

基於未來氣候的住宅溫室氣體 排放趨勢預測與調適策略

計畫主持人：羅時麒 組長
協同主持人：黃瑞隆 博士
研究員：黃國倉 博士
研究助理：王仁俊
研究助理：施文玫

內政部建築研究所協同研究報告

中華民國 106 年 12 月

(本報告內容及建議，純屬研究小組意見，不代表本機關意見)

目次

表次.....	III
圖次.....	V
摘要.....	IX
第一章 緒論.....	1
第一節 研究緣起與背景.....	1
第二節 本研究計畫之重要性與預期成果.....	1
第三節 研究步驟與流程.....	3
第四節 國內外相關文獻回顧.....	4
第二章 研究方法.....	15
第一節 研究範圍界定.....	15
第二節 自下而上的住宅能耗模擬模型.....	17
第三節 主要驅動因子與中間層驅動.....	18
第四節 能源功能.....	20
第五節 研究流程圖.....	23
第三章 未來氣候分析.....	25
第一節 生物氣候與冷熱應力.....	25
第二節 生物氣候與被動式策略.....	30
第四章 未來氣候下單位空調耗能變動分析.....	35
第一節 單位空調耗能的不確定性分析.....	35
第二節 建築外殼因子的靈敏度分析.....	50
第五章 溫室氣體排放趨勢預測.....	53
第一節 模型校正.....	53
第二節 溫室氣體排放量預測.....	54
第六章 調適策略.....	58
第一節 建築外殼熱性能改善.....	59

第二節 空調能效提升.....	64
第三節 家電設備效率提升.....	66
第四節 照明效率提升.....	68
第五節 綜合調適效果.....	70
第七章 結論與建議.....	75
第一節 結論.....	75
第二節 建議事項.....	76
附錄一 期中審查會議委員意見回覆.....	77
附錄二 期末審查會議委員意見回覆.....	81
附錄三 期中工作會議紀錄.....	83
附錄四 期末工作會議紀錄.....	87
參考書目.....	91

表次

表 1-1 研究進度	3
表 1-2 在不同社經情境之下的住宅部門排碳量	7
表 2-1 各變因及其參數設定	22
表 2-2 LEED 規範之生活熱水計算標準	23
表 2-3 生活熱水使用的各項溫度設定	23
表 3-1 台北之全年累計熱和冷應力比較	28
表 3-2 台中之全年累計熱和冷應力比較	29
表 3-3 高雄之全年累計熱和冷應力比較	29
表 3-4 台北之各項策略潛力整理	32
表 3-5 台中之各項策略潛力整理	33
表 3-6 高雄之各項策略潛力整理	33
表 4-1 台北之空調綜合分析	47
表 4-2 台北之空調綜合分析相對於當代之改變量	47
表 4-3 台中之空調綜合分析	48
表 4-4 台中之空調綜合分析相對於當代之改變量	48
表 4-5 高雄之空調綜合分析	49
表 4-6 高雄之空調綜合分析相對於當代之改變量	49
表 6-1 住宿類建築的 U_w 、 U_f 和 SF 基準值	60
表 6-2 多元回歸分析獲得之各項係數	60
表 6-3 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(1)	62
表 6-4 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(2)	62
表 6-5 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(3)	63
表 6-6 窗(壁)型冷氣機能源效率分級基準表	64
表 6-7 調適組合(1)各項設定值 — 中度減量效果	71
表 6-8 調適組合(2)各項設定值 — 高度減量效果	72

圖次

圖 1-1 研究流程圖	2
圖 1-2 各 RCP 情境的輻射強迫力	4
圖 1-3 全球平均溫度變化相較於 1986-2005 的平均	5
圖 1-4 自下而上和自上而下模型的一般方法論說明	6
圖 1-5 自上而下與自下而上用於推估住宅能源消耗之方法	7
圖 1-6 住宅部門之耗能與碳排放量在未來的趨勢變化	9
圖 1-7 全年能源使用量於 2080 年代時在三個情境下的改變	10
圖 1-8 冷暖房在各區域受全球暖化影響的淨碳排改變量	11
圖 1-9 全國與住宅部門歷年二氧化碳變動趨勢	12
圖 1-10 住宅部門各能源消費結構二氧化碳排放變動趨勢	12
圖 2-1 臺灣 1990 至 2014 年總溫室氣體排放量和移除量趨勢	15
圖 2-2 住宅碳排放的計算邊界	16
圖 2-3 本計畫擬採用之自下而上的能量模擬模型	17
圖 2-4 總人口成長趨勢—高、中及低推估	18
圖 2-5 人均住宅面積和人均 GDP 之間的關係	19
圖 2-6 住宅平面配置圖	21
圖 2-7 含住宅能源模型之研究流程圖	24
圖 3-1 台灣之生物氣候與濕空氣線圖	25
圖 3-2 台北之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)	26
圖 3-3 台中之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)	27
圖 3-4 高雄之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)	27
圖 3-5 台北之生物氣候與被動式策略	30
圖 3-6 台中之生物氣候與被動式策略	31
圖 3-7 高雄之生物氣候與被動式策略	31
圖 4-1 台北的年尖峰冷房負荷變動趨勢	36

圖 4-2 台中的年尖峰冷房負荷之變動趨勢	37
圖 4-3 高雄的年尖峰冷房負荷之變動趨勢	38
圖 4-4 台北的全年空調使用時間變動趨勢	40
圖 4-5 台中的全年空調使用時間變動趨勢	41
圖 4-6 高雄的全年空調使用時間變動趨勢	42
圖 4-7 台北的單位全年空調耗能變動趨勢	44
圖 4-8 台中的單位全年空調耗能變動趨勢	45
圖 4-9 高雄的單位全年空調耗能變動趨勢	46
圖 4-10 台北的各住宅外殼因子標準迴歸係數	50
圖 4-11 台中的各住宅外殼因子標準迴歸係數	51
圖 4-12 高雄的各住宅外殼因子標準迴歸係數	51
圖 5-1 歷年各部門燃料燃燒 CO ₂ 排放量占比 (含電力消費)	53
圖 5-2 模型推估值與歷史資料之校正	54
圖 5-3 在低排放 RCP2.6 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢	56
圖 5-4 在中排放 RCP4.5 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢	56
圖 5-5 在高排放 RCP8.5 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢	57
圖 6-1 臺灣六大部門溫室氣體排放現況與短中長期減量目標	58
圖 6-2 目前法規所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	61
圖 6-3 修訂標準(1)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	62
圖 6-4 修訂標準(2)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	63
圖 6-5 修訂標準(3)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	64
圖 6-6 空調 COP = 3.6 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	65
圖 6-7 空調 COP = 3.9 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	65
圖 6-8 空調 COP = 4.2 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	66
圖 6-9 設備節能率提升 10% 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	67
圖 6-10 設備節能率提升 20% 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	67

圖 6-11 設備節能率提升 30%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	68
圖 6-12 設備節能率提升 40%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	68
圖 6-13 照明節能率提升 10%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	69
圖 6-14 照明節能率提升 20%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	69
圖 6-15 照明節能率提升 30%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	70
圖 6-16 照明節能率提升 40%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量	70
圖 6-17 應用調適組合(1)之住宅部門溫室氣體排放趨勢	71
圖 6-18 應用調適組合(2)之住宅部門溫室氣體排放趨勢	72

摘要

關鍵詞：住宅部門、溫室氣體預測、建築外殼節能、調適策略

一、研究緣起

氣候變遷之議題從過去至今已激起許多關注，其對人居環境的衝擊更是備受討論。在臺灣每年近百分之四十的能源使用皆來自於建築能耗，其中供建築之日常使用的能源占比，其影響程度不容小覷。根據先前的研究結果顯示，隨著全球暖化日益加劇，外氣條件之改變增加了未來建築節能不確定性，尤其臺灣位於亞熱帶熱濕氣候區，未來的氣溫增量導致空調耗能於最嚴峻之情境下，在 21 世紀末增為 2000 年之兩倍(Huang & Hwang, 2016)。如此巨幅的成長，最終勢必貢獻於全國整體溫室氣體排放量的上升。基於建築節能與碳排放等因素，本研究之目的旨在量化未來住宅之溫室氣體排放趨勢，並以此為依據，制定適切的調適策略以將未來住宅之溫室氣體排放量維持在當代水準。

二、研究方法及過程

本研究以由下往上之推估法，建立用於預測未來住宅溫室氣體排放趨勢之模型，由社經因素如人口、家戶收入等為外部驅動因子，並考慮各個會影響住宅能源使用之最終用途，包含空調使用、設備、燈光照明與烹飪等等；透過全域不確定性分析中的蒙地卡羅法產生足以代表臺灣多樣化住宅之研究案例，各案例以 EnergyPlus 模擬在三種氣候變遷情境下至世紀末之逐年能源使用情形，由模擬之結果建立溫室氣體推估模型以預測未來氣候下的住宅部門排放趨勢。為了使得住宅部門的溫室氣體排放量維持在溫室氣體減量管理法的管制標準內，本研究最終提出應用於住宅之各項調適策略並量化其效益，以為未來政策擬定之參考，以臻節能減碳之目的。

三、重要發現

本研究成果之重要結論如下：

1. 未來氣候下人體的熱不舒適度為主要調適目的，而被動式的自然通風與主動式的空調降溫為兩項可行的調適策略以維持人體舒適性。

2. 自下而上的方法由分解部件的層次數據構建，並根據組合而成的數據來估計個別因素對整體能源耗用的影響。此推估模型可用來選擇基於最佳成本效益應用於各個部件的技術和過程，以實現碳排放減量的目標。
3. 本研究分析未來氣候下單位空調耗能的變化趨勢，結果顯示全年單位空調耗能的增加主因在於長時間的空調使用；年尖峰冷房負荷的增量未如空調使用時間的多，然而在冷凍噸數的設計上仍需考慮氣候改變所造成的影響。
4. 若為改善建築外殼的熱性能，依據靈敏度分析的結果，改善之優先順序為玻璃之日射透過率(SHGC)、外遮陽係數(Ki)、外牆平均熱傳透率(U_w)。
5. 因人口、經濟成長與氣候改變三項因子的作用下，各情境之溫室氣體排放量在 2030 年左右達到高峰，約為 34.58 至 33.05 百萬公噸不等；在 2030 年至 2060 年之間，氣候影響更為明顯，在高排放 RCP8.5 情境下，儘管全國的人口減少，溫室氣體排放量仍維持在 33.25 百萬公噸並未減緩。
6. 本研究針對四個項目提出溫室氣體減量調適策略，依序為建築外殼熱性能改善、空調效率提升、設備效率提升與照明效率提升。結果顯示在高度減量效果的綜合調適策略下，2020 的溫室氣體排放量可降至 28.40 萬公噸，但若以《溫室氣體減量及管理法》的長期標準而言，各個項目的減量程度仍需努力。

四、主要建議事項

根據本研究成果發現，提出下列具體建議，分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉如下：

建議一

(研擬因應未來氣候之建築外殼法規相關法規):立即可行之建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國內各大學或研究機構

在氣候變遷影響下，透過法規規範外殼之改善是必須的。本研究已提出基準值來描述整體的住宅外殼性能，至於如何透過改變個別外殼因子以降低基準值，後續研究則可參考本研究之靈敏度分析結果，作出個別性的調整，以最有效率的方式提升整體住宅外殼熱性能，並進一步評估其對於社會、經濟與環境之衝擊。

建議二

(持續並擴大推廣老舊建築與設備的更新):中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營政署、台灣建築中心、經濟部能源局

本研究之研究結果證實，老舊建築的拆除更新與更換節能建築設備有助於改善整體住宅建築外殼熱性能，而逐年建築的更新率為達成減量目標的重要因素，須仰賴政府的推廣與民眾的配合才能達到一定的減量效果。

ABSTRACT

Keywords: residential building sector, greenhouse gas emissions projection, building envelope energy saving, mitigation

1. Introduction

Global warming issue has drawn great attention over the past few decades, and its impact on human habitat has been a major concern to the public. Building energy consumption is responsible for approximately 40% of the annual total energy usage in hot-and-humid Taiwan. The daily energy uses of residential buildings contribute the largest proportion of this consumption. Based on previous research, it showed that the changing climate would increase the uncertainty and reduce the flexibility of building energy conservation efficiencies. Moreover, as a consequence of the dramatically increasing temperature in the late 21st century under the medium greenhouse gas (GHG) emission scenario, it revealed that the annual residential cooling energy will rise almost twofold as compared to that in 2000s for hot-and-humid Taiwan (Huang and Hwang, 2016). In consequence, it is speculated that such a considerable increment in building energy consumption would eventually contribute to higher nation-wide GHG emissions. From the perspectives of energy saving and carbon emission reduction, the primary aim of this study is to investigate the possible variation trend of residential GHG emissions under the influence of the future climate, and furthermore, to formulate adequate strategies for new and existing buildings to mitigate the amount of GHG emissions.

2. Method

A building physics and statistical based bottom-up model was introduced in the study for the purpose to project the future GHG emissions in residential sector. The model adopts socio-economic factors such as population and household income as external drivers, and includes different energy end-use groups (including space cooling and heating, water heating, appliances, lighting, etc.) to predict the amount of residential energy consumption. In order to ensure that a variety of building characteristics of typical condominium in Taiwan is encompassed, residential cases were generated through Monte Carlo method based on global uncertainty analysis. These generated models were simulated via EnergyPlus under three climate change scenarios to estimate their future cooling energy use. Therefore, a model to predict and assess the variation trend of GHG emissions in residential sector under future climate was developed based on the simulation results. To restrain the excessive amount of residential GHG emissions in the future, this study proposed several passive design mitigation measures and quantified their corresponding benefits in application to residential buildings.

3. Significant findings

The following findings have been achieved through the in-situ experiments in this research:

- a) The result of bioclimates indicates that the growing cooling demand during summer is the dominant and urgent requirement to be satisfied. In addition, natural ventilation and mechanical cooling is still applicable to maintain the human thermal comfort in the future.
- b) The bottom-up model is developed from disaggregated components on a hierarchical level, and then all the components are combined to estimate for their corresponding impact on the total energy use. As a result, the bottom-up model is sufficient and useful when formulating mitigation for individual component.
- c) The result reveals the annual cooling energy ultimately increases dramatically as the annual A/C operation frequency increases. Although the increment in the peak cooling load is not as much as that of the annual cooling energy, the climate change impact on the refrigeration ton still need be taken in to consideration.
- d) To improve the thermal properties of the building envelope, based on the result of the sensitivity analysis, Solar heat gain coefficient (SHGC) of the glazing would be the priority consideration during the selection of the window material. In addition, exterior shading coefficient (K) and the insulation of the exterior walls (U_w) could be taken as effective factors as well.
- e) Due to the interaction among population, economic development and climate change, the GHG emissions in all the scenarios reach a peak of around 34.58 Mt CO_{2e} to 33.05 Mt CO_{2e} in 2030. During the period from 2030 to 2060, the effect of changing climate become more significant. The GHG emission still remains at 33.25 Mt CO_{2e} under the high emission scenario RCP8.5, although the amount of population decays.
- f) The study proposed four mitigations to the GHG emissions. The mitigations include improvement of thermal properties of the building envelope, enhance the efficiency of the HVAC systems, electricity equipment, and lighting equipment. The result shows that the GHG emission will maintain at 28.40 Mt CO_{2e} in 2020 if the four mitigations are integrated.

4. Recommendation

- a) Under the effect of climate change, it is urgent to mandate and improve the building envelope thermal properties through the new regulations.
- b) The research results reveal a promising benefits of the improvement and renewal in old existing building and non-efficient equipment.

第一章 緒論

第一節 研究緣起與背景

氣候變遷對於生態系統和人居環境的影響日益加劇，政府間氣候變化專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2013 年發表的第五次報告書(The fifth assessment, AR5)當中指出，在各種溫室氣體排放情境下，從 1960 年代到 2100 年的全球年均溫上升幅度將落在攝氏 1 到 7 度之間；近年臺灣之夏季溫度屢屢高於攝氏 38 度，臺灣電力公司於 2017 年的夏天宣佈單日尖峰用電量高達 3626.6 萬瓩，創下歷史新高，危及全台的能源使用。氣候變遷除了造成地表溫度上升，全球環境之濕度、風和太陽輻射等氣候因子，也會隨著逐年累積的大量溫室氣體排放而改變，由於上述戶外條件的變化，氣候變遷將對建築能源的使用產生影響，其中佔有建築能耗約 50%的空調與供暖的部份衝擊尤為明顯。

氣候變遷對於不同地區的供暖和空調能源使用的影響，會因氣候區的不同而有所差異，因此需要對未來供暖以及空調的能源使用進行因地制宜的分析，以更明確地了解未來氣候對建築能耗的影響與衝擊。根據我國於 2015 年通過的《溫室氣體減量及管理法》，溫室氣體減量與管理是以總體減量率為目標，而住宅部門占了全國整體溫室氣體排放量的比例約為 12%，若能釐清氣候變遷對住宅能耗帶來什麼樣的影響，同時制定因應的調適策略，修改現有建築法規，對於達成建築溫室氣體減量目標與擬訂管理策略將有莫大助益。

第二節 本研究計畫之重要性與預期成果

了解氣候變遷影響下溫室氣體的排放趨勢，是制定溫室氣體減量政策的重要依據。本研究選擇佔有建築部門能耗 2/3 的住宅做為研究對象，整理國際上考慮未來氣候下的住宅溫室氣體排放趨勢的推估方法，並建構符合我國住宅碳排放構成及特點的預測

模型，完成未來氣候下我國住宅溫室氣體排放趨勢的預測，並以此為基準提出可行之住宅部門調適策略，其對於國家整體溫室氣體排放量的減少具有相當重要的意義與貢獻。

本研究之預期成果有以下五點：

- 一、蒐集彙整未來氣候下各國住宅溫室氣體排放趨勢。
- 二、製作台灣地區至 21 世紀末的逐年模擬氣象數據。
- 三、完成世紀末住宅溫室氣體排放隨氣候變化的趨勢預測。
- 四、進行減緩氣候變化衝擊的住宅調適策略靈敏度分析。
- 五、提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改建議。

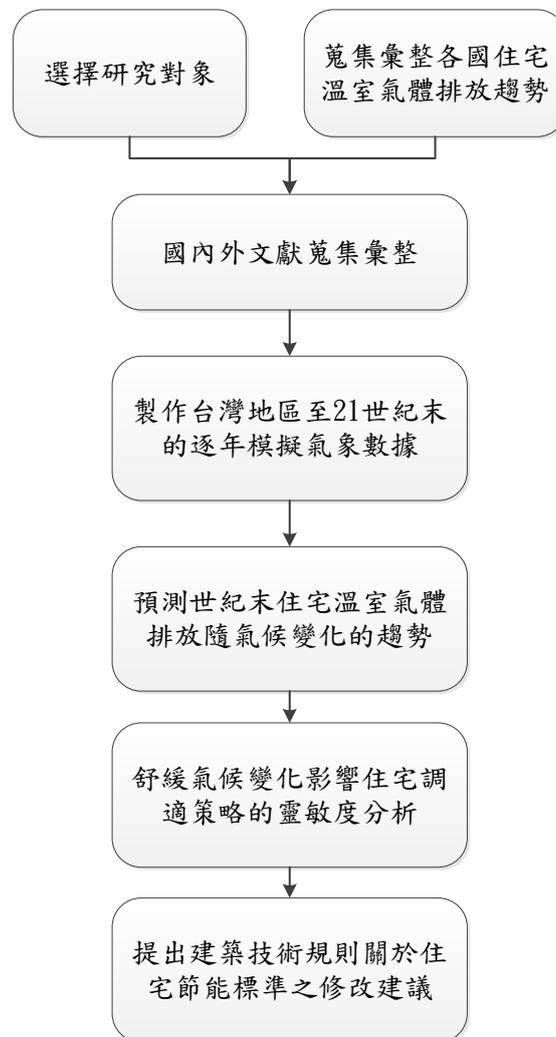


圖 1-1 研究流程圖
(資料來源：本研究整理)

第三節 研究步驟與流程

本研究案的研究流程與時程安排分如圖 1-1 和表 1-1。

表 1-1 研究進度

工作項目 \ 月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	備註
文獻蒐集整理												
蒐集彙整未來氣候下各國住宅溫室氣體排放趨勢												
製作台灣地區至 21 世紀末的逐年模擬氣象數據												
預測世紀末住宅溫室氣體排放隨氣候變化的趨勢												
舒緩氣候變化影響的住宅調適策略靈敏度分析												
提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改項目												
改善建議												
報告撰寫												
預定進度 (累積數)	5%	13%	23%	35%	50%	60%	73%	83%	93%	98%	100%	

(資料來源：本研究整理)

第四節 國內外相關文獻回顧

本節整理有關國內外文獻之探討區分為氣候變遷背景、溫室氣體推估模型、區域別與國家別的氣候變遷影響等之文獻分別進行文獻回顧。

自工業革命以來，大氣當中的二氧化碳濃度因為活躍的人類活動日漸上升，2015年的全球二氧化碳平均濃度達到 400ppm，其水平為工業化之前的 144%。在政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 的第五次報告書當中，以「代表濃度途徑」(Representative Concentration Pathways, RCP) 定義四組氣候變遷之情境，其中途徑所指的大氣當中二氧化碳濃度隨著時間改變的歷程，並以「輻射強迫力」(radiative forcing) 在 1750 年與 2100 年的差值作為區分各個情境的依據。輻射強迫所指的是，當大氣中某一因子產生變化，對於地球與大氣系統間能量平衡的影響程度，而能夠使得地球與大氣系統能量平衡產生擾動致使氣候改變的因子，即稱為輻射強迫因子。基於前段描述可知，二氧化碳的濃度即為輻射強迫因子之一。IPCC 報告書當中對於輻射強迫力的定義常以「氣候變遷的某個外部驅動因子的變化，如二氧化碳濃度或太陽輻射量的變化等，造成對流層頂淨輻照度發生的變化」(IPCC 2007; 國家災害防救科技中心 2014)。

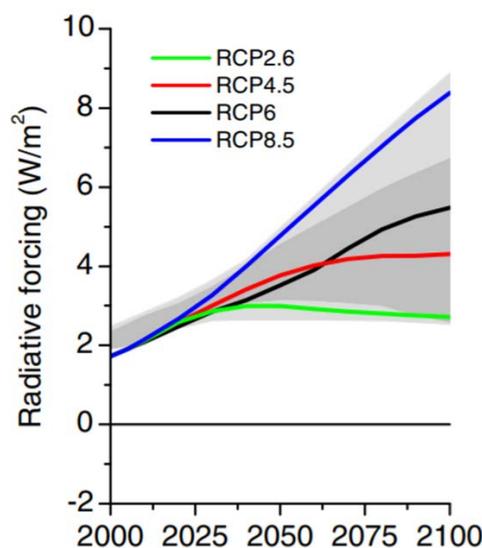


圖 1-2 各 RCP 情境的輻射強迫力
(資料來源：van Vuuren et al. 2011)

如圖 1-2 所示，RCP2.6 情境代表每平方公尺的輻射強迫力在 2100 年增加了 2.6 瓦，而 RCP4.5、RCP6.0 與 RCP8.5 則代表每平方公尺的輻射強迫力分別增加了 4.5、6.0 與 8.5 瓦。在這四種情境中，RCP2.6 為低溫室氣體排放的情境，二氧化碳的濃度在 2100 年會達到 421 ppm；RCP4.5 與 RCP6.0 為中溫室氣體排放，二氧化碳的濃度在 2100 年分別會達到 538 ppm、670ppm；RCP8.5 則為高溫室氣體排放的情境，二氧化碳的濃度在 2100 年會達到 936 ppm。各情境下的全球平均溫度變化如圖 1-3 所示，若溫室氣體排放量得以抑制，如變遷情境 RCP2.6 所示，全球長期平均溫度於世紀末的平均增量可維持在攝氏 1 至 1.2 度，反之，若溫室氣體排放量依照 RCP8.5 情境的走勢無限制成長，全球平均溫度將上升攝氏 3.5 至 5 度不等。

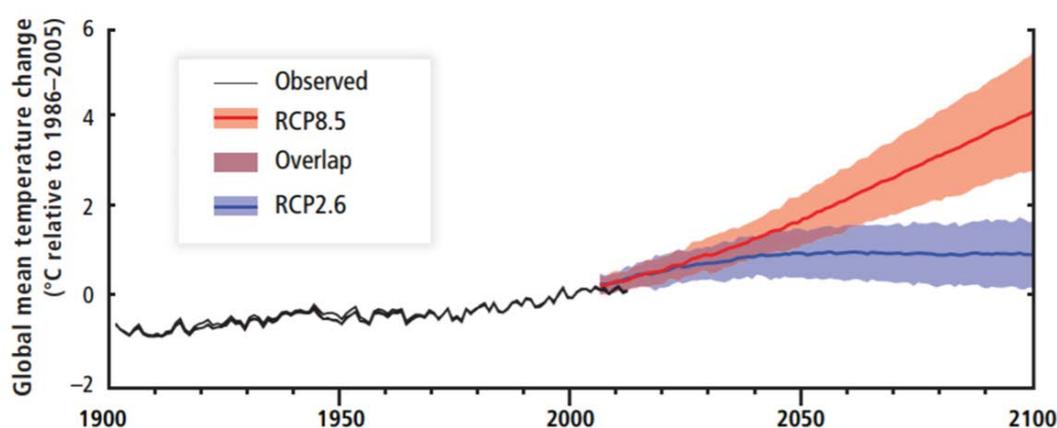


圖 1-3 全球平均溫度變化相較於 1986-2005 的平均
(資料來源：IPCC 2014)

概括地說，關於在未來氣候下住宅建築的溫室氣體排放預測模型分為兩種基本類型：自上而下(Top-down)和自下而上(Bottom-up)的方法。圖 1-4 示意性的顯示由國際能源總署 IEA (1998) 開發的自下而上和自上而下模型的一般方法論，而較複雜的預測模型會混合使用這兩個基本類型。

自上而下的方法是在國家總量的數據上做處理，通常是意在擬合國家能源消耗或二氧化碳排放數據的歷史時間序列。這種模型傾向於用來調查能源部門和整個經濟之間的相互關係，能夠被廣泛地歸類為自上而下的計量經濟學和技術模型。自上而下的計量經濟學模型主要基於能源使用與社經因子之間的關係，諸如國民所得收入、燃料

價格和國內生產總值，以表達能源部門和經濟產出之間的聯繫。它們還可以囊括一個國家的一般氣候條件。因此，計量經濟學自上而下的模型往往缺乏關於當前和未來技術選擇的細節，因為其重視過去所觀察的宏觀經濟趨勢與關係，而非可能影響能源需求的建築物中的個體物理因素。更重要的是，對環境、社會和經濟條件可能完全不同於以前經歷的氣候變化問題時，直接套用過去的能源 - 經濟相互作用之間的關係可能也不太合適。同時也缺乏固有的能力用以模擬科技技術上的不連續變化。自上而下模型包括影響能源使用的一系列其他因素，此部份並沒有在模型中明確描述。

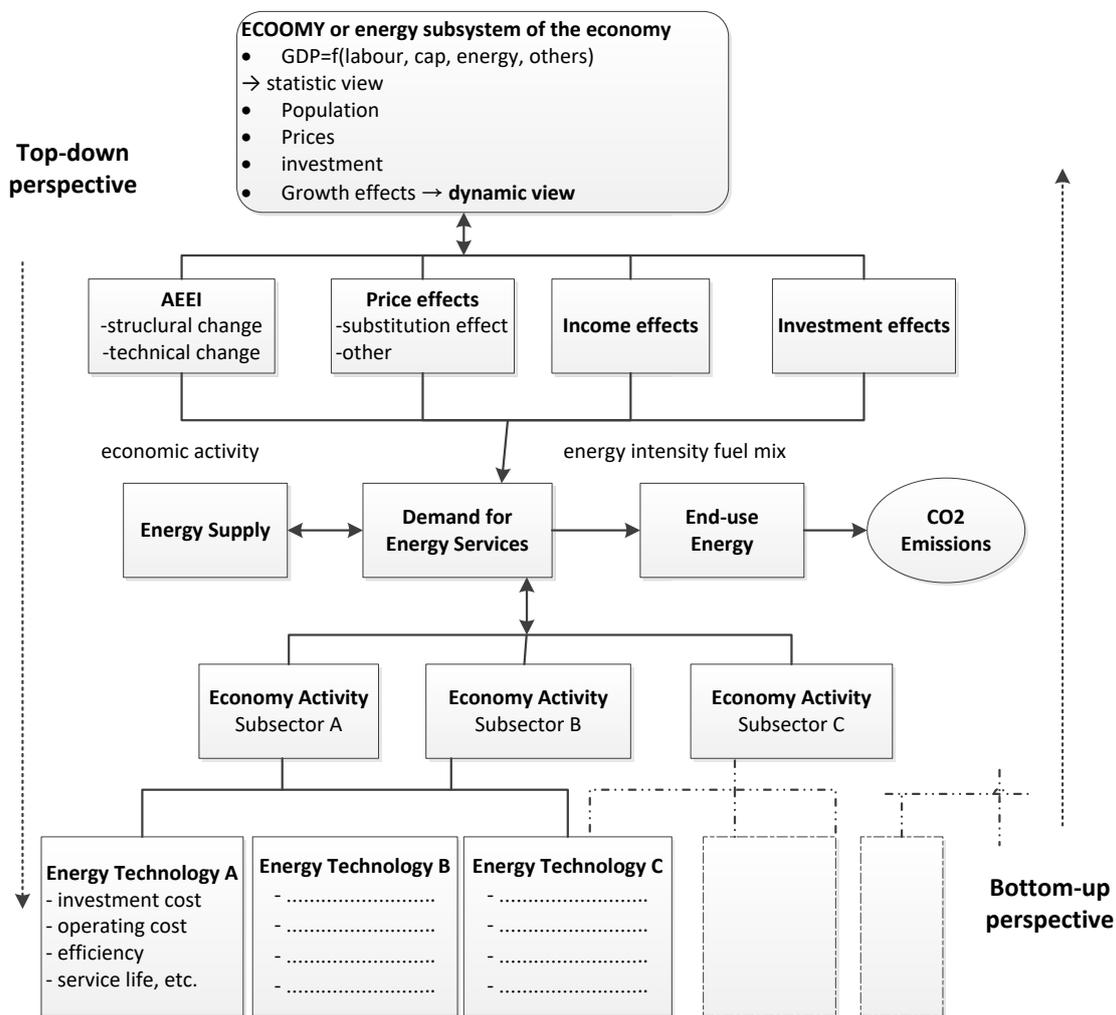


圖 1-4 自下而上和自上而下模型的一般方法論說明
(資料來源：IEA 1998)

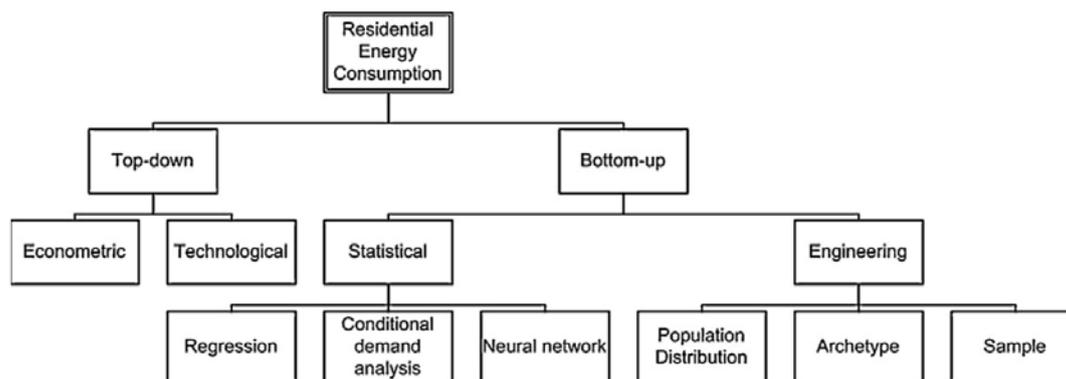


圖 1-5 自上而下與自下而上用於推估住宅能源消耗之方法
(資料來源：Swan and Ugursal 2009)

自下而上的方法是根據分解部件的層次數據構建，並根據組合而成的數據來估計個別因素對整體能源耗用的影響。這意味著此方法可用於估計各種單獨的能效措施如何影響二氧化碳排放。一般而言，這些模型可以用來選擇基於最佳成本效益的可用技術和過程，以實現給定的碳排放減量目標。自下而上模型著重在部件層次上的處理，因此需要廣泛的經驗數據庫來支持每個部件的描述，以提升模型推估的準確性。

Swan 和 Ugursal (2009)將自上而下與自下而上兩種模型做了系統性的整理，其中自下而上的模型則細分成了統計分析與工程分析兩個面向，如圖 1-5 所示。統計分析著重在歷史資料的取得與迴歸分析等等，對於住戶的能源使用偏好、使用者行為的描述較為詳盡；工程分析則是以實際的熱流物理性質描述最終能耗與能源使用的關係，可以科學的方法探討氣候改變對於整體住宅耗能的衝擊。透過以上兩種分析方法，自下而上的模型能夠針對個別的项目作出調整，對於調適策略的制定有實質上的幫助。

表 1-2 在不同社經情境之下的住宅部門排碳量

MtC/yr	Residential carbon emissions (incl. electricity production)	Residential carbon emissions (including fuelwood)
1971	9.7	79.9
2005	36.9	166.6
2050 OECD-B	376.4	457.7
2050 OECD-A	324.6	441.3
2050 OECD-EO	208.7	312.0

(資料來源：Ruijven et al. 2011)

影響未來氣候下住宅能源需求成長趨勢的因素眾多。主要因素包括人口數、家庭規模、家戶收入和氣候條件。以上這些因素都被視為外部驅動因子囊括於住宅能源預測模型中。van Ruijven 等人 (2011)基於由下而上的方法論提出了一套適合於開發中國家的住宅能源需求預測模式，並用來預測印度自 2005 至 2050 的全國住宅二氧化碳的排放趨勢，其結果顯示與 2005 年相比，在 2050 年印度住宅部門溫室氣體排放將增加 9-10 倍之多，其中根據不同的社經情境假設如表 1-2 所示，表中的 OECD-EO 代表的是社會經濟發展的基準情境，而另外兩種情境 OECD-A、OECD-B，前者強調市場機制的自由發展、經濟蓬勃成長，後者著重於社會福利以期縮短貧富差距，根據結果可發現三種情境的溫室氣體排放增量亦有所差異，可歸納出社經因素對於溫室氣體排放量的影響必須列入考慮。Daioglou, van Ruijven, 與 van Vuuren (2012)應用該模型於分析五個開發中國家（印度、中國、東南亞、南非和巴西）住宅能源使用的未來可能發展，其研究發現表明，適當的氣候政策可以減少住宅能源的溫室氣體排放。

Jylhä 等人 (2015) 在觀察近期和未來氣候條件下評估了芬蘭典型住宅的能源需求。透過使用 2030、2050 和 2100 年的逐時氣象年做建築能量動態模擬。模擬的結果發現在芬蘭，住宅全年的供暖和通風的耗電量在 2100 年減少了 20-40%，而空調的能耗需求增加了 40-80%。根據氣候變化的嚴重程度，到 2100 年，供暖和空調消耗的年能源總量估計會下降 20-35%。基於長期經濟分析，並考慮到建築物中用於其他目的所消耗的能源，研究也發現位在寒帶氣候區的芬蘭於 2100 年家庭能源成本的淨現值將比沒有考慮氣候變化影響時減少 5-10%。

Bari, Begum, Jaafar, Abidin, 和 Pereira (2011)基於馬來西亞 2008-2020 年住宅部門能源消耗和二氧化碳排放的初步評估。通過預測多項式曲線擬合方法估計能源消耗和排放的未來趨勢。研究表明，2008 年，馬來西亞住宅部門的二氧化碳排放量為 2,347,538 噸，由於電力和液化石油氣（LPG）的巨大消耗，到 2020 年會增加到 11,689,308 噸，如圖 1-6 所示。在天然氣、液化石油氣、煤油和電力四種類型的燃料中，電力和液化石油氣導致能源消耗量增加以及二氧化碳排放。研究還表明，到 2020 年，二氧化碳排

放量可分別從 5%，10%和 15%的用電量減少量減少 11,367,417 噸，11,047,126 噸和 10,728,642 噸。

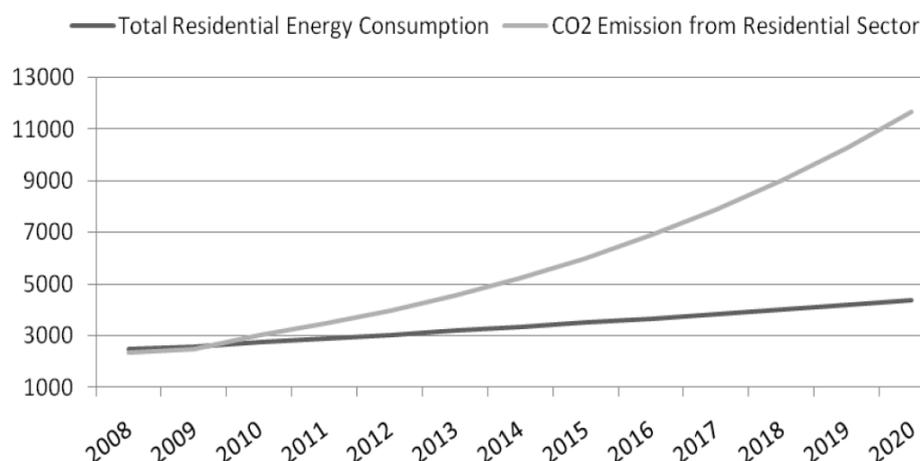


圖 1-6 住宅部門之耗能與碳排放量在未來的趨勢變化
(資料來源：Bari et al. 2011)

建築中的能源使用在全球和區域能源需求中占很大的一部分。供暖與空調在整個建築能源使用中的重要性非常多樣，所占配額在 18%和 73%之間變化。Vorsatz 等人的文章 Ürge-Vorsatz, Cabeza, Serrano, Barreneche, 與 Petrichenko (2015)提供關於建築物中的能源使用、其驅動因素及其在全球和區域基礎上的過去，現在和未來趨勢的信息來源。該文章根據 Kaya 特徵方法確定了供暖和空調能源需求的關鍵驅動因素：家庭數量、每戶人口、人均佔地面積、GDP，每 GDP 的佔地面積和商業建築的比能耗等。

Wang 與 Chen (2014)注意到因為全球變暖對建築物的環境和人類活動的許多方面具有很大的影響，全球變暖在近年來已經引起了極大的關注。供暖和空調的能源消耗是最直接受氣候變化影響的一個領域。為了量化影響，Wang 和 Chen 使用 HadCM3 全球大氣環流模式為美國的 15 個城市在三個 CO₂ 排放情景下產生未來 2020、2050 和 2080 年的典型氣象年數據，以用於 EnergyPlus 的建築能量模擬。在 15 個城市中的每一個城市模擬兩種類型的住宅建築和七種類型的商業建築。本文首先使用 EnergyPlus 系統性地研究了美國所有七個氣候帶對各種類型的住宅和商業建築的氣候變遷影響，並為全美國提供了加權平均結果。他們還確定了氣候變化對未來能源使用的影響的地

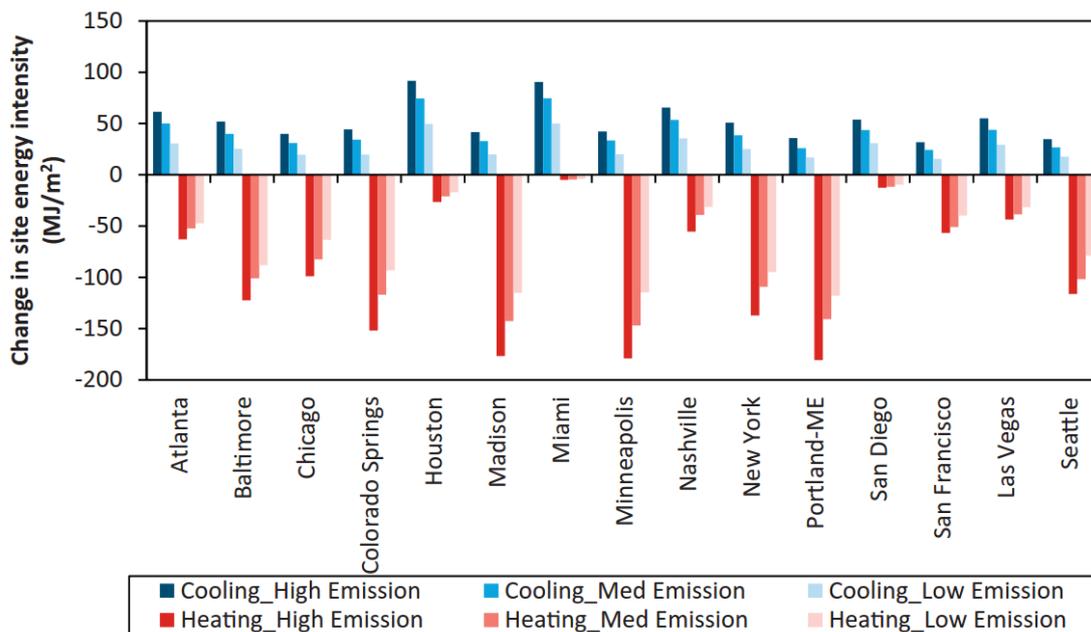


圖 1-7 全年能源使用量於 2080 年代時在三個情境下的改變
(資料來源：Wang and Chen 2014)

理依賴性。根據 HadCM3 天氣預測，20 世紀 80 年代美國 1-4 氣候帶的源能源消費淨增加量和 6-7 氣候帶的淨減少量，如圖 1-7 所示。此外，該研究利用改進的自然通風模型研究了舊金山，聖地亞哥和西雅圖的自然通風性能。他們發現因為全球暖化，到了 2080 年代被動式供冷不適合聖地亞哥，但它在舊金山和西雅圖仍然可以適用。Dirks 等人 (2015) 分析檢查了氣候變化對位於美國東部區域許多商業和住宅建築的峰值和年度建築能耗的影響。他們也使用 EnergyPlus 作為模擬引擎以及研究區域內的 100 個位置的未來氣候，在三個美東時區中選了代表建築物群體的不同類型、大小、年份和特徵的超過 26,000 個建築物配置模型進行能耗模擬。

Isaac 和 van Vuuren (2009) 評估了在氣候變化背景下未來住宅供暖和空調的能源使用的潛在發展趨勢。他們發現在參考情景中，全球對供暖的能源需求預計將增加到 2030 年，然後穩定。相比之下，預計空調的能源需求在整個 2000-2100 年期間將快速增長，主要由於所得收入增長推動的。供暖和空調的相關二氧化碳排放量從 2000 年的 0.8 Gt C 增加到 2100 年的 2.2 Gt C，即能源使用產生的總二氧化碳排放量的大約 12% (在亞洲增長最多)。氣候變化對全球能源使用和排放的淨效應相對較小，因為供暖減

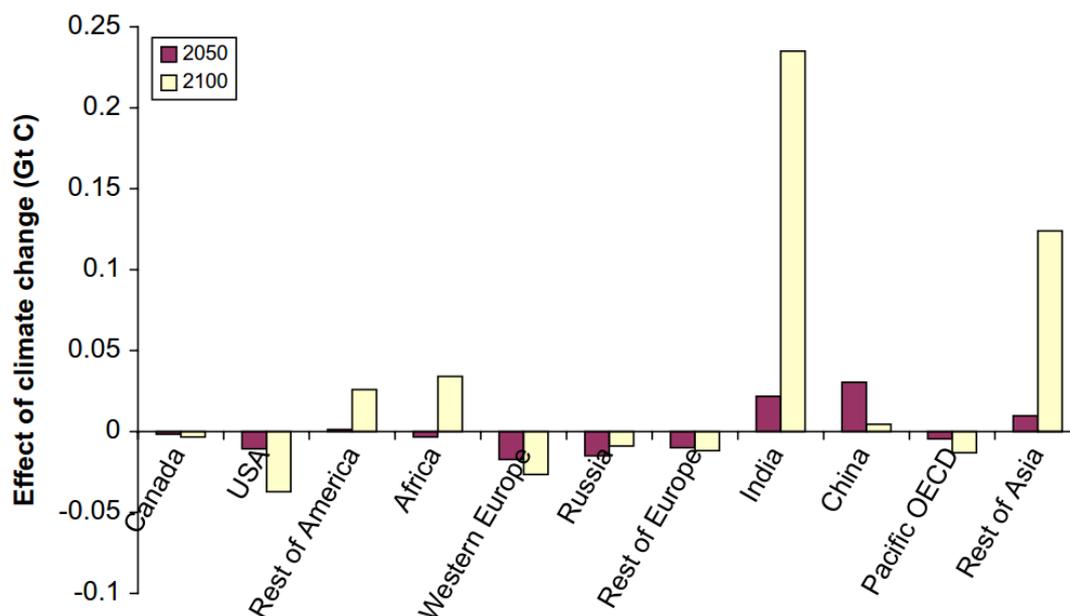


圖 1-8 冷暖房在各區域受全球暖化影響的淨碳排改變量
(資料來源：Isaac and Vuuren 2014)

少通過空調的增加來補償。然而，在這種情況下，單獨對供暖和空調的影響是相當大的，由於氣候變化，到 2100 年，全世界的熱能需求下降了 34%，空調能源需求增加了 72%。如圖 1-8 所示，在區域尺度上，可以看到相當大的影響，特別是在南亞，與沒有氣候變化的情況相比，由於氣候變化，住宅空調的能源需求可能增加約 50%。

黃群達 (2006) 利用因素分解及脫鉤指標分析方法，以住宅部門及商業部門為探討對象，針對住商部門之歷年能源消費及二氧化碳排放變動趨勢進行探討，並藉由因素分解法找出影響二氧化碳排放之關鍵因子；同時再以脫鉤指標分析住商部門在國內生產總值、能源及二氧化碳三者間的發展關係；最後比較數個 OECD 國家商業部門二氧化碳排放變動的主要因素影響程度。其研究結果顯示如圖 1-9、圖 1-10，住宅部門的歷年碳排放量占全國比例的 10-12%，且住宅部門能源消費結構以電力為主，油品及天然氣所佔比例較小；在因素分解方面，住宅部門主要影響碳排放量的因素為每人居住樓板面積的增加、全國住宅戶口總數與家戶人口數。由上述結果可知，社經因素確實會影響住宅部門的能源使用，因此本研究所提出之住宅部門溫室氣體排放模型除了考量氣候狀況的改變，亦會將上述社經因素納入模型之部件。

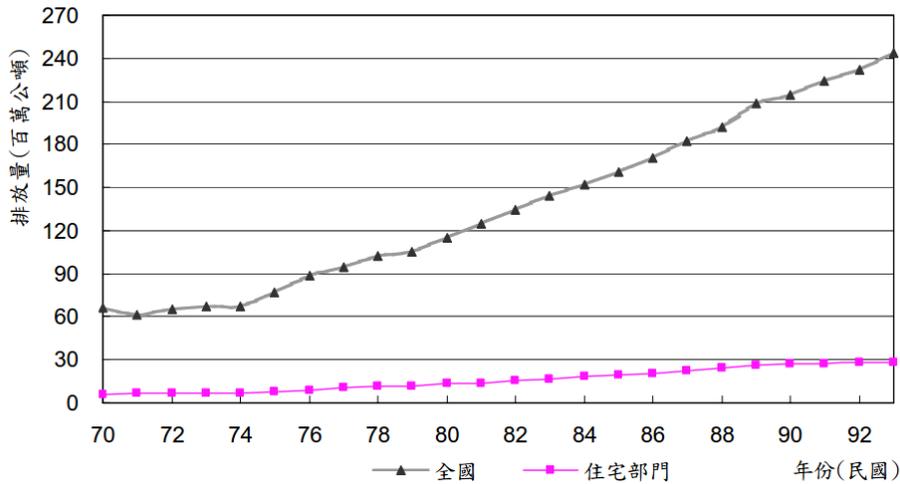


圖 1-9 全國與住宅部門歷年二氧化碳變動趨勢

(資料來源：黃群達 2006)

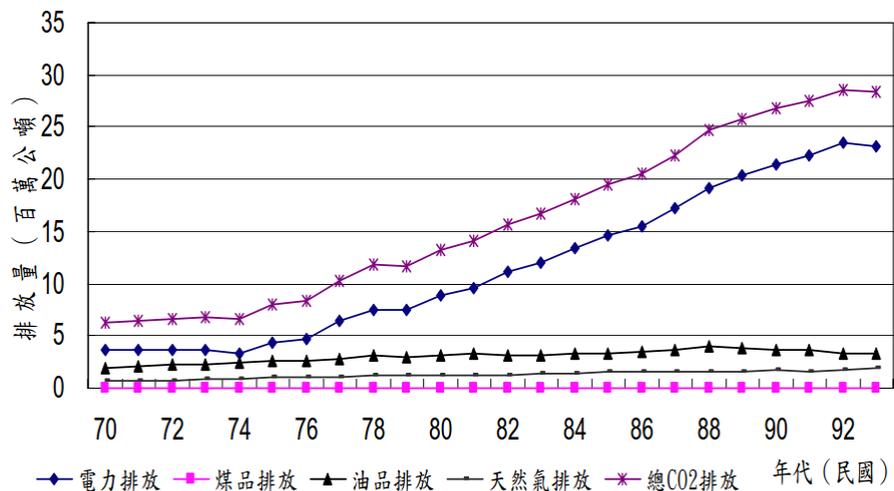


圖 1-10 住宅部門各能源消費結構二氧化碳排放變動趨勢

(資料來源：黃群達 2006)

林唐裕等人(2010)整合二個模型以推估我國住宅及服務業部門能源需求，包含臺灣永續能源發展模型(Taiwan Sustainable Energy Development, TaiSEND)，並應用系統動態理論，參考前人建構之住商部門能源服務需求預測模型，在考量金融海嘯、潔淨能源發展與能源價格合理化等因素下，預測住宅與服務業部門之能源需求。蔡妙嫻 (2015)運用自下而上(Bottom-up)之推估法，以系統模型建置住宅與服務業電力需求推估模型，參數考量社會面、經濟面、技術面及環境面建立住宅與服務業部門的電力需求預測模

型進行節電潛力評估。而本研究將延續上述各層面的考量以建構住宅部門的溫室氣體預測模型，並針對各個項目提出減量策略。

第二章 研究方法

第一節 研究範圍界定

在進行住宅溫室氣體排放趨勢分析之前，有其必要對住宅溫室氣體排放及其構成、計算內容與邊界進行明確地界定，以保證計算結果的準確性與可比性。主要的溫室氣體種類包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亞氮(N₂O)、氫氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)、六氟化硫(SF₆)、三氟化氮(NF₃)等7種，根據2016年公佈的我國國家溫室氣體排放清冊報告，其中盤點了自1990至2014年逐年的溫室氣體排放量，結果如圖2-1所示，可發現二氧化碳的貢獻量為大宗，其次為甲烷，氧化亞氮及含氟溫室氣體位居第三，其中二氧化碳亦為導致氣候變遷的主要溫室氣體。因此，本研究所指的住宅溫室氣體排放即定義為住宅CO₂排放（或稱為碳排放）。

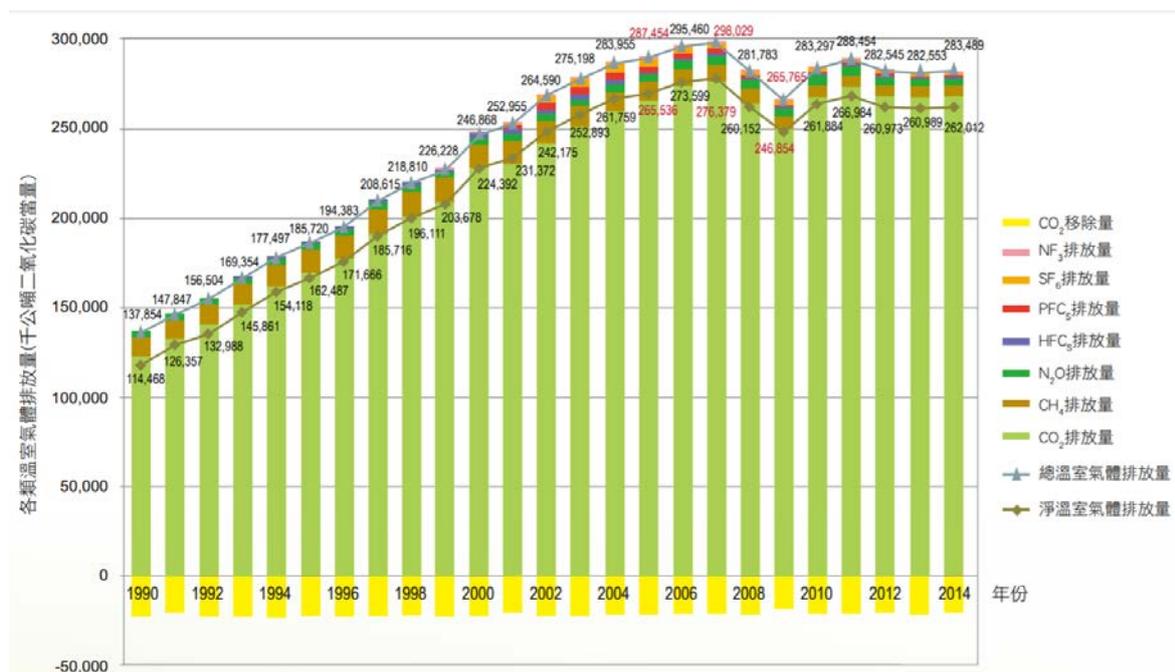


圖 2-1 臺灣 1990 至 2014 年總溫室氣體排放量和移除量趨勢

(資料來源：環保署)

顧名思義，住宅碳排放是以單個家庭或家庭成員為研究物件，從直接能源消費與間接能源消費兩個角度出發，將住宅碳排放分為直接碳排放與間接碳排放兩部分。目



圖 2-2 住宅碳排放的計算邊界

(資料來源：本研究整理)

前學術界尚未對住宅碳排放的計算內容與邊界進行統一與規範，本研究所指的住宅碳排放的計算邊界是限定於家庭消費範圍以及家庭消費產品和服務的生產鏈上端。具體而言，可以細分為：(1)邊界 1，即家庭範圍內所有化石能源消耗產生的直接碳排放，包括煤炭、汽油、柴油、煤油、液化石油氣、天然氣、煤氣；(2)邊界 2，即家庭使用的電力等能源產品其本身在使用過程中不產生碳排放，但在生產過程中產生碳排放；(3)邊界 3，即家庭消費各類非能源產品與服務（例如食品、衣著及日用品、家庭設備用品、醫療衛生保健、住房、交通通信、教育文化娛樂服務等）在生產過程中產生的碳排放。邊界 1 內能源產品的使用與碳排放均發生在家庭邊界內；邊界 2 和邊界 3 內產品和服務的使用發生在家庭邊界內，但碳排放發生在家庭邊界外，如圖 2-2 所示。

綜上所述，本計畫的住宅溫室氣體排放趨勢預測界定為家庭的直接碳排放，包括家庭直接耗能（煤炭、汽油、柴油、煤油、液化石油氣、天然氣、煤氣、電力、水力、熱力等）部份產生的碳排放的趨勢預測；至於私人交通（私家車、摩托車）和間接碳排放涵蓋家庭成員衣、食、住、用過程中的非能源產品和服務消費在生產過程中的碳排放則不在預測範圍內。

第二節 自下而上的住宅能耗模擬模型

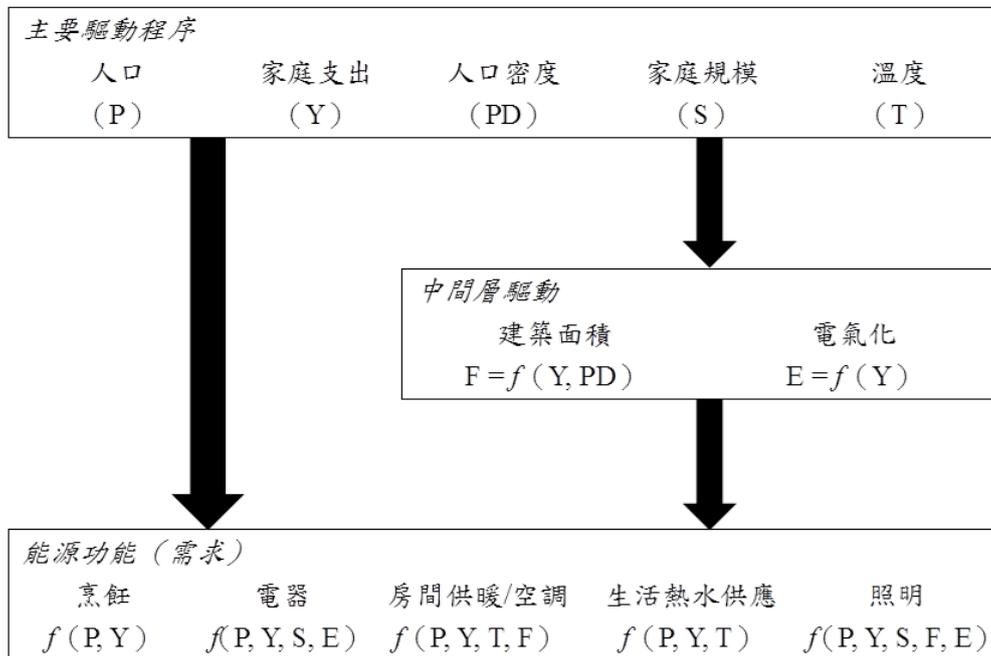


圖 2-3 本計畫擬採用之自下而上的能量模擬模型
(資料來源：本研究整理)

本研究採用如圖 2-3 所示之自下而上的能量模擬模型，以描述不同家庭能量函數的能量需求和供給。圖中述及的有關於住宅能源使用可從現有文獻中得出，通過關注特定終端用途功能及其驅動力以理解住宅領域的能源使用，將這些能源功能與經濟發展聯繫起來，就能分析及預測未來的能源使用變化，而圖 2-3 也顯示出了在模型中主要驅動力，次要驅動力 and 能量函數之間的相關性。總體而言，該模型著重於五個最重要的最終用途功能：即烹飪、家電器具、供熱和空調、熱水供應和照明。對於特定用途的能量需求(F)可以描述為三個基本元素的函數，如式 二-1 所示：

$$F = A \times S \times I \quad \text{式 二-1}$$

其中活動(A)表示對特定功能的能量需求的驅動力，結構(S)是指確定能量需求的其他元素，能量強度(I)是指每單位活動所使用的能量的量。以下將針對細部的主要驅動因子、中間層驅動和能源功能作說明。

第三節 主要驅動因子與中間層驅動

本研究提出的預測模型所採之主要驅動因子囊括人口、家庭支出、人口密度、家庭規模與氣候條件。中間層驅動包含總體建築面積與電氣化，然而國內之能源使用已趨近成熟，故電氣化對於整體能源的使用影響可忽略。

壹、 人口數、家庭支出、家庭規模與建築面積

國家總體人口的成長直接影響住宅能耗之需求，故詳細的人口預測資料有利於住宅部門溫室氣體的推估。本研究之人口預測資料參考由國家發展委員會提出的「中華民國人口推估（105 至 150 年）」，其中包含高、中、低之人口推估值，如圖 2-4 所示，根據推估結果，人口成長將持續趨緩，而人口零成長預估將於 2021 至 2025 年間發生，總人口數最高峰達 23.7 至 23.8 百萬人，較 2016 年增加 12 到 26 萬人；2061 年人口數將降為 17.1 到 19.5 百萬人，約為 2016 年之 72.5% 至 82.8%。

圖 2-4 總人口成長趨勢—高、中及低推估
(資料來源：國家發展委員會)

年間平均家庭化的數據和情景值本研究參考「2005 - 2030 年人類住區全球報告」以及國內的戶政資料。家庭支出資料則參考人均國內生產總值（人均 GDP）。同時本研究參考聯合國人居署全球城市指標數據庫和歐洲統計局城市審計歐洲統計數據庫收集了全世界目前平均樓面面積數據，其結果如圖 2-5 所繪製的住屋面積和人均 GDP 之間的關係，根據此關係式，可藉由經濟成長之趨勢得到全國住宅部門之總體建築面積，以此作為預測模型的中間驅動層因子。

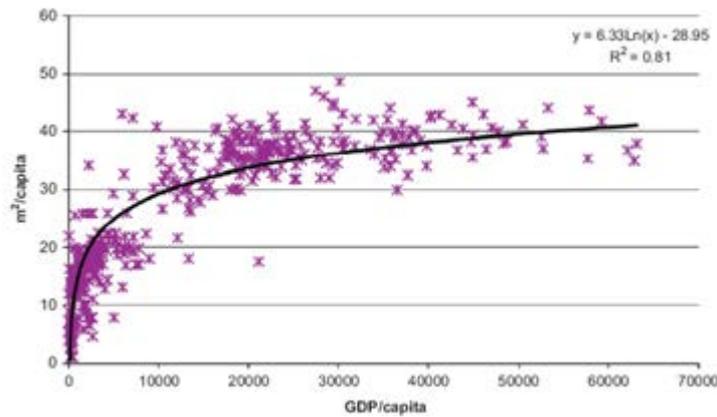


圖 2-5 人均住宅面積和人均 GDP 之間的關係
(資料來源：Isaac and Vuuren 2014)

貳、氣候條件——未來氣象年製作

為對未來的家庭的空調耗能詳細估算，需更全面地了解氣候變化對建築能耗的影響，因此本研究必須製作逐時的未來氣象年。本計畫採用過去內政部建築研究所委託研究所產製的 TMY3 標準氣象年(何明錦和黃國倉, 2013)與來自全球大氣環流模式(Global Circulation Model, GCM)的數據來產生臺灣主要城市的 2015 年到 2100 年的逐時氣象年。參考莊愷韓(2015)的文章挑選符合臺灣氣候條件之全球大氣環流模式，選定的模式須包涵地表溫度、地表比溼、地表向下短波輻射通量、地表風速與風向，透過主成份分析上述各項影響建築能源使用的氣象參數，與八個測站(台北、新竹、台中、花蓮、嘉義、台南、台東與高雄)過去的實測資料作比對，最後選定 CanESM2 作為本研究參考之模式。

由於大氣環流模式之模擬極為複雜與耗時，故 CanESM2 模式僅模擬 RCP2.6、RCP4.5 和 RCP8.5 三種氣候變遷情境，分別代表低、中、高溫室氣體排放量的氣候背景值。然而全球大氣環流模式的氣候變化資料庫只提供月平均資料，但建築能耗模擬用的氣象年要求的時間解析度為逐時的氣候資料，故有必要將月平均資料轉化成逐時資料的形式，為達成此目的，故本研究援引目前國際上最常使用的型態轉換法(Belcher, Hacker, 和 Powell, 2005)將月平均資料轉化成逐時資料。型態轉換法一般作法包括：(1) 平移(shift)；(2) 線性伸縮(linear stretch)；(3) 結合平移和伸縮。

(1) 平移是將每月的改變量(Δx_m)套用於當前的氣候變數(x_0)上，亦即

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad \text{式 二-2}$$

其中 Δx_m 是某一氣象變數在 m 月份的月平均值的絕對改變量。當氣候變化情境以絕對改變量說明某一氣象參數的變化時，就要使用平移的做法來調整該氣象參數。譬如大氣壓力的調整就適用平移法。

(2) 線性伸縮是將一個伸縮係數(α_m)套用於當前的氣候變數(x_0)上，亦即

$$x = \alpha_m x_0 \quad \text{式 二-3}$$

其中 α_m 是某一氣象變數於 m 月份在月平均值方面的變化比例。當氣候變化情境不是以絕對改變量，而是以比例或者該參數的變化來描述，說明某氣象參數的月平均值的變化時，就要使用線性伸縮的做法。譬如，水平面的太陽全輻射和散射輻射的調整就適用線性伸縮法。

(3) 結合平移和伸縮，亦即

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m (x_0 - x_{0,m}) \quad \text{式 二-4}$$

外氣溫度的調整就是一個適用結合平移和伸縮的例子。外氣溫度除了有月平均溫度要調整外，還有最高溫度和最低溫度要調整。型態轉換法是根據氣候變化預測值(Δx_m 或者 α_m)對逐時的當前的氣象數據(x_0)進行調整，來產生逐時的未來氣候數據(x)。

第四節 能源功能

根據本研究提出的住宅能源使用預測模型，家戶之各項終端能源使用包含烹飪、電器設備、供暖與空調、生活熱水、照明等需求，以下將逐項說明。

壹、 空調——建築能耗與環境模擬

逐時的未來氣象年製作完成後，便可藉助建築動態能耗模擬來獲得每一家庭使用空調的單位能耗。然而，經歷不同經濟發展時期和不同建築能源法規要求，造就台灣住宅建築物在型式與熱性能上的多樣性，這使得建築模擬過程中存在著不確定性。所以本研究放棄範例建築模型，本計畫改以全域方法之蒙地卡羅分析 (Monte Carlo Analysis, MCA)，探討在同時改變所有參數之狀況下，應變之改變量 (Iain A. MacDonald, 2009; van Griensven et al., 2006)，並以 MCA 中之隨機抽樣法，隨機產生亂數後，透過給定的機率

分佈與其對應之參數，經比例轉換為 300 組隨機住宅樣本以作為本研究之模擬對象。首先選定臺灣較為常見之集合住宅標準平面，如圖 2-6 所示，其中包含客廳、餐廚空間、主臥室與次臥室。同時假設影響空調耗能之變因，透過 MCA 進行樣本之生成以盡可能模擬涵蓋市場上所有可能住宅建築樣態之組合。各參數變動範圍之設定則參考郭柏巖 (2005) 之研究與節能法規，數值羅列如表 2-1，為探討在可行範圍內之變動，本研究假設各參數分佈類型為均勻分佈 (Normal Distribution)，類別囊括各項建築外殼參數與室內熱取得來源。



圖 2-6 住宅平面配置圖
(資料來源：本研究整理)

由於受氣候影響之建築能源最鉅者係以空調耗能，因此為了描述臺灣常見之住宅空調系統的運轉情形，以透過動態模擬獲取其全年空調耗能量，必須事先定義住宅空調之運轉模式。臺灣的住宅多以小型分離式空調為主，其運轉模式類似於複合式空調模式，意即當室內過熱時始啟動空調運轉以達降溫之目的，否則常時多以開窗自然通風為主。空調的運轉與否，應視室內狀況是否有過熱的情形發生，為了判斷住宅空調的啟停時間，我們採用 ASHRAE Standard 55 提出的熱適應舒適模型作為評斷標準，當室內操作溫度高於該模型室內 80% 熱舒適上限時則啟動空調。該模型的最佳室內操作溫度 (T_{oc}) 乃為一外氣月均溫 (T_{om}) 之函數，而 80% 的舒適範圍上界則為 $T_{oc} + 3.5^{\circ}\text{C}$ 。

$$T_{oc} = 0.31 \times T_{om} + 17.8 \quad \text{式 二-5}$$

表 2-1 各變因及其參數設定

變因	最小值	最大值	備註
坪數分配	92.56		m ²
窗牆比 (WWR)	0.1	0.6	-
玻璃熱傳透率 (U 值)	1.5	6.0	W/m ² -K
玻璃日設透過率 (Solar heat gain coefficient, SHGC)	0.20	0.85	-
外遮陽深度比	0	2.0	遮陽裝置的深度與窗高之 比值，採格子遮陽
外牆熱傳透率 (U 值)	0.5	3.5	W/m ² -K
建築方位	八個方位等機率模擬		
每戶人員數	4		人
客餐廳的燈光密度	12.0		W/m ²
客餐廳的設備密度	10.8		W/m ²
臥室的燈光密度	9.6		W/m ²
臥室的設備密度	4.8		W/m ²

(資料來源：本研究整理)

貳、家電設備與照明

各項家電設備、照明設定參照郭柏巖之「住宅耗電實測解析與評估系統之研究」，此研究針對台灣地區公寓和透天式住宅進行耗電量解析，透過實地調查統計住宅規模、家庭人口、家電普及率以及生活模式等住宅因子，並對各項家電設備進行電力監測其計算而得的設備密度與照明密度羅列如表 2-1 所示。

參考林建隆 (2003)分析住宅設備的二氧化碳排放生命週期，設備更新占了整個週期的 5%，相較於日常使用所占的 90%其影響比例較少，故本模型之推估先行忽略設備與照明更新的溫室氣體貢獻量。設備與照明之耗能除了會貢獻住宅部門之總體溫室氣體排放量，其於使用狀態時產生之發散熱亦會增加室內之冷房負荷，增加空調能耗。

參、烹飪

參考 van Ruijven 等人 (2011)由 de Ia Rue du Can 和 Price (2008)、 Xiaohua, Xiaqing, 和 Yuedong (2002)等研究歸納出，每人每天約消耗 0.5 至 3.5 MJ 的能源用於居家烹調，而分佈上又以 1.7 至 2.7 MJ 的區間較為集中，並且發現其值無關乎家戶收入與家戶大

小。可能原因如下：其一，烹調習慣主要與飲食文化有關，故本研究參考與台灣相鄰之東亞文獻作為基準；其二，高收入有可能使得家戶購買並消耗更多的食物，使用更多的能源進行居家烹調，另一方面卻也增加即食食品與餐廳消費，使得耗能轉移至其他部門。綜上所述，本研究採 van Ruijven 等人所提出之每人每日用於居家烹調消耗的能源量，約為 $2 \text{ MJ} = 0.556 \text{ kWh}$ 。

肆、生活熱水

生活熱水之計算參考 LEED Canada 2009 reference guide 之計算標準，並以李孟杰 (2006) 針對臺灣之熱水使用狀況所作的研究為基準，調整至符合台灣現況的熱水使用情形。參考鄭凱文 (2004) 的研究，其採取實際案例監測的方式針對各住戶的用熱水量、耗電量、進水溫、用熱水溫以及室外溫度進行分析，結果顯示每天的使用熱水行為與長期的氣候相關性不大，且使用熱水行為不會影響耗電量，只有用水量與儲電熱桶的比值與耗電量有關。故本研究視生活熱水之耗能不受氣候變遷之影響。各項設定表 2-2、表 2-3 所示。

表 2-2 LEED 規範之生活熱水計算標準

用途	流量 (L/s)	使用次數/人-天	使用時間(min)
淋浴	9.46	1	4.5
水槽	8.33	2	1

(資料來源：LEED Canada 2009 reference guide)

表 2-3 生活熱水使用的各項溫度設定

項目	溫度 (攝氏)
熱水供應溫度	55
冷水供應溫度	24
混合後溫度	40

(資料來源：李孟杰 2006)

第五節 研究流程圖

由前述之主要驅動因子、中間層驅動與能源功能項目，本研究建構了住宅部門的能量模擬模型，而此模型可應用於不同時期的社會經濟發展，以及氣候狀態改變下的能源需求與碳排放。在了解未來氣候下可能的住宅部門排放趨勢後，可進一步根據建

築外殼、空調、家電設備與照明等面向提出調適策略，以期降低住宅部門的溫室氣體排放量，詳細的研究流程如圖 2-7 所示。

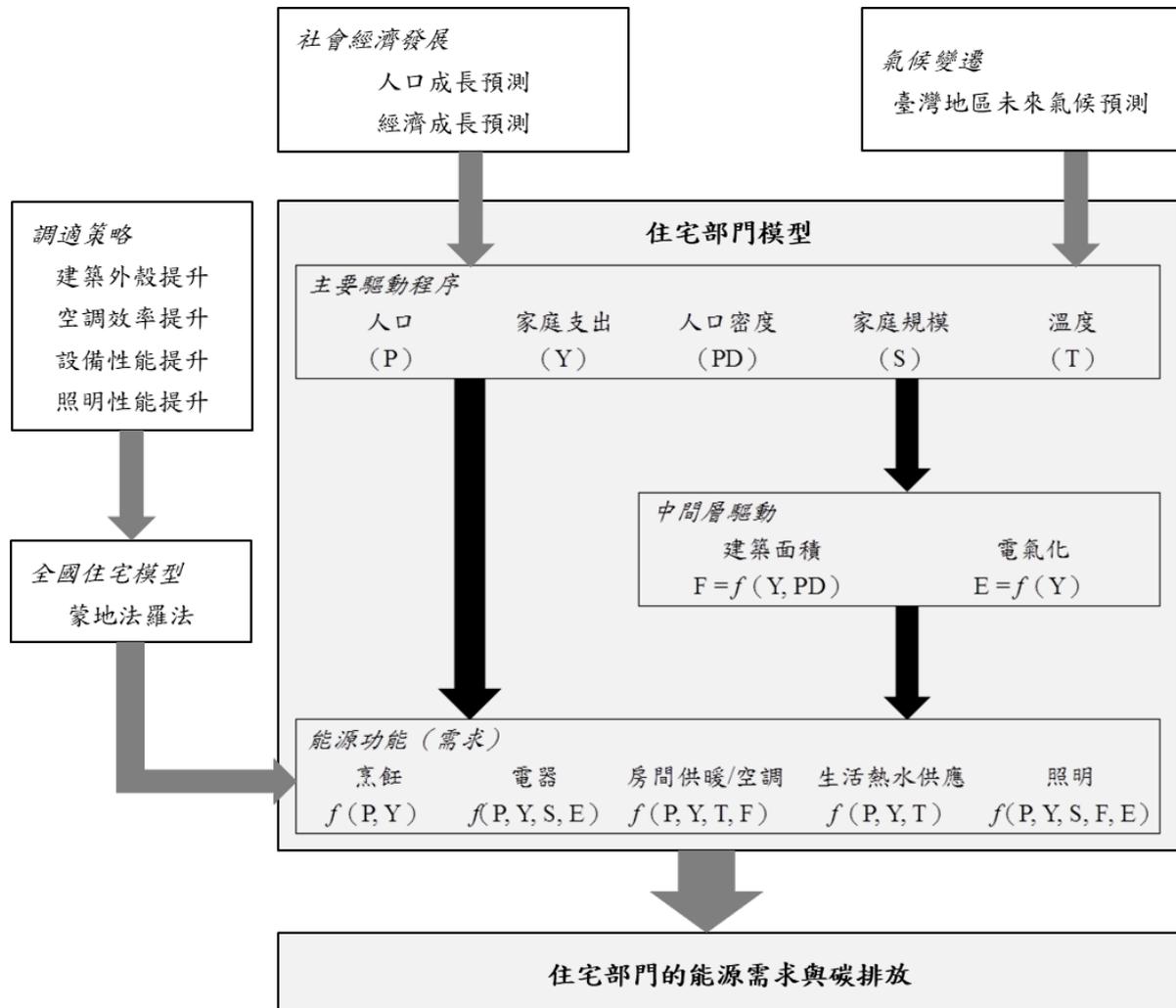


圖 2-7 含住宅能源模型之研究流程圖

(資料來源：本研究整理)

第三章 未來氣候分析

第一節 生物氣候與冷熱應力

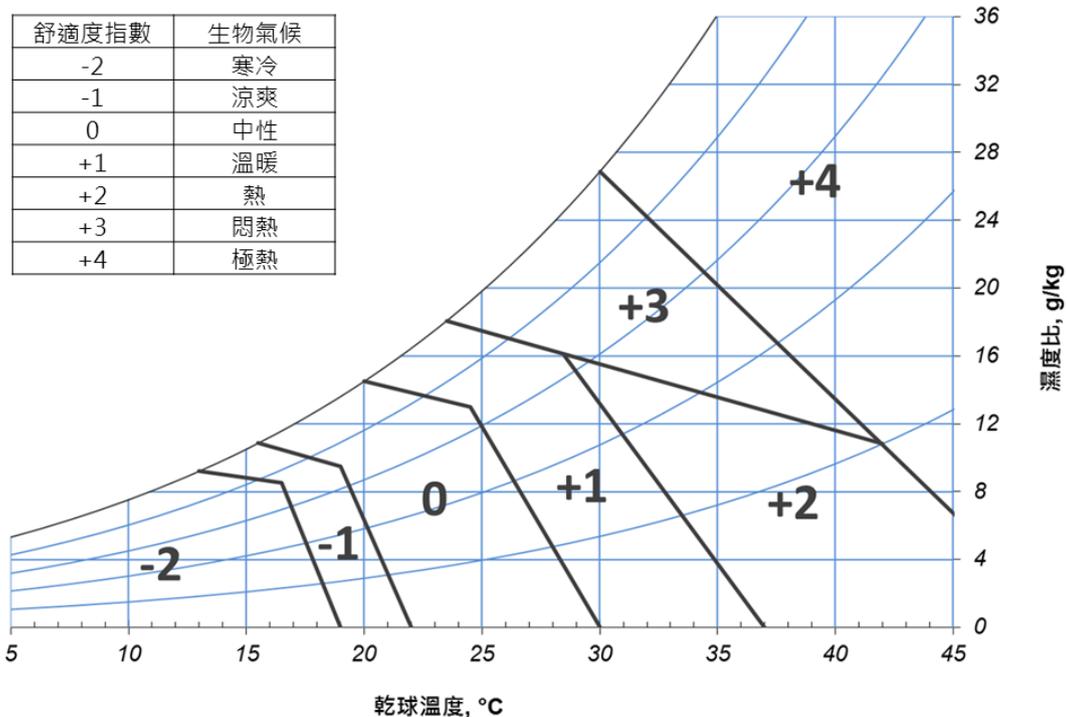


圖 3-1 台灣之生物氣候與濕空氣線圖

(資料來源：本研究整理)

為了探討氣候變遷對於長期的生物氣候影響概況，本研究採用了人體生物氣候學研究上的一個簡易舒適度指數，作為衡量未來氣候下，人體不舒適程度的初步評估標準。關於舒適度指數的概念，以及如何界定每一個舒適度指數在濕空氣線圖上的對應範圍的詳細說明可以參考 Terjung (1966)和 Giles, Balafouti, 與 Arseni-Papadimitriou (1987)的文章。此生物熱舒適指數著重於人類對溫度和濕度的感受，並將不同等級的舒適指數所對應的生理氣候範圍標註於濕空氣線圖上，共包含了從極熱(+4)到超冷(-6)的11個等級的舒適指數對應於11個生理氣候，舒適指數距0的差值越大表示不舒適的程度越嚴重。臺灣氣候在濕空氣線圖上的分佈範圍如圖3-1，圖中顯示了其中7個舒適度指數(由-2到+4)所對應在濕空氣線圖上生理氣候的位置。

藉由上述的舒適度指數，便能了解人類對於當下氣候狀態的感受，而我們則進一步依據此舒適度指數去計算一整年人體感受到熱不舒適與冷不舒適的程度，以下分別以長期的生物氣候全年累計熱應力與全年累計冷應力(annual cumulative heat and cold stresses, ACHS 與 ACCS)表示，其計算公式如下：

$$ACHS = \sum_{i=1}^{12} D_i^2 + N_i^2 \quad \text{when } D_i > 0 \text{ and } N_i > 0 \quad \text{式 三-1}$$

$$ACCS = \sum_{i=1}^{12} D_i^2 + N_i^2 \quad \text{when } D_i < 0 \text{ and } N_i < 0 \quad \text{式 三-2}$$

其中 D_i 為第 i 月日間的舒適指數，而 N_i 則為第 i 月夜間的舒適指數。若計算出的全年累計熱應力數值越大，即人體對於該年度的熱不舒適感受越明顯，同理可知若全年累計冷應力數值越大，人體的冷不舒適程度越大。

由本研究產製之未來標準氣象年可獲得長期的乾球溫度和相對濕度數據，並據以分別計算出每月平均最大、最小的乾球溫度與相對濕度，以及最終相應的日間和夜間的舒適度指數。圖 3-2至圖 3-4分別顯示了台北、台中及高雄於整個21世紀的長期全年累計熱和冷應力，而表 3-1至表 3-3則分別為三地之全年累計熱和冷應力比較，其

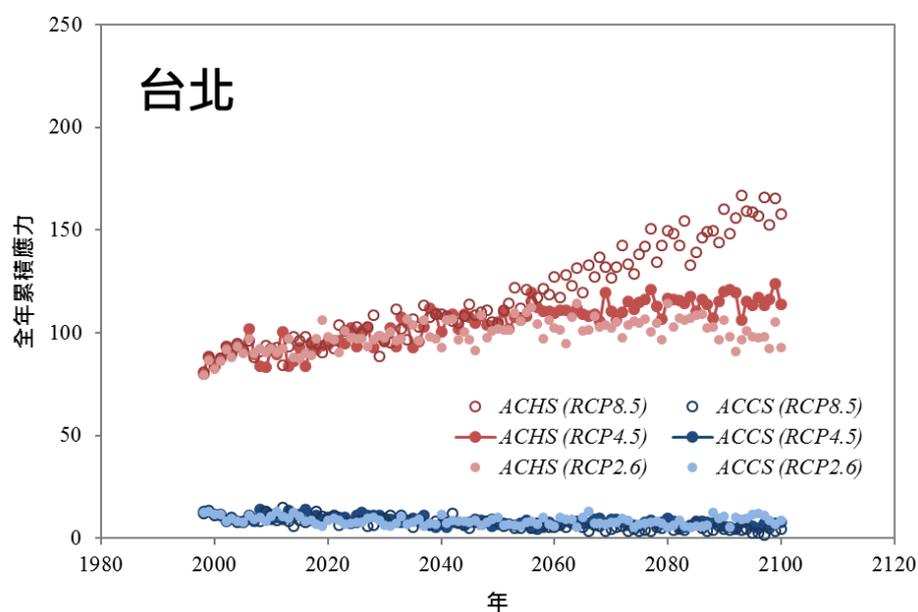


圖 3-2 台北之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)
(資料來源：本研究整理)

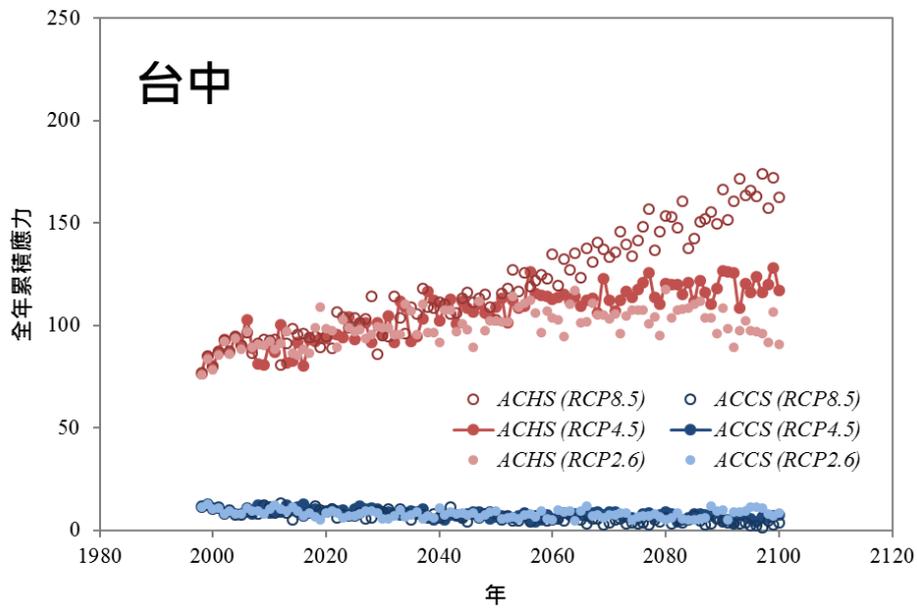


圖 3-3 台中之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)
(資料來源：本研究整理)

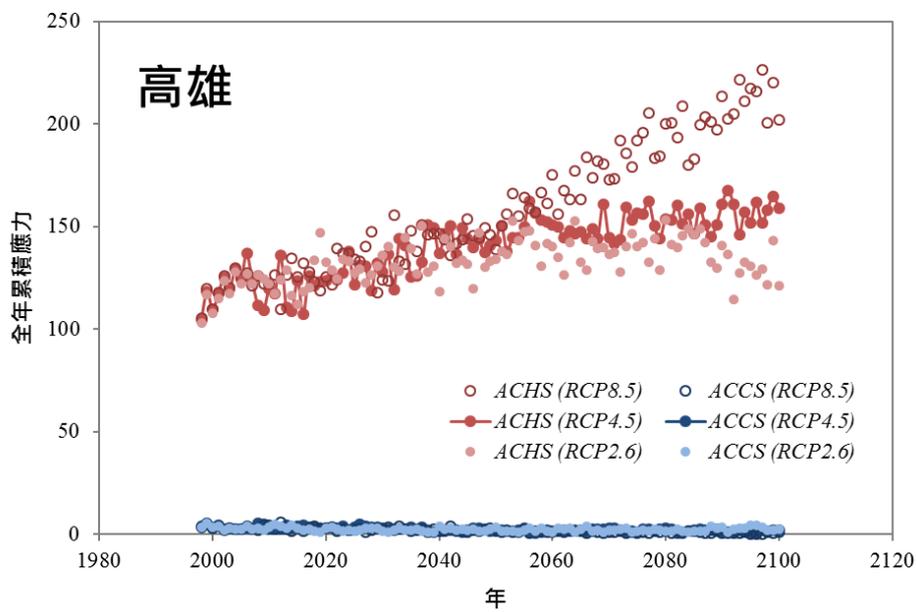


圖 3-4 高雄之全年累計熱和冷應力 (1998-2100)
(資料來源：本研究整理)

中 PHS 為熱應力佔全年累積應力（冷熱應力的總和）的比例(Proportional cumulative stress)。

以整體趨勢而言，在當代之 15 年間(2000 年至 2015 年)，三地的累計熱應力皆大於冷應力之比例，著實反映臺灣屬於熱帶與亞熱帶氣候區的事實。如表 3-3 所示，熱應力最高的地區為高雄，佔全年總累計應力比例(PHS)達 97%以上，表示其過熱不舒適度相較於其他地區最高；在近未來的部份，三地之全年累計熱應力約增加了 8-12%不等，對於既有建築的衝擊最為明顯；另外表格中斜率之正負號，可表示此時期，熱和冷應力分別呈現上升或下降的趨勢。以世紀末之各情境為例，可發現在低排放 RCP2.6 情境下，熱應力在三地皆呈下降並趨於緩和，相較於當代之熱應力上升了約 12-14%；然而以高排放情境 RCP8.5 為例，熱應力在三個地區皆大幅上升，改變率皆達到 60%以上，其中在高雄的部份，累計熱應力的比例近乎百分之百，由此可知於世紀末，氣候過熱為亟需克服的難題。

表 3-1 台北之全年累計熱和冷應力比較

時期	情境	全年累計應力			改變率 (%)			斜率	
		ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS
當代 (2000-2015)	RCP2.6	10.2	90.5	89.9%	-	-	-	0.102	0.271
	RCP4.5	10.4	90.1	89.6%	-	-	-	0.097	0.014
	RCP8.5	9.6	91.7	90.5%	-	-	-	-0.028	0.388
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	8.0	97.6	92.4%	-21.6	7.8	2.8	0.011	0.201
	RCP4.5	9.7	98.1	91.0%	-6.9	8.9	1.5	-0.164	0.560
	RCP8.5	8.4	100.9	92.3%	-12.5	10.1	2.0	-0.083	0.572
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	7.9	103.1	92.9%	-22.0	13.9	3.3	0.014	0.130
	RCP4.5	7.3	108.7	93.7%	-30.3	20.7	4.6	0.037	0.215
	RCP8.5	6.4	117.8	94.9%	-33.6	28.6	4.8	-0.123	0.948
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	8.2	102.0	92.6%	-19.6	12.7	3.0	0.098	-0.305
	RCP4.5	7.0	114.6	94.2%	-32.7	27.2	5.1	-0.044	0.152
	RCP8.5	4.3	148.2	97.2%	-54.9	61.7	7.4	-0.050	0.968

(資料來源：本研究整理)

表 3-2 台中之全年累計熱和冷應力比較

時期	情境	全年累計應力			改變率 (%)			斜率	
		ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS
當代 (2000-2015)	RCP2.6	9.8	89.5	90.2%	-	-	-	0.077	0.282
	RCP4.5	9.9	88.7	89.9%	-	-	-	0.066	-0.031
	RCP8.5	9.3	90.6	90.7%	-	-	-	-0.039	0.458
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	7.7	98.0	92.8%	-21.8	9.5	2.9	0.015	0.216
	RCP4.5	9.3	98.6	91.4%	-6.4	11.1	1.6	-0.158	0.713
	RCP8.5	8.0	101.6	92.7%	-13.2	12.1	2.1	-0.068	0.696
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	7.7	104.3	93.2%	-21.7	16.5	3.3	0.002	0.156
	RCP4.5	7.1	111.3	94.0%	-28.9	25.5	4.6	0.037	0.247
	RCP8.5	6.1	121.6	95.2%	-34.5	34.1	5.0	-0.126	1.043
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	7.8	102.5	92.9%	-20.5	14.5	3.1	0.096	-0.353
	RCP4.5	6.8	118.0	94.6%	-31.6	33.0	5.1	-0.045	0.227
	RCP8.5	4.0	153.1	97.5%	-57.1	69.0	7.4	-0.054	1.026

(資料來源：本研究整理)

表 3-3 高雄之全年累計熱和冷應力比較

時期	情境	全年累計應力			改變率 (%)			斜率	
		ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS	PHS	ACCS	ACHS
當代 (2000-2015)	RCP2.6	3.2	120.9	97.4%	-	-	-	0.053	0.185
	RCP4.5	3.3	120.1	97.3%	-	-	-	0.023	-0.167
	RCP8.5	3.0	123.1	97.6%	-	-	-	0.013	0.464
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	2.1	131.2	98.4%	-34.4	8.5	1.0	0.000	0.195
	RCP4.5	2.9	129.6	97.8%	-10.7	7.9	0.5	-0.065	0.903
	RCP8.5	2.4	135.1	98.3%	-22.8	9.7	0.7	-0.030	0.863
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	2.1	138.0	98.5%	-34.0	14.1	1.1	-0.006	0.101
	RCP4.5	1.9	147.1	98.7%	-43.1	22.5	1.5	0.016	0.240
	RCP8.5	1.5	159.1	99.1%	-50.0	29.3	1.5	-0.046	1.387
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	2.3	136.4	98.4%	-28.0	12.8	0.9	0.045	-0.491
	RCP4.5	1.8	154.4	98.8%	-44.9	28.6	1.6	-0.019	0.271
	RCP8.5	0.8	199.8	99.6%	-72.7	62.3	2.0	-0.016	1.138

(資料來源：本研究整理)

第二節 生物氣候與被動式策略

建築節能可以透過應用不耗能的被動式策略得到改善，然而合適的被動式節能策略需要依據當地的氣候條件而做選擇。延續前一節所提到的生物氣候圖的概念(如圖 3-1)，我們能經由給定的地區，針對當地氣候找到最佳的被動式節能策略，部份研究(Lam, Yang, & Liu, 2006; Singh, Mahapatra, & Atreya, 2007)以這樣的分析方法探討尚在概念設計階段的生物氣候設計策略。

一共有五種被動式設計策略可藉助生物氣候圖加以分析其應用潛力，這些策略包括被動式太陽能採暖(PS)、自然通風(NV)、熱質量(HM)、熱質量耦合夜間通風(HMV)和蒸發冷卻(EC)。為了全面性的探討各項節能策略，兩個主動式的方法也加註在生物氣候圖上，也就是傳統的暖氣和空調(AC)，各被動設計策略區的邊界如圖 3-5 所示。每一種設計策略的應用潛力可藉由疊印在濕空氣線圖上的 12 條月氣候線來進行評估，每一條氣候線的兩個端點，分別是月平均最低溫度和月平均最小相對濕度，以及月平均最高溫度和月平均最大相對濕度。氣候線落入一個特定被動設計策略區的比例（以百

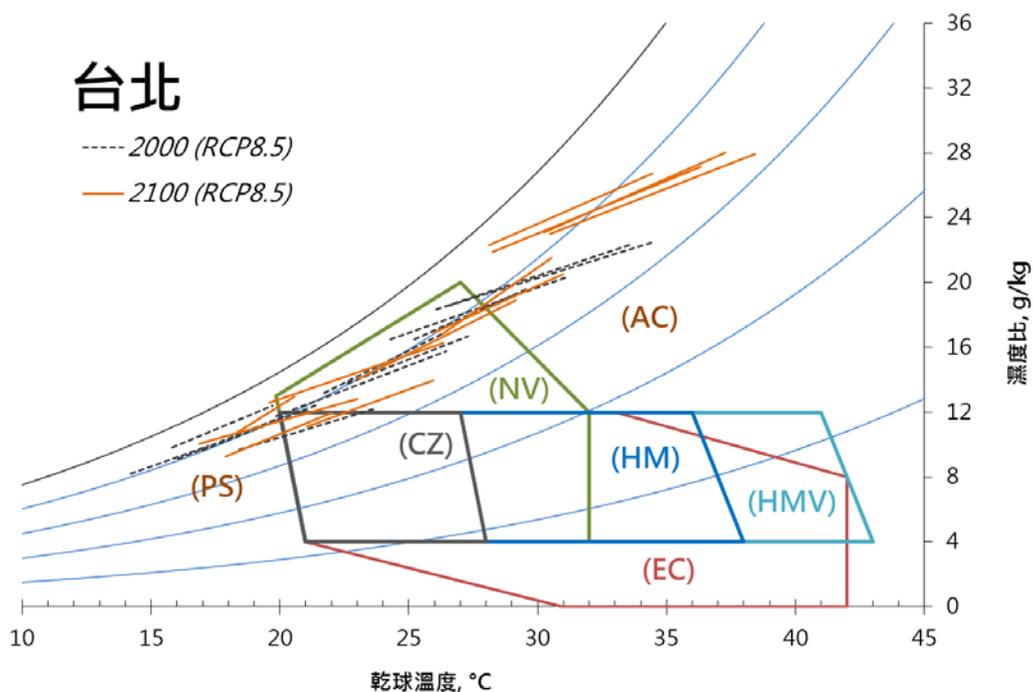


圖 3-5 台北之生物氣候與被動式策略
(資料來源：本研究整理)

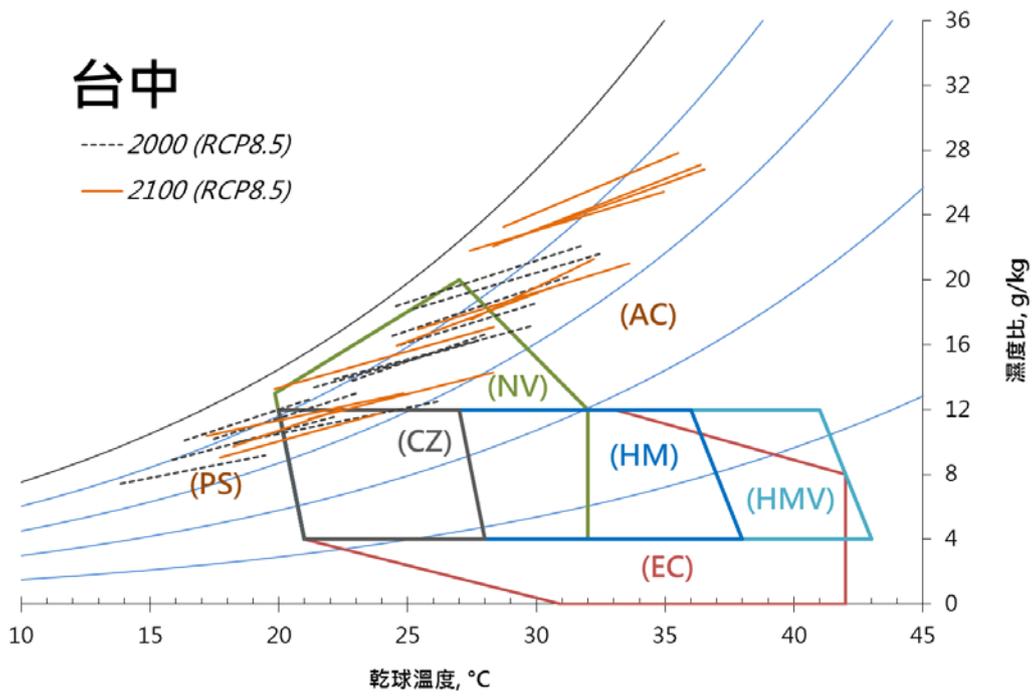


圖 3-6 台中之生物氣候與被動式策略
 (資料來源：本研究整理)

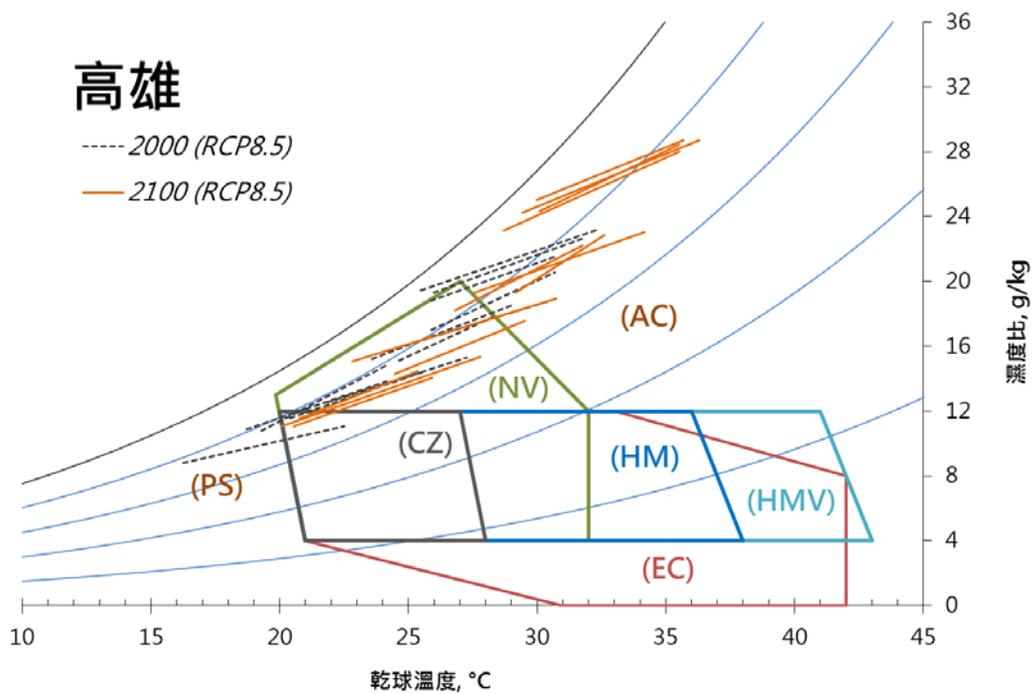


圖 3-7 高雄之生物氣候與被動式策略
 (資料來源：本研究整理)

分比計)表示該設計策略被採用的潛力,如果氣候線落於舒適區(CZ),則不需要採用額外的策略即可維持人體舒適度。

圖 3-5 至圖 3-7 分別顯示了在溫室氣體排放量最高的 RCP8.5 情境下,位於台北、台中和高雄,氣候線落於各項被動式策略區之分佈情形,為簡化圖表資訊圖中僅顯示 2000 年與 2100 年的線段分佈。由圖 3-5 可發現以 2000 年來說,在一月至二月的氣候線絕大部分落在太陽採暖區(PS),意即在台北溫和的冬天非常適合採用被動式太陽能採暖策略;在六月至九月間,濕熱的氣候使得氣候線段完全落於舒適區(CZ)之外,甚至超出自然通風區(NV)延伸到冷氣空調區(AC),意謂在這些月份中的部份時間需要啟用空調來滿足人體的舒適性。然而,在氣候變遷影響下的 2100 年,許多氣候線段明顯完全落於冷氣空調區(AC),故已無法應用被動式策略來維持舒適度。再由圖 3-7 分析高雄的被動式策略應用潛力,在 2000 年僅有少部分的氣候線落於太陽能採暖區(PS),大部分仍集中於自然通風區(NV)與冷氣空調區(AC),而氣候變遷影響下,使得冷氣空調區(AC)的線段向右偏移。由於台灣位處熱帶與亞熱帶氣候區,潮濕的氣候特性使得氣候線都遠離蒸發冷卻(EC)、高熱質量(HM)以及熱質量加夜間換氣(HMV)區,意謂著

表 3-4 台北之各項策略潛力整理

時間	Scenario	暖氣(%)	太陽能採暖(%)	自然通風(%)	冷氣(%)
現在 (2000-2015)	RCP2.6	4.0	32.0	33.9	30.2
	RCP4.5	4.0	32.2	33.9	29.9
	RCP8.5	3.8	31.4	34.2	30.6
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	2.8	30.8	33.2	33.2
	RCP4.5	3.7	31.1	31.4	33.8
	RCP8.5	3.2	29.6	32.5	34.7
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	2.6	30.0	31.7	35.7
	RCP4.5	2.3	28.3	31.7	37.7
	RCP8.5	1.7	27.6	30.1	40.6
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	3.0	29.6	32.1	35.3
	RCP4.5	2.2	27.3	30.7	39.8
	RCP8.5	0.8	22.4	29.7	47.1

(資料來源：本研究整理)

表 3-5 台中之各項策略潛力整理

時間	Scenario	暖氣(%)	太陽能採暖(%)	自然通風(%)	冷氣(%)
現在 (2000-2015)	RCP2.6	2.9	26.9	41.8	28.4
	RCP4.5	3.1	27.0	41.7	28.2
	RCP8.5	2.9	26.4	42.0	28.7
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	1.9	25.9	40.6	31.7
	RCP4.5	2.7	26.5	38.4	32.4
	RCP8.5	2.2	24.9	39.7	33.2
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	1.8	25.2	38.3	34.8
	RCP4.5	1.5	23.6	37.5	37.5
	RCP8.5	1.1	22.9	34.4	41.5
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	2.1	24.8	39.0	34.2
	RCP4.5	1.5	22.7	35.5	40.4
	RCP8.5	0.5	18.6	29.8	51.0

(資料來源：本研究整理)

表 3-6 高雄之各項策略潛力整理

時間	Scenario	暖氣(%)	太陽能採暖(%)	自然通風(%)	冷氣(%)
現在 (2000-2015)	RCP2.6	0.3	15.3	44.3	40.0
	RCP4.5	0.4	15.5	44.5	39.6
	RCP8.5	0.4	14.8	44.2	40.5
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	0.2	13.2	43.3	43.4
	RCP4.5	0.4	14.8	41.0	43.9
	RCP8.5	0.2	13.4	40.5	45.8
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	0.2	13.0	40.4	46.4
	RCP4.5	0.1	12.0	38.1	49.8
	RCP8.5	0.1	10.8	35.5	53.6
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	0.2	13.1	40.7	46.0
	RCP4.5	0.1	11.5	35.8	52.6
	RCP8.5	0.0	7.3	29.5	63.2

(資料來源：本研究整理)

單以氣候條件來看，這三種被動式設計於台灣似乎是沒有使用潛力的冷房策略，只剩下自然通風(NV)為可行的選項。

表 3-4 至表 3-6 整理了當代與未來不同時期、三種溫室氣體排放情境下，被動式節能策略與主動式策略分別應用於台北、台中與高雄的潛力。以台北為例，從表 3-4 中

的數字能夠發現，隨著氣候暖化，儘管自然通風策略的使用潛力並沒有明顯地變化，但是需要啟用空調的比例卻有明顯的增加，主要是來自於暖氣與太陽能採暖的應用潛力下降；若針對高溫室氣體排放量的 RCP8.5 情境，從當代至世紀末，自然通風使用潛力由 34.2% 降低至 29.7%，需要空調降溫的比例由 30.6% 上升至 47.1%。各項策略於台中和高雄亦呈現相似的趨勢，其中高雄的冷房空調使用比率在世紀末 RCP8.5 情境下，使用潛力超過 60%，最終將貢獻於住宅部門的溫室氣體放量，如何透過現有法規的調整因應上升的空調耗能會是後面的章節所要討論的重點。

本研究從氣候的角度分析各項主動與被動式策略的應用潛力，必須特別注意的是，濕空氣線圖上的自然通風區(NV)邊界，其假設條件為室內操作溫度和濕度與室外條件相同，但實際上室內環境有可能不符合此假設條件。因此，表 3-4 至表 3-6 中的各項評估只是概略依據氣候資料，反應可能的能源使用潛力，詳細評估仍需以實際由戶外傳遞至室內環境的溫溼度為準。

第四章 未來氣候下單位空調耗能變動分析

前一章從氣候資料切入，探討氣候變遷對於人體熱舒適的衝擊，並且針對各項被動式節能設計與空調的機械式通風，分析其在未來的應用潛力。此章節進一步從建築物理的觀點出發，藉由逐時的動態能源模擬軟體 EnergyPlus，在不受各個社會、經濟面的因素影響下，評估氣候變遷對於單位樓地板面積空調耗能的衝擊。以下章節先行以不確定性分析探討單位樓地板面積空調耗能在未來可能變化的趨勢與變動區間，並藉由靈敏度分析找出對於降低空調耗能較為有效的建築外殼設計因子，以利訂定建築外殼的改善方向，達到溫室氣體減量之目的。

第一節 單位空調耗能的不確定性分析

不確定性分析旨在判斷因不確定性之變因造成模式應變之變異(I.A. Macdonald, 2002; van Griensven et al., 2006)，本研究分別探討年尖峰冷房負荷、全年空調使用時間與及全年總體空調耗三者為討論對象，漸進式的分析未來空調耗能的變化趨勢。

壹、年尖峰冷房負荷

為檢視在未來氣候狀況下，空調設備量在需求上的變化，本研究以年尖峰負荷量在三個氣候變遷情境下的變動趨勢作呈現，圖 4-1 至圖 4-3 分別為台北、台中、高雄三地的年尖峰冷房負荷之變動趨勢，圖中的實線為平均值，而色塊標示的區間意義為年尖峰冷房負荷約有 50%的機率會在此範圍內變動。總體而言，高雄的尖峰冷房負荷最大，台北次之而台中最低；若以台北為例，如圖 4-1 所示，在溫室氣體排放量減緩的 RCP2.6 情境下，趨勢近乎持平於整個時間區段；在 RCP4.5 情境下，年尖峰負荷量在 2070 前稍稍上升，之後則維持在 58 W/m^2 左右；然而在溫室氣體高度排放的 RCP8.5 情境下，年尖峰負荷量的上升幅度最大，於世紀末時平均增加至 67 W/m^2 ，增量約為今日之 25.5%。再端看圖 4-2 與圖 4-3，可發現年尖峰冷房負荷量於台中、高雄的變動與台北之趨勢相符，僅在 RCP8.5 情境下於世紀末有明顯的成長。

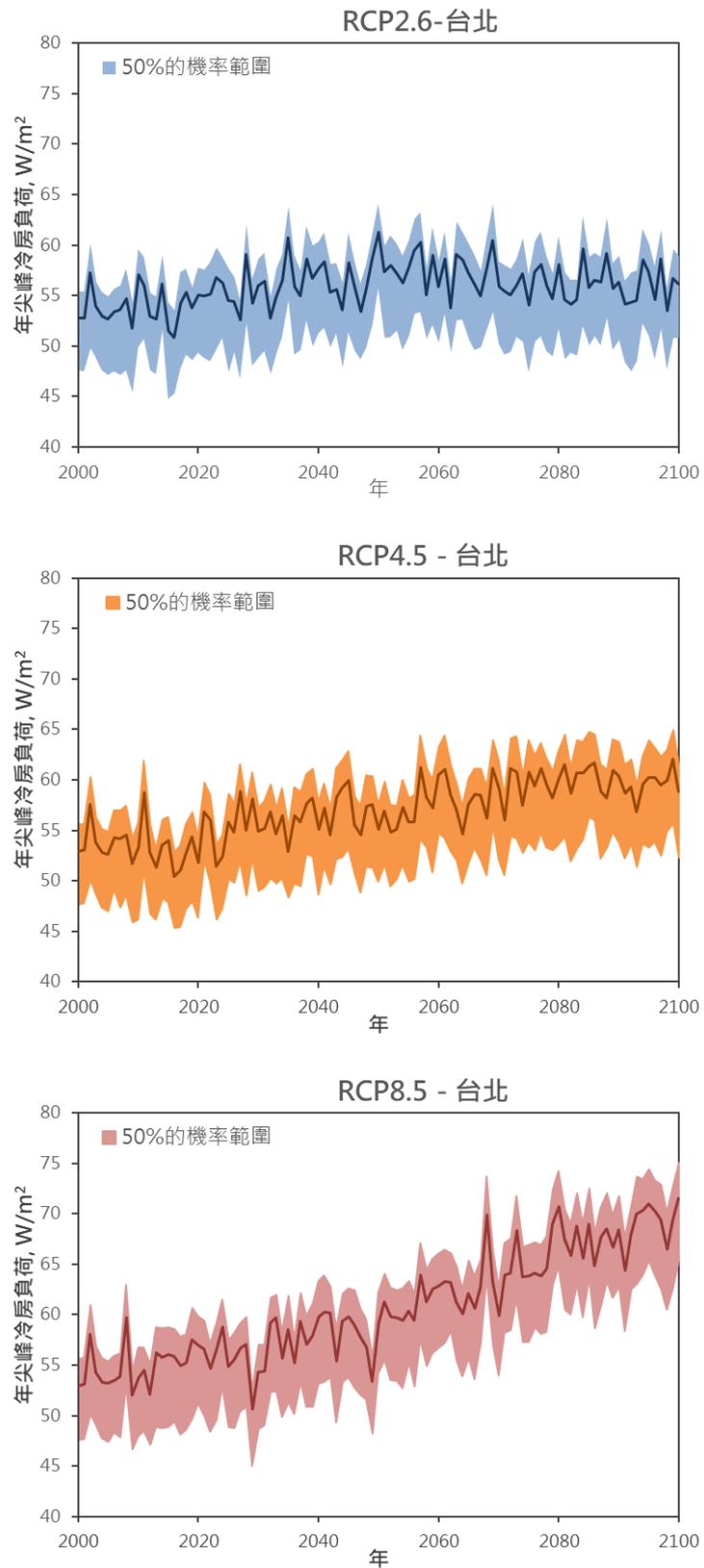


圖 4-1 台北的年尖峰冷房負荷變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

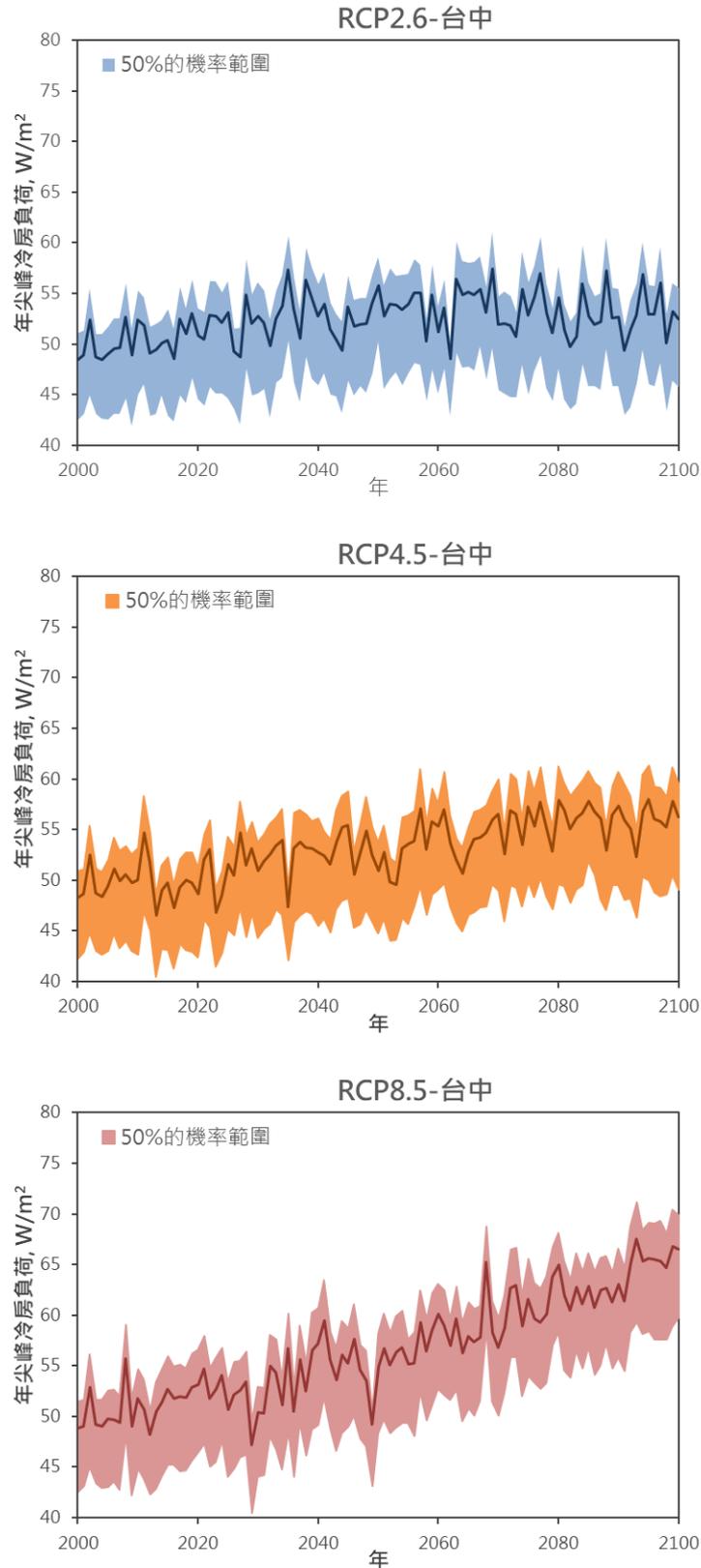


圖 4-2 台中的年尖峰冷房負荷之變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

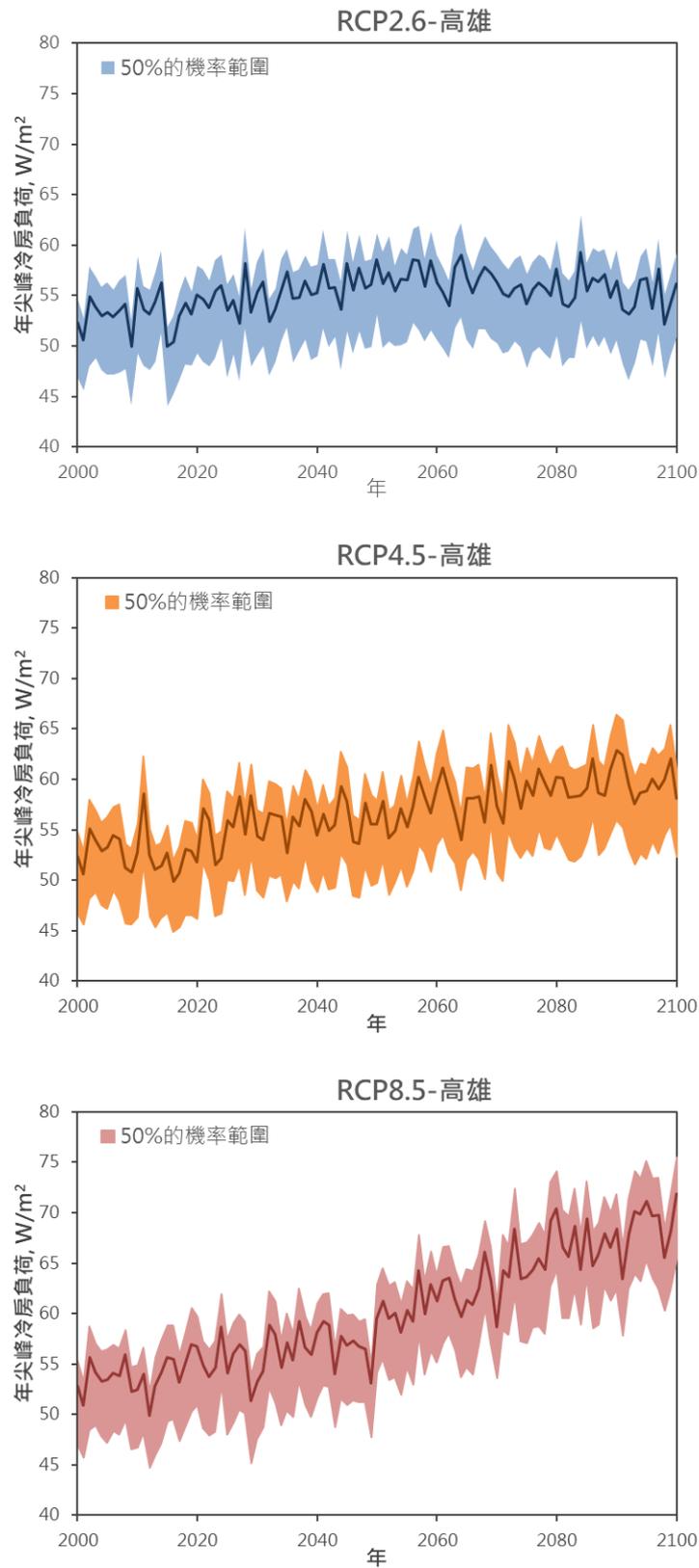


圖 4-3 高雄的年尖峰冷房負荷之變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

貳、全年空調使用時間

為檢視未來空調的使用情形，全年空調啟用頻率為第二個分析的項目，探討在三個氣候變遷情境下，其分別位於台北、台中、高雄的變動趨勢，本研究以年間使用天數為計算空調使用時間的單位，意即空調使用時間占全年多少比例，研究結果如圖 4-4 至圖 4-5 所示，圖中的實線為平均值，而色塊標示的區間意義為全年空調使用時間約有 50% 的機率會在此範圍內變動。總體而言，仍然是高雄地區的全年空調使用時間最長，台北與台中的部份則不相上下。若以台北為例，如圖 4-4 所示，空調使用時間在低排放 RCP2.6 情境下，在 2060 以前些微地上升，之後呈下降的趨勢；於 RCP4.5 情境下，空調使用時間在 2070 前上升並在之後持平，維持在 70 天左右；而空調使用時間在高排放 RCP8.5 情境下穩定上升，於世紀末成長至 95 天，相當於一整年有四分之一的時間須使用空調系統維持室內的人體熱舒適。再由圖 4-5 與圖 4-6 可發現全年空調使用時間於台中、高雄的變動與台北之趨勢相符，且相對於年尖峰冷房負荷，空調使用時間的增幅極為明顯，在高溫室氣體排放 RCP8.5 情境下，以高雄而言，空調使用時間由世紀初的 60 天增長至世紀末的 150 天，增加近 3 倍的時間。綜合上述，長時間啟用空調將成為未來的趨勢。

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

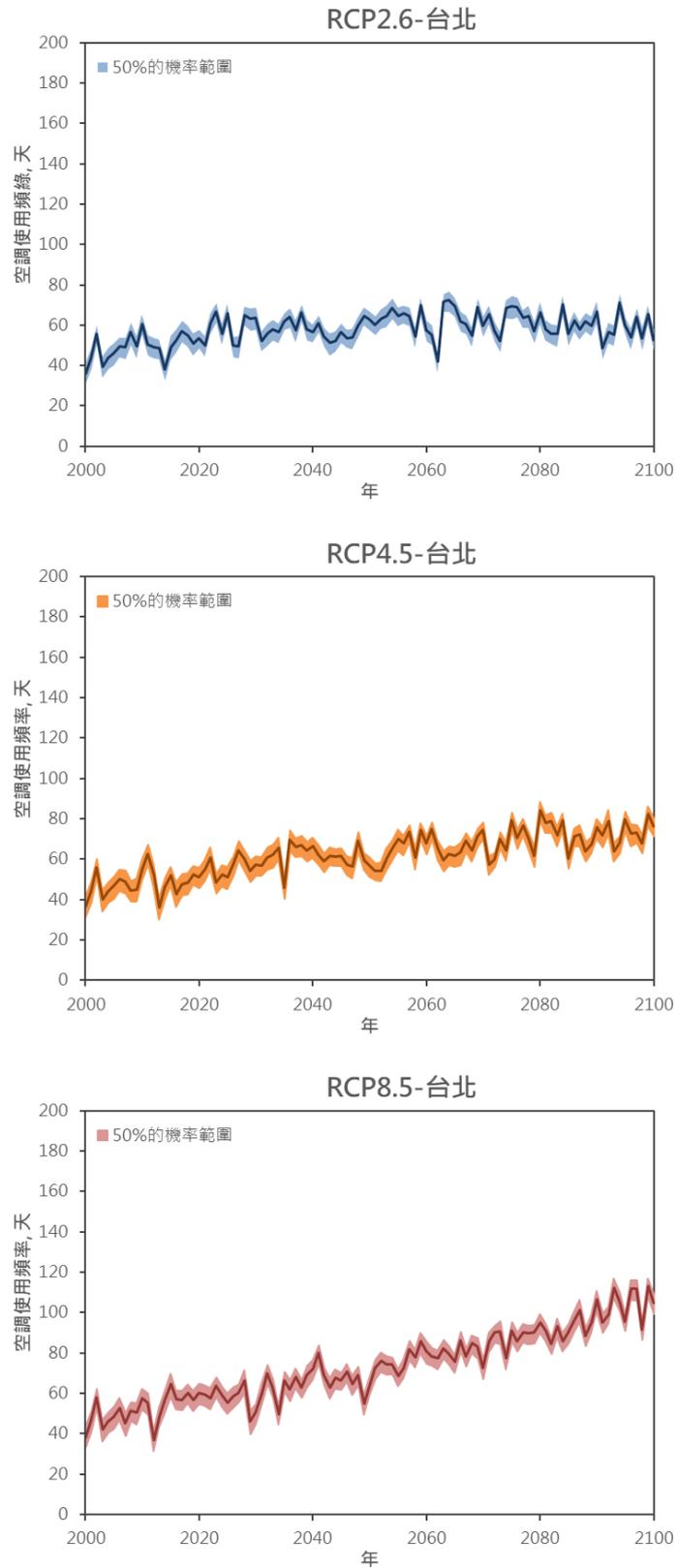


圖 4-4 台北的全年空調使用時間變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

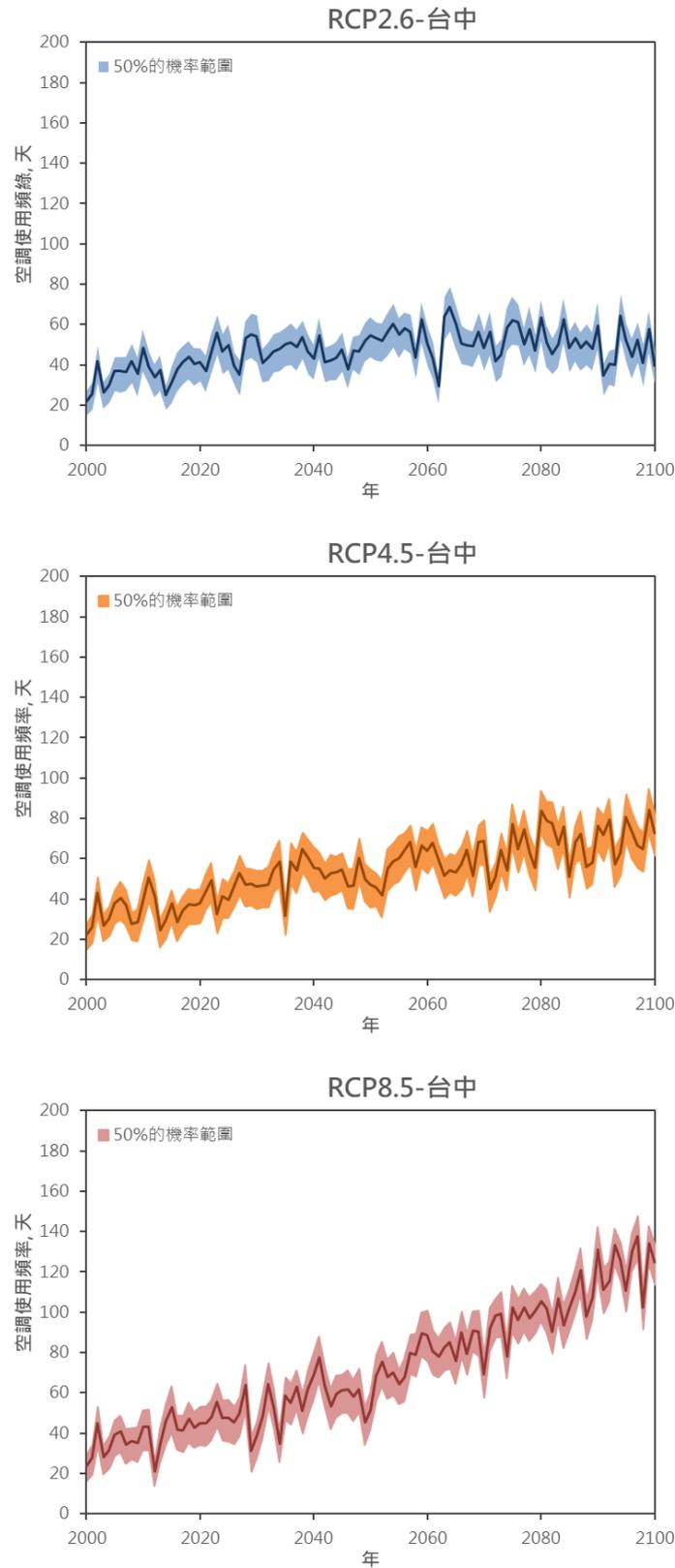


圖 4-5 台中的全年空調使用時間變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

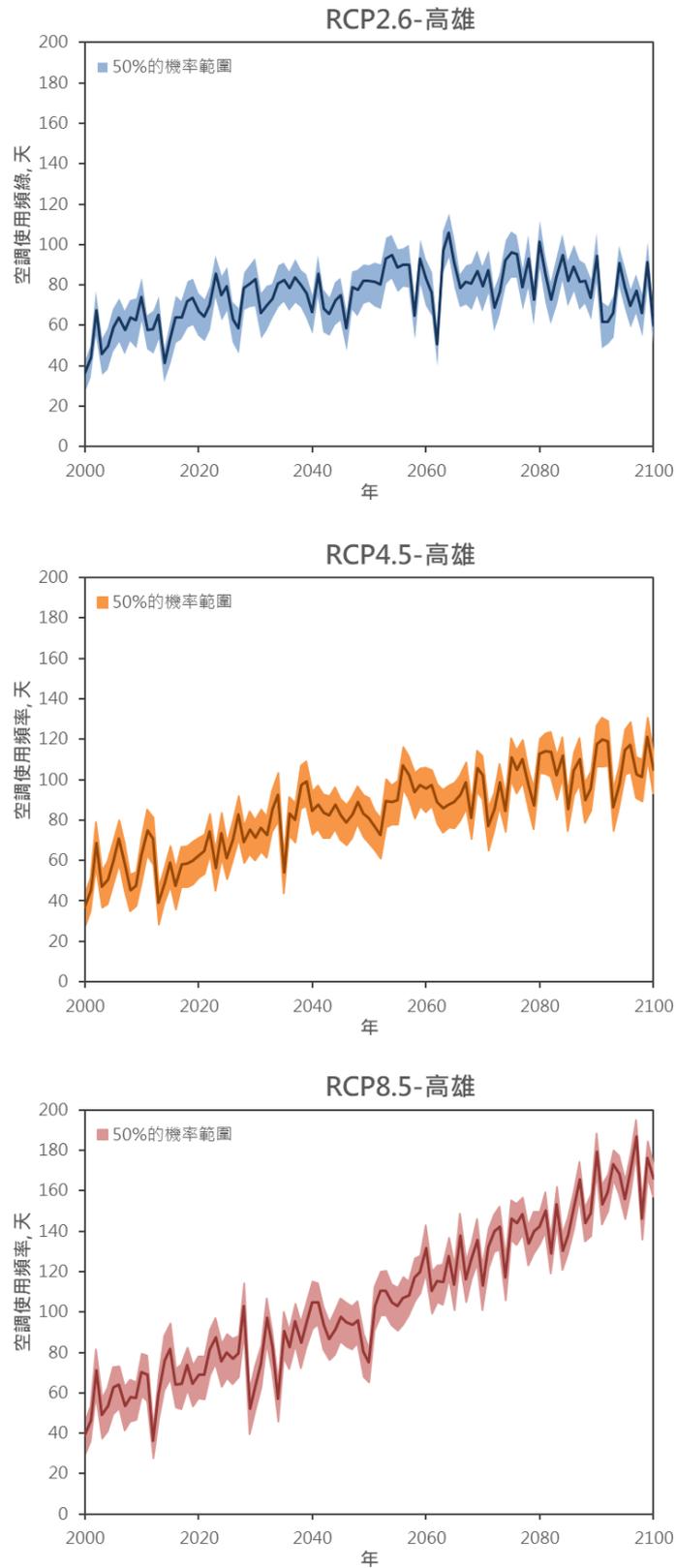


圖 4-6 高雄的全年空調使用時間變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

參、全年空調耗能

由前述的分析結果可知概略的空調使用狀況，進而探討實際之單位空調耗能之變化，圖 4-7 至圖 4-9 分別顯示了在各氣候變遷情境下於台北、台中、高雄的變化趨勢。以台北為例，如圖 4-7 所示，全年單位空調耗能之變化趨勢，與空調時數在各情境的變化大致相同，以低排放量 RCP2.6 情境為例，世紀末之空調耗能控制在 17 kWh/m^2 ，而在 RCP8.5 之情境下，全年之單位空調耗能穩定上升至 32 kWh/m^2 ，為現今之 2 倍以上。再由圖 4-8 與圖 4-9 可發現空調耗能於台中、高雄的變動與台北之趨勢相符，且在高雄的增幅最鉅，在高排放量 RCP8.5 情境下，全年空調耗能由世紀初之 17 kWh/m^2 增長至世紀末之 49 kWh/m^2 。

為更完整的了解空調耗能整體的變化趨勢，我們將年尖峰冷房負荷、空調使用時間和全年單位空調耗能在氣候變遷影響改變整理成表。表 4-1、表 4-3 和表 4-5 所示的分別為台北、台中和高雄的綜合分析，而表 4-2、表 4-4 和表 4-6 分別為各項空調分析項目相對於當代標準的改變量。綜合所有地區而言，年尖峰冷房負荷在高溫室氣體排放量 RCP8.5 情境下增量為兩成左右，相比於全年空調使用時數的增量落在 91% 至 180% 左右，前者變化較不明顯。由以上分析可得到一個結論，全年單位空調耗能的增量多反映於長時間的空調使用；雖然年尖峰冷房負荷的增量未如空調使用時間的多，但是在空調系統噸數的設計上仍需考慮氣候改變所造成的影響。而須注意的是，上述著眼於氣候條件改變對單位樓地板面積空調耗能的影響，尚未考慮人口變化、經濟成長對於全國住宅部門的空調耗能總量的衝擊，此部份將於後面的章節作說明。

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

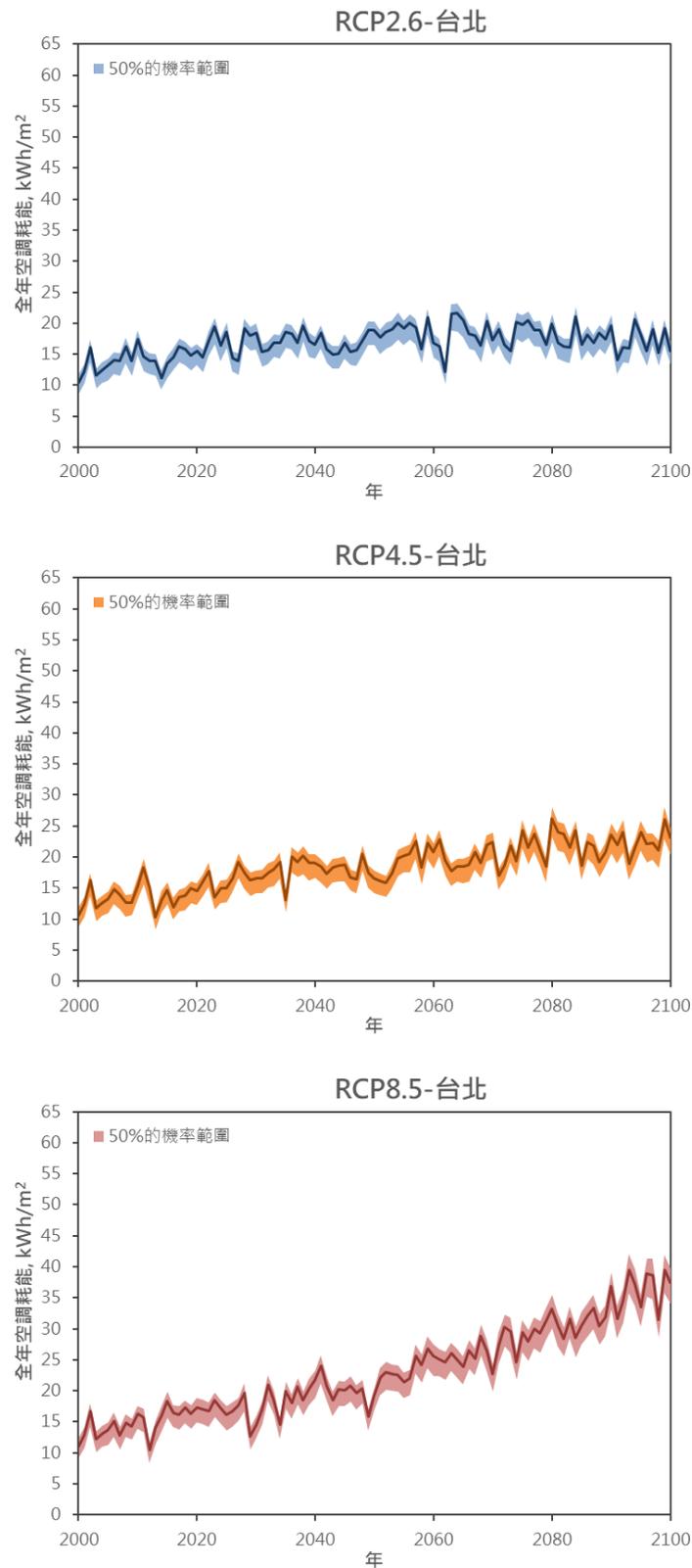


圖 4-7 台北的單位全年空調耗能變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

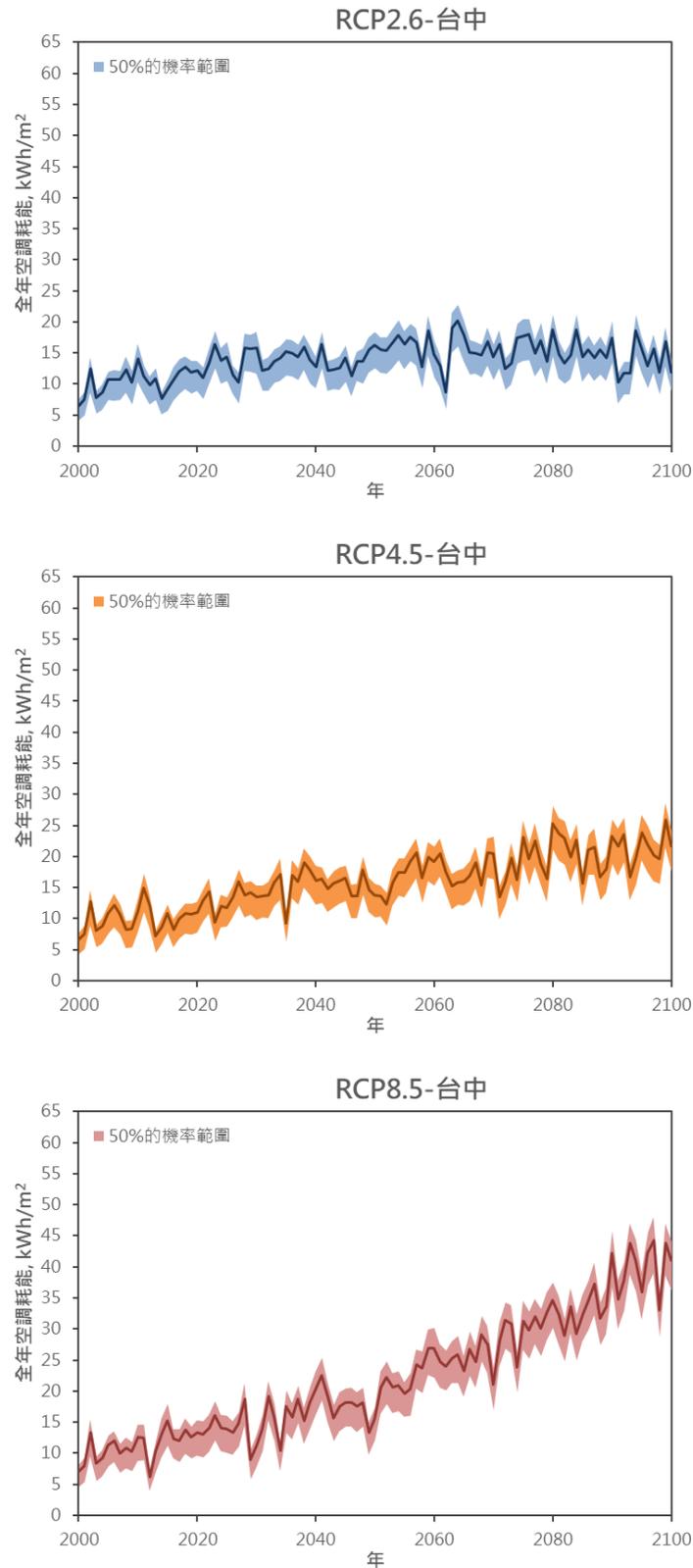


圖 4-8 台中的單位全年空調耗能變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

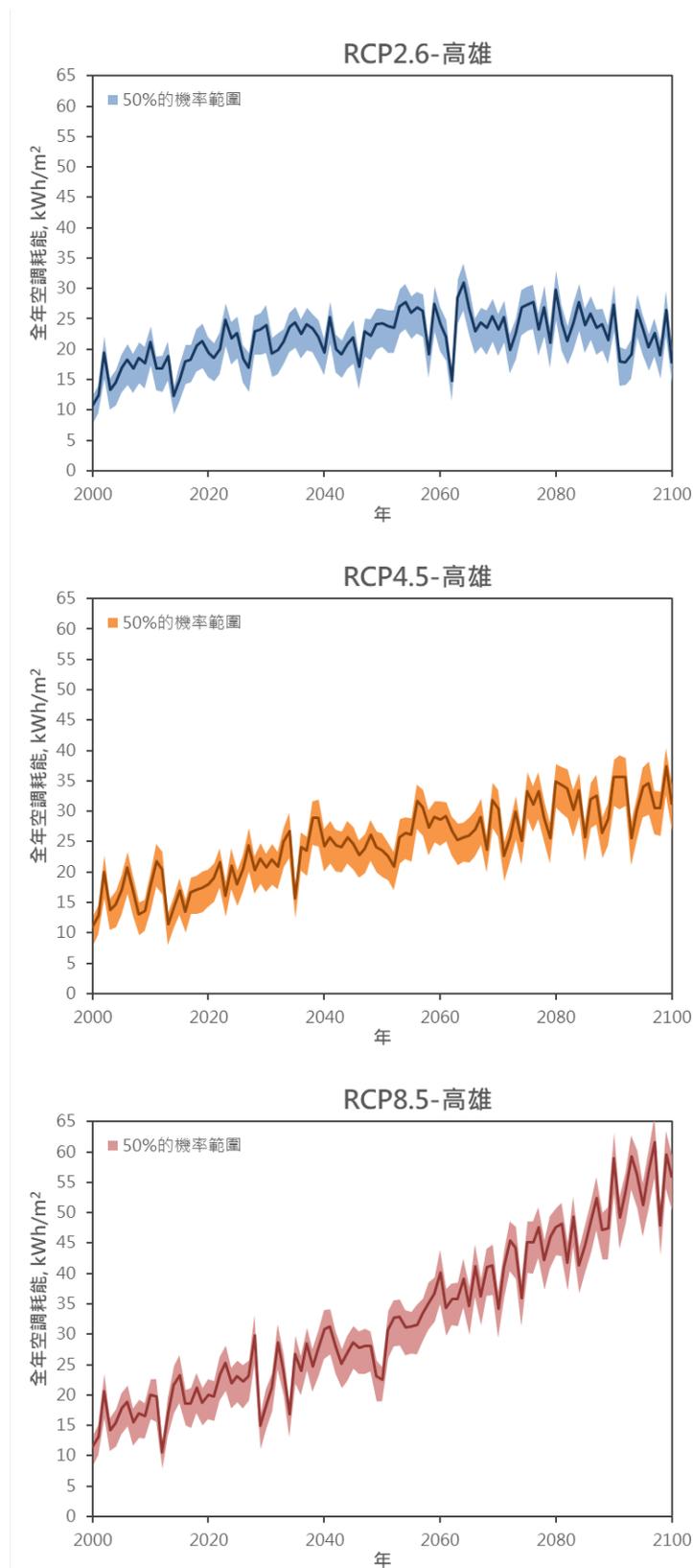


圖 4-9 高雄的單位全年空調耗能變動趨勢
(資料來源：本研究整理)

表 4-1 台北之空調綜合分析

時期	情境	年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
當代 (2000-2015)	RCP2.6	53.90	47.83	13.66
	RCP4.5	53.83	47.52	13.58
	RCP8.5	54.53	49.78	14.22
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	55.54	57.87	16.75
	RCP4.5	54.97	57.17	16.56
	RCP8.5	56.51	60.36	17.62
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	57.18	60.70	17.91
	RCP4.5	57.50	64.00	19.09
	RCP8.5	60.59	74.38	23.00
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	56.11	60.65	17.75
	RCP4.5	59.75	71.60	21.91
	RCP8.5	67.32	95.26	32.31

(資料來源：本研究整理)

表 4-2 台北之空調綜合分析相對於當代之改變量

時期	情境	改變率 (%)		
		年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	3.0	21.0	22.7
	RCP4.5	2.1	20.3	21.9
	RCP8.5	3.6	21.2	23.9
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	6.1	26.9	31.1
	RCP4.5	6.8	34.7	40.5
	RCP8.5	11.1	49.4	61.8
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	4.1	26.8	30.0
	RCP4.5	11.0	50.7	61.3
	RCP8.5	23.5	91.4	127.3

(資料來源：本研究整理)

表 4-3 台中之空調綜合分析

時期	情境	年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
當代 (2000-2015)	RCP2.6	49.99	34.37	10.05
	RCP4.5	49.94	34.05	9.95
	RCP8.5	50.48	36.55	10.67
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	52.32	46.14	13.52
	RCP4.5	51.32	46.24	13.52
	RCP8.5	52.85	50.06	14.72
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	53.33	51.34	15.18
	RCP4.5	53.50	56.48	16.75
	RCP8.5	56.83	72.24	21.79
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	52.96	51.03	14.99
	RCP4.5	55.91	67.64	20.38
	RCP8.5	62.87	108.63	34.60

(資料來源：本研究整理)

表 4-4 台中之空調綜合分析相對於當代之改變量

時期	情境	改變率 (%)		
		年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	4.7	34.2	34.6
	RCP4.5	2.8	35.8	35.8
	RCP8.5	4.7	37.0	38.0
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	6.7	49.4	51.1
	RCP4.5	7.1	65.9	68.3
	RCP8.5	12.6	97.7	104.3
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	5.9	48.4	49.2
	RCP4.5	12.0	98.6	104.7
	RCP8.5	24.6	197.2	224.4

(資料來源：本研究整理)

表 4-5 高雄之空調綜合分析

時期	情境	年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
當代 (2000-2015)	RCP2.6	53.22	56.30	16.25
	RCP4.5	52.99	55.34	15.98
	RCP8.5	53.47	59.23	17.09
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	54.58	73.43	21.26
	RCP4.5	54.76	72.44	21.06
	RCP8.5	55.83	78.78	22.89
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	56.70	81.15	23.77
	RCP4.5	57.04	89.41	26.32
	RCP8.5	59.90	107.97	32.62
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	55.44	80.89	23.53
	RCP4.5	59.52	103.32	30.98
	RCP8.5	67.10	151.06	49.04

(資料來源：本研究整理)

表 4-6 高雄之空調綜合分析相對於當代之改變量

時期	情境	改變率 (%)		
		年尖峰冷房負荷 (W/m ²)	全年空調使用時間 (天/年)	全年空調耗能 (kWh/m ²)
近未來 (2016-2040)	RCP2.6	2.6	30.4	30.8
	RCP4.5	3.3	30.9	31.8
	RCP8.5	4.4	33.0	34.0
世紀中 (2041-2070)	RCP2.6	6.6	44.1	46.3
	RCP4.5	7.6	61.6	64.7
	RCP8.5	12.0	82.3	90.9
世紀末 (2071-2100)	RCP2.6	4.2	43.7	44.8
	RCP4.5	12.3	86.7	93.9
	RCP8.5	25.5	155.0	187.0

(資料來源：本研究整理)

第二節 建築外殼因子的靈敏度分析

為制定適切的氣候變遷調適策略改善現行的規範，並針對當中的重點因子作調整以達到最有效率的改變，為本研究之目的。本研究評估了未來可改善的住宅外殼變因，諸如窗牆比(WWR)、外牆的平均熱傳透率(U_w)、玻璃的平均熱傳透率(U_f)、玻璃日射透過率(SHGC)、外遮陽係數(K_i)等 6 個變數，分別對其進行靈敏度分析。靈敏度的分析意義在於決定各個變數對於應變數的影響程度(Iain A. MacDonald, 2009)，以本研究而言，即為決定各住宅外殼因子對全年空調耗能的影響程度，影響程度越顯著的因子即為優先改善的方向。本研究以標準迴歸係數 (standard regression coefficients, SRC) 作為靈敏度分析的指標，將此指標應用在線性回歸模型上提供一個快速且易於理解的比較值，用以量化各個外殼因子對於整體住宅空調耗能的影響程度。當標準迴歸係數的絕對值越大，表示其相關性越高、越顯著；若標準迴歸係數為負值，則表示此外殼因子與住宅空調耗能為負相關。選用標準迴歸係數之益處在於其計算上的快速，並且在比較各變因的影響程度時，不會受到單位不同的限制而無從比較(Mara & Tarantola, 2008)。

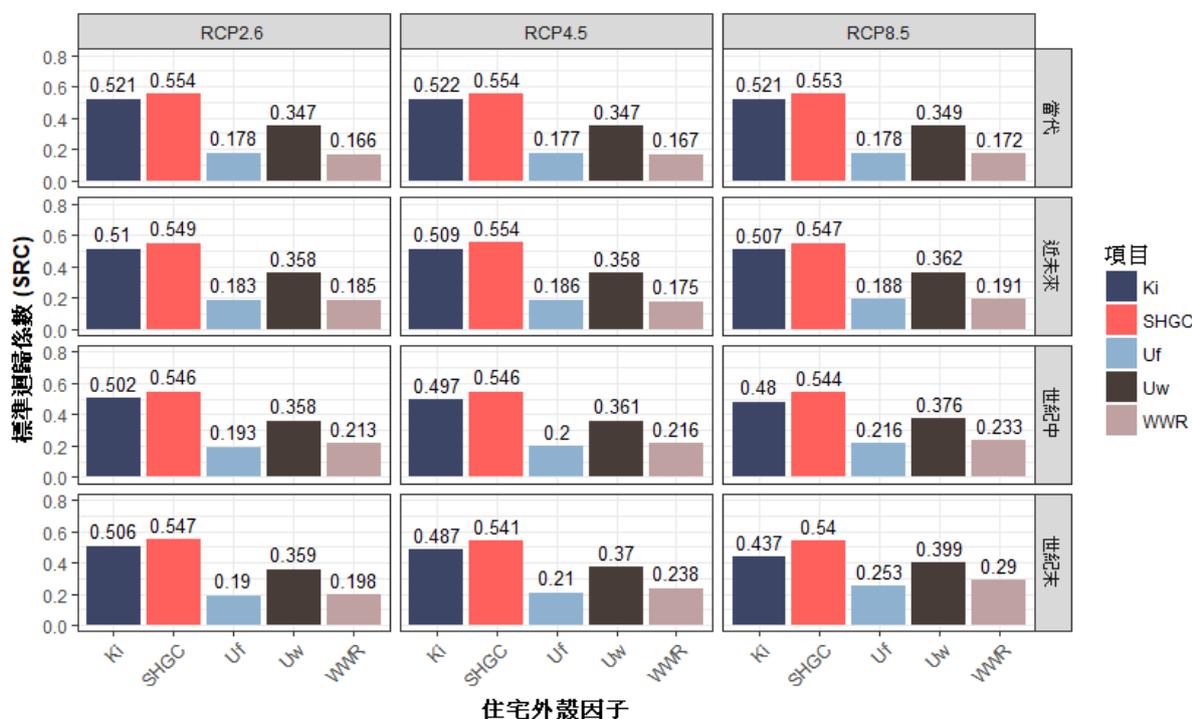


圖 4-10 台北的各住宅外殼因子標準迴歸係數

(資料來源：本研究整理)

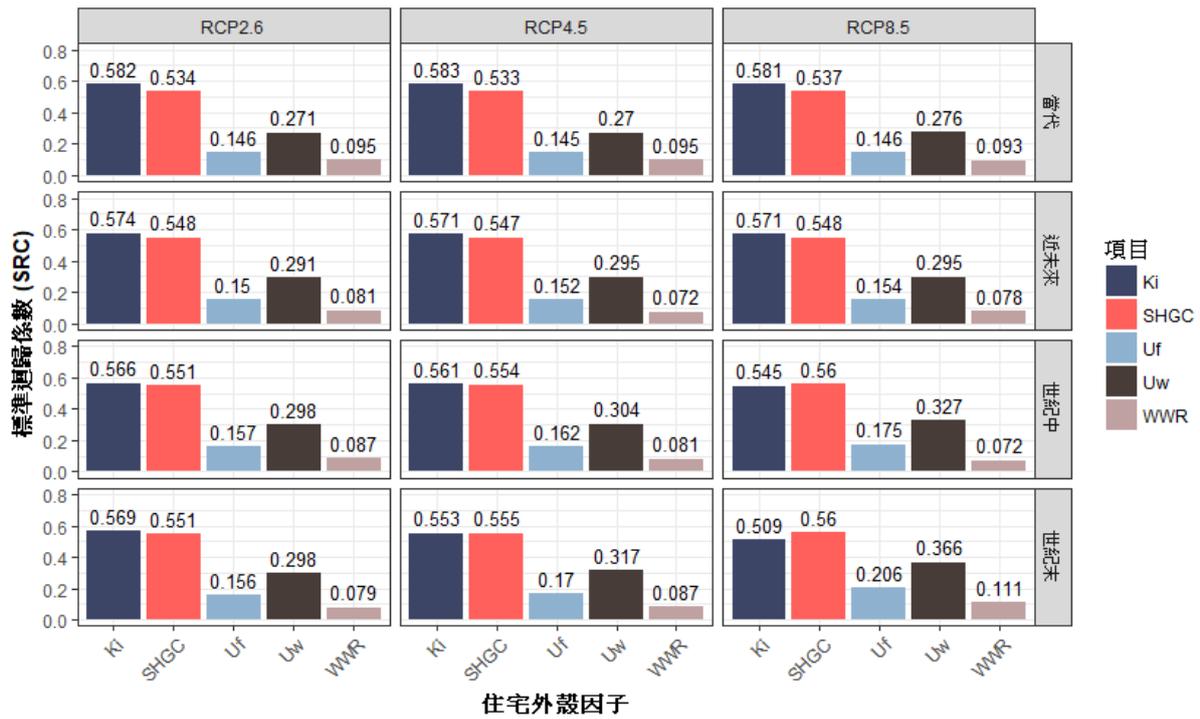


圖 4-11 台中的各住宅外殼因子標準迴歸係數

(資料來源：本研究整理)

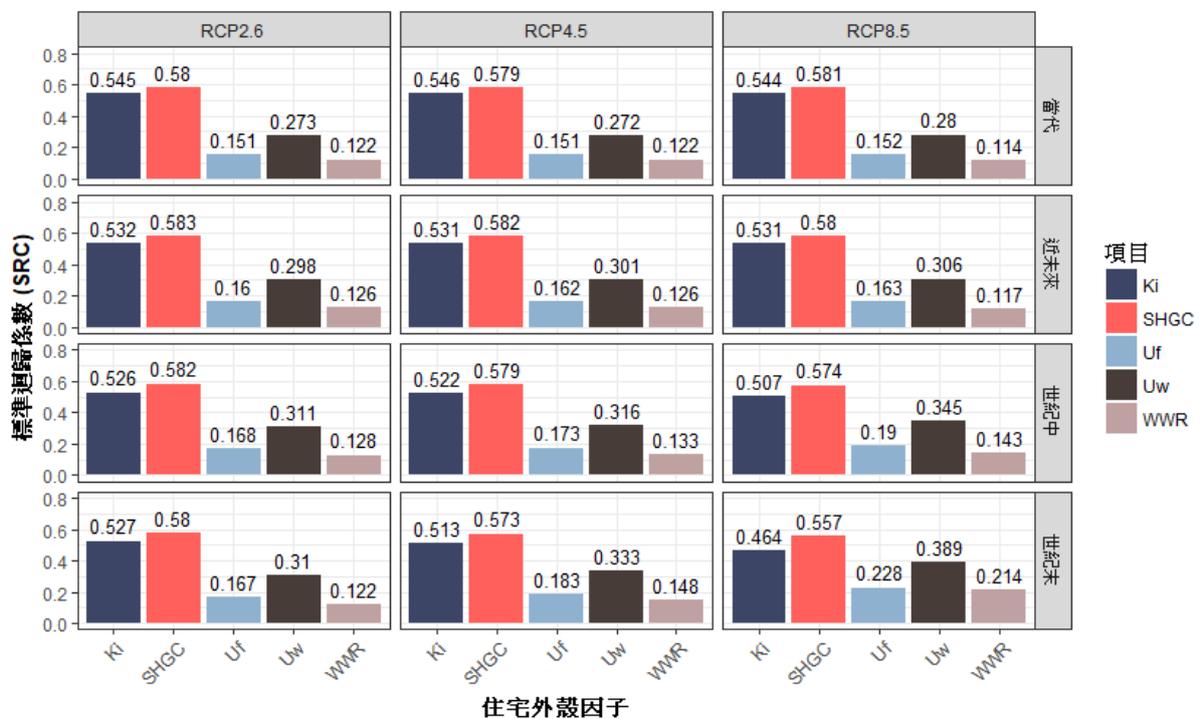


圖 4-12 高雄的各住宅外殼因子標準迴歸係數

(資料來源：本研究整理)

圖 4-10 至圖 4-12 分別為台北、台中與高雄的標準迴歸係數分析結果，我們將結果依據不同的溫室氣體排放量情境、不同的時間切段作呈現。以台北為例，由圖 4-10 可知，整體而言，不管處於何種溫室氣體排放情境假設、時間切段之下，玻璃日射穿透率(SHGC)的影響程度最高，而玻璃的隔熱性能(U_f)影響最小，故在玻璃選材上，如為減少經由建築外殼傳至室內所造成的熱負荷，應以玻璃的日射穿透率為主要的挑選依據，隔熱性能為其次。影響程度次之的為外遮陽係數(K_i)，三者為外牆之隔熱性能。

值得注意的是，在外氣溫度較低的溫室氣體排放情境下，如 RCP2.6 之世紀末，外遮係數(K_i)之影響程度大於外牆之隔熱性能(U_w)，但在外氣溫度較高的溫室氣體排放情境下，如 RCP8.5 之世紀末，標準迴歸係數呈現相反的結果，外牆的隔熱性能(U_w)反而顯得較為重要，阻擋外氣的熱量經由熱傳導的方式傳至室內，相較於使用外遮陽裝置阻擋日射更為有效率。此現象亦發生於玻璃之熱傳透率，乃是同一原因所致。窗牆比(WWR)的影響程度也是隨著外氣溫度上升而增加，因其主要反映了整體建築外殼的平均熱傳透率，若窗牆比越大，即窗戶占整體的外殼面積比越重，而玻璃的隔熱性能較外牆的隔熱性能差，表示整體的建築外殼平均熱傳透率越大，意謂著整體的隔熱性能表現下降，導致建築空調負荷受外氣的影響程度變大，單位面積的空調耗能因此上升。再比較標準迴歸係數在台中、高雄與台北之間的差異，如圖 4-11 和圖 4-12 所示，分析結果會因地區的不同而有所差異。綜合上述所得之結果，建築外殼調適策略的方向應隨著時間切段、氣候狀況做適切的改變。

第五章 溫室氣體排放趨勢預測

因為氣候的改變對於空調耗能的衝擊最為明顯，由前面的章節可知，本研究分別從氣候資料與實際的能源模擬分析了氣候變遷對於單位樓地板面積空調耗能的影響。此章節進一步結合其他的住宅終端能源使用項目，諸如生活熱水、居家烹調、照明燈具、家電設備消耗的能源，並代入人口變化與未來的 GDP 成長趨勢等社經因素，結合先前生成的未來典型氣象年作為氣候條件，建構一住宅部門的溫室氣體排放趨勢預測模型，推估在未來氣候下可能的溫室氣體排放量。

第一節 模型校正

由經濟部能源局提供的歷史資料來看，如圖 5-1 所示自 1992 年至 2015 年住宅部門之溫室氣體排放量約占全國的 10-12%，每年的比例變化不大，歷年平均為 11.49%。為建立本預測模型之可信度與未來調適策略之可行性，首先以 2000 至 2016 年由的歷

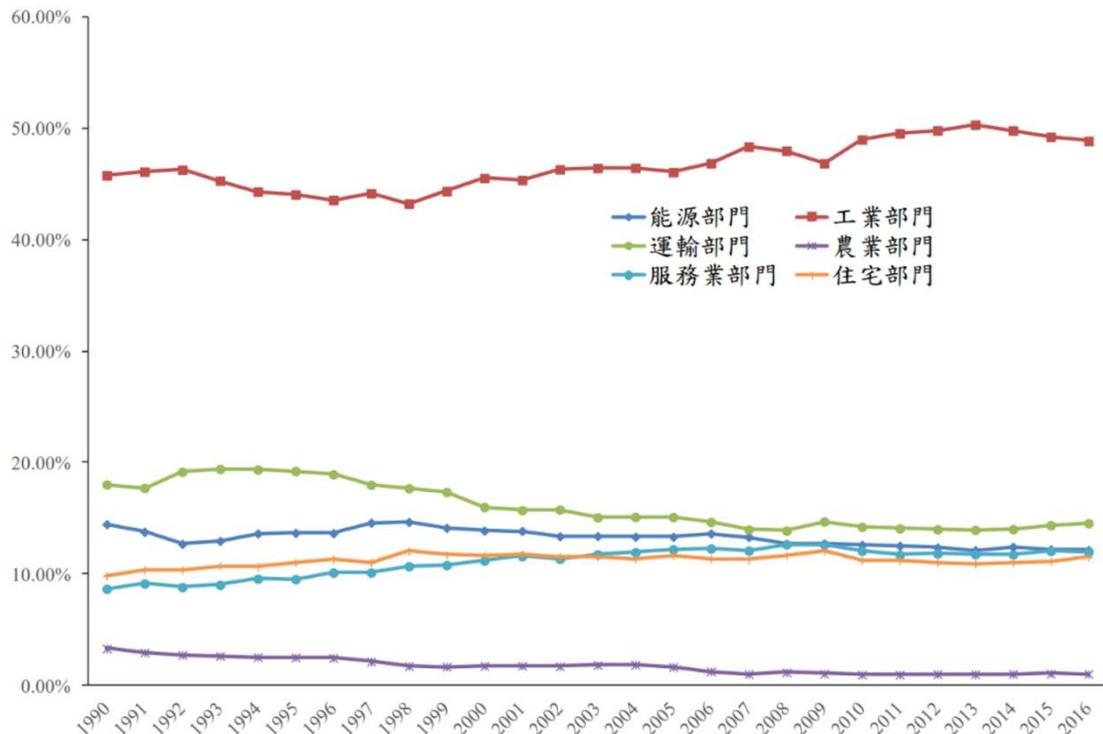


圖 5-1 歷年各部門燃料燃燒 CO2 排放量占比 (含電力消費)
(資料來源：經濟部能源局、本研究整理)

史資料進行模型預測校正，並且由圖 5-2 可發現，從溫室氣體的排放趨勢來看，2000 年以後的年增率逐漸減緩，在 2008 年至 2013 年甚至出現負成長，然而在 2013 年以後持續上升，2016 年的住宅部門溫室氣體排放達到歷年高峰，也就是 2967 萬公噸。

本模型假定之空調使用行為建立於理想之複合式空調運轉模式，然而使用者的熱適應行為未必符合理論之假設，故分析結果可能低估實際的空調耗能；另一方面，本模型僅考慮住宅各終端使用項目的耗能，並未包含能源運送過程的損失，造成整體之推估值低於歷史資料；故本研究採一校正係數使本模型更符合實際之溫室氣體排放量，校正後之住宅部門溫室氣體推估值與歷史資料之對照如圖 5-2 所示，模型校正後與歷史資料比對，所得之正規化方均根誤差(Normalized Root-Mean-Square Deviation, NRMSD)為 4.21%。

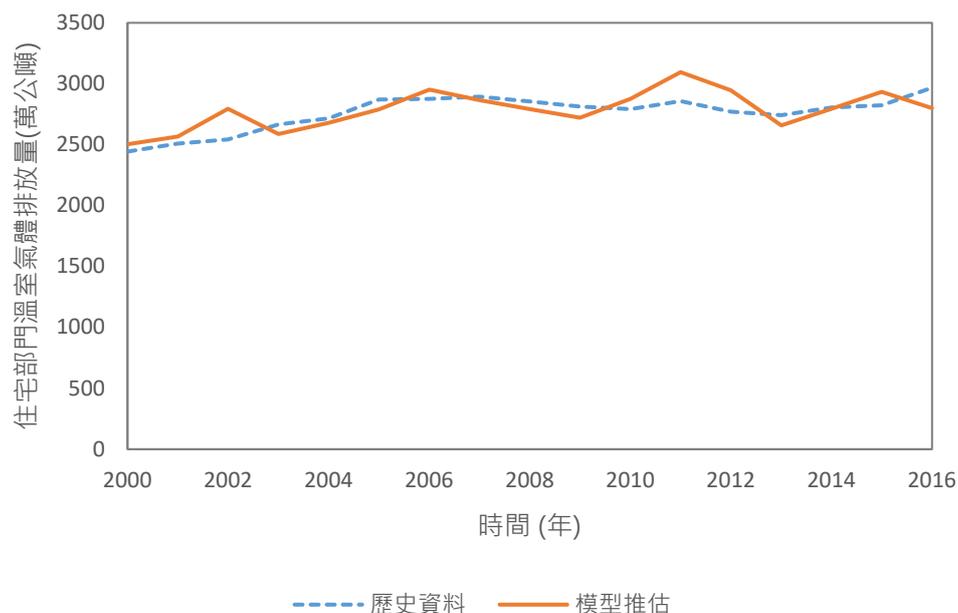


圖 5-2 模型推估值與歷史資料之校正
(資料來源：經濟部能源局、本研究整理)

第二節 溫室氣體排放量預測

本研究援引不同程度的人口發展與經濟成長，輔以各項住宅終端耗能資訊，推估未來的住宅部門溫室氣體排放趨勢，為簡化圖表資訊，僅以上、下界呈現最高與最低之

推估值，色塊部份則為溫室氣體排放趨勢可能的分佈區間。圖 5-3 至圖 5-5 分別顯示了在各氣候變遷情境下的住宅部門溫室氣體排放趨勢預測，由於國發會之人口預測僅推估至 2061 年，以下的趨勢推估僅呈現 2000 年至 2061 年的結果。

壹、短期程與中期程（2000 年至 2030 年）

以下之結果先行以目前臺灣的發電結構作預測，以 2016 年的電力排放係數 0.529 公斤 CO₂e/度作為未來電力排放係數的推估值。總體來說，在 2030 以前住宅部門的溫室氣體排放量上升主要與人口增長、家戶收入增加有關。在低排放 RCP2.6 情境下，自 2017 年至 2030 年間的溫室氣體排放量平均年增率為 0.74-1.09%，中排放情境 RCP4.5 則為 0.85-1.19%，而高排放情境 0.10-0.44%。以分佈區間的上限值而言，也就是最高推估值，溫室氣體排放量於 RCP2.6 情境下在 2028 年達到高峰，約為 3458 萬公噸，於 RCP4.5 情境下在 2027 年達到高峰值 3424 萬公噸，於 RCP8.5 情境下在 2028 年達到高峰值 3505 萬公噸。由上述結果可知，以短、中期程而言，若未採取相關的溫室氣體減緩或調適策略，住宅部門的溫室氣體將由 2016 年的 2967 萬公噸成長至 2020 年的 3084 萬公噸，在 2030 年持續增長至 3267 萬公噸左右，其增量相較於 2005 年的 2871 萬公噸，2020 年與 2030 年的溫室氣體增量分別為 7.42% 與 13.79%。

貳、長期程（2031 年至 2061 年）

長期的溫室氣體排放趨勢本研究以 2031-2045 年與 2046-2061 年兩個區間作討論。2031 年開始因人口開始出現負成長，氣候逐漸成為影響溫室排放趨勢的主導因子，2031 年至 2045 年間，在低排放 RCP2.6 情境下，溫室氣體排放量逐漸下降，平均年成長率為 -0.66 至 -0.24%，15 年平均的溫室體排放量為 3154 萬公噸；中排放情境 RCP4.5 的最低推估值年成長率為 -0.16%，而最高推估值平均而言仍為呈現正成長，成長率約為 0.26%，期間平均溫室體排放量為 3245 萬公噸；高排放情境 RCP8.5 下溫室氣體排放量仍未下降，年平均成長率為 0.31-0.73%，平均的溫室體排放量為 3325 萬公噸。

2046 年以後三個氣候變遷情境的氣候背景值差異持續擴大，且人口數逐年下降，低排放情境 RCP2.6 與中排放情境 RCP4.5 的溫室氣體排放量呈現逐年減少的趨勢，平均年成長率分別為 -1.08% 至 -0.54%、-0.84% 至 -0.31%，平均排放量則分別為 2918 萬公

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

噸與 2971 萬公噸；在高排放 RCP8.5 情境下，儘管全國的人口減少，溫室氣體排放量仍維持在 3154 萬公噸左右。由上述分析可知，若為達到《溫室氣體減量及管理法》的標準於 2050 年減量至 2005 年溫室氣體排放量的 50%，也就是 1435 萬公噸，住宅部門勢必得採取調適策略以達到此目標。

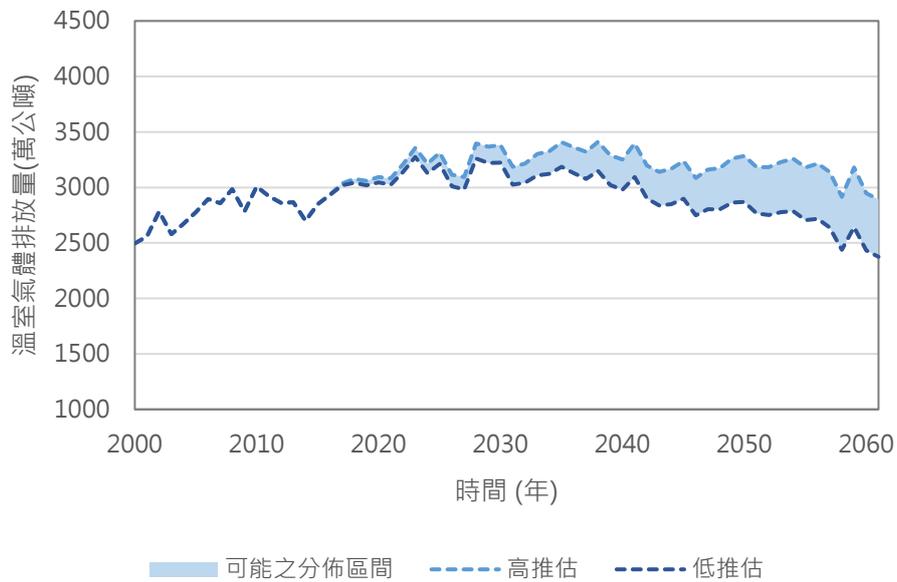


圖 5-3 在低排放 RCP2.6 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢
(資料來源：本研究整理)

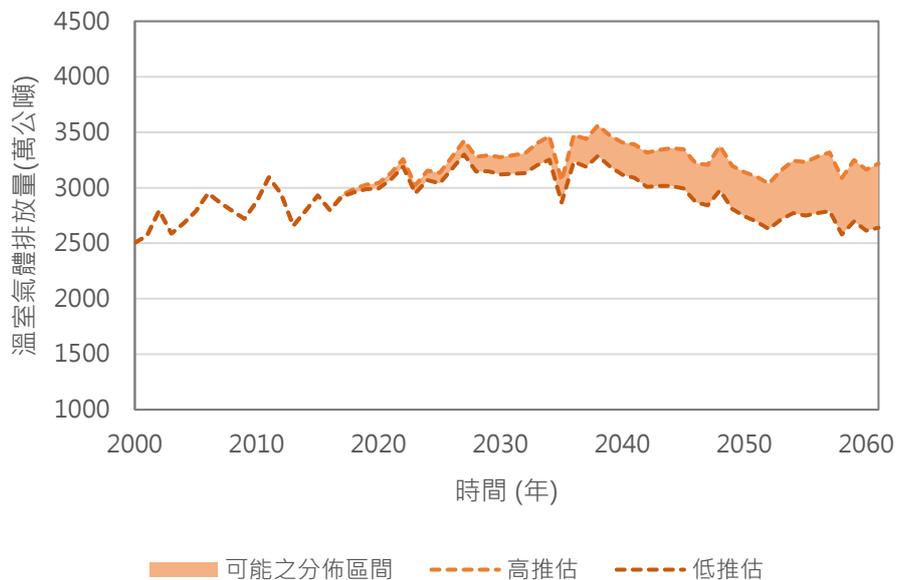


圖 5-4 在中排放 RCP4.5 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢
(資料來源：本研究整理)

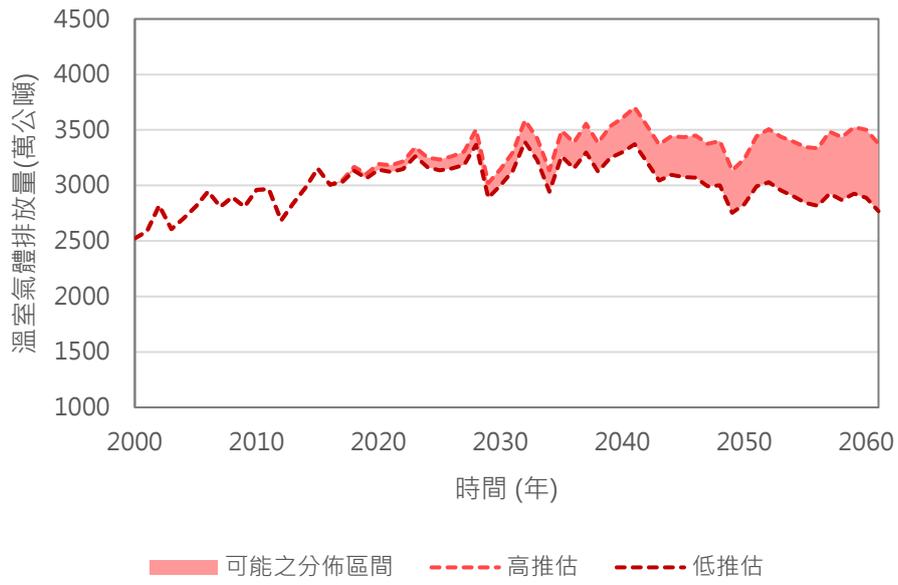


圖 5-5 在高排放 RCP8.5 情境下之住宅部門溫室氣體排放趨勢
(資料來源：本研究整理)

第六章 調適策略

由前章節的分析結果可知，在 2030 年以前人口的成長將達到巔峰，進一步使得溫室氣體排放量上升。《溫室氣體減量及管理法》(以下簡稱溫管法)第 11 條規定，我國應以每五年為一期訂定溫室氣體階段管制目標，而第一期階段管制目標(草案)為 2020 年溫室氣體排放量較基準年(2005 年)減量 2%，也就是說 2020 年的全國溫室氣體淨排放總量降為 260.717 百萬噸碳當量，其他中長期的管制目標如圖 6-1 所示。針對住商部門而言，2020 年的管制目標為 57.53 百萬公噸，若參考經濟部統計的歷年全國溫室起體排放量(含電力消費)，住宅部門平均約占全國的 11.49%，商部門則占了 11.96%，以此為依據計算出在 2020 年住宅部門的溫室氣體排放量需控制在 28.18 百萬公噸。

為了抑制溫室氣體的增量，本研究針對四個項目提出溫室氣體減量調適策略，其中包含建築外殼熱性能改善、空調效率提升、家電設備效率提升與照明效率提升，以下將逐項分別作說明，並呈現在氣候改變之情境下，與其他社會經濟層面影響自 2016 至 2030 之預期減量效果，以下的假設為中推估人口數與中度溫室氣體排放情境 RCP4.5。

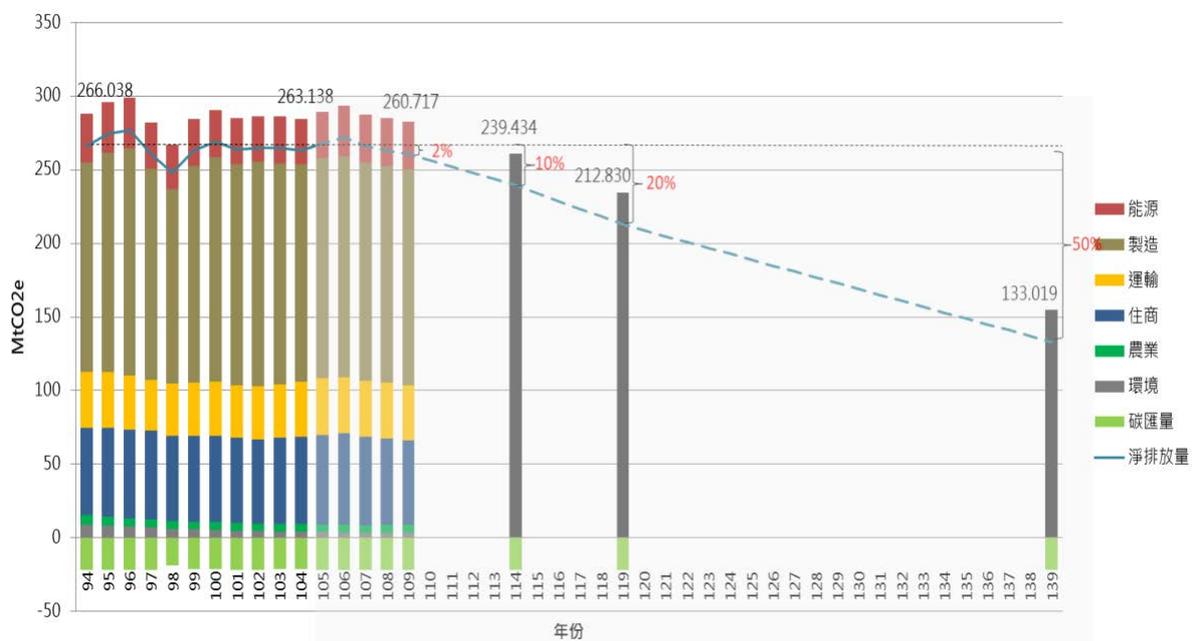


圖 6-1 臺灣六大部門溫室氣體排放現況與短中長期減量目標
(資料來源：環保署)

根據第一期的溫室氣體減量推動方案（草案）其中提到能源部門評量指標為 2020 年再生能源設置量為 10,875 MW，發電量為 252 億度；2025 年設置量為提升至 27,423 MW，發電量為 546 億度，發電占比為 20%。而 2016-2020 年的電力排放係數階段目標由 2016 年的 0.529 公斤 CO₂e/度降至（年平均）0.517 公斤 CO₂e/度，故後續提出的調適策略效果計算則以 0.517 公斤 CO₂e/度作為基準。

第一節 建築外殼熱性能改善

建築外殼節能設計的目的在於降低通過建築物外殼傳輸到室內空間的每平方米外殼面積的平均全季總傳遞熱。平均總傳遞熱有三個主要組成部分：(1)通過不透光外牆的傳導熱、(2)通過開窗的傳導熱、和(3)通過開窗的太陽輻射熱，而我們可透過下列變數加以描述建築物外殼設計與熱性能之間的關係，包括窗牆比(WWR)、外牆的平均熱傳透率(U_w)、玻璃的平均熱傳透率(U_f)、玻璃日射透過率(SHGC)、外遮陽係數(K)和方位等 6 個變數。在建築技術規則第 308 條之二提供了規定式路徑來指導建築物建築外殼節約能源設計，以本文的研究對象住宿類建築來說，在規定式路徑的方法中，建築設計通常必須滿足一些要求，因此規定外牆的平均熱傳透率(U_w)、立面開窗的平均熱傳透率(U_f)及平均遮陽係數(SF)應低於所列的基準值，而平均遮陽係數(SF)的計算公式如下：

$$SF = \frac{\sum_i (K_i \times \eta_i \times A_{f,i})}{A_f} \quad \text{式 六-1}$$

其中 K_i 為開窗部位 i 的外遮陽日射透過率修正係數，η_i 為開窗部位 i 的玻璃日射透過率，A_{f,i} 為開窗部位 i 的開窗面積，A_f 為總開窗面積。

由於經建築外殼傳遞至室內的熱負荷與空調耗能具有一定關係，本研究將各建築外殼因子與該外殼設計對應的當代空調耗能（2000 年至 2016 年的平均值）作多元回歸分析，建立一建築外殼與熱負荷的關係式，而此關係式亦能直接反映該建築外殼設計下空調所消耗的能源，關係式如式 六-2 所示：

$$Y = a \times (1 - WWR) \times U_w + b \times WWR \times U_f + c \times (\sum WWR \times \eta \times fk \times Ki)$$

式 六-2

其中 WWR 為窗牆比， U_w 為外牆的平均熱傳透率， U_f 為玻璃的平均熱傳透率， η 為玻璃之日射透過率，fk 為 k 方位之日射修正係數， K_i 為開窗部位 i 之外遮陽日射透過率修正係數，a、b、c 為多元迴歸分析後計算出的各項係數，依據不同地理分區獲得之係數羅列如表 6-2。式 六-2 中等號右側第一大項反映經由外牆傳導至室內的熱量，第二大項則反映經由玻璃傳至室內的熱量，最後一項反映穿透玻璃之熱輻射的熱量取得，而這三大項即為建築外殼主要的熱得來源。一旦此關係式建立，我們便可借助此關係式量化各項外殼設計因子對於降低空調耗能的貢獻，以便調整目前規範各項建築外殼因子的標準。

表 6-1 住宿類建築的 U_w 、 U_f 和 SF 基準值

項目	WWR					
	WWR>0.5	0.4<WWR≤0.5	0.3<WWR≤0.4	0.2<WWR≤0.3	0.1<WWR≤0.2	WWR≤0.1
U_w (W/m ² -K)	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
U_f (W/m ² -K)	2.7	3	3.5	4.7	5.2	6.5
SF	0.1	0.15	0.25	0.35	0.45	0.55

(資料來源：建築技術規則)

表 6-2 多元迴歸分析獲得之各項係數

地理分區	係數		
	a	b	c
北	2.462	0.208	0.479
中	3.050	-0.440	0.710
高	3.632	-0.381	0.854

(資料來源：本研究整理)

由於前述的溫室氣體預測僅考慮既有建築的貢獻量，並未考量每年會有部份舊建築拆除並更新為新建物的過程，故以下分別根據不同的更新率去修正原本的預測結果，

而新建物的外殼水準則直接參考建築技術第 308 條之二的規範，分析結果如圖 6-2 所示。圖例的建築更新率所指的是每年有多少比例外殼熱性能表現較差的建築被拆除，替換成表現良好的新建物，而假定之建築更新率為 1 至 5% 不等。圖 6-2(A) 中所得的溫室氣體減量為相減於基準年（即建築更新率 = 0%）而得的差值；圖 6-2(B) 所呈現的，為圖(A)經各項社會層面驅動因子換算後，貢獻於全國住宅部門的溫室氣體排放量。由結果可知，在同樣的建築外殼規範下，不同的建築更新率貢獻的減量效果差異頗大，以 2030 年而言，若建築更新率為 1%，溫室氣體將減少 31.2 萬公噸，若進一步將更新率提升到 5%，減少的溫室氣體排放量可來到 121.9 萬公噸，故重建老舊瀕危建築物，不僅僅為改善居住環境、提升建築安全，亦有助於住宅部門的溫室氣體減量。

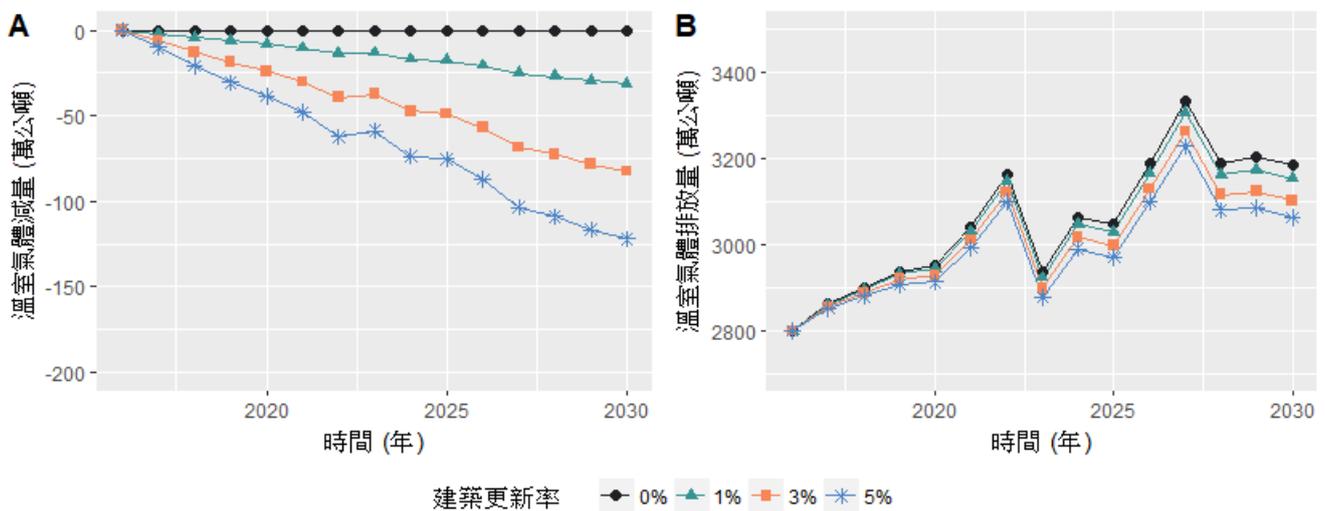


圖 6-2 目前法規所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

由上圖的結果可知現階段法規所達到的減量效果，而本研究進一步調整目前建築技術規則第 308 條之二所規範的 U_w 、 U_f 和 SF 基準值，選定三個不同程度的修訂組合羅列如表 6-3 至表 6-5，分別探討各組合的溫室氣體減量效果。基準值修訂後差異最小的結果如表 6-3 所示，其中外牆的平均熱傳透率由原本的 $2.75 \text{ W/m}^2\text{K}$ 調整至 $2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ，原訂定之玻璃的平均熱傳透率與 SF 值因隨著窗牆比而變動，調整後的玻璃平均熱傳透率與 SF 值為原訂標準調降 10%，其貢獻的溫室氣體減量效果如圖 6-3 所示。圖 6-3 (A) 中所得的溫室氣體減量為相減於基準年（未進行任何調適策略，即建築更新率 = 0%）而得的差值，同樣假定建築逐年的更新率為 1 至 5% 不等；圖 6-3 (B) 的結果為

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

應用調整後之法規標準，並且考慮人口與經濟成長的影響下，全國住宅部門的溫室氣體排放總量，若建築更新率為 5%，在 2030 年減少的溫室氣體排放量可達 135.4 萬公噸。

表 6-3 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(1)

項目	WWR					
	WWR>0.5	0.4<WWR≤0.5	0.3<WWR≤0.4	0.2<WWR≤0.3	0.1<WWR≤0.2	WWR≤0.1
U_w (W/m^2-K)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
U_f (W/m^2-K)	2.43	2.7	3.15	4.23	5.85	5.85
SF	0.09	0.135	0.225	0.315	0.495	0.495

(資料來源：本研究整理)

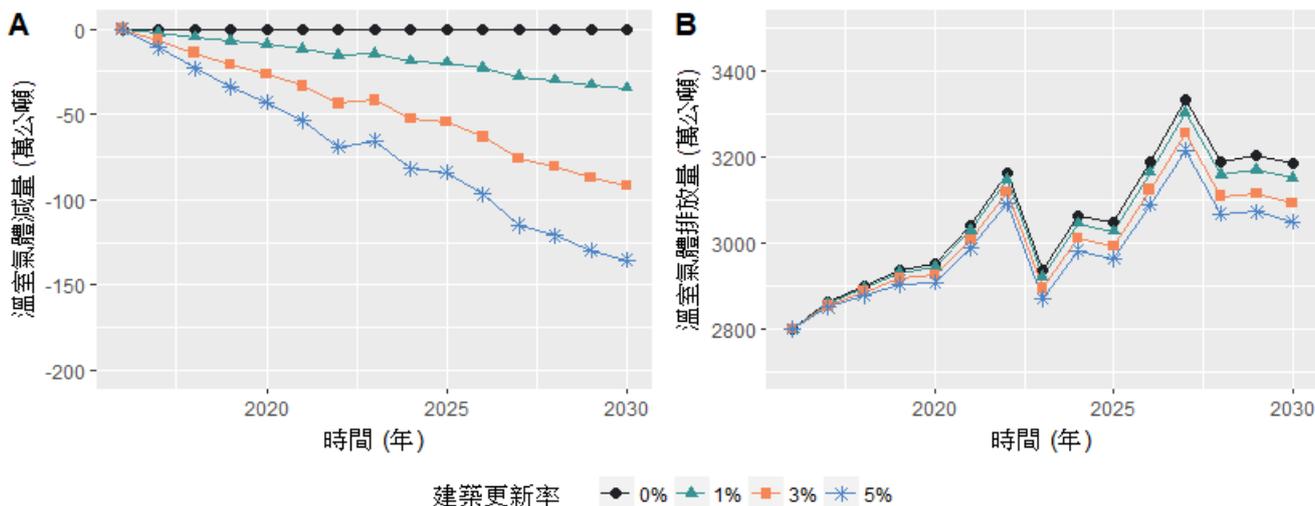


圖 6-3 修訂標準(1)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

表 6-4 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(2)

項目	WWR					
	WWR>0.5	0.4<WWR≤0.5	0.3<WWR≤0.4	0.2<WWR≤0.3	0.1<WWR≤0.2	WWR≤0.1
U_w (W/m^2-K)	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
U_f (W/m^2-K)	2.16	2.4	2.8	3.76	5.2	5.2
SF	0.08	0.12	0.2	0.28	0.44	0.44

(資料來源：本研究整理)

表 6-4 所示的為第二組修訂標準，其中外牆的平均熱傳透率由原本的 $2.75 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 調整至 $2.25 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，調整後的玻璃平均熱傳透率與 SF 值為原訂標準調降 20%，其貢獻的溫室氣體減量效果如圖 6-4 所示。

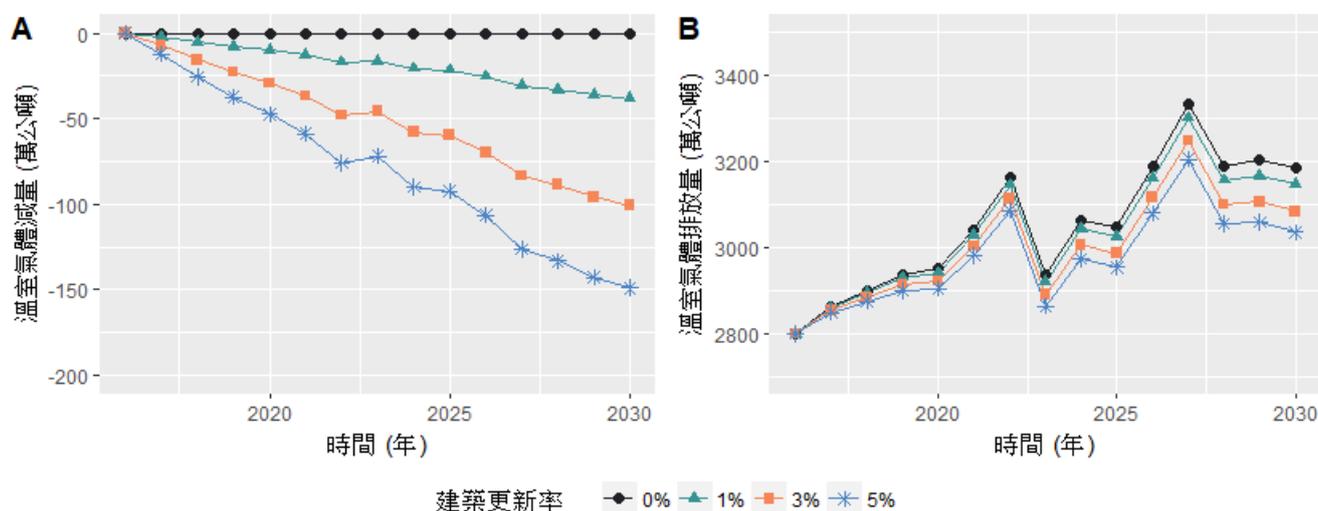


圖 6-4 修訂標準(2)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

表 6-5 所示的為第三組修訂標準，其中外牆的平均熱傳透率由原本的 $2.75 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 調整至 $2.0 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，調整後的玻璃平均熱傳透率與 SF 值為原訂標準調降 30%，其貢獻的溫室氣體減量效果如圖 6-5 所示。由圖 6-5(B)可知，若每年的建築更新率維持在 5%，於 2030 年的全國住宅部門溫室氣體能夠減少約 162 萬公噸的排放量。

表 6-5 修訂後的住宿類 U_w 、 U_f 和 SF 基準值-(3)

項目	WWR					
	$WWR > 0.5$	$0.4 < WWR \leq 0.5$	$0.3 < WWR \leq 0.4$	$0.2 < WWR \leq 0.3$	$0.1 < WWR \leq 0.2$	$WWR \leq 0.1$
U_w ($\text{W/m}^2\text{-K}$)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
U_f ($\text{W/m}^2\text{-K}$)	1.89	2.1	2.45	3.29	4.55	4.55
SF	0.07	0.105	0.175	0.245	0.385	0.385

(資料來源：本研究整理)

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

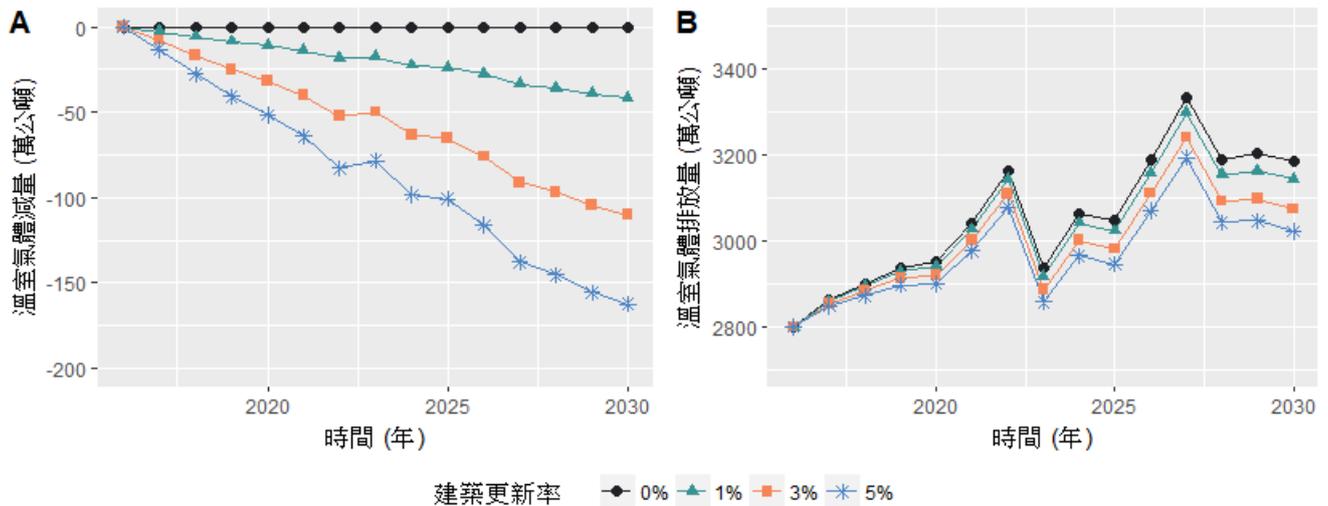


圖 6-5 修訂標準(3)所貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

第二節 空調能效提升

本研究參考窗(壁)型冷氣機能源效率分級基準，如表 6-6 所示，考量到目前住宅普遍使用的空調形式包含單體式與分離式，因此本研究設定整體之空調能效為 COP = 3.3，分別是 2 級能效的單體式空調與 4 級能效的分離式空調。若考慮未來科技技術提升，逐年更新部份空調設備，此方法亦為降低住宅耗能與住宅部門溫室氣體排放量的

表 6-6 窗(壁)型冷氣機能源效率分級基準表

機種	冷氣能力分類 (kW)	能源效率比 (W/W)				
		5 級	4 級	3 級	2 級	1 級
各等級基準						
單體式	2.2 以下	低於 2.95	2.95 以上，低於 3.10	3.10 以上，低於 3.25	3.25 以上，低於 3.40	3.40 以上
	高於 2.2，4.0 以下					
	高於 4.0，7.1 以下					
	高於 7.1，10.0 以下					
分離式	4.0 以下	低於 3.45	3.45 以上，低於 3.69	3.69 以上，低於 3.93	3.93 以上，低於 4.17	4.17 以上
	高於 4.0，7.1 以下	低於 3.20	3.20 以上，低於 3.42	3.42 以上，低於 3.65	3.65 以上，低於 3.87	3.87 以上
	高於 7.1	低於 3.15	3.15 以上，低於 3.37	3.37 以上，低於 3.59	3.59 以上，低於 3.81	3.81 以上

註：上表適用範圍為消耗電功率 3kW 以下之單體式窗(壁)型冷氣機及分離式窗(壁)型冷氣機。

(資料來源：經濟部能源局)

策略。圖 6-6 至圖 6-8 所示分別為空調能效 COP 提升至 3.6、3.9 和 4.2 所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-6 (A) 為例，若空調能效 CO 提升至 3.6，意即空調系統以較少的能源便可維持室內的熱舒適性，圖例的空調更新率所指的是每年有多少比例能效表現較差的空調被拆除，替換成表現良好的空調設備 (COP=3.6)，而假定之空調更新率為 1 至 5% 不等，溫室氣體減量則是相減於基準年 (未進行任何調適策略，即空調更新率 = 0%) 而得的差值；圖 6-6 (B) 所呈現的，為應用調適策略後，並且考慮人口與經濟成長的影響下，貢獻於全國住宅部門的溫室氣體排放總量。

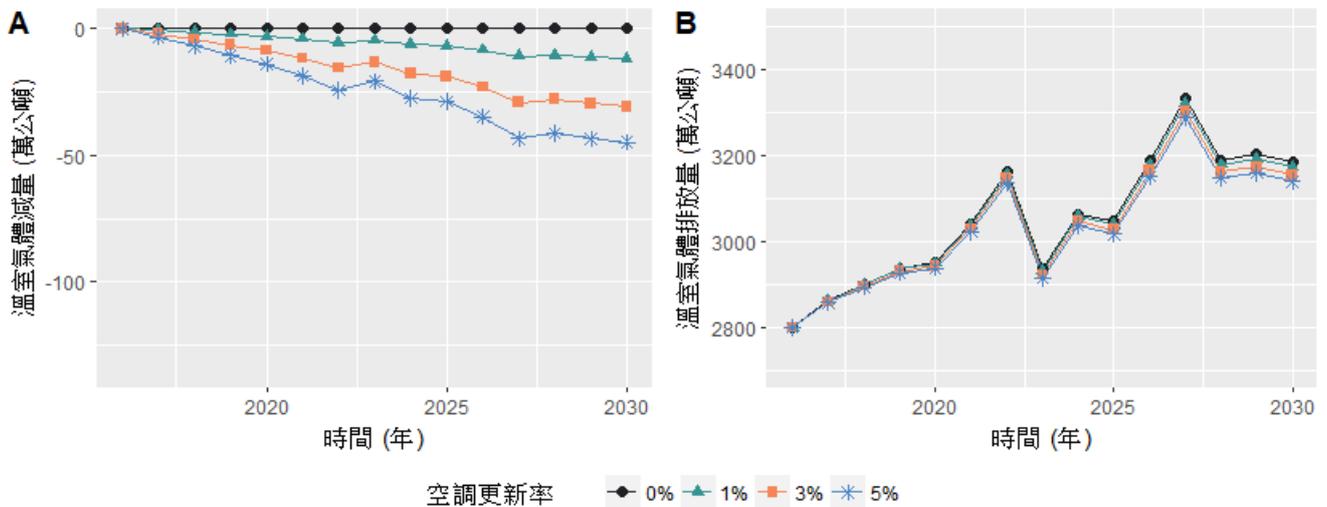


圖 6-6 空調 COP = 3.6 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

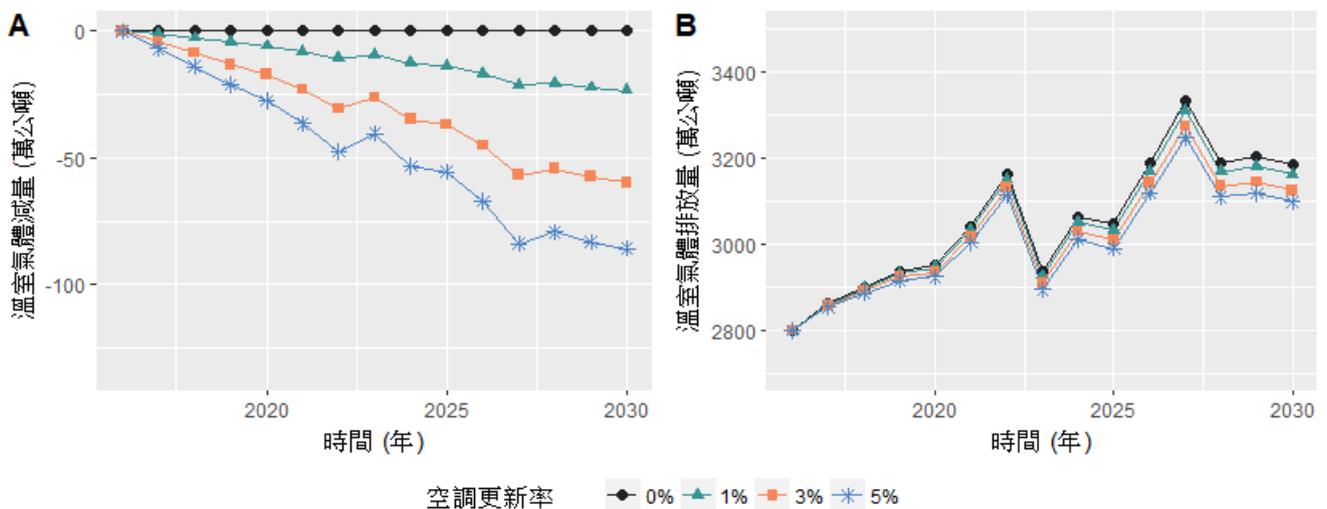


圖 6-7 空調 COP = 3.9 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

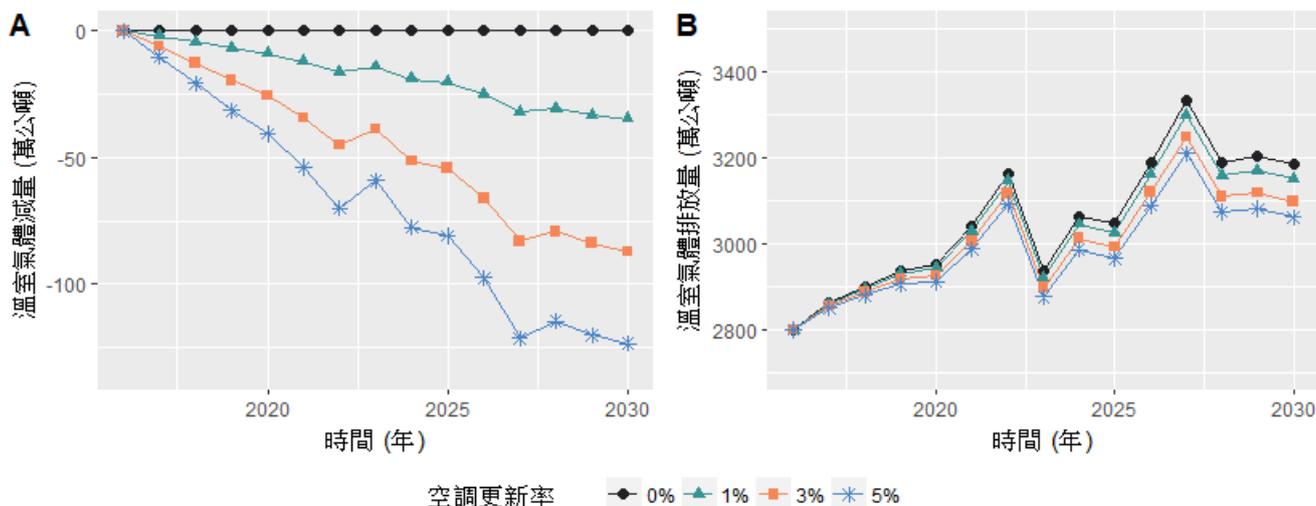


圖 6-8 空調 COP = 4.2 貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量 (資料來源：本研究整理)

調適程度最大的結果如圖 6-8 所示，為空調能效 COP 提升至 4.2 所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-8(B)為例，若每年的空調更新率維持在 5%，於 2030 年的全國住宅部門溫室氣體能夠減少約 123.5 萬公噸的排放量。

第三節 家電設備效率提升

根據前述的分析可知，家電設備的耗能最終會貢獻於住宅部門的溫室氣體排放量，參考郭柏巖 (2005) 針對家電設備的調查，最後換算得每年由家電設備消耗的住宅能源密度為 21.91 kWh/m²，若考慮未來科技技術提升，逐年更新部份家電設備，亦為降低溫室氣體排放量的策略。以一台約 560 公升電冰箱為例，購買第一級的電冰箱相較於第五級電冰箱，節能率可達 40%，一年可省下約 304 kWh 的電。

圖 6-9 至圖 6-12 所示為設備節能效率提升至 10 至 40% 不等所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-9(A)為例，若設備節能效率提升 10%，也就是說供於設備使用之能源用量下降，而圖例的設備更新率所指的是每年有多少比例效率較差的家電設備，替換成較為節能的設備，溫室氣體減量則是相減於基準年 (未進行任何調適策略，即設備更新率 = 0%) 而得的差值；圖 6-9(B)所呈現的，為應用調適策略後，並且考慮人口與經濟成長的影響下，貢獻於全國住宅部門的溫室氣體排放總量。

調適程度最大的結果如圖 6-12 所示，為設備節能效率提升 40% 所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-12 (B) 為例，若每年的家電設備更新率維持在 5%，於 2030 年的全國住宅部門溫室氣體能夠減少約 241.8 萬公噸的排放量。

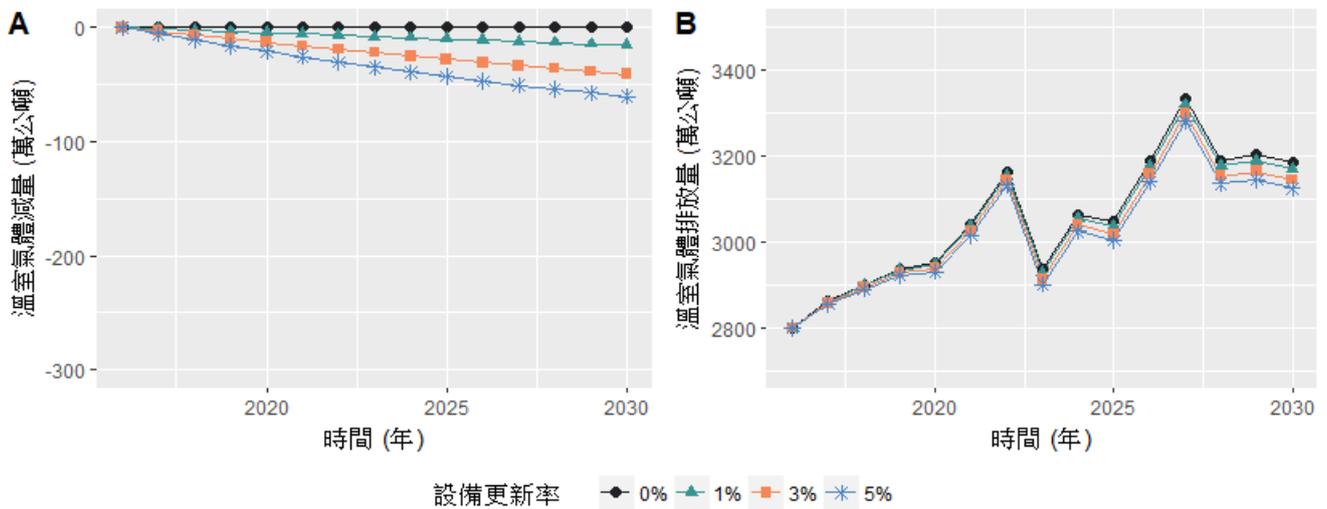


圖 6-9 設備節能率提升 10% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量 (資料來源：本研究整理)

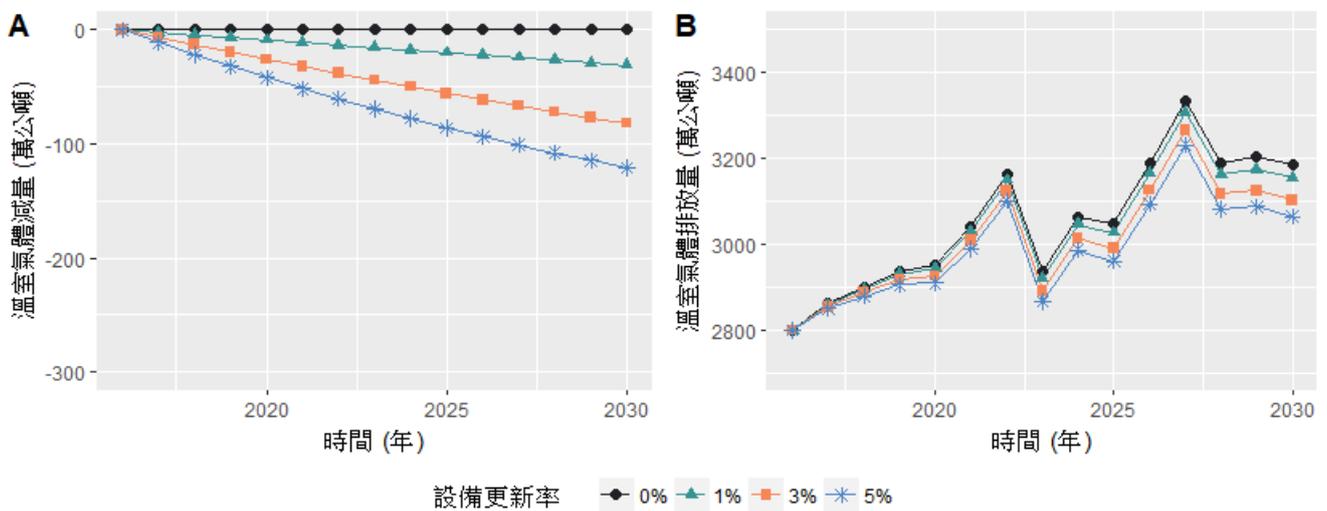


圖 6-10 設備節能率提升 20% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量 (資料來源：本研究整理)

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

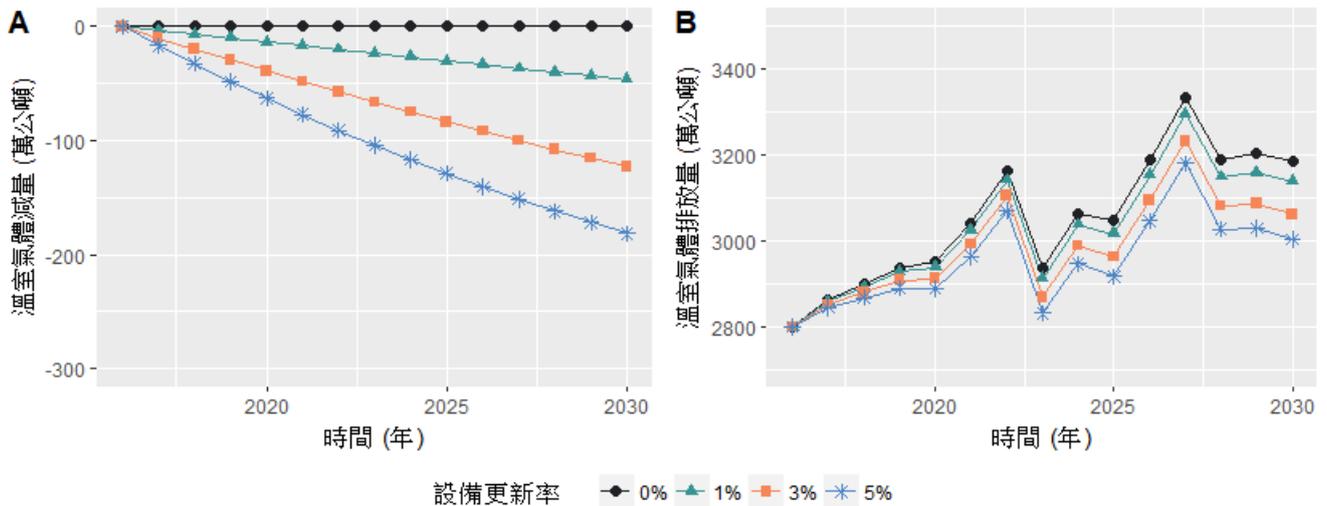


圖 6-11 設備節能率提升 30%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

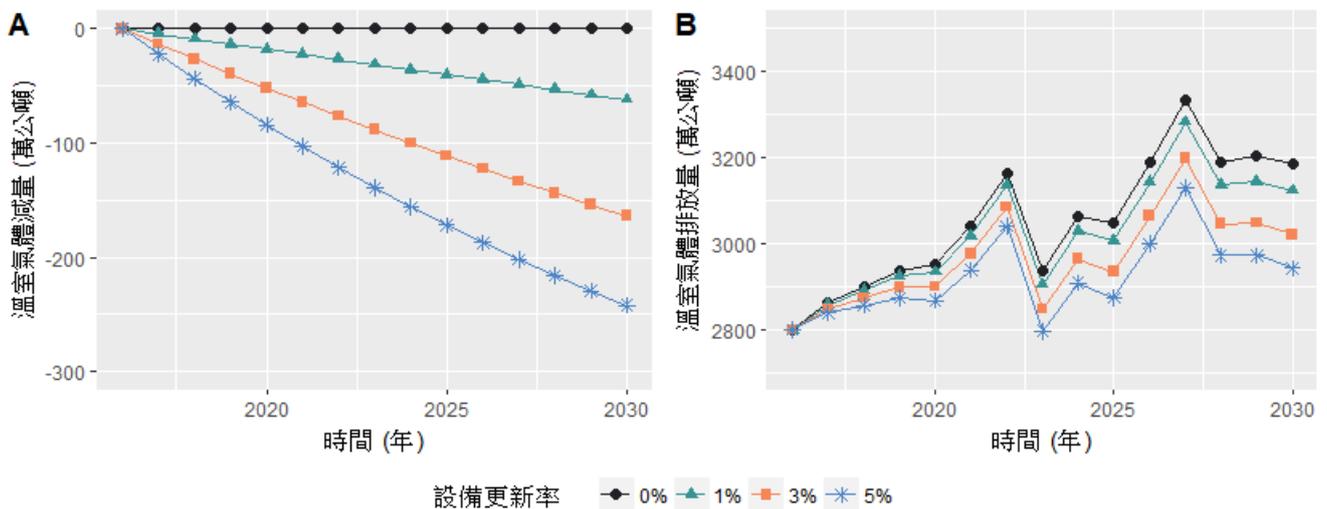


圖 6-12 設備節能率提升 40%貢獻的(A)溫室氣體減量與(B)住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

第四節 照明效率提升

根據前述的分析可知，照明燈具的耗能最終會貢獻於住宅部門的溫室氣體排放量，本研究針對照明的設定亦參考郭柏巖（2005）研究結果，最後換算得每年由照明燈具消耗的住宅能源密度為 13.02 kWh/m²，若考慮科技技術提升，逐年更新部份照明燈具亦為降低溫室氣體排放量的策略。以家庭燈具搭配一般 23W 省電燈泡為例，使用第一級產品 4 顆相當於使用第五級產品 6 顆的總輸出光量，約可省下 33%的耗電量。圖 6-13

至圖 6-16 所示為照明燈具節能效率提升至 10 至 40% 不等所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-13 (A) 為例，若照明節能效率提升 10%，也就是說供於照明使用的能源用量下降，而圖例的照明更新率所指的是每年有多少比例效率較差的照明設備，替換成較為節能的燈泡，溫室氣體減量則是相減於基準年（未進行任何調適策略，即照明更新率 = 0%）而得的差值；圖 6-13 (B) 所呈現的，為應用調適策略後，並且考慮人口與經濟成長的影響下，貢獻於全國住宅部門的溫室氣體排放總量。

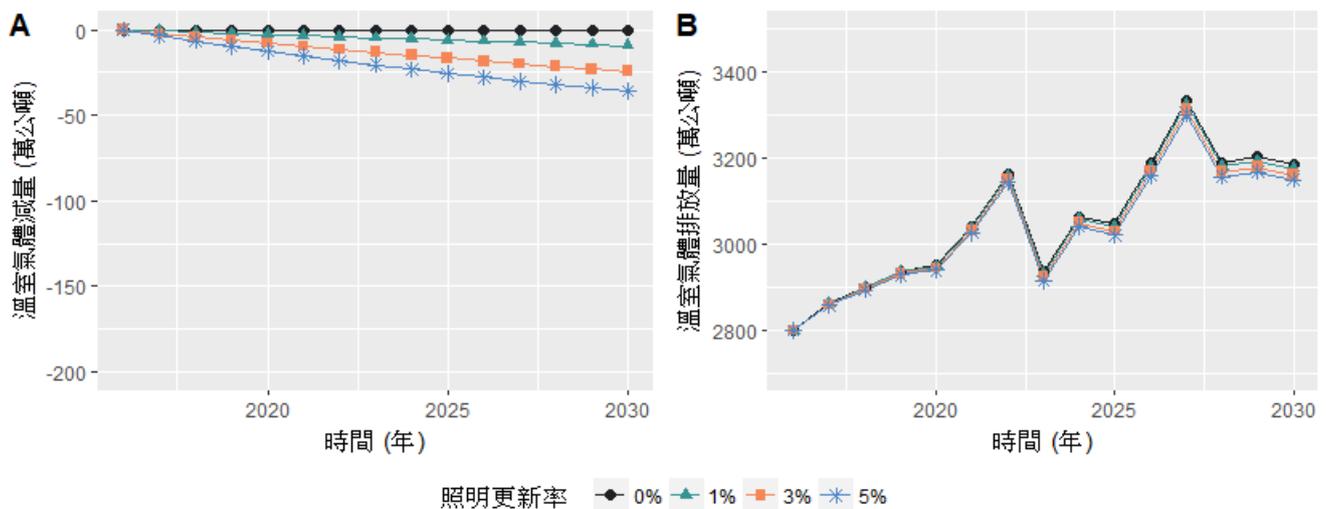


圖 6-13 照明節能率提升 10% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

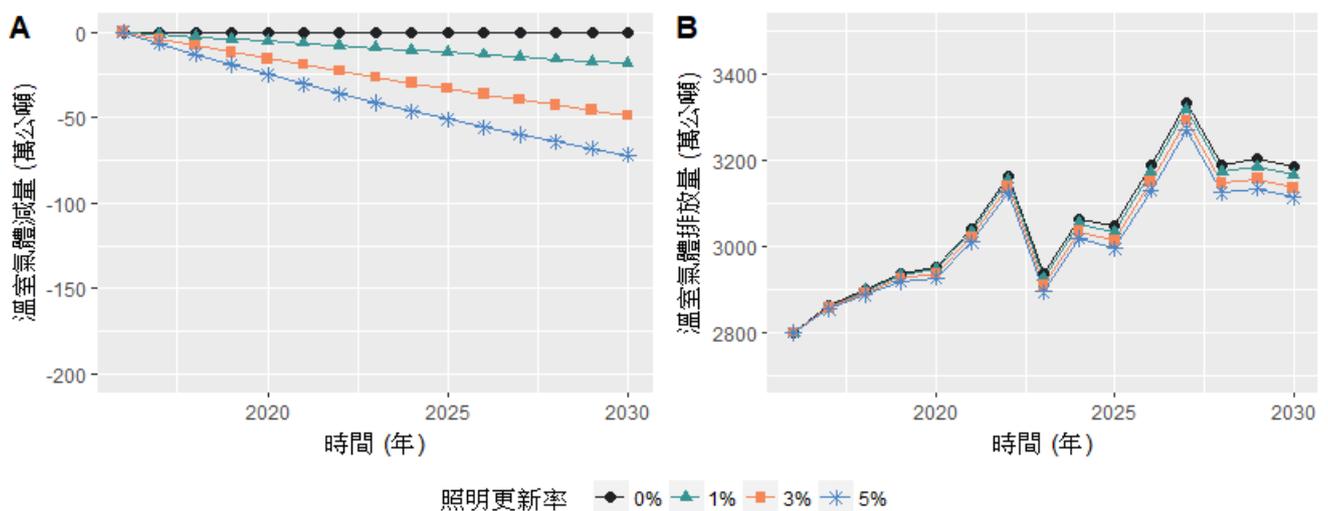


圖 6-14 照明節能率提升 20% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量
(資料來源：本研究整理)

調適程度最大的結果如圖 6-16 所示，為照明燈具節能效率提升 40% 所貢獻於全國的溫室氣體減量。以圖 6-16 (B) 為例，若每年的照明燈具更新率維持在 5%，於 2030 年的全國住宅部門溫室氣體能夠減少約 143.7 萬公噸的排放量。

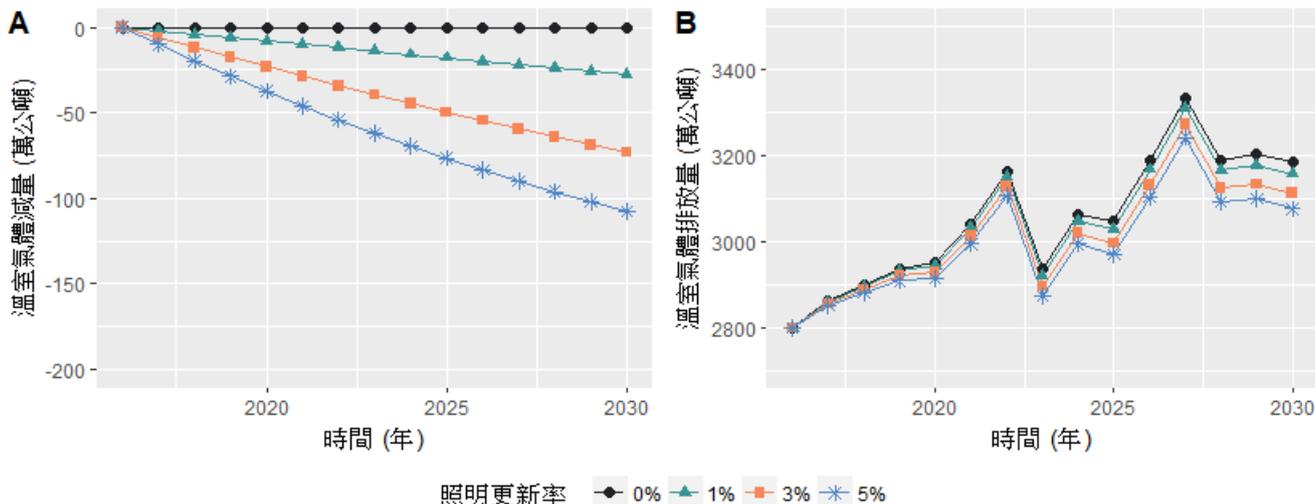


圖 6-15 照明節能率提升 30% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量 (資料來源：本研究整理)

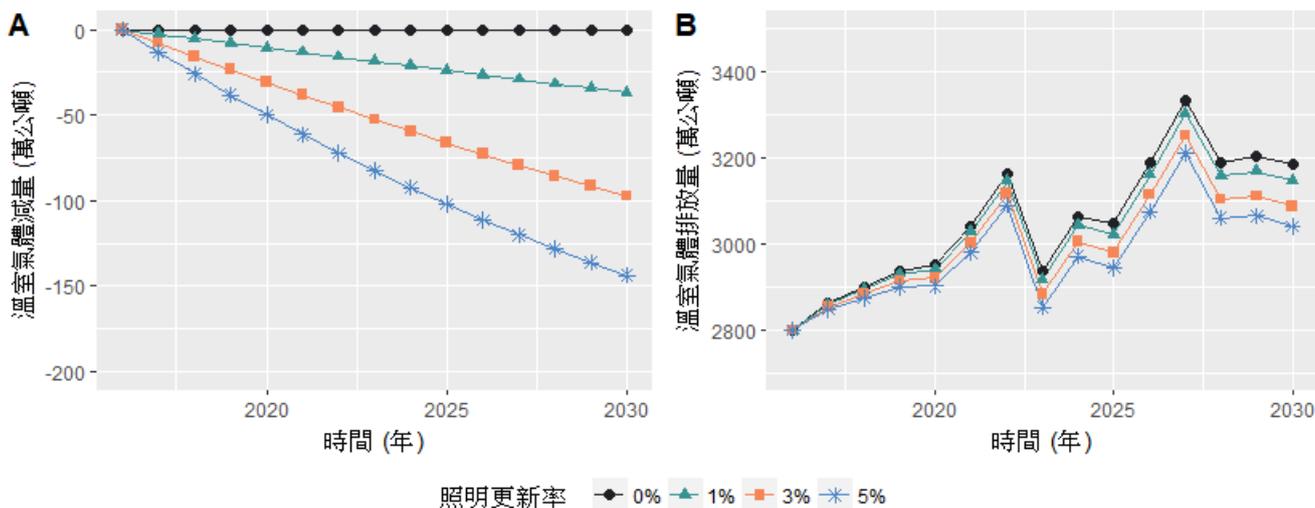


圖 6-16 照明節能率提升 40% 貢獻的 (A) 溫室氣體減量與 (B) 住宅部門溫室氣體排放量 (資料來源：本研究整理)

第五節 綜合調適效果

根據前述各個調適方向，我們可針對不同項目作改善以達到溫室氣體減量之目的。為提供更全面的調適策略，本研究選出以下兩組改善強度分別為中度、高度之綜合調

適方案，並呈現在氣候改變之情境下，與其他社會經濟層面影響自 2016 至 2030 之預期溫室氣體減量效果，詳細的調適項目羅列如表 6-7、表 6-8。

表 6-7 調適組合(1)各項設定值 — 中度減量效果

項目	描述	逐年更新率
外殼熱性能	法規加嚴 10%	3%
空調能效	節能率提升 20%	3%
家電設備效率	節能率提升 20%	3%
照明效率	節能率提升 20%	3%

(資料來源：本研究整理)

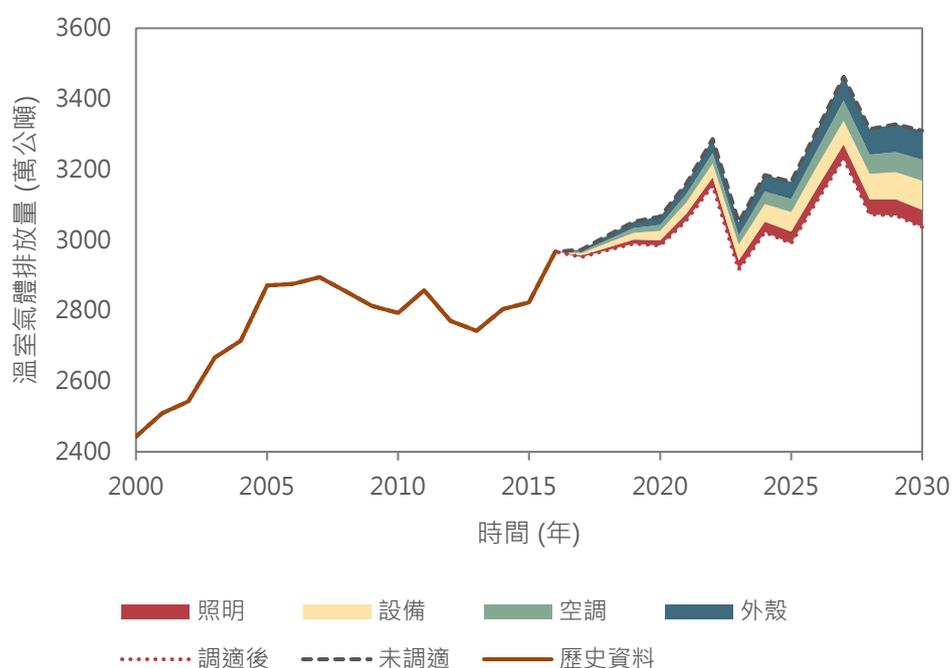


圖 6-17 應用調適組合(1)之住宅部門溫室氣體排放趨勢

(資料來源：經濟部能源局，本研究整理)

本研究提出的兩組綜合調適方案之住宅部門溫室氣體排放趨勢如圖 6-17、圖 6-18 所示，圖中由線段組成的黑色虛線標示的為由本模型推估未應用調適組合的溫室氣體排走勢，由圓點組成的紅色虛線則為調適後的溫室氣體排放量，各個色塊則對應各項目達到的減量效果，以最下層的區塊而言，即對應到照明節能效率提升的減緩效果，圖中橘色實線標示為 2000 年至 2016 年的數據則由經濟部能源局的歷史資料。

以圖 6-17 為例，圖中顯示的採取中度減量效果的調適組合(1)，以 2020 年而言，如果不應用任何調適策略，住宅部門的溫室氣體排放量將來到 3066 萬公噸，依序提升建築外殼熱性能(法規加嚴 10%)、空調能效(提升 20%)、家電設備效率(提升 20%)、照明效率(提升 20%)，每項調適策略分別造成 23.9、17.3、25.9、15.4 萬公噸的溫室氣體減量，故在應用中度減量效果的調適組合(1)之後，2020 年的住宅部門溫室氣體可望降至 2984 萬公噸；若持續實施此調適組合，2030 年的溫室氣體排放量將由原本模式推估的 3310 萬公噸減少至 3037 萬公噸。再進一步檢視各項調適策略的減量比例，提升設備效率的減量比例最大，占整體的 31%，其次是改善外殼熱性能占比 29%，再次之為提升空調效率與照明效率，分別占了 22% 與 18%。

表 6-8 調適組合(2)各項設定值 — 高度減量效果

項目	描述	逐年更新率
外殼熱性能	法規加嚴 30%	5%
空調能效	節能率提升 30%	5%
設備效率	節能率提升 40%	5%
照明效率	節能率提升 40%	5%

(資料來源：本研究整理)

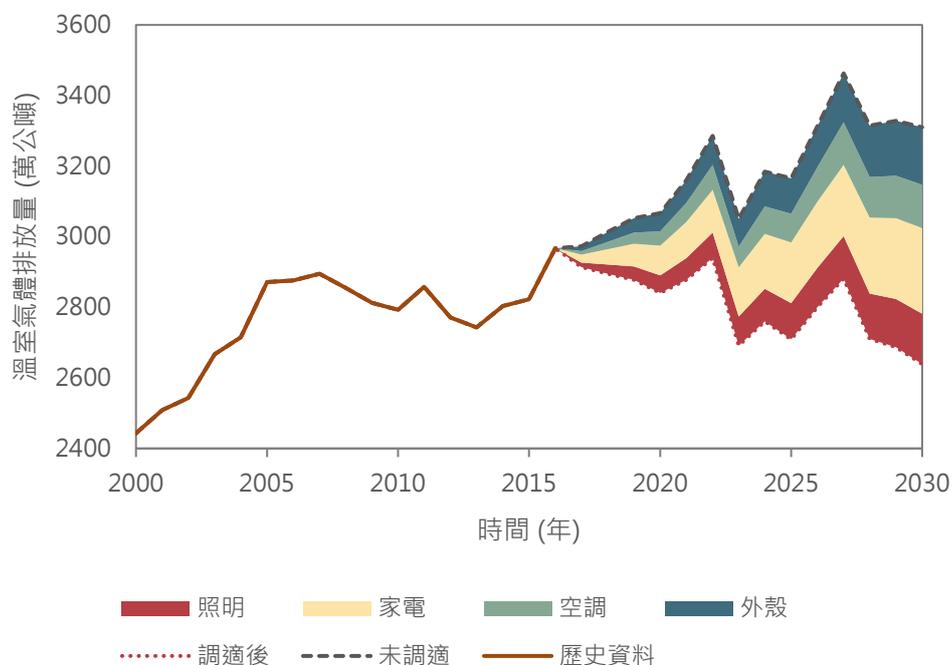


圖 6-18 應用調適組合(2)之住宅部門溫室氣體排放趨勢

(資料來源：經濟部能源局，本研究整理)

若採取更為嚴謹的高度減量效果調適組合(2)，其對應的減量趨勢如圖 6-18 所示，以 2020 年為例，應用調適組合之前溫室氣體排放量為 3066 萬公噸，依序提升建築外殼熱性能（法規加嚴 30%）、空調能效（提升 30%）、家電設備效率（提升 40%）、照明效率（提升 40%），若各個調適策略能維持再逐年更新率 5% 的水準，各個調適策略分別能貢獻 51.5、40.7、84.0、50.0 萬公噸的溫室氣體減量，所以在應用高度減量效果的調適組合(2)之後，2020 年的住宅部門溫室氣體可望控制在 2840 萬公噸，並進一步在 2030 年的溫室氣體排放量從原本模式推估的 3310 萬公噸減少至 2638 萬公噸。逐一檢視各項調適策略的減量比例，提升設備效率的減量比例仍占據第一，占整體的 37%，其次是改善外殼熱性能占比 23%，再次之為提升照明效率與空調效率，分別占了 22% 與 19%。

以《溫室氣體減量及管理法》的短期減量目標而言，於 2020 年溫室氣體排放量管制標準為 2818 萬公噸，由前述的兩組調適策略組合的結果來看，僅有高度減量效果的調適組合(2)有機會達成管制目標，並且是在逐年更新率維持在 5% 的前提下才有望達標；然而 2030 年的中期目標為基準年（2005 年）的 80%，假設減量比例由各部門均攤，住宅部門的溫室氣體排放量在 2030 年需降至由歷史資料換算而得的 2547 萬公噸，而由前述的兩組調適組合皆無法達成減量目標。

由前述的結果可發現，不論是何種改善程度的調適策略，逐年更新率為達成減量效果的重要因素，須仰賴政府的推廣與民眾的配合才能達到一定的更新率；而空調系統、家電設備與照明燈具的效率提升則需依靠產品開發端的技術進步，倘若上述的用電設備能在源頭達成節能設計，對於 80% 以上的溫室氣體排放來自電力消費的住宅部門將有莫大助益；目前第一期的溫室氣體減量推動方案（草案）其中提到 2016-2020 年的電力排放係數階段目標為（年平均值）0.517 公斤 CO₂e/度，若未來再生能源的占整體發電結構的配比能提升，亦將有助於達成減量目標。

第七章 結論與建議

第一節 結論

本研究為探討氣候變化下住宅部門溫室氣體排放趨勢的預測，以由下往上之推估法，結合社經因素等為外部驅動因子，並考慮各個會影響住宅能源使用之最終用途，建構用於預測未來住宅能源模擬模型。本研究獲之重要結論如下：

1. 未來氣候下人體的熱不舒適度為主要調適目的，而被動式的自然通風與主動式的空調降溫為兩項可行的調適策略以維持人體舒適性。
2. 自下而上的方法由分解部件的層次數據構建，並根據組合而成的數據來估計個別因素對整體能源耗用的影響。此推估模型可用來選擇基於最佳成本效益應用於各個部件的技術和過程，以實現碳排放減量的目標。
3. 本研究分析未來氣候下單位空調耗能的變化趨勢，結果顯示全年單位空調耗能的增加主因在於長時間的空調使用；年尖峰冷房負荷的增量未如空調使用時間的多，然而在冷凍噸數的設計上仍需考慮氣候改變所造成的影響。
4. 若為改善建築外殼的熱性能，依據靈敏度分析的結果，改善之優先順序為玻璃之日射透過率(SHGC)、外遮陽係數(Ki)、外牆平均熱傳透率(Uw)。
5. 因人口、經濟成長與氣候改變三項因子的作用下，各情境之溫室氣體排放量在 2030 年左右達到高峰，約為 34.58 至 33.05 百萬公噸不等；在 2030 年至 2060 年之間，氣候影響更為明顯，在高排放 RCP8.5 情境下，儘管全國的人口減少，溫室氣體排放量仍維持在 33.25 百萬公噸並未減緩。
6. 本研究針對四個項目提出溫室氣體減量調適策略，依序為建築外殼熱性能改善、空調效率提升、設備效率提升與照明效率提升。結果顯示在高度減量效果的綜合調適策略下，2020 的溫室氣體排放量可降至 28.40 萬公噸，但若以《溫室氣體減量及管理法》的長期標準而言，各個項目的減量程度仍需努力。

第二節 建議

根據本研究成果發現，提出下列具體建議，分別從立即可行建議及中長期建議加以列舉如下：

建議一

(研擬因應未來氣候之建築外殼法規相關法規)：立即可行建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：國內各大學或研究機構

在氣候變遷影響下，透過法規規範外殼之改善是必須的。本研究已提出基準值來描述整體的住宅外殼性能，至於如何透過改變個別外殼因子以降低基準值，後續研究則可參考本研究之靈敏度分析結果，作出個別性的調整，以最有效率的方式提升整體住宅外殼熱性能，並進一步評估其對於社會、經濟與環境之衝擊。

建議二

(持續並擴大推廣老舊建築與設備的更新)：中長期建議

主辦機關：內政部建築研究所

協辦機關：內政部營政署、台灣建築中心、經濟部能源局

本研究之研究結果證實，老舊建築的拆除更新與更換節能建築設備有助於改善整體住宅建築外殼熱性能，而逐年建築的更新率為達成減量目標的重要因素，須仰賴政府的推廣與民眾的配合才能達到一定的減量效果。

附錄一 期中審查會議委員意見回覆

項次	評選意見	廠商回應
一	<ol style="list-style-type: none"> 請參考 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 補充說明第 11 頁「溫室氣體」之詳細內容。 同第 11 頁，研究主題「住宅」碳排放，建議可再進一步限制「住宅」研究範圍，在住宅建造完成後家庭生活使用能源之有限範圍，並排除建材、設備及施工過程等項目。 請扼要說明本研究「住宅」之標準化內涵。 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，遵照辦理。 已於研究方法中說明住宅的碳排放範圍，其中排除建材、設備及施工過程等項目。 不論在外殼構造，平面大小或者室內設備，各住宅都存在些許差異，所以本案採用蒙地卡羅法產生大量樣本，即為了解決無法以單一標準住宅來到表所有住宅的問題。
二	<ol style="list-style-type: none"> 終端耗能估算是用家庭戶數或人口數來作考量，也無考慮未來人口高齡化的影響因素，是否需再作調整？ 推估出來的氣候預測是否有驗證其可信度的方法？ 本案企圖自氣候的預測估計溫室氣體排放，進而提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改建議，其推理邏輯的關聯性建議加強說明，且這種標準可能是一次性的，也有可能是分期漸進式的，可能也要配合政府政策及施政目標審慎研議。 簡報第 19 頁，世紀中 (2041-2040) 應為筆誤，請修正。另外 RCP 代表的意義建議於內文說明。 冷氣耗能採用 SF，但 SF 依林憲德教授的說法是構造式的檢討，和用 Req 是性能式的檢討有別，而實際上因採用 SF 檢討的外牆 U 值標準高很多，所以採用的案子很少，是否妥適？ 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員建議，期末報告中的最終之住宅部門終端耗能估算，參考國發會所提供之人口推估報告書，其中已有假定之人考高齡化情境。 感謝委員建議，期末報告中以補充模型驗證的相關說明，以此增加本預測模型之可性度。 感謝委員建議，已將此部份補充於期末報告中。 感謝委員提醒，遵照辦理。 SF 法式是屬於條列式的基準值，本研究採用它是基於它可以分開討論 U 值和遮陽的影響，至於 Req 和 SF 何者較為嚴格，非本研究的範圍與內容。
三	<ol style="list-style-type: none"> 相關文獻資料收集相當完整，若能加入適當專題深入分析探討，可讓政府了解住宅溫室氣體排放趨勢預測與 	<ol style="list-style-type: none"> 感謝委員肯定。 感謝委員建議，本研究團隊將秉持此目的撰寫期末報告書，讓大眾了解住

	<p>調適策略，並提升研究成果之參考價值。</p> <p>2. 建議研究之策略應朝大眾方向進行，讓民眾了解及應用。</p>	<p>宅部門的溫室氣體減量及應用。</p>
四	<p>1. 本研究蒐集各國住宅溫室氣體排放趨勢資料相當齊全，具參考價值。</p> <p>2. 本研究對提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改，具有參考的價值，可供未來建築節能政策目標規劃參考。</p>	<p>1. 感謝委員肯定。</p> <p>2. 感謝委員肯定，期末報告的部份以建築技術規則第 308 條作為調適基準，最終提出修改建議予建研所。</p>
五	<p>1. 報告書 P.37，透過 RCP2.6 情境下之 ETTV 結果，是否可作為未來推估住宅耗能之基線，宜再詳加考量。</p> <p>2. 研究團隊是否能以近 5 - 10 年住宅排碳量趨勢，推估後續 2017 - 2030 年之住宅排碳量，應有詳細說明，並建請一併提出我國住宅調適策略與衝擊之評估。</p> <p>3. 建請補充說明我國住宅能源需求占比，俾使報告內容更為完整。</p>	<p>1. 感謝委員提醒，期末報告的部份未直接援引 ETTV 之計算結果；改以目前的建築技術規則第 308 條作為調適基準，亦便於提供直接的修改建議予建研所。</p> <p>2. 感謝委員建議，期末報告當中已納入 2000-2061 年之住宅排碳量趨勢推估，並針對 2016-2030 年的部份提出細部的調適策略。</p> <p>3. 感謝委員建議，遵照辦理。</p>
六	<p>1. 報告中關於 RCP 等英文簡寫，建議可補充全名或有詳細定義說明，以增進可讀性。</p> <p>2. 本研究已探討臺北、臺中、高雄至 21 世紀末之住宅能耗及對應策略，若研究期程允許，建議可將臺灣東部納入考量，俾增進應用參考價值。</p>	<p>1. 感謝委員提醒，關於 RCP 之定義將補充於期末報告書當中。</p> <p>2. 感謝委員建議，由於時程上的緊湊將於未來之研究納入臺灣東部的評估。</p>
七	<p>1. 本研究有關溫室氣體之歷年排放數據，如有引用其他單位之資料，均須清楚說明。</p> <p>2. 未來排放趨勢預測，建議針對本部營建署及本所已規劃相關措施、未來可能措施等不同情境進行模擬，以提供本部政策規劃之參考。</p>	<p>1. 感謝委員建議，遵照辦理。</p> <p>2. 本研究之未來溫室氣體排放趨勢預測，針對未來不同調適措施進行模擬，建築外殼的調適以目前的 SF 法為基準，以提供本所未來政策規劃之參考。</p>

<p>八</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. 關於 RCP 定義部分請於內文詳細說明，俾利於了解及增進可讀性。 2. 本案請研究團隊於9月中旬前提出具體研究成果及調適策略，俾供本所邀集相關單位召開座談會。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員提醒，關於 RCP 之定義將補充於期末報告書當中。 2. 本研究團隊將如期提交具體研究成果並參與相關單位之座談會。
----------	---	---

附錄二 期末審查會議委員意見回覆

項次	評選意見	廠商回應
一	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本研究已完成蒐集彙整未來氣候影響下之各國住宅溫室氣體排放趨勢，可供後續調適策略研議參考。 2. 研究中提出完整之臺灣地區至 21 世紀末模擬氣象數據，及住宅溫室氣體排放之預測資料，具參考應用價值。 3. 研究報告中針對未來住宅調適策略有充分解析，並提出建築技術規則之住宅節能標準修訂建議，將有助於建築節能法規之未來發展。 4. 建議第七章結論與建議可再予精簡扼要。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。 3. 感謝委員肯定。 4. 感謝委員建議，遵照辦理。
二	<ol style="list-style-type: none"> 1. 本案彙整國內外資料與考量影響住宅能源需求因子，提出住宅能源使用預測模型，研究中並建構預測模式，探討氣候變遷對空調耗能之影響，及建築外殼影響空調耗能之 6 個因子，同時提出住宅溫室氣體排放之預測與調適策略，成果具體且相當豐富。 2. 報告內圖號標示方式目前採國字與阿拉伯數字併用方式，請修正。 3. 報告撰寫圖表順序，建議採內文文字提及該圖後再出現圖表，較能符合閱讀習慣。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 已將圖表標號修正於成果報告書。 3. 感謝委員提醒，遵照辦理
三	<ol style="list-style-type: none"> 1. 目前研究策略已朝實務方向進行，本案成果應有助於逐步落實住宅建築碳排放減量之目標，值得肯定。 2. 本研究探討氣候變化下住宅部門溫室氣體排放趨勢預測，可供未來建築節能政策目標規劃參考。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員肯定。 2. 感謝委員肯定。

四	<ol style="list-style-type: none"> 1. 報告書 P.5 AR5 有文字缺漏，及 P.7 圖表之顏色太深不易閱讀，請調整。 2. 報告書 P.17 中溫室氣體之定義不正確，建請參考溫室氣體減量與管理法之定義修正。 3. 報告書 P.24 表 2 中流量之單位是否有誤，請檢討修正。 4. 報告書 P.57、59 內文中「建築技術規則第 308 條」請修正為「建築技術規則第 308 條-2」；另 P.58 表 6-1 之 WWR 值區間表示方式，建請調整如 $0.4 < WWR \leq 0.5$ 之方式表示，較為合理。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員提醒，已調整圖表顏色。 2. 已參照溫室氣體減量與管理法所規範的 7 種溫室氣體加以定義本研究之研究範疇。 3. 已將表中的單位修正，感謝委員。 4. 感謝委員提醒，已更正規範名稱與表格之表示法增進易讀性。
五	<ol style="list-style-type: none"> 1. 環保署近期將公告第一階段溫室氣體管制目標，2020 年住商部門排放量上限為 57.30 百萬噸，建議研究團隊可參採上述數值，納入住宅調適策略研究或結論與建議。 2. 綜合調適策略之建議部分，後續建議可對社會面衝擊（環境、經濟、能源等）作進一步評估；另未來人口數將下降，住宅能源需求是否可能會隨之下降，亦請納入研究考量。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員提醒，已將第一階段溫室氣體管制目標等相關內容納入成果報告書當中。 2. 感謝委員建議，未來預測人口下降，但氣候變遷溫度上升及經濟發展 GDP 將成長，三項因素間交互作用，目前尚無考慮人口單一因素效應之評估研究與分析。
六	<ol style="list-style-type: none"> 1. 國內由於居住密集度高，集合住宅朝高樓層、大量體趨勢發展，但公共用電部分之耗電量多採各住戶分攤方式，可能影響家戶用電資料，是否本案評估模式須將此因素納入考量，請補充說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員提醒，集合住宅主要分佈於都市中，公用電部分鄉村較少，相關研究指出單一街廓之用電量中公用電約占 3~5%，其中都市及鄉村集合住宅公用電差異目前是採修正係數方式納入研究分析。
七	<ol style="list-style-type: none"> 1. 目前溫室氣體減量與管理法中，住宅部門之目標及減量內容為何，請補充說明。 2. 五大建議策略未來應需與建築技術規則連結，但部分策略內容(如家電效率)係非屬建築技術規則之強制管制範圍，或非屬建築法規管理範疇，執行面上如何因應，請補充說明。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 感謝委員建議，已將溫室氣體減量與管理法等相關內容納入成果報告書當中。 2. 調適策略五大方向中，目前建築外殼熱性能部分為技術規則管制範疇；另空調、設備及照明等部分，則牽涉使用人之行為模式，建議可採獎勵方式誘導。

附錄三 期中工作會議記錄

本所 106 年度協同研究

「基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略」

期中審查會議紀錄

一、時間：106 年 7 月 20 日(星期四)下午 2 時 30 分

二、地點：本所簡報室(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)

三、主席：王副所長安強

記錄：蔡介峰、陳盈樺

四、出席人員：詳簽到簿

五、主席致詞：(略)

六、計畫簡報：(略)

七、綜合討論：

(一)「基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略」案

江教授哲銘：

1. 請參考 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 補充說明第 11 頁「溫室氣體」之詳細內容。
2. 同第 11 頁，研究主題「住宅」碳排放，建議可再進一步限制「住宅」研究範圍，在住宅建造完成後家庭生活使用能源之有限範圍，並排除建材、設備及施工過程等項目。
3. 請扼要說明本研究「住宅」之標準化內涵。

張建築師矩墉：

1. 終端耗能估算是用家庭戶數或人口數來作考量，也無考慮未來人口高齡化的影響因素，是否需再作調整？
2. 推估出來的氣候預測是否有驗證其可信度的方法？
3. 本案企圖自氣候的預測估計溫室氣體排放，進而提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改建議，其推理邏輯的關聯性建議加強說明，且這種標準可能是一次性的，也有可能是分期漸進式的，可能也要配合政府政策及施政目標審慎研議。
4. 簡報第 19 頁，世紀中 (2041-2040) 應為筆誤，請修正。另外 RCP 代表的意義建議於內文說明。

5. 冷氣耗能採用 SF，但 SF 依林憲德教授的說法是構造式的檢討，和用 Req 是性能式的檢討有別，而實際上因採用 SF 檢討的外牆 U 值標準高很多，所以採用的案子很少，是否妥適？

黃理事長秀莊：

1. 相關文獻資料收集相當完整，若能加入適當專題深入分析探討，可讓政府了解住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略，並提升研究成果之參考價值。
2. 建議研究之策略應朝大眾方向進行，讓民眾了解及應用。

台灣省建築材料商業同業公會聯合會(王總幹事榮吉)：

1. 本研究蒐集各國住宅溫室氣體排放趨勢資料相當齊全，具參考價值。
2. 本研究對提出建築技術規則關於住宅節能標準之修改，具有參考的價值，可供未來建築節能政策目標規劃參考。

本所一

鄭研發替代役任軒：

1. 報告書 P.37，透過 RCP2.6 情境下之 ETTV 結果，是否可作為未來推估住宅耗能之基線，宜再詳加考量。
2. 研究團隊是否能以近 5-10 年住宅排碳量趨勢，推估後續 2017-2030 年之住宅排碳量，應有詳細說明，並建請一併提出我國住宅調適策略與衝擊之評估。
3. 建請補充說明我國住宅能源需求占比，俾使報告內容更為完整。

蔡副研究員介峰：

1. 報告中關於 RCP 等英文簡寫，建議可補充全名或有詳細定義說明，以增進可讀性。
2. 本研究已探討臺北、臺中、高雄至 21 世紀末之住宅能耗及對應策略，若研究期程允許，建議可將臺灣東部納入考量，俾增進應用參考價值。

羅組長時麒：

1. 本研究有關溫室氣體之歷年排放數據，如有引用其他單位之資料，均須清楚說明。
2. 未來排放趨勢預測，建議針對本部營建署及本所已規劃相關措施、未來可能措施等不同情境進行模擬，以提供本部政策規劃之參考。

主席(王副所長安強)：

1. 關於 RCP 定義部分請於內文詳細說明，俾利於了解及增進可讀性。

2. 本案請研究團隊於9月中旬前提出具體研究成果及調適策略，俾供本所邀集相關單位召開座談會。

執行單位回應（黃教授瑞隆）：

1. 本研究之主題著重於溫室氣體，故對於各個專有名詞，諸如溫室氣體的定義、國際上對於氣候變遷情境（各項 RCP）的描述，將於期末報告書中詳述補充之。
2. 本研究採用之研究方法係參考聯合國之預估模型，其中並未將人口高齡化納入考量，然本研究仍會依照台灣之現行與未來社經狀況對溫室氣體預估模型進行調整。
3. 研究內容中 RCP2.6 的溫室氣體排放情境無法作為情境假設，因氣候變化的不確定性太高，無法直接以單一情境假設作為基準線，且各情境發生的情況是相互獨立的。
4. 截至目前期中簡報的進度，是以不實施任何調適策略的前提下進行預測，以作為各調適情境比較時的基準線；本研究後續將逐步針對法規規定之各項外殼設計標準進行調整，並代入模擬軟體進行驗證，新舊建築汰換的過程亦將納入調適過後的預測考量。
5. 有關模型驗證部分，本研究所使用之溫室氣體預估模型會以 2000 年至 2015 年之歷史資料來進行校正，以使其更符合台灣之現況。
6. 本研究選用之氣象資料係參考政府間氣候變化專門委員會（IPCC）所公佈之第五次報告書當中提及的溫室氣體排放情境相關資訊，該資料已是國際上公認公信力最高的資料來源。

附錄四 期末工作會議記錄

本所 106 年度協同研究

「基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略」

期末審查會議紀錄

一、時間：106 年 11 月 3 日(星期五)下午 2 時 30 分

二、地點：本所討論室(二)(新北市新店區北新路 3 段 200 號 13 樓)

三、主席：王副所長安強

記錄：林招焯、陳盈樺

四、出席人員：詳簽到簿

五、主席致詞：(略)

六、計畫簡報：(略)

七、綜合討論：

(一)「基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略」案

江教授哲銘：

1. 本研究已完成蒐集彙整未來氣候影響下之各國住宅溫室氣體排放趨勢，可供後續調適策略研議參考。
2. 研究中提出完整之臺灣地區至 21 世紀末模擬氣象數據，及住宅溫室氣體排放之預測資料，具參考應用價值。
3. 研究報告中針對未來住宅調適策略有充分解析，並提出建築技術規則之住宅節能標準修訂建議，將有助於建築節能法規之未來發展。
4. 建議第七章結論與建議可再予精簡扼要。

陳教授炯堯(盧教授士一代理)：

1. 本案彙整國內外資料與考量影響住宅能源需求因子，提出住宅能源使用預測模型，研究中並建構預測模式，探討氣候變遷對空調耗能之影響，及建築外殼影響空調耗能之 6 個因子，同時提出住宅溫室氣體排放之預測與調適策略，成果具體且相當豐富。
2. 報告內圖號標示方式目前採國字與阿拉伯數字併用方式，請修正。
3. 報告撰寫圖表順序，建議採內文文字提及該圖後再出現圖表，較能符合閱讀習慣。

黃理事長秀莊：

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

1. 目前研究策略已朝實務方向進行，本案成果應有助於逐步落實住宅建築碳排放減量之目標，值得肯定。
2. 本研究探討氣候變化下住宅部門溫室氣體排放趨勢預測，可供未來建築節能政策目標規劃參考。

中華民國全國建築師公會(江建築師星仁)：

1. 報告書 P.5 AR5 有文字缺漏，及 P.7 圖表之顏色太深不易閱讀，請調整。
2. 報告書 P.17 中溫室氣體之定義不正確，建請參考溫室氣體減量與管理法之定義修正。
3. 報告書 P.24 表 2 中流量之單位是否有誤，請檢討修正。
4. 報告書 P.57、59 內文中「建築技術規則第 308 條」請修正為「建築技術規則第 308 條-2」；另 P.58 表 6-1 之 WWR 值區間表示方式，建請調整如 $0.4 < WWR \leq 0.5$ 之方式表示，較為合理。

本所一

鄭研發替代役任軒：

1. 環保署近期將公告第 1 階段溫室氣體管制目標，2020 年住商部門排放量上限為 57.30 百萬噸，建議研究團隊可參採上述數值，納入住宅調適策略研究或結論與建議。
2. 綜合調適策略之建議部分，後續建議可對社會面衝擊(環境、經濟、能源等)作進一步評估；另未來人口數將下降，住宅能源需求是否可能會隨之下降，亦請納入研究考量。

徐副研究員虎嘯：

1. 國內由於居住密集度高，集合住宅朝高樓層、大量體趨勢發展，但公共用電部分之耗電量多採各住戶分攤方式，可能影響家戶用電資料，是否本案評估模式須將此因素納入考量，請補充說明。

主席：

1. 目前溫室氣體減量與管理法中，住宅部門之目標及減量內容為何，請補充說明。
2. 五大建議策略未來應需與建築技術規則連結，但部分策略內容(如家電效率)係非屬建築技術規則之強制管制範圍，或非屬建築法規管理範疇，執行面上如何因應，請補充說明。

執行單位回應（黃協同主持人瑞隆）：

1. 本案各項文字誤繕及圖說編號格式，將一併於資料蒐集分析報告檢討修正。
2. 節能與減碳兩者間關係，由於其中牽涉國家能源發電結構規劃因素，並非研究範圍可及，目前排碳量推估模式採國家電力排放係數為基礎值；預估未來因發電結構改採再生能源，每度電發電之排碳量為現值之 70%，再加上因設施採節能措施排碳量亦預估為現值之 70%，兩者加乘效應將可達 2050 年 50% 之目標。
3. 調適策略五大方向中，目前建築外殼熱性能部分為技術規則管制範疇；另空調、設備及照明等部分，則牽涉使用人之行為模式，建議可採獎勵方式誘導。
4. 未來預測人口下降，但氣候變遷溫度上升及經濟發展 GDP 將成長，三因素間為交互作用，目前尚無僅考量人口單一因素效應之評估研究或分析。
5. 集合住宅主要分佈於都市中，公用電部分鄉村較少，相關研究指出單一街廓之用電量中公用電約占 3~5%，其中都市及鄉村集合住宅公用電差異目前是採修正係數方式納入研究分析。

參考書目

- [1] Bari, M. A., Begum, R. A., Jaafar, A. H., Abidin, R. D. Z. R. Z., & Pereira, J. J. (2011). *Future Scenario of Residential Energy Consumption and CO₂ Emissions in Malaysia*. Paper presented at the Innovation and Sustainability Transitions in Asia, Kuala Lumpur, Malaysia.
- [2] Belcher, S. E., Hacker, J. N., & Powell, D. S. (2005). Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology*, 26, 49-62.
- [3] Daioglou, V., van Ruijven, B. J., & van Vuuren, D. P. (2012). Model projections for household energy use in developing countries. *Energy*, 37(1), 601-615.
- [4] de la Rue du Can, S., & Price, L. (2008). Sectoral trends in global energy use and greenhouse gas emissions. *Energy Policy*, 36(4), 1386-1403.
- [5] Dirks, J. A., Gorrissen, W. J., Hathaway, J. H., Skorski, D. C., Scott, M. J., Pulsipher, T. C., Rice, J. S. (2015). Impacts of climate change on energy consumption and peak demand in buildings: A detailed regional approach. *Energy*, 79, 20-32.
- [6] Giles, B. D., Balafouti, C., & Arseni-Papadimitriou, A. (1987). A study of climatic stress and physiological regions in Greece. *Journal of Climatology*, 7(3), 303-312.
- [7] Huang, K. T., & Hwang, R. L. (2016). Future trends of residential building cooling energy and passive adaptation measures to counteract climate change: The case of Taiwan. *Applied Energy*, 184, 1230-1240.
- [8] IEA. (1998). *Mapping the energy future: energy modelling and climate change policy*. Paris: International Energy Agency.
- [9] IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [10] IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- [11] Isaac, M., & van Vuuren, D. P. (2009). Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy*, 37(2), 507-521.
- [12] Jylhä, Kirsti, et al. (2015). Energy demand for the heating and cooling of residential houses in Finland in a changing climate. *Energy and Buildings*, 99, 104-116.
- [13] Lam, J. C., Yang, L., & Liu, J. (2006). Development of passive design zones in China using bioclimatic approach. *Energy Conversion and Management*, 47(6), 746-762.
- [14] Macdonald, I. A. (2002). *Quantifying the effects of uncertainty in building simulation*. (PhD thesis), University of Strathclyde.

- [15] MacDonald, I. A. (2009). Comparison of sampling techniques on the performance of Monte Carlo based sensitivity analysis. *Building Simulation 2009 Conference Proceedings*, 992-999.
- [16] Mara, T. A., & Tarantola, S. (2008). Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations. *Building Simulation*, 1(4), 290-302. Singh, M. K., Mahapatra, S., & Atreya, S. K. (2007). Development of bio-climatic zones in north-east India. *Energy and Buildings*, 39(12), 1250-1257.
- [17] Swan, L. G., & Ugursal, V. I. (2009). Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1819-1835.
- [18] Terjung, W. H. (1966). Physiologic climates of the conterminous united states: a bioclimatic classification based on man. *Annals of the Association of American Geographers*, 56(1), 141-179.
- [19] Ürge-Vorsatz, D., Cabeza, L. F., Serrano, S., Barreneche, C., & Petrichenko, K. (2015). Heating and cooling energy trends and drivers in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 85-98.
- [20] van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, A., & Srinivasan, R. (2006). A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 10-23.
- [21] van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., de Vries, B. J. M., Isaac, M., van der Sluijs, J. P., Lucas, P. L., & Balachandra, P. (2011). Model projections for household energy use in India. *Energy Policy*, 39(12), 7747-7761.
- [22] Van Vuuren, Detlef P., et al. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5.
- [23] Wang, H., & Chen, Q. (2014). Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy and Buildings*, 82, 428-436.
- [24] Xiaohua, W., Xiaqing, D., & Yuedong, Z. (2002). Domestic energy consumption in rural China: A study on Sheyang County of Jiangsu Province. *Biomass and Bioenergy*, 22(4), 251-256.
- [25] 內政部營建署 (2015), 建築技術規則。
- [26] 行政院環保署 (2016), 2016 年中華民國國家溫室氣體排放清冊報告。
- [27] 行政院環保署 (2015), 溫室氣體減量及管理法。
- [28] 何明錦與黃國倉 (2013)。臺灣建築能源模擬解析用逐時標準氣象資料 TMY3 之建置與研究。台北：內政部建築研究所。
- [29] 李孟杰 (2006)。住宅生活熱水使用耗能評估與節能方法之研究。國立臺灣科技大學博士論文。

- [30] 林建隆 (2003)。住宅設備生命週期二氧化碳排放量解析。國立成功大學碩士論文。
- [31] 林唐裕、葛復光、謝智宸、曾禹傑與林忠漢 (2010)。我國 2010-2030 年住宅及服務業部門能源需求推估。台電工程月刊。
- [32] 國家災害防救科技中心編譯 (2014)。氣候變遷 2013 物理科學基礎 (給決策者摘要)。
- [33] 國家發展委員會 (2016)。中華民國人口推估 (105 至 150 年)。
- [34] 郭柏巖 (2005)。住宅耗電實測解析與評估系統之研究。國立成功大學博士論文。
- [35] 莊凱韓 (2015)。氣候變遷下未來建築節能與外殼設計策略之研究。國立臺灣大學碩士論文。
- [36] 黃群達 (2006)。住宅與商業部門能源消費及二氧化碳排放特性與趨勢變動分析。國立成功大學博士論文。
- [37] 經濟部能源局 (2016)。我國燃料燃燒二氧化碳排放統計。
- [38] 蔡妙姍 (2015)。台灣地區住宅與服務業電力服務需求與節能潛力之研究。國立臺北大學博士論文。
- [39] 鄭凱文 (2004)。家用太陽能熱水器輔助電熱器耗能因子分析。國立成功大學碩士論文。

基於未來氣候的住宅溫室氣體排放趨勢預測與調適策略

出版機關：內政部建築研究所

電話：(02) 89127890

地址：新北市新店區北新路3段200號13樓

網址：<http://www.abri.gov.tw>

編者：羅時麒、黃瑞隆、黃國倉、王仁俊、施文玫

出版年月：106年12月

版次：第1版

ISBN：978-986-05-4479-4（平裝）