運輸計劃季刊
第五十四卷 第一期
民國一一四年三月
頁 47～頁 72

Transportation Planning Journal
Vo1. 54 No. 1
March 2025
PP. 47～ 72

# 桃園國際機場環境永續發展策略性方案評估之研究

# AN EVALUATION OF STRATEGICAL ALTERNATIVES FOR ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY DEVELOPMENT AT TAOYUAN INTERNATIONAL AIRPORT

盧華安 Hua-An Lu[1]
劉祈心 Chi-Hsin Liu[2]
王柏琳 Po-Ling Wang[3]

(112 年 5 月 17 收件，112 年 8 月 16 日第一次修正，112 年 9 月 12 日接受)

## 摘 要

環境永續儼然成為現代機場發展的最重要目標之一，本研究提出一分析層級架構，可協助機場單位進行初期評估之參考，該架構由建置複雜性、投入成本、改善效益和社會價值等四項構面組成，其下各有四項關鍵準則，用以評估可選擇方案的優劣。實證部分以桃園國際機場為例，透過排序成對比較法整合專家意見所得，最重要的構面為建置複雜性，16 項準則中以系統建置成本、國內外跨單位合作和改善環境生態，為評估方案時最值得關注的因素。以灰關聯分析整合受訪專家對 12 項列舉可行方案的評估，「建設綠色航廈」、「提升機場碳排放認證等級」和「減少燃油消耗與改良油品」是桃園國際機場應優先考量推動的方向。但不同背景的受訪者觀點，仍有些許差異。

1. 國立臺灣海洋大學航運管理學系教授 (聯絡地址：202 基隆市北寧路 2 號，電話：02-24622192#3431，E-mail: halu@ntou.edu.tw)。
2. 國立臺灣海洋大學航運管理學系碩士生。
3. 國立臺灣海洋大學航運管理學系碩士。

**關鍵詞：** 環境永續、分析層級架構、排序成對比較法、灰關聯分析法、機場碳排放認證

**ABSTRACT**

*Environmental sustainability has been one of the essential development aims for modern airports. This study proposed an analytic hierarchy framework with four criteria, i.e., construction complexities, investment costs, possible improved effects, and appearance of social values. Each criterion includes four attributed sub-criteria to evaluate the priorities of selected possible alternatives in the case study for the Taoyuan International Airport (TPE). Through compiling expert opinions, the rank pair-wise comparison (RPC) results revealed that the most crucial criterion is construction complexities. System construction cost, international and domestic cross-unit collaboration, and improvement of the environmental ecology were ranked the top three sub-criteria worth noting. Results of gray relational analysis (GRA) showed that constructing green terminals, upgrading airport carbon accreditation (ACA), and reducing aircraft fuel consumption are the most adaptable alternatives for developing a sustainable TPE. However, experts' opinions from different backgrounds have little variation.*

**Key Words:** *Environmental Sustainability；Analytic Hierarchy Framework；Rank Pair-Wise Comparison (RPC)；Gray Relational Analysis (GRA)；Airport Carbon Accreditation (ACA)*

# 一、前　言

聯合國在 2015 年揭示 17 項永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs)[1]，作為可實現全球人類良好生活的未來藍圖，永續性儼然已是維護人類文明以及國家發展的重要責任之一。而其中，與交通有關的項目至少包括可負擔及乾淨能源、就業與經濟成長、永續城市與社區發展，以及氣候變遷行動等目標。過去的數十年中，航空業的運量保持穩定的增長，不過對環境永續性的負面影響也隨之增加。國際航空運輸協會 (International Air Transport Association, IATA) 早年預測在 2050 年時，航空業將佔整體之溫室氣體排放的 5%，佔全球人為碳排放的 3%左右[2]。儘管此一比例並非特別的高，但飛機每執飛一次航班時所消耗的燃料與廢氣排放，卻是所有運具之最，廣受大眾的矚目。航空產業社群刻正積極呼籲及響應提前減碳，希望能在 2050 年前達到淨零 (Net-Zero) 目標[3]。

國際民航組織 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 強調任何倡議或活動，都須在社會、經濟和環境影響間取得平衡，以配合航空業的永續發展。ICAO 訂定三大環境目標作為全球航空社群在環境永續的發展指引[4]，分別為限制或減少受飛機噪音影響的

人數、降低航空排放對當地空氣品質的影響，以及儘量減少國際民用航空對全球氣候的不利影響。此外，IATA [2] 提出了三階段性目標與四支柱策略，確認全球正面臨的氣候變遷問題，並決定以減少航空運輸產生的二氧化碳排放量為主要改善對象。其核心概念是採用科技技術、公司營運、基礎設施以及經濟措施，對應航空業永續發展的長期解決方案。IATA 的三階段目標分別為預計在 2009 年至 2020 年間，每年平均提升 1.5%燃油效率、2020 年起開始實現零碳成長、在 2050 年達成淨零碳排放，即航空業的二氧化碳淨排放量相較於 2005 年減少 50%。這些目標需要所有利害關係人透過四支柱策略共同努力，包括提升科技技術、改善基礎設施、有效的飛行操作和單一全球市場策略來填補剩餘的排放差距。

機場不僅是空運系統與其他運輸系統的轉換介面，在航空產業與服務社區間仍扮演著重要的交流管道，航空業的營運作業環境和永續發展方案正可透過此一管道，直接影響旅客、員工以及當地居民。國際機場協會 (Airports Council International, ACI) 即指出 [5]，機場乃是具有實質潛力的管道，可跨越各種航空及非航空利害關係人間的圍牆，引領航空產業轉型變革，並具備成為航空產業與其他相關系統標竿的能力。ACI 建議機場擬定的策略應遵循聯合國三大支柱，從經濟、環境、社會層面列出各自重大問題，於不同階段提出行動建議及具有實質意義的關鍵績效指標。

雖然航空運輸產業已積極採取一些環境永續的改善方案和操作步驟，朝向綠色運輸、永續航空的最終目標邁進。但對於特定機場而言，當務之急乃是如何針對本身的條件評估適當的發展方向，以及擬訂不同方案採行的優先順序。施行方案的可行性與所能達到的效果，對於政府相關部門、機場當局和營運單位，應是長期發展軌跡中值得關注且須深入探究的課題。然而機場永續課題千頭萬緒，所有方案實施前都應有細部分析與評估，但這些詳細的評估步驟往往曠日廢時，也需投入大量的人力、物力資源。在初步調查階段，以較少的費用及投入，設計出可靠且全面性的評估架構是必要的，其可鎖定規劃單位具體的評估準則，確認準則的重要程度，同時快速篩選出可行方案進行評比，以確立可能發展的優先順序，對於後續的細部規劃，將有事半功倍之效。

本研究基於上述的研究動機，確立研究目的旨於確認哪些因素適合用於評估機場環境永續的發展策略，同時可藉由這些因素協助判定相關方案的優劣，供機場營運單位在研擬實施計畫的參考。本研究建議一分析層級架構，並採用排序成對比較法 (Rank Pair-Wise Comparison, RPC) 進行問卷設計和整合專家意見，以在第一次調查即能克服構面、準則兩兩相比可能產生的不一致性。同時，針對桃園國際機場未來的永續發展，挑選 12 個已知的減排方案請專家進行評估，利用灰關聯分析法 (Gray Relational Analysis, GRA) 進行評級，確認桃園機場採用施行的優先順序。本研究提出的評估流程，可做為政府及機場當局在訂定其永續發展策略時，採用的整合性和快速性的初評程序，評估準則之權重結果可供相關執行單位與學術領域，在評量機場環境永續發展方案選擇的參考。實證的策略方案排序結果，體現訪談專家認定目前桃園機場在未來永續發展趨勢的可行作為，亦可提供具體且深化研析的引導作用。

# 二、文獻回顧

國際間機場環境永續發展已如火如荼的推展，學術領域也探索了許多研究成果，本節針對較為相關的學術文獻進行蒐整與歸納，分成機場永續發展、評估機場永續發展標準和可行選擇方案進行文獻整理。

## 2.1 機場永續發展

機場及其相關機構的永續性目標，是將經濟可行性、營運效率、宜居性、自然資源保護和社會責任與機場永續性的整體方法結合[6]。這樣的決定將會創造一個全新的環境生物倫理學，而環境教育必須解決永續機場的規劃、建設及營運問題。Postorino and Mantecchini[7]曾提出一種運輸碳足跡方法，用以確定機場碳足跡單位 (Unit Carbon Footprint, UCF)。機場二氧化碳排放的來源包含陸地的車輛、飛機之重飛效應、地面勤務和航廈設備。碳足跡單位的測量取決於運輸活動，可以透過一些相關變數來定義，以區分機場之運輸相關行動的貢獻和有效性。若欲減少機場碳足跡，Sukumaran and Sudhalar[8]認為太陽能可以取代傳統能源達成此一目標，從其對印度科欽機場的研究發現，在跑道周圍寬闊及自由空間區域實施強制性的太陽能收集與應用，可在減少碳足跡方面存在著一定的可靠性。

機場擴展計劃的推動是新興觀念融入的最好時間，但對於永續性的顧慮，通常會和經濟與社會成長造成衝突。Liebe et al.[9]在鄰近法蘭克福及蘇黎世國際機場的兩個城市對機場擴建方案的社會接受程度進行調查，發現大眾對於飛機噪音和民眾參與所表現出的接受程度更為明顯。此外，部分文獻[10][11]也從溫室氣體排放的角度，證實環境廢物管理乃是在機場擴建計劃中不可忽視的課題。

ACI Europe[5]建議機場可以透過推動、發展、成熟和領導地位四階段的定位，擬定行動朝永續發展邁進。其中可茲參考的關鍵績效指標包含每位旅客或交通單位的二氧化碳排放量、機場營運商的能源強度 (每交通單位或平方公尺的消耗)、零碳排能源在機場營運消耗所佔的百分比以及機場碳認證級別。機場碳認證計畫的官方網站[12]透過遵循世界企業永續發展委員會 (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) 和世界資源研究所 (World Resources Institute, WRI) 共同發行的溫室氣體盤查議定書企業標準 (Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard) 之原則，定義了所使用的碳排放足跡。考量飛機在機場周圍與最後進場及最初離場時產生的排放，機場碳認證 (Airport Carbon Accreditation, ACA) 採用 ICAO 對機場起降循環的定義，並要求機場遵守這些定義。為申請機場碳認證的七個級別之一的認證，機場必須遵照 ISO14064 對其碳足跡進行獨立驗證。這些證明須和所有關於碳管理過程的聲明一併提供給管理者，而這些聲明同樣須經過獨立的驗證。

## 2.2 評估機場永續發展標準

雖然改善機場碳排放為永續發展策略中的主要目標，但同時也須留意機場的永續發展品質。因此 Koç and Durmaz [13] 參照全球報告倡議組織 (Global Reporting Initiative, GRI) 標準，針對 Skytrax 及 ACI 認證前十名最佳服務品質機場中的永續發展報告書及服務品質進行比較。結果顯示為 GRI 支持公司設立永續發展報告書，並建議將社會、環境與經濟結合起來成為長期永續發展指標，藉此提升機場的永續發展品質。

若為評估機場的永續績效，可根據其性質提出特定的方法衡量。如 Ferrulli [14] 提出一個架構來評估機場方案設計和技術策略的永續表現。綠色機場的評估類別包括降噪、減排和空氣品質、能源利用、水資源利用、廢物和材料管理、減少水污染以及保護生物多樣性和土地利用。至於在機場環境保護的評估，Chao et al. [15] 使用模糊德爾菲法探索環境保護指標，利用專家調查法建構其權重及函數值。評估的層面包括綠色機場設計、機場營運的節能減碳、再生能源的利用、機場環境永續的管理等 18 個屬性指標。經調查後發現節能控制、公共交通對機場的便利性和航空器碳管理最為重要，該架構也被應用於評估五個不同國家的機場。

除了上述在學術方面提出的評估方法之外，也可以藉由官方認可的機場碳認證級別在永續之路上走得更踏實。其主要目的為有效降低機場產生的碳足跡，以及透過國際之間的知識共享，使全球的機場可以達到真正的零碳排機場，進而減少航空業產生的碳排放。

## 2.3 可行選擇方案

在 2003 年英國政府頒布航空運輸白皮書後，Kaszewski and Sheate [16] 開始研究不同方案對於機場永續發展的可行性，這些方案包含航廈設計和陸地運輸。根據不同相關機構服務的 23 名受訪者之調查結果，最佳方案是要能獲得更節能、更具成本效益以及可行性較高的能源技術。我國交通部 2019 年頒布的綠色運輸政策白皮書中 [17]，將其定義為永續運輸的一部分，以環境保護為主要考量，提倡環境友善、低污染的運輸方式。為實現此一目標，特別揭示應加強航空、海運和場站的節能及減碳建設。至於在航空專業領域，實際作為發展方向包含建立持續下降操作 (Continuous Descent Operations, CDO)、縮短航線、綠色航廈的改善、機場環境管理機制和使用飛機地面電源設備 (Ground Power Unit, GPU) 等。

對於一個機場而言，邁向永續發展的選擇方案可考慮從空側作業、陸側應對措施和管理系統三大方向著手。以下綜整文獻蒐集，歸納可行的發展方案。

### 2.3.1 空側作業

機場規模隨著時代的進步擴大，不僅使單位間的協調比以往更加複雜，資訊間的傳遞量也增加許多。故此 Joppart [18] 建議管理者可以採用機場協調整合決策 (Airport Collaborative Decision Making, A-CDM)，以更有效、透明的方式加強管理，其可強化航班正常運行，提供資源共享和資訊交流的平臺，以及減少機場管理者與其他作業單位間資訊不同步之情形發生，進而提升機場營運的整體效率與環境改善，甚至還能提升機場的競爭

力。為使機場營運更有效率，Van Phat et al. [19] 認為整合不同實體系統的知識庫是不可忽視的一個關鍵步驟，機場單位可利用知識庫將停機坪、滑行道、跑道等空側系統效能發揮至最大，優化機場系統與航機運作間的配合，減少航機運作擁擠，並保持效率和安全飛行。

日益增長的空中交通量使許多國家的空域出現壅塞情形，尤其航班較多的機場恐導致航機滯空時間過長、碳排放的增加。ICAO [20] 建議可透過空中交通流量管理 (Air Traffic Flow Management, ATFM) 改善上述情形，具體方法乃是利用航機到場順序及速度的調節，達到與相鄰飛航情報區的流量管制，除能確保航空交通安全，也可提升航空交通管制 (Air traffic control , ATC) 的作業效率。Smailes et al. [21] 鑒於持續成長的空中交通流量不僅造成航機壅塞，也容易在管制員與駕駛員之間產生語音壅塞的情形，因此建議利用數據通信鏈 (Controller-Pilot Data Link Communications, CPDLC) 將管制員與駕駛員間的無線電口語通話，利用衛星數據資料代替，不僅減少無線電口語通話，同時還能降低空中碰撞的風險。

航機的燃油使用也伴隨著空中交通量而增加，減少燃油消耗與使用永續燃油對環保的衝擊將是最為直接的 [22]，更是航空業朝向零碳排的關鍵之一，而航空公司之航路規劃、優化機型等營運抉擇，皆對燃油效率與能源使用效率至關重要。Shahriar and Khanal [23] 同樣認為永續航空燃油 (Sustainable Aviation Fuel, SAF) 對於環境的改善效益最大。雖然技術、經濟與政策依然面臨著不同的挑戰，若未來成功使用永續燃油，勢必大幅降低航空業對環境造成的影響，而航空業也將在永續發展的道路上邁進一大步。機場當局雖然無法直接影響航空公司的選擇，但在永續燃油供應設施的建設與油商的合作條件，仍成為鼓勵航空公司改用環保節能燃油的條件。此外機場相關單位改善航機燃油耗能也有其他著力之處，Liu et al. [24] 指出持續下降進場和持續爬升離場 (Continuous Climb Operations, CCO) 程序能有效節省能源消耗，讓航空器性能達到最佳化，同時減少噪音及空氣汙染，也是空中交通管制可以推展的方案。

### 2.3.2 陸側之應對措施

打造一個讓旅客感到滿意的綠色航廈是走向永續發展的重要指標，Krueger et al. [25] 針對綠色建築項目展開調查，證實使用永續建材有助於環境的改善。Li et al. [26] 也透過分析大型機場的主要節能減碳技術與經驗，提出幾項實施策略，如改善航廈建材，並以低環境負荷、回收、耐久，以及易維護管理之材料做為優先考量，運用自然採光、減少燈具照明用電量等建築設計。

機場固體廢棄物與剩食，正隨著旅客量及機場擴展計畫持續增加，Sebastian and Louis [27] 認為若無法將其透過適當方式處理，恐導致環境的破壞。Lam et al. [28] 為找出最佳處理方式，發現利用焚化爐處理廢棄物與剩食是最有效的永續發展策略，或是藉由傳統方式，減量、再使用、回收，兩者皆能減少環境的衝擊。落實垃圾分類可營造環保文化，機具持續汰舊換新也可降低能源浪費。航廈剩食管理將油水分離，並透過特殊處理後排放，可以有效改善水質汙染。

由於新世代與綠色機場概念的結合，傳統機場正逐漸轉型成智能機場，在客運航廈的程序改善效果最為顯著。Rajapaksha and Jayasuriya [29] 將智能機場分為四個核心概念，分別為強化航空安全、加強旅客的使用便利性、提升機場營運效率，以及將有限的資源發揮至最佳化。智能入出境及查驗作業系統 (CIQS) 剛好符合上述概念，若使其導入機場將有助於智能機場的發展。實際執行的方案如結合生物辨識科技，可以疏解查驗櫃檯等候時間並加快通關速度；設置自助報到、自助託運行李等設備，並採用 RFID 射頻識別登機證、託運行李吊牌以節省時間、提升效率。抑或是運用人體掃描儀偵測金屬、爆裂物、毒品以取代傳統金屬探測門，縮短檢查時間。利用建置全面電子化與數位轉移之資訊化作業與管理，以達成完全無紙化和最佳化作業流程之目標。

### 2.3.3 管理系統

為確保永續策略走在正確的發展道路上，遵循強而有效的引導系統至關重要。像是桃園國際機場 [30] 導入國際標準組織 (ISO) 相關認證作為參考，如：ISO 14001 環境管理系統、ISO 50001 能源管理系統、ISO 14064-1 溫室氣體查驗等，其可將品質維持在標準規範之上，還能透過準則以精進各項作業績效與管理。

先前提及的國際機場碳排放認證同樣是促進永續機場的重要計畫之一，其可依碳排放減量程度區分成不同的等級，分別為「盤查」(Mapping)、「減量」(Reduction)、「優化」(Optimization)、「中和」(Neutrality)、「轉型」(Transformation)、「過渡」(Transition)、「最高等級」(Topmost) 共七個等級 [31]。Dube [32] 發現許多機場為對抗氣候變遷紛紛投入國際機場碳排放認證計畫，參與機場已佔全球客運量 44.7%。此外，高級別的機場數量也正在持續增加，如桃園國際機場在 2020 年達到第三等級「優化」，現階段正在評估桃園國際機場申請 Level 4 之可行性 [33]。

為擬定更有效的機場應對策略，將機場特性及其所產生的碳排放納入考量，也是永續發展的關鍵步驟之一。Sahinkaya and Babuna [34] 藉由計算機場的溫室氣體排放，作為每年減量的參考依據，使機場管理者可依其建立歷年排放量統計資料庫。若使其結合國際標準規範，將有助於綠色機場的發展。

從以上的文獻整理可發現，機場環境永續已為當務之急，桃園機場作為也有初步的成效，但可採行的措施與方案仍有眾多選擇，如何從中挑選適當可行且有效的發展方案，至為關鍵，而能適應各機場進行評估的工具，或化繁為簡的檢視程序，將扮演重要的角色，此亦為本研究最主要的研究目的。

## 三、研究設計

本研究在確定研究目的後，對相關文獻進行廣泛的回顧與資料整理，建立初步的分析層級架構，透過對專家的預試問卷，參考修正初步的分析層級架構，再進行正式問卷調查。

所得結果藉由排序成對比較法和分析層級程序 (Analytic Hierarchic Process, AHP) 步驟統整專家意見，並計算評估準則的相對權重，之後藉由灰關聯分析法對桃園機場可採行的方案進行評比排序，並比較不同群體之差異，方研提相關結論與建議。整體研究設計流程，詳如圖 1 所示。

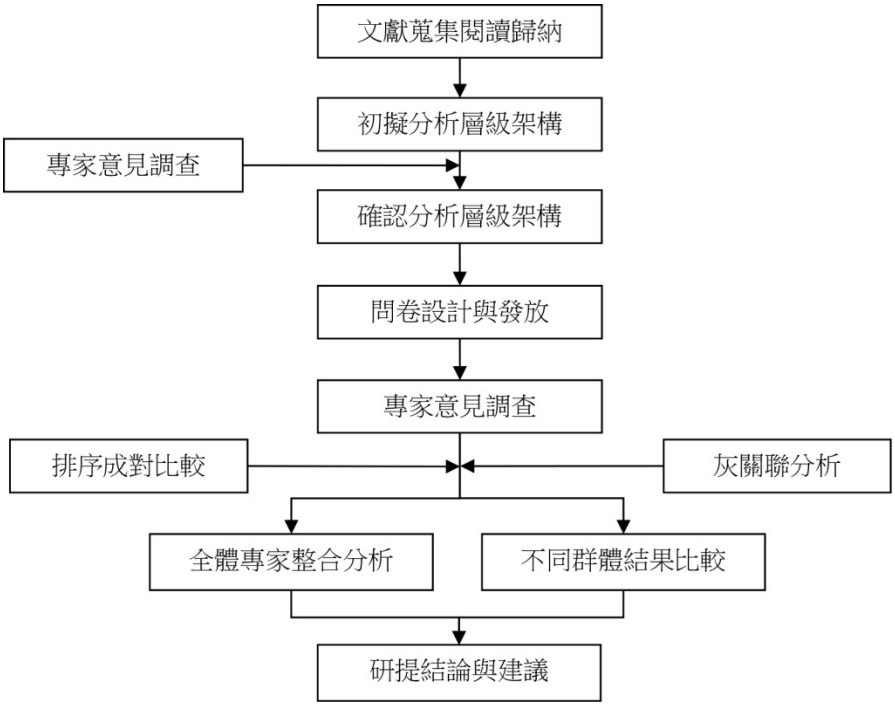


**圖 1　研究設計**

本節分別說明分析層級架構擬定的過程與結果，再簡要介紹 RPC 和 GRA 的學理概念和執行步驟，最後為問卷施測過程與調查樣本的描述。

## 3.1 分析層級架構擬訂

本研究根據以往文獻的歸納，思考在終極目標~評估提升桃園國際機場環境永續發展方案下，每個系統的投入應該要考慮到建置複雜性、投入成本、改善效益和社會價值等四個構面，而每個構面中可依以往文獻的關鍵因素初步歸納出四個準則，用以評估九個永續方案之優先順序。這份初擬結構被設計成問卷，並邀請六位專家學者進行討論與修正，包括兩位服務於民航局相關單位之官員 (其中包含負責航站環保業務之主管)、一位資深航站主任和三位從事永續航空研究之學者，以確保每項構面、準則和選擇方案的適用性和正確性，並能納入學者專家建議的其他未考量但適合採用的因素與方案。

調查後所得修正意見大多集中在準則的用詞，包括構面一中之「跨國際協調合作」修

正為「參與相關國際組織」、「跨單位協同合作」修正為「國內外跨單位合作」、「遵照國外技術標準」修正為「遵照或參考國外技術標準」；構面三中之「減少擁擠」修正為「減少擁擠產生」；構面四之「改善機場周圍的生活環境」修正為「建立機場與社區共融性」等。專家建議另外新增三個選擇方案進行評估，即「達成國際 ISO 相關標準制度」、「減少燃油消耗與改良油品」和「廢棄物與剩食管理」。修正後的分析層級架構如圖 2 所示，由一個終極目標、四個構面、十六個準則和十二個替選方案組成。各自的詳細定義說明如下，主要之參考來源如表 1 所示。

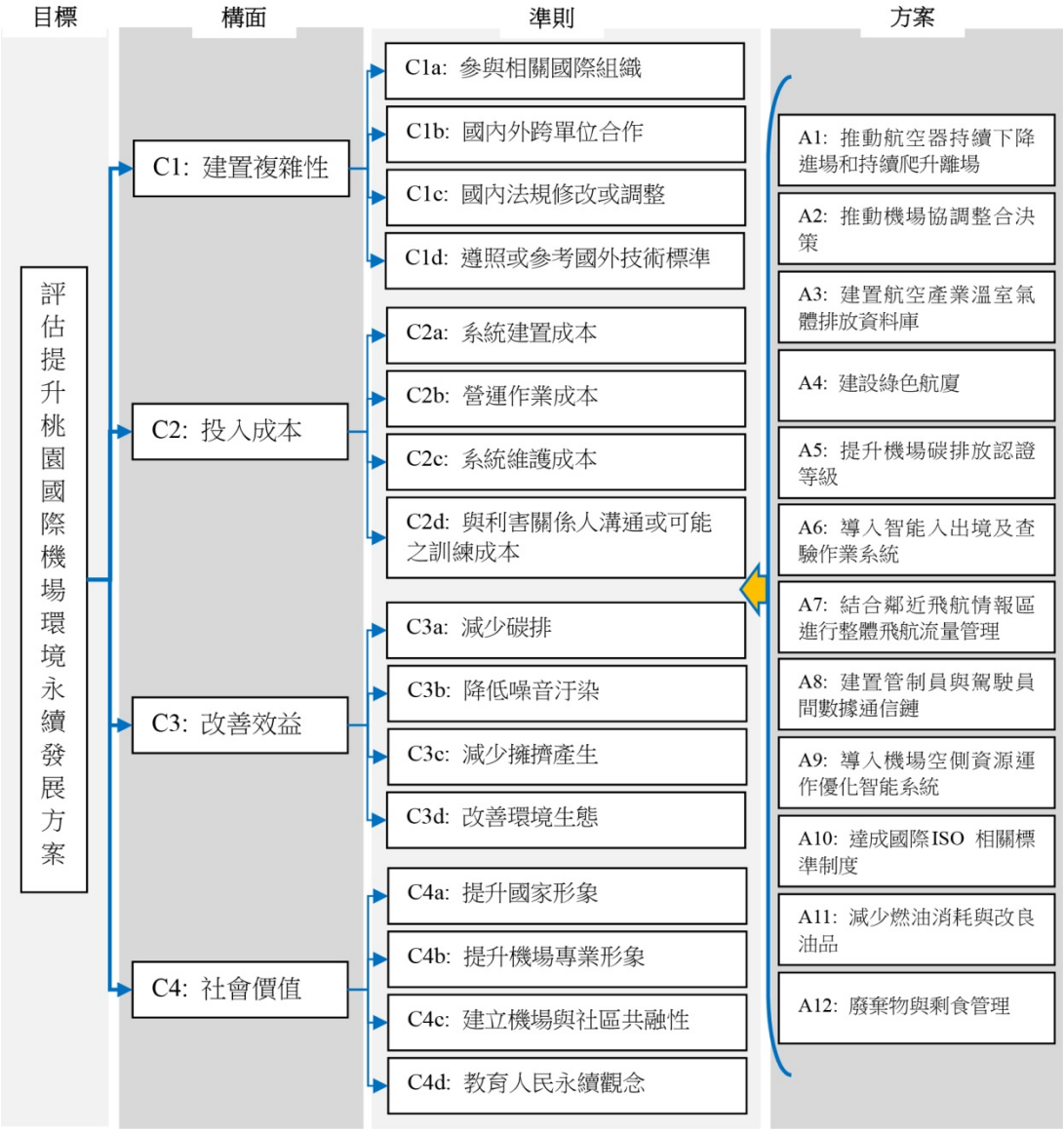


**圖 2　評估桃園國際機場永續策略的層級架構**

**表 1　準則與方案之參考來源**

| 準則與方案 | 參考來源 |
|---|---|
| C1:　建置複雜性 | 交通部 [17]；Li et al. [26]；專家提供修正建議 |
| C2:　投入成本 | Sukumaran and Sudhalar [8]；專家提供修正建議 |
| C3:　改善效益 | Postorino and Mantecchini [7]；Sukumaran and Sudhalar [8] |
| C4:　社會價值 | Oto et al. [6]；Liebe et al. [9] |
| C1a: 參與相關國際組織 | Koç and Durmaz [13] |
| C1b: 國內外跨單位合作 | Joppart [18]；Van Phat et al. [19] |
| C1c: 國內法規修改或調整 | 本研究研提；專家提供修正建議 |
| C1d: 遵照或參考國外技術標準 | 桃園國際機場 [30] |
| C2a: 系統建置成本 | Krueger et al. [25]；Li et al. [26] |
| C2b: 營運作業成本 | Sukumaran and Sudhalar [8] |
| C2c: 系統維護成本 | Li et al. [26] |
| C2d: 與利害關係人溝通或可能之訓練成本 | ACI Europe [5]；專家提供修正建議 |
| C3a: 減少碳排 | Liu et al. [24] |
| C3b: 降低噪音汙染 | Ferrulli [14]；Liu et al. [24]；Liebe et al. [9] |
| C3c: 減少擁擠產生 | ICAO [20]；Smailes et al. [21] |
| C3d: 改善環境生態 | Ferrulli [14]；Sebastian and Louis[27] |
| C4a: 提升國家形象 | Koç and Durmaz [13]；專家提供修正建議 |
| C4b: 提升機場專業形象 | Koç and Durmaz [13] |
| C4c: 建立機場與社區共融性 | Liebe et al. [9]；ACA[12, 31]；專家提供修正建議 |
| C4d: 教育人民永續觀念 | Liebe et al. [9] |
| A1:　推動航空器持續下降進場和持續爬升離場 | Liu et al. [24] |
| A2: 推動機場協調整合決策 | Joppart [18] |
| A3:　建置航空產業溫室氣體排放資料庫 | Postorino and Mantecchini[7]；Sahinkaya and Babuna [34] |
| A4:　建設綠色航廈 | Krueger et al. [25]；Li et al.[26] |
| A5:　提升機場碳排放認證等級 | 本研究研提 |
| A6:　導入智能入出境及查驗作業系統 | Rajapaksha and Jayasuriya [29] |
| A7:　結合鄰近飛航情報區進行整體飛航流量管理 | ICAO [20] |
| A8:　建置管制員與駕駛員間數據通信鏈 | Smailes et al. [21] |
| A9:　導入機場空側資源運作優化智能系統 | Van Phat et al. [19] |
| A10: 達成國際 ISO 相關標準制度 | 桃園國際機場[33]；專家建議新增 |
| A11: 減少燃油消耗與改良油品 | 盧華安等人 [22]；Shahriar and Khanal [23]；專家建議新增 |
| A12: 廢棄物與剩食管理 | Lam et al. [28]；Sebastian and Louis [27]；專家建議新增 |

1. 終極目標：評估提升桃園國際機場環境永續發展方案。
2. 構面和準則

C1: 建置複雜性：永續機場已成為國際趨勢，機場欲完成環境永續目標需多方協調，包括與其他國家合作及航空站各單位建立共識。此外，亦須遵照國外技術標準規範，並且於必要時適時地修正國內法規，以利航空站持續推動。準則包括：

C1a: 參與相關國際組織：航空產業具高度國際性，建置系統可能需顧及與國際組織或他國密切協調配合、更新或交換資訊。

C1b: 國內外跨單位合作：系統建置可能需顧及航空站與其他包含國內與國際相關單位之協同整合。

C1c: 國內法規修改或調整：欲達成永續及長遠規劃，需建立在不違法的基礎上，故需考慮會否需要進行法規修改或調整方得以推動。

C1d: 遵照或參考國外技術標準：建置系統是否須遵照國際性組織或機構，如 ICAO 等，所公布之技術標準與國際規範進行設置。

C2: 投入成本：從建置單位與系統設立至組織與系統運作，皆需投入相當的成本，而系統為長期營運亦需進行維護，與機場利害關係人溝通交流時，或針對其系統運作進行訓練時也需投入時間和成本。準則包括：

C2a: 系統建置成本：整體系統之基礎建設、輔助系統、設備軟體等所需之成本。

C2b: 營運作業成本：使系統能順利運作施行而需花費之營運成本。

C2c: 系統維護成本：整體系統與相關介面經年運作所需之維護成本。

C2d: 與利害關係人溝通或可能之訓練成本：與機場利害關係人就系統運作進行之溝通或甚至訓練，所需花費之成本。

C3: 改善效益：航空站環保永續之目的是為達到減少汙染和擁擠，包含空氣污染、噪音汙染、水汙染、陸側及空側擁擠情形，甚至是降低空域擁擠，期望能改善環境生態，以達到環境友善、低汙染的理念。準則包括：

C3a: 減少碳排：可減少航站營運和航空器運作所產生之溫室氣體與碳排放量。

C3b: 降低噪音汙染：可降低航站營運與航空器運作時所產生之噪音。

C3c: 減少擁擠產生：可提升陸側通關效率、減少空側機坪擁擠與航機滯留、或降低空域壅塞之情形。

C3d: 改善環境生態：可減少航站營運或航空器清潔所產生之水汙染，以及機場整體基地之環境生態的改善。

C4: 社會價值：追求環境永續的目的隱含了以人為本的運輸理念，達成永續除提升自身價值與形象外，推動綠色運輸可有效改善居民生活環境，並藉由航空站永續理念之執行，將此觀念植入民心。準則包括：

C4a: 提升國家形象：機場象徵國門，發展永續機場並採取行動有助於提升國家形

象。

C4b: 提升機場專業形象：施行永續發展相關方案，有助於提升機場在國際空運社群之形象。

C4c: 建立機場與社區共融性：實行機場環境永續方案後，能間接改善鄰近居民生活環境品質。

C4d: 教育人民永續觀念：推動機場永續發展的改變成果，能間接加深人民對永續觀念的認知。

3. 策略性選擇方案：

A1: 推動航空器持續下降進場和持續爬升離場：強化桃園機場航空器持續下降進場之空域設計和隔離引導體系，以及建置持續爬升離場體系，使航空器能直接進場或離場，以節省能源消耗和減少碳排放量。

A2: 推動機場協調整合決策：機場協調整合決策可提升航班正常運行，並提供資源共享和資訊交流的平臺，強調機場管理者與其他作業單位之緊密配合與協調。

A3: 建置航空產業溫室氣體排放資料庫：為達到永續發展，藉由計算並彙整航空產業溫室氣體排放，建立歷年排放量統計資料庫，作為來年減量的參考依據。

A4: 建設綠色航廈：改善航廈建材，以低環境負荷、回收、耐久，以及易維護管理之材料做為優先考量，並在未來第三航廈的建築設計，運用自然採光、減少燈具照明用電量，並以綠色植物調節室內環境等。

A5: 提升機場碳排放認證等級：國際機場碳排放認證，依碳排放減量程度分別為「盤查」(Mapping)、「減量」(Reduction)、「優化」(Optimization)、「中和」(Neutrality)、「轉型」(Transformation)、「過渡」(Transition) 共六個等級，目前桃園機場已達「優化」等級，可再向進階等級邁進。

A6: 導入智能入出境及查驗作業系統：機場導入電腦自動化和智能系統，如結合生物辨識科技，以疏解查驗櫃檯等候時間和加快通關速度；設置自助報到、自助託運行李等設備，並採用 RFID 射頻識別登機證、託運行李吊牌以節省時間提升效率；運用人體掃描儀偵測金屬、爆裂物、毒品取代傳統金屬探測門，縮短檢查時間；建置全面電子化與資訊化作業與管理，以達成完全無紙化和最佳化作業流程之目標。

A7: 結合鄰近飛航情報區進行整體飛航流量管理：飛航流量管理乃是與相鄰飛航情報區進行流量調節，安排航機到場順序及速度調節，可避免航機滯空時間過長、空域壅塞之情形。

A8: 建置管制員與駕駛員間數據通信鏈：管制員與駕駛員間數據通信鏈，可將管制員與駕駛員之間無線電口語通話，利用衛星數據資料代替，結合衛星導航及數據化傳輸，達成 CNS/ATM 飛航管理概念。

A9: 導入機場空側資源運作優化智能系統：機場從停機坪、滑行道、跑道等機場的最

佳化運用，可減少航機在地面的等候與能源消耗，減少航機運作擁擠，智能系統的建置需要大量資料的蒐集與分析，可增進決策效率。

A10: 達成國際 ISO 相關標準制度：導入國際標準組織品質、環境與能源管理等相關認證，可維持品質標準，藉由所訂之準則可精進各項作業績效與管理。

A11: 減少燃油消耗與改良油品：飛機燃油不只佔航空公司支出比例高，亦是航機碳排放之主要來源，航路規劃、優化機型等營運抉擇皆對燃油效率與能源使用效率至關重要。近年來，生質燃油和氫化技術的研發進展，期待可減緩傳統燃油對環境造成的影響，機場可扮演催化航空公司調整用油的角色。

A12: 廢棄物與剩食管理：廢棄物藉由減量、再使用、回收等循環過程，除減少環境衝擊外，確實落實垃圾分類可營造環保文化，機具持續汰舊換新，亦可降低能源浪費。航廈及空側辦公室剩食管理將油水分離，並透過特殊處理後排放，可改善水質汙染。

## 3.2 排序成對比較法

排序成對比較法源於分析層級程序法，只是在成對比較矩陣的調查上，先建立了比較元素之間的優先順序，再進行兩兩相鄰順序的比較差異，透過尺度調整後進一步轉換成比較元素的權重[35]。本研究利用 RPC 降低專家意見不一致的可能性，迅速彙整專家意見建置成對比較矩陣，透過行向量標準化平均法 (Average of Normalized Columns, ANC) 求得比較標的之權重。而在方案層的評估，顧及評選方案眾多，利用成對比較法進行不僅在專家意見蒐集上較為困難，計算 12×6 的成對比較也較為複雜，因此選用灰關聯分析法衡量受評方案的優先順序。本節介紹排序成對比較法的運算，下一節接續說明灰關聯分析法的應用。

成對比較此一概念建立在比較元素間的遞移性，以任三個元素 $r1$,$r2$ 和 $r3$ 為例，倆倆比較的結果應滿足 $w_{r1}/w_{r2} = w_{r1}/w_{r3} \times w_{r3}/w_{r2}$ 之性質，但由於調查時乃是決策者直接表達對兩元素之間的比例，因此要具備完美的遞移性並不容易。Saaty[35] 建議可容許不完美遞移性的存在，只要能滿足一致性的門檻即可被接受，其所建議的方法乃是建立比較元素間之成對比較矩陣，斜對角元素皆為 1，此矩陣的對稱元素互為倒數，利用最大特徵值法 (Principal Eigenvalue Method) 將所得的一致性指標 (Consistency Index, C.I.) 與 Saaty 所建議的隨機指標 (Random Index, R.I.) 相比作為評判，此比值稱為一致性比率 (Consistency Ratio, C.R.) 必須低於 0.1 的門檻。

若使用傳統的成對比較法來執行 AHP，根據 Lu and Liu[36] 的觀察，對於沒有經驗的受訪者或太多比較元素下，成對比較極易產生評判不一致的混淆現象，使所得結果不容易達到一致性門檻。受訪者若被要求重複調整評判結果，只為達到可接受的一致性時，受訪者原先的觀點可能會遭受扭曲。導致這樣現象的主因，應該是受訪者沒有對比較元素事先建立起先驗的排序所致。因此，該篇論文提出了 RPC 方法來彌補上述傳統成對比較法的

缺憾，此方法要求受訪者對比較元素先進行優先順序的比較，再就兩順序之間的元素比較彼此的重要性程度。這樣首先就能成對比較的次數從 n×(n – 1)/2 減少到 n – 1，n 為比較元素的數量。再者，比較的結果能符合遞移性的要求；假設某位受訪者已透露自己的優先順序是從 $r_1$ 到 $r_n$，並比較相鄰順序元素的相對性為 $p_{r_1,r_2}=w_{r_1}/w_{r_2}$、$p_{r_2,r_3}=w_{r_2}/w_{r_3}$、……、$p_{r_{n-1},r_n}=w_{r_{n-1}}/w_{r_n}$ 的相對權重，其他非相鄰排序準則之間的權重比較可以透過以下公式計算：

$$p_{r_1,r_3}=\frac{w_{r_1}}{w_{r_3}}=\frac{w_{r_1}}{w_{r_2}}\times\frac{w_{r_2}}{w_{r_3}}=p_{r_1,r_2}\times p_{r_2,r_3}\text{，}\ p_{r_1,r_4}=p_{r_1,r_3}\times p_{r_3,r_4},\ldots,p_{r_1,r_n}=p_{r_1,r_{n-1}}\times p_{r_{n-1},r_n},$$

$$p_{r_2,r_4}=\frac{w_{r_2}}{w_{r_4}}=\frac{w_{r_2}}{w_{r_3}}\times\frac{w_{r_3}}{w_{r_4}}=p_{r_2,r_3}\times p_{r_3,r_4},\ \ p_{r_2,r_5}=p_{r_2,r_4}\times p_{r_4,r_5},\ldots,\ \ p_{r_2,r_n}=p_{r_2,r_{n-1}}\times p_{r_{n-1},r_n},$$

…,

$$p_{r_{n-2},r_n}=\frac{w_{r_{n-2}}}{w_{r_n}}=\frac{w_{r_{n-2}}}{w_{r_{n-1}}}\times\frac{w_{r_{n-1}}}{w_{r_n}}=p_{r_{n-2},r_{n-1}}\times p_{r_{n-1},r_n}$$

但這個步驟會導致 $p_{r_1,r_2}$ 和 $p_{r_{n-1},r_n}$ 之間的相對權重值差異過大，如果使用 1 至 $s$ 點量表，它們的最大差異是 $s^{n-1}$，因此希望能將所有兩兩元素的相對權重，透過一縮減尺度，轉換到 1 至 s 之間。令縮減尺度間距為 d，則 $d\times(s^{n-1}-1)=s-1$，重整此式可得式 (1) 之調整尺度值，留意此處調整後的最小尺度仍然維持在 1。準此，每一個新的成對比較值可透過式 (2) 加以計算修正。表 2 列出常用之衡量尺度 (1 ~ $s$) 與不同的比較元素數量 ($n$)，在使用排序成對比較法時之新調整尺度間距 ($d$)。不過由於間距的調整，可能產生微小的不一致現象，因此本研究建議也應進行一致性檢定予以確認較佳。

$$d=\frac{s-1}{s^{n-1}-1} \tag{1}$$

$$p'_{ij}=1+d\times(p_{ij}-1) \tag{2}$$

**表 2　縮短尺度間距對應表**

| 衡量尺度 (1 ~ s) | 比較元素數量($n$) | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 ~ 5 | 1 | 0.166667 | 0.032258 | 0.006410 | 0.001280 | 0.000256 | 5.12E-05 | 1.02E-05 |
| 1 ~ 7 | 1 | 0.125000 | 0.017544 | 0.002500 | 0.000357 | 5.1E-05 | 7.29E-06 | 1.04E-06 |
| 1 ~ 9 | 1 | 0.100000 | 0.010989 | 0.001219 | 0.000135 | 1.51E-05 | 1.67E-06 | 1.86E-07 |

資料來源：Lu and Liu [36]

根據 AHP 和 RPC 之學理內容，本研究設計如下之準則評估權重計算步驟：

步驟 1：按 RPC 需求設計構面與構面下準則之排序成對比較問卷。

步驟 2：回收受訪者問卷後，按下列步驟建立個別受訪者之成對比較矩陣，並檢查其一性。

(a) 依照遞移性法則，透過排序後連續兩準則間的比較結果，計算其他非相鄰準則間之權重比較值。

(b) 利用式 (2) 之尺度調整法，計算已知元素之權重比較值。

(c) 透過倒數原則，填滿成對比較矩陣中的其他元素。

(d) 利用最大特徵值計算各專家之成對比較矩陣之一致性比率，確認符合一致性門檻。

步驟 3：將所有專家之相對應成對比較矩陣及其元素，利用幾何平均彙整成單一分析層級結構之所有成對比較矩陣。

步驟 4：利用行向量標準化平均法，如式 (3) 所示，計算所有矩陣元素之相對權重。

$$w_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{p'_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} p'_{ij}} \quad i = 1, 2, \ldots, n \tag{3}$$

步驟 5：進行層級串連，利用構面權重與所屬準則之分配權重相乘，而得各準則整體權重值。

## 3.3 灰關聯分析法

AHP 在進行方案層的成對比較時，仍要將所有方案對所有準則進行倆倆相比，當候選方案較多的情形下，亦會產生觀點失真的可能，部分文獻則採用直接評分，再與權重相乘總和所得之分數進行評級與排序。本研究之評估方案多達 12 個，要求受訪者針對各準則評比這些方案，所費時間與心力極具挑戰。由於評估準則中尚有效益型和成本型之差異，因此採用灰關聯分析中之望目準則 (objective effectiveness of measurement)，進行受評方案之評級與排序。

溫坤禮等人 [37] 對灰關聯分析法的基本概念，有詳盡介紹與說明，本文藉其內容略述其觀念與步驟。令 $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \ldots, x_0(n))$ 代表一具 $n$ 個指標系統特性的數據序列，稱為生成數列，乃是由 $m$ 個受評方案序列，$X_i = (x_i(1), x_i(2), \ldots, x_i(n))$, $i = 1, 2, \ldots, m$，所產生的比較值序列。此一生成序列，可依需求分成望大 (upper-bound effectiveness of measurement)、望小 (lower-bound effectiveness of measurement) 和望目三種原則。望大希望目標越大越好，故以序列中最大值為參考值；望小希望目標越小越好，故以序列中最小值為參考；而望目則希望目標介於最大與最小值之間，可設此值為 $OB$，式 (4) 即為灰關聯生成數值的計算公式，此亦為本研究設定的原則與計算方式。

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{\left|x_i(k) - OB\right|}{\max\{\max\left[x_i(k)\right] - OB, OB - \min\left[x_i(k)\right]\}} \tag{4}$$

$X_i$ 與 $X_0$ 的灰關聯度，$\gamma_{0i}$ 或 $\gamma(X_0, X_i)$，乃由式 (5) 表示，其中 $w_k$ 為第 $k$ 個指標之權重，其值位於 0 和 1 之間，$\sum_{k=1}^{n} w_k = 1$。$\gamma_{0i}(k)$ 則是代表序列 $X_0$ 和 $X_i$ 的第 $k$ 個指標項目的灰關聯係數，其定義如式 (6) 所示。

$$\gamma_{0i} = \gamma(X_0, X_i) = \sum_{k=1}^{n} w_k \gamma_{0i}(k), \ \ i = 1, 2, ..., m \tag{5}$$

$$\gamma_{0i}(k) = \frac{\min_i \min_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right| + \max_i \max_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right|}{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left|x_0(k) - x_i(k)\right| + \max_i \max_k \left|x_0(k) - x_i(k)\right|} \tag{6}$$

本研究在生成過程採取的望目原則，乃是將成本準則以望小原則處理，效益準則以望大原則處理。而所有方案中的準則數值，乃是將每位受訪者對選擇方案之準則的評價先進行幾何平均而得，採用幾何平均數而非算術平均數，乃為降低平均值受離群值的影響。最後候選方案乃是以灰關聯度的大小，判定其執行的優先順序。

## 3.4 問卷設計與調查

依照本研究所提出的分析層級架構及 RPC 所需，將問卷設計成先排序再比較相鄰元素之重要程度，重要程度分成 9 點尺度，其語意定義詳如表 3 所示。此外問卷亦請受訪者同樣以 9 個尺度表達 12 個候選方案對評選準則的影響程度，尺度從完全不影響的 1 分至影響極大的 9 分。由於構面一和構面二所屬準則為成本型，即表示影響愈大，優先排序的順序愈低。反之，構面三和構面四是效益型，即表示影響愈大，優先排序的順序愈高。

**表 3　問卷中重要性比較採用之評估尺度與意義說明**

| 評估尺度 | 語意變數 | 定義說明 |
|---|---|---|
| 1:1 | 同等重要 | 兩比較方案的貢獻度具同等重要性 |
| 3:1 | 稍微重要 | 經驗與判斷稍微傾向喜好某一方案 |
| 5:1 | 頗為重要 | 經驗與判斷強烈傾向喜好某一方案 |
| 7:1 | 極為重要 | 經驗與判斷非常強烈傾向喜好某一方案 |
| 9:1 | 絕對重要 | 經驗與判斷完全傾向喜好某一方案 |
| 2:1, 4:1, 6:1, 8:1 | 相鄰語意中間值 | 需要折衷時 |

問卷共發放給 15 位專家，最後回收 12 份，回收率為 80%；但其中一份回答不完全，判定為無效問卷，有效回收率為 73%。表 4 為有效問卷之受訪者背景彙整，有效問卷包含

2 位民航主管單位官員、3 位運輸研究單位幕僚、2 位機場管理當局同仁和 4 位航空領域學者。填答者在民航領域的工作或研究經驗，大部分都在 10 年以上。其中一位民航局官員和一位學者，亦為參與問卷試擬與建議之委員。

**表 4　問卷中重要性比較採用之評估尺度與意義說明**

| 受訪者群體 | 問卷發放數 | 問卷回收數 | 有效問卷數 | 民航工作或研究經驗年資 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 0-5 年 | 5~10 年 | 10 年以上 |
| 民航主管單位官員 | 3 | 2 | 2 | 0 | 1 | 1 |
| 運輸研究單位幕僚 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | 3 |
| 機場管理當局同仁 | 4 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| 航空領域學者 | 6 | 5 | 4 | 0 | 0 | 4 |

# 四、評估結果與討論

## 4.1 權重評估結果

透過 RPC 計算過程，填答者在構面部分的一致性比率為 0.00303；在準則層介於 0.00021 至 0.00858 之間；層級一致性比例則是 0.00293，均符合一致性應有的門檻。彙整過後的構面重要性以建置複雜性 (C1) 最為關鍵，其權重值為 0.2614，其次是改善效益 (0.2597) 和投入成本 (0.2549)，社會價值居末，權重值為 0.2240。綜合專家觀點推論，所有環保永續方案施行時，最應擔憂的是建置時所可能牽涉的關聯性，跨單位整合或法規上的變更，太過複雜的體系或建置過程並不容易成功達成，所得的永續成效也有可能事倍功半。

準則層評估之整體權重分配結果，以系統建置成本 (C2a) 為最重要的考量因素，該準則的整體權重為 0.07949，其所屬為投入成本構面。其次是建置複雜性構面中的國內外跨單位合作 (C1b)，整體權重為 0.07194。第三重要的準則為改善效益構面的改善環境生態 (C3d)，整體權重為 0.06769。表 5 彙整所有構面和準則之評估權重，從中也可發現改善效益層面的準則，重要性較為全面，其他構面僅凸顯少數準則的受重視程度。而社會價值構面中的 4 個準則，幾乎都在 16 個準則裡排名居於末段；但投入成本構面中的「與利害關係人溝通或可能之訓練成本」準則於全部準則中墊底，整體權重為 0.04880。

綜合上述，建置複雜性是所有構面中最重要的，但在跨單位合作和法規修改上，是較值得留意之處，但專家們似乎也覺得無須太在意與國際關聯的顧忌，永續發展仍應以國內的發展方向為主導。另投入成本主要強調建置和維護成本，其他的成本花費可能都是九牛一毛，無須太過重視，尤其永續觀念已為普世價值之下，溝通或訓練成本又比其他準則的重要性相對更低。在改善效益的考量上，以生態環境和減少空污較為重要，亦與現在大部

分航空永續作為的步調一致。至於社會價值層面的重要性較低，可能也因為在臺灣對全民永續觀念推展仍處於起步階段，衡諸於其他較實體面的因素，相對較未受到重視。

**表 5　構面與準則之權重與排名**

| 構面(權重) | 準則 | 相對權重 | 整體權重 | 排序 |
|---|---|---|---|---|
| C1:<br>建置複雜性<br>(0.2614) | C1a:參與相關國際組織 | 0.2410 | 0.06300 | 9 |
| | C1b:國內外跨單位合作 | 0.2752 | 0.07194 | 2 |
| | C1c:國內法規修改或調整 | 0.2504 | 0.06547 | 5 |
| | C1d:遵照或參考國外技術標準 | 0.2334 | 0.06101 | 12 |
| C2:<br>投入成本<br>(0.2549) | C2a:系統建置成本 | 0.3119 | 0.07949 | 1 |
| | C2b:營運作業成本 | 0.2419 | 0.06164 | 10 |
| | C2c:系統維護成本 | 0.2547 | 0.06492 | 6 |
| | C2d:與利害關係人溝通或可能之訓練成本 | 0.1915 | 0.04880 | 16 |
| C3:<br>改善效益<br>(0.2597) | C3a:減少碳排 | 0.2525 | 0.06557 | 4 |
| | C3b:降低噪音汙染 | 0.2435 | 0.06322 | 7 |
| | C3c:減少擁擠產生 | 0.2434 | 0.06320 | 8 |
| | C3d:改善環境生態 | 0.2607 | 0.06769 | 3 |
| C4:<br>社會價值<br>(0.2240) | C4a:提升國家形象 | 0.2448 | 0.05484 | 14 |
| | C4b:提升機場專業形象 | 0.2512 | 0.05627 | 13 |
| | C4c:建立機場與社區共融性 | 0.2749 | 0.06159 | 11 |
| | C4d:教育人民永續觀念 | 0.2291 | 0.05134 | 15 |

## 4.2 受評方案排序

本研究之灰關聯分析採用望目原則，希望可以透過理想目標值達到較精準的灰關聯度計算。其中建置複雜性、投入成本兩構面屬於成本型，因此將這兩個構面中的準則目標值設定為越低越好。反之，改善效益及社會價值是效益型準則，所以這兩個構面的準則目標採越高越好。

經由所有專家針對各受評方案之 9 點評級，並以幾何平均值彙整獲得各方案在所有準則的評量，詳如圖 3 所示。藉由此數據序列，按照灰關聯分析步驟之計算結果得知，建設綠色航廈 (A4) 的灰關聯度為 0.59469，可列為提升桃園國際機場永續發展策略性方案評估的首要替選方案。第二替選方案是提升桃園機場的碳排放認證等級 (A5)，其灰關聯度為 0.58506，與排名第一差距為 0.00963。第三替選方案為灰關聯度 0.57146 的減少燃油消耗

與改良油品 (A11)。而灰關聯度最低的替選方案為建置管制員與駕駛員間數據通信鏈，其灰關聯度為 0.49224；其餘受評方案之灰關聯度，彙整於表 6。

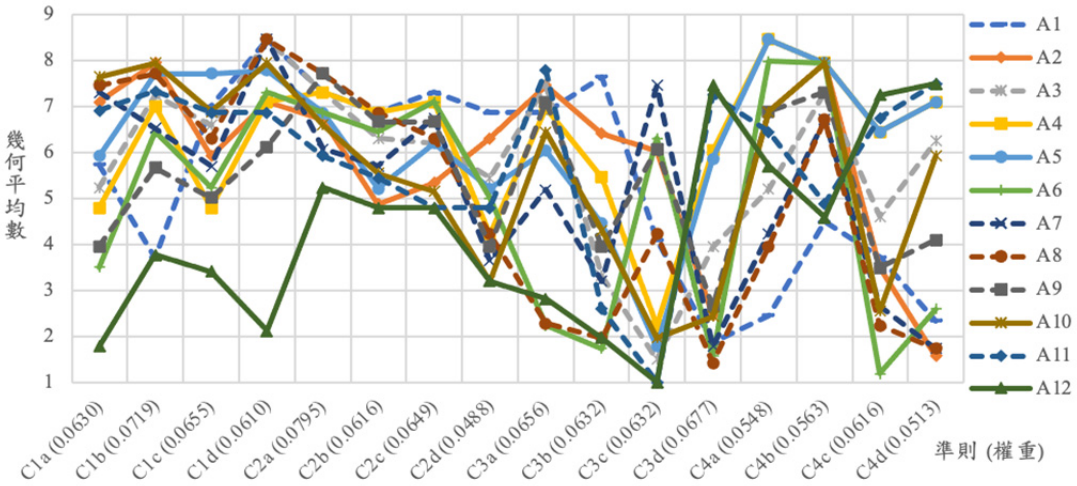


**圖 3　選擇方案的準則之幾何平均數**

**表 6　總體填答者之灰關聯分析及加權評分排序**

| 排序 | 受評方案 | 灰關聯度 | 差距 |
|---|---|---|---|
| 1 | A4: 建設綠色航廈 | 0.59469 | - |
| 2 | A5: 提升機場碳排放認證等級 | 0.58506 | 0.00963 |
| 3 | A11: 減少燃油消耗與改良油品 | 0.57146 | 0.01360 |
| 4 | A9: 導入機場空側資源運作優化智能系統 | 0.56548 | 0.00598 |
| 5 | A2: 推動機場協調整合決策 | 0.54678 | 0.01870 |
| 6 | A3: 建置航空產業溫室氣體排放資料庫 | 0.54667 | 0.00012 |
| 7 | A1: 推動航空器持續下降進場和持續爬升離場 | 0.54637 | 0.00030 |
| 8 | A12: 廢棄物與剩食管理 | 0.53958 | 0.00679 |
| 9 | A7: 結合鄰近飛航情報區進行整體飛航流量管理 | 0.53921 | 0.00037 |
| 10 | A10: 達成國際 ISO 相關標準制度 | 0.53484 | 0.00437 |
| 11 | A6: 導入智能入出境及查驗作業系統 | 0.52573 | 0.00911 |
| 12 | A8: 建置管制員與駕駛員間數據通信鏈 | 0.49224 | 0.03349 |

從表 6 中亦可發現建立綠色航廈，是所有歸屬於陸側方案中最應努力付諸執行的；而在空側部分，則是導入機場空側資源運作優化智能系統。提升機場碳排放認證等級雖為管理層面的方案，但其需要有全面性和多細節性的執行內容予以支持，但好處是能有一定的

執行規範與方針可以遵行。

圖 4 進一步解析前三名受評方案，在不同準則的幾何平均數，以瞭解其所具備的優勢何在，說明如下：

1. 建設綠色航廈(A4)

若桃園國際機場實施建設綠色航廈的行動方案，此方案的優勢是較不受建置複雜性之約束，尤其是不受參與相關國際組織、國內法規修改或調整的影響。除此之外，也有助於社會價值的提升，特別是在改善國家形象及機場專業形象。但可能也在建置成本上會有較大的負擔，效益層面以減少空污為主。

2. 提升機場碳排放認證等級(A5)

若實施此行動方案，優勢為營運作業成本、與利害關係人溝通或可能之訓練成本較低。同樣，此方案將有助於社會價值的提升，特別是在改善國家形象及機場專業形象。不過此一方案需要較多的跨單位協調、法規修改和遵循國際的標準要求，與其他兩方案一樣，可能也無助於改善機場擁擠現象。

3. 減少燃油消耗與改良油品(A11)

若實施減少燃油消耗與改良油品之方案，最大的優勢在於改善效益的方面，特別是有效減少空氣污染、改善環境生態。除此之外，此方案之成本花費相對其他兩個方案為優；對於教育人民永續觀念的效益也較高。

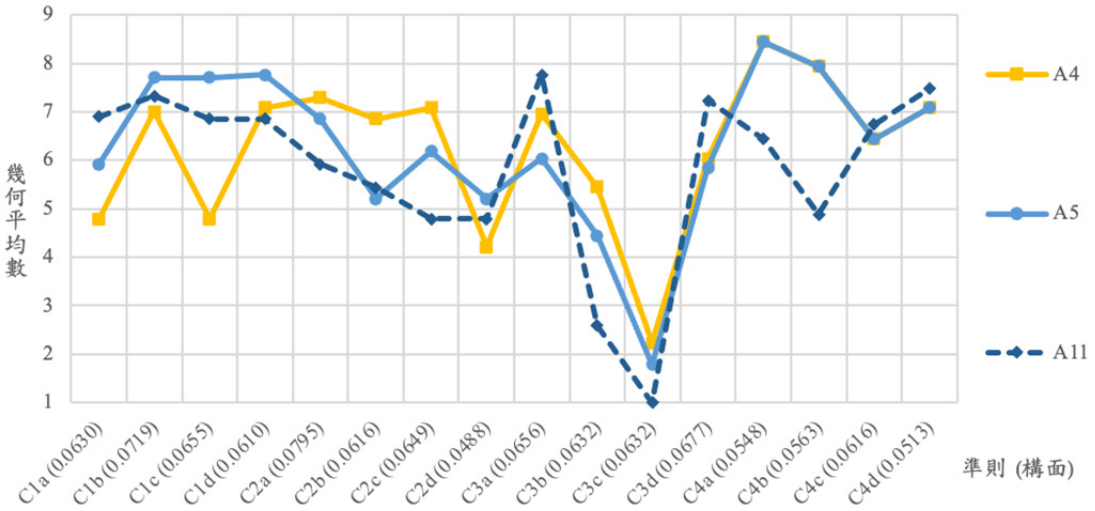


**圖 4　排序前三名之受評方案的準則幾何平均值**

## 4.3 不同群體觀點比較

問卷填答者的背景，主要分為公部門與學者兩類，但在公部門中仍可有主管單位和研究幕僚之分。雖然填答者之回覆並不代表所屬單位之意見，但都可代表特定群體之專業觀

點，因此本研究將問卷依填答者背景分成三類。第一類主管單位，包含民航局和機場公司同仁；第二類為研究幕僚，乃是整合運輸研究幕僚之意見；第三類即是專業學者。三個群體的樣本數分別為四位、三位和四位。將三個群體重新個別執行 RPC 和 GRA 的程序，以獲得構面、準則之權重，以及受評方案之灰關聯度比較。

圖 5 顯示三類群體在構面層之計算權重，其中主管單位認為改善效益是最重要的策略方案選取依據，但研究幕僚較考量建置成本的付出，專業學者較考慮系統建置的複雜性，但也是三群體中，最重視社會價值層面。值得關注的是，主管單位並不會太在意成本的付出和社會價值，可能在業務推廣中，如何獲得最有效的成果避免複雜性的方案，才是經驗中最有可行性的目標。研究幕僚對社會價值的認可是所有評估當中最低的，可能覺得臺灣尚未到將機場的永續價值推廣至社會群眾，畢竟機場只是旅行過程中的站點，全國尚有其他更應受重視的永續推動方向。專業學者在四個構面的權重分配，相對較為平均，且較從社會公益角度著想，希望能讓機場永續價值，也能普及在所有利害關係人的心中。

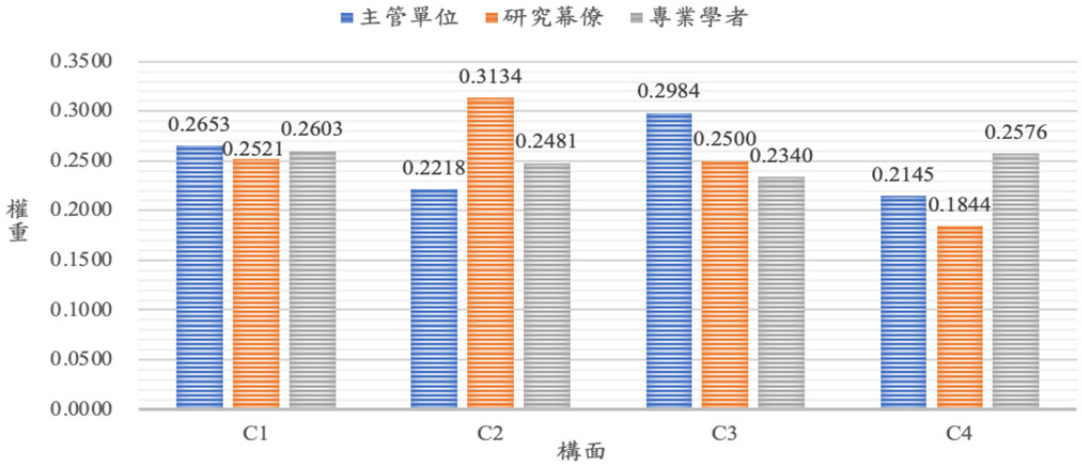


**圖 5　三種群體構面之權重結果比較**

三類群體在準則層的選擇，可從圖 6 中獲知。主管單位最強調改善環境生態之效果，其次是擁擠改善與減少空污，在國內外跨單位合作、參與國際組織和系統建置成本，分別也獲得較高的青睞。研究幕僚極為重視系統的建置成本，其他營運作業成本與系統維護成本，也名列前三名，顯示研究幕僚深刻瞭解成本面的影響，策略性方案執行後可能就無法任意放棄，因此應在執行前好好考慮整體系統的經費負擔，甚至是財源的籌措。而學者群除了最重視建置成本和國內外跨單位合作外，其餘均為機場專業形象、國家形象、機場與社區共融的社會價值。

如圖 7 所示，主管單位和專業學者對受評方案的排序，最青睞建設綠色航廈 (A4) 和提升機場碳排放認證等級 (A5)；但研究幕僚覺得應先推動減少燃油消耗和改良油品，之後再進行此兩個方案。主管單位也認同燃油消耗和油品改良的措施，同時也覺得應該要推動

機場廢棄物與剩食管理 (A12)，之後才投入空側之機場協調整合決策 (A2)。顯見主管單位覺得陸側之綠色航廈是最應考量的方案，其餘應以管理功能的部分為優先。研究幕僚除前兩個方案外，覺得空側之導入機場空側資源運作優化智能系統 (A9) 和推動航空器持續下降進場和持續爬升離場 (A1) 較能達到環境永續之效果。專業學者也較著重於空側之改善方案，除 A1、A9 外，結合鄰近飛航情報區進行整體飛航流量管理 (A7) 也是可優先設置之系統。

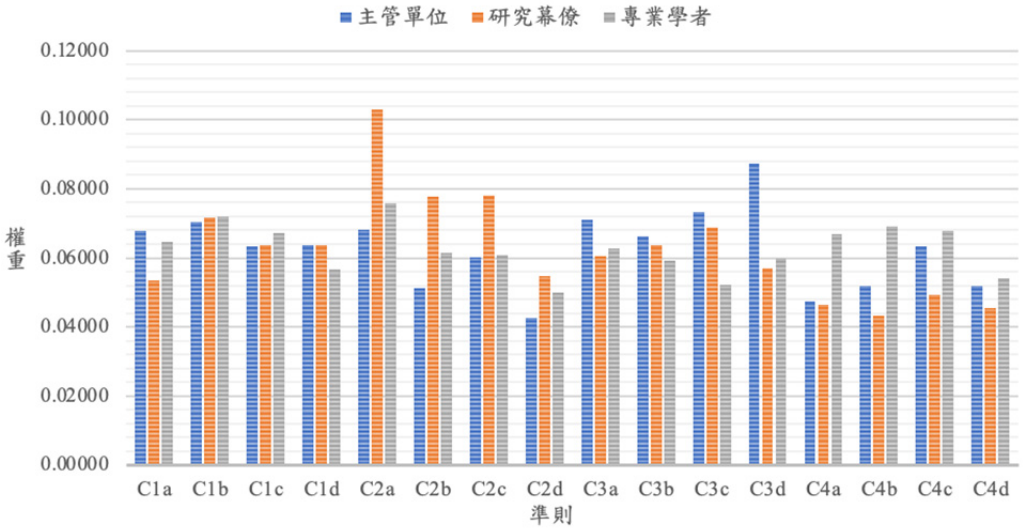


**圖 6　三種群體準則之權重結果比較**

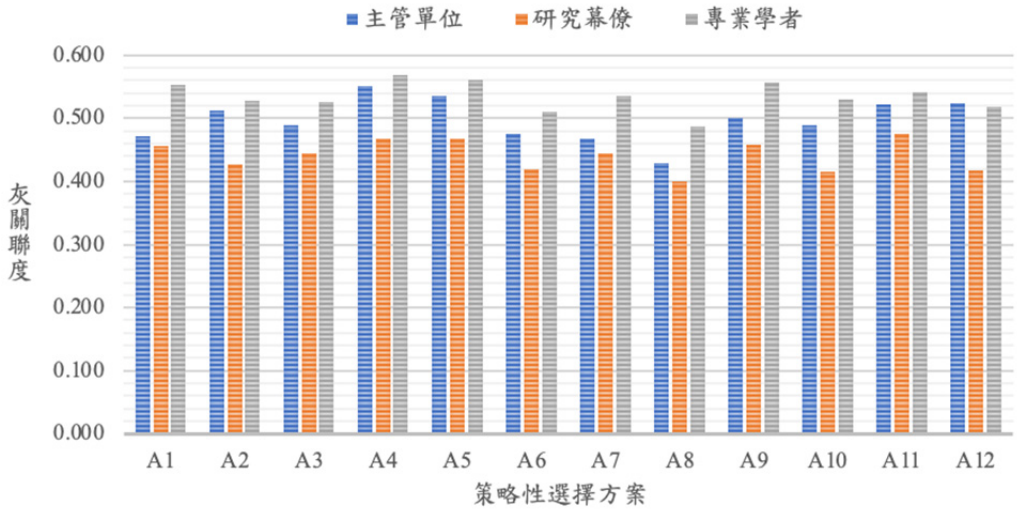


**圖 7　三種群體選擇方案優先順序之比較**

總結三類群體對於方案的選擇，建設綠色航廈和提升機場碳排放認證等級是大家的共識，其次主管單位會傾向先推動管理功能性的方案，但研究幕僚和專業學者則選擇空側的智能方案或協調方案的建置。

# 五、結論與建議

永續發展已是普世價值，而環境永續則是當務之急，國際間正如火如荼地推動相關的淨零措施。航空運輸是重要的運輸系統之一，與民眾的接觸度最高；而機場扮演空運系統和其他運輸系統的介面，與旅客和周遭社群關係密切，因此其環境永續的行動，最能與所有的利害關係人相結合。本研究蒐集以往文獻和推展中的計畫，以桃園機場為對象，建立 4 個構面、16 個準則和 12 個受評方案的分析層級架構，藉由產業專家和專業學者的協助，利用排序成對比較法和灰關聯分析法，獲得相對重要之評估構面與準則，同時獲得對桃園機場最有助益之策略性方案。綜整所得結論如下：

1. 整體專家學者的意見共識指出，建設綠色航廈及提升機場碳排放認證等級，是目前引導桃園國際機場走上永續發展之路的最佳方向，專家也認為減少燃油消耗與改良油品有助於促進桃園國際機場的永續發展。儘管燃油消耗與改良油品的發展策略與決策牽涉多方單位，但永續燃油的推動使用已是國際航空產業與政府單位的共識，桃園機場須面對供給設施鋪設的課題，以及國、內外航空公司的殷殷期盼，只要確定永續燃油的可行性與商業化，桃園機場扮演推手的角色責無旁貸。
2. 在評估機場永續方案時，系統建置的複雜性是最應關注的構面；而系統建置成本、跨單位協同合作、改善環境生態是最應留意的因素。
3. 由於填答專家來自於不同的背景，若欲細部瞭解個別的評估與選擇，主管單位認為改善效益是最重要的策略方案選取依據，研究幕僚較考量建置成本的付出，專業學者則重視系統建置的複雜性。準則層面的重視因素，也反映了構面層的排序。
4. 三類群體對於方案的選擇，建設綠色航廈和提升機場碳排放認證等級仍是大家的共識；除此，主管單位會傾向先推動管理功能性的方案，但研究幕僚和專業學者則選擇空側的智能方案或協調方案的建置。
5. 社會價值構面的重視程度不一，專業學者與其他公部門專家的意見明顯不一。利害關係人溝通或可能之訓練成本，在評選結果顯示最不受重視，並不一定是其不重要，而是所花費的成本可能相對無足輕重，或這是所有方案執行後都該付出的，故對任何方案都不具影響性。尤其，利害關係人溝通或可能之訓練成本與社會價值具連動關聯，永續教育應該也是推動時重要的環節。

根據以上的研究成果，建議桃園國際機場應在新的環保建材上規劃預算，且以低環境負荷為主打造成令人感動的綠色航廈，讓桃園國際機場在陸側方面有更進一步的永續發展。除此之外，桃園機場目前已通過機場碳排放認證第三級，未來應持續致力於最高等級

的腳步邁進，如此才能更全面性的推展相關永續措施。在細節措施的制訂上，廢棄物與剩食管理是有效但花費較低成本的方案，其對機場生活圈的利害關係人最有助益。此外，桃園機場也應留意社會價值的推展，審視社會價值對於未來發展的效益，畢竟獲得大眾的支持，提升機場專業形象是永續治理不可或缺的元素。

永續發展目標的訂定與推展越來越受重視，本研究在執行調查時，尚未有太多專家可供諮詢，但未來研究必然可以廣納意見，獲得更多的專業人士以及桃園機場公司永續發展團隊的協助，甚至建構更為完善和全面的評估架構。本研究的成果為一策略性的選擇，但在確認方案是否施行前，仍應做細部資料蒐集與評估，方能獲得更為縝密的資訊提供決策者參考。本研究從文獻與相關報告中擷取了 12 項的發展方案進行評估，但並未考量其可能的影響範圍與建置規模，後續研究若能針對不同環保永續方案的特性，預先邀請相關專家協助進行歸類與評選，則可讓相同型態或特性相近的方案集中評量，在評估結果的呈現上應能更為細緻，從實務作業的資源投入來看也會有較一致的評準。此外機場永續治理與環境永續息息相關，且須顧及的層面也更為廣泛，未來研究可朝向這一全面性的課題再進行深入探討。

## 參考文獻


1. United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*, A/RES/70/1, New York, 2015.
2. International Air Transport Association (IATA), *Annual Report 2009 International Air Transport Association*, 65th Annual General Meeting, Kuala Lumpur, 2009.
3. International Air Transport Association (IATA), *Annual Review 2022*, 78th Annual General Meeting and World Air Transport Summit, Doha, Qatar, 2022.
4. International Civil Aviation Organization (ICAO), On Board *A Sustainable Future: 2016 Environmental Report*, Montreal, QC, Canada, 2016.
5. Airports Council International (ACI) Europe, *Sustainability Strategy for Airports*, Limassol, Cyprus, 2019.
6. Oto, N., Cobanoglu, N., and Geray, C., "Education for Sustainable Airports", *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Vol. 47, 2012, pp. 1164-1173.
7. Postorino, M. N., and Mantecchini, L., "A Transport Carbon Footprint Methodology to Assess Airport Carbon Emissions", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 37, 2014, pp. 76-86.
8. Sukumaran, S., and Sudhakar, K., "Fully Solar Powered Airport: A Case Study of Cochin International Airport", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 62, 2017, pp. 176-188.
9. Liebe, U., Preisendörfer, P., and Enzler, H. B., "The Social Acceptance of Airport Expansion Scenarios: A Factorial Survey Experiment," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 84, 2020, 102363.
10. Sarbassov, Y., Venetis, C., Aiymbetov, B., Abylkhani, B., Yagofarova, A., Tokmurzin, D.

and Inglezakis, V. J., "Municipal Solid Waste Management and Greenhouse Gas Emissions at International Airports: A Case Study of Astana International Airport", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 85, 2020, 101789.

11. Dos Santos, A. J., Mancini, S. D., Roveda, J. A. F., Ewbank, H. and Roveda, S. R. M. M., "A Fuzzy Assessment Method to Airport Waste Management: A Case Study of Congonhas Airport, Brazil," *Journal of Air Transport Management*, Vol. 87, 2020, 101838.
12. Airport Carbon Accreditation (ACA), "Accredited Airports across the World", https://www.airportcarbonaccreditation.org/accredited-airports/, 2025.
13. Koç, S., and Durmaz, V., "Airport Corporate Sustainability: An Analysis of Indicators Reported in the Sustainability Practices", *Procedia-social and Behavioral Sciences*, Vol. 181, 2015, pp. 158-170.
14. Ferrulli, P., "Green Airport Design Evaluation (GrADE)–Methods and Tools Improving Infrastructure Planning," *Transportation Research Procedia*, Vol. 14, 2016, pp. 3781-3790.
15. Chao, C. C., Lirn, T. C. and Lin, H. C., "Indicators and Evaluation Model for Analyzing Environmental Protection Performance of Airports", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 63, 2017, pp. 61-70.
16. Kaszewski, A. L., and Sheate, W. R., "Enhancing the Sustainability of Airport Developments", *Sustainable Development*, Vol. 12, No. 4, 2004, pp. 183-199.
17. 交通部，**運輸政策白皮書(綠運輸分冊)**，民國 108 年 12 月。
18. Joppart, P., "Airport Collaborative Decision Making: Integrating Airports into the Network", *Journal of Airport Management*, Vol. 5, No. 4, 2011, pp. 295-297.
19. Van Phat, T., Alam, S., Lilith, N., Tran, P. N. and Binh, N. T., "Deep4air: A Novel Deep Learning Framework for Airport Airside Surveillance", In 2021 IEEE International Conference on Multimedia and Expo Workshops (ICMEW), 2021, pp. 1-6.
20. ICAO, *Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management (ATFM)*, DOC 9971, 2018.
21. Smailes, J., Moser, D., Smith, M., Strohmeier, M., Lenders V. and Martinovic, I., "You talkin' to Me? Exploring Practical Attacks on Controller Pilot Data Link Communications", CPSS '21: Proceedings of the 7th ACM on Cyber-Physical System Security Workshop, 2021, pp. 53–64.
22. 盧華安、余坤東、蕭凱珊，「航空公司有效綠色運輸策略與方案之研究」，**航運季刊**，第 25 卷，第 3 期，民國 105 年，頁 1-24。
23. Shahriar, M. F., and Khanal, A., "The Current Techno-Economic, Environmental, Policy Status and Perspectives of Sustainable Aviation Fuel (SAF)", *Fuel*, Vol. 325, 2022, 124905.
24. Liu, J., Zhang, J., Dai, X., and Zu, H., "Research on Trajectory Generation and Optimization in Continuous Descent Operations", In 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2018.
25. Krueger, K., Stoker, A., and Gaustad, G., "Alternative Materials in the Green Building and Construction Sector: Examples, Barriers, and Environmental Analysis", *Smart and Sustainable Built Environment*, Vol. 8, No. 4, 2019, pp. 270-291.
26. Li, X., Chen, X., and Liu, Z., "Research on Construction and Development of Green Airport", In 2022 International Conference on Urban Planning and Regional Economy

(UPRE 2022), 2022, pp. 434-437.

27. Sebastian, R. M., and Louis, J., "Understanding Waste Management at Airports: A Study on Current Practices and Challenges Based on Literature Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 147, 2021, 111229.
28. Lam, C. M., Iris, K. M., Medel, F., Tsang, D. C., Hsu, S. C., and Poon, C. S., "Life-cycle Cost-benefit Analysis on Sustainable Food Waste Management: The case of Hong Kong International Airport", *Journal of cleaner production*, Vol. 187, 2018, pp. 751-762.
29. Rajapaksha, A., and Jayasuriya, N., "Smart Airport: A Review on Future of the Airport Operation", *Global Journal of Management and Business Research*, Vol. 20, No. 3, 2020, pp. 25–34.
30. 桃園國際機場股份有限公司，**2021 企業社會責任報告書**，民國 111 年。
31. Airport Carbon Accreditation (ACA), 7 Level of Accreditation, https://www.airportcarbonaccreditation. org/about/7-levels-of-accreditation/, 2025.
32. Dube, K., "Climate Action at International Airports: An Analysis of the Airport Carbon Accreditation Programme", In: Nhamo, G., Chikodzi, D., Dube, K. (eds) Sustainable Development Goals for Society Vol. 2. *Sustainable Development Goals Series*, Springer, Cham. 2021, pp. 237-251.
33. 桃園國際機場股份有限公司，**2020 企業社會責任報告書**，民國 110 年。
34. Sahinkaya, S. A., and Babuna, F. G., "Baseline Values of Greenhouse Gas Emissions for An Airport", *International Journal of Global Warming*, Vol. 23, No. 2, 2021, pp. 129-137.
35. Saaty, T. L., *The Analytic Hierarchy Process*, McGraw-Hill, New York, 1980.
36. Lu, H.-A. and Liu, R.-R., "Market Opportunity Analysis and Evaluation of the Expansion of Air Transport Services across the Taiwan Strait", *Journal of Air Transport Management*, Vol. 37, 2014, pp. 10-19.
37. 溫坤禮、黃宜農、陳繁雄、李元秉、連志峰、賴家瑞，**灰預測原理與應用**，全華科技圖書股份有限公司，臺北，民國 91 年。