污染之生命週期與健康風險研究(I)。行政院國科會研究報告(編號 NSC90-2621-Z006-006)。

室內空氣中總細菌數檢測方法 NIEA E301.11C(97 年 12 月 23).取自：
<http://www.niea.gov.tw/niea/LIVE/E30111C.htm>

室內空氣中總真菌數檢測方法 NIEA E401.11C(97 年 12 月 23).取自：
<http://www.niea.gov.tw/niea/LIVE/E40111C.htm>

