

營建廢棄物清運車輛排程暨處理場 選址最佳化之研究¹

OPTIMIZATION OF CONSTRUCTION WASTE TRANSPORT SCHEDULING AND WASTE-TREATMENT PLANT SITE SELECTING

顏上堯 Shangyao Yan²

黃紀涵 Chi-Han Huang³

陳怡君 Yi-Chun Chen⁴

(107年7月26日收稿，107年11月10日第1次修改，107年12月27日定稿)

摘 要

實務上營建廢棄物的清運從選擇處理場、自有或租賃車輛調派等，仍以人工經驗的方式進行，缺乏系統性的整體考量，常導致決策績效不佳及效率不彰。本研究以環保公司的立場，發展最佳化營建廢棄物清運車輛排程暨處理場選址模式，以幫助決策者同時規劃自有及租賃車輛清運及處理場選址。本研究藉由時空網路流動技巧，定式車輛在時空網路中流動情況，以總成本最小化為目標構建一模式。有效地求解實務問題，本研究並發展一啟發解演算法。最後，為評估模式與演算法之績效，本研究以某環保公司資料為範例進行測試，初步結果顯示本模式與啟發解的效果頗佳，可提供實務決策者參考。

-
1. 本文初稿之一部分曾發表於2017第13屆臺灣作業研究學會年會暨學術研討會。本文承科技部計畫(MOST104-2221-E-008-032-MY3)之部分補助，特此致謝。作者亦感謝二位審查委員寶貴的意見，使得本文更為嚴謹。
 2. 國立中央大學土木工程學系教授，通訊作者（聯絡地址：32001 桃園市中壢區中大路 300 號國立中央大學土木工程學系；電話：03-4227151 分機 34141；E-mail：t320002@cc.ncu.edu.tw）。
 3. 國立中央大學土木工程學系碩士。
 4. 國立中央大學土木工程學系博士。

關鍵詞：營建廢棄物清運排程；時空網路；處理場選址；啟發解演算法

ABSTRACT

In practice, decision makers of environmental companies dispatch their own and rental vehicles, and select the waste-treatment plants according their experiences without a system perspective, which is neither efficient nor effective. Therefore, this research adopts the time-space network technique to build a model with the aim of minimizing the total operating cost, to help environmental protection companies for construction waste transport scheduling and waste-treatment plant sites selecting. To efficiently solve large problems occurred in practice, a solution algorithm is also developed. Finally, a case study using real data from an environmental company is conducted to evaluate the proposed model and the solution algorithm. The preliminary test results are good, showing that the model and the solution algorithm could be used as references in practice.

Key Words: Construction waste transport scheduling; Time-space network; Waste-treatment plants selecting; Heuristic algorithm

一、緒 論

自從十八世紀工業革命以來，由於人口快速增加，造成自然資源日益匱乏。目前世界上許多國家致力於各產業廢棄物回收再利用，以達到環境永續發展，避免非再生能源的耗竭。臺灣地區每年營建工程所產生的營建副產物（包括廢棄土與混合物）約有 1,800 萬公噸，這些廢棄物中常存有許多可回收再利用的非再生資源，若無完善的回收管理機制，則除造成資源的浪費外，大量的廢棄物亦會對環境產生衝擊。因此，營建廢棄物的回收再利用，為現今環境保護與永續發展之一重要議題。有別於一般家庭廢棄物，營建廢棄物不僅體積龐大，數量也較多，須有專門車輛之環保公司安排清運，以送至處理機構加以分類及判斷是否有再生資源可以回收利用。

過去有一些文獻針對營建廢棄物管理與清運問題進行探討，例如張傑^[1]分析國內營建廢棄混合物處理與再利用機構二業者之間的差異性，並利用文獻收集、業者的營業數據調查、本量利分析之損益平衡點分析、損益表分析、SWOT 分析及碳排放量分析方法，提出政府對於營造業所產生廢棄物質的管制機制及執法方式。蔡文夏^[2]針對環保清運公司之載運營建混合物車輛調派問題，考量載運車清運路徑，及單一環保回收廠作業，以最佳化最大利潤為目標，利用數學規劃方法建構數學模式，並以 Lingo 套裝軟體求解，提供決策者規劃載運車清運營建廢棄物的調派。Gangoellis 等人^[3]以西班牙建築公司所調查數據為例，利用問卷調查方式，分析營建工程在工地中如何有效控管廢棄物之流向。Yan 等人

[4] 針對營建廢棄物清運排程規劃問題，以環保清運業者觀點為考量，利用 C++ 程式語言搭配數學規劃軟體 CPLEX 求解，有效地規劃營建廢棄物清運排程。

此外，營建廢棄物在設定處理場位置時，對於環保公司而言，如何選擇最佳位置設置也是目前面臨的重要問題。一般業者在設立處理場時，除了要考量土地租金以外，還有一般固定支出以及運輸成本，因此，處理場的區位選擇對於總成本亦會產生很大的影響。此部分屬於區位選擇問題，最早的研究為 Weber [5] 提出，主要解決工廠設置的區位問題，目標為使原料產地至工廠與工廠至市場之總旅行距離最小化，以求得工廠最佳位置，因此區位選擇理論開始蓬勃發展。Sumathi 等人 [6] 考慮地質、水資源、土地使用、敏感地點、空氣品質與地下水水質等垃圾掩埋場選址因素，並將這些因素根據它們的相對重要性與衝擊強度分配權重。接著利用多準則決策分析 (multi-criteria decision analysis, MCDA) 與地理資訊系統，解決新建垃圾掩埋場的選址問題。詹曙嘉 [7] 針對掩埋場區位之選擇，評估篩選出 8 項影響因子，並以新北市案例，透過地理空間資訊整合技術選出適合設置掩埋場的地點，最後以成本最小化為目標，利用數學規劃法選出最佳設置地點。Eiselt 與 Marianov [8] 針對垃圾掩埋場選址問題，透過不同文獻討論不同類別之決策準則模式，並以一般成本最小化為目標建構垃圾掩埋場選址模式。Habibi 等人 [9] 將由客戶、轉運站、垃圾掩埋場、回收廠和廢棄物清運車輛所構成之一城市固體廢棄物管理系統，同時考量經濟、環境與社會觀點，以最小化總成本、溫室氣體排放與視覺污染等目標，發展一多目標最佳化系統，以幫助決策者選擇垃圾掩埋場、回收場以及決策設施之最佳位置。

實務上，根據臺灣法規規定，一定規模之新建工程在拆除前，需於開工前向縣市環保主管單位，取得管制編號並進行申報，以利主管單位進行總量管制、流向管理，避免環境汙染發生。環保公司需於每日下班前，彙整統計各營建工地申報隔日需清運的廢棄物量，並規劃隔日上班時間清運車的派遣，以進行清運作業，因此，此問題亦屬於期間車輛排程問題。過去許多學者利用不同方法來解決期間車輛排程問題，如 Yu 與 Yang [10] 提出改良傳統蟻群演算法，透過多維費洛蒙矩陣及交叉比對的方式來改善蟻群演化效率，以求解時窗限制之車輛途程問題。Erdoğan 與 Miller-Hooks [11] 針對綠色車輛車隊排程問題，發展一模式，以解決電動車或替代燃料車，在受限的行駛里程與有限的能源補充設施下之車隊排程問題。Yan 等人 [12] 針對災害搶修之物料後勤補給排程問題，以總運送成本最小化為目標，建構隨機旅行時間下之物料後勤補給排程模式，並利用分解技巧與貪婪演算法，發展一啟發式演算法進行求解，以幫助決策者有效地規劃物料後勤補給排程。Mirmohammadsadeghi 與 Ahmed [13] 針對卡車與拖車路線問題，在需求不確定情況下，發展一隨機需求與時窗限制之模式，並以 memetic 演算法求解模式。Liao 等人 [14] 探討多種車輛路線規劃模式，以電動車行駛路線或旅行時間最短為目標，發展一演算法進行求解，有效地規劃電動車行駛路線。

綜觀上述文獻，以往營建廢棄物的相關文獻多偏向管理為主，即使有針對清運排程問題的文獻，如蔡文夏 [2] 與 Yan 等人 [4]，卻缺乏處理場選址問題。而區位選擇的相關文獻，多為考量處理場本身設置條件與限制下，解決區位設置問題。然而本研究的處理場選址問

題，則為在已設置的眾多候選處理場中，期望在總成本最小化的情況下，挑選合適之處理場並完成清運排程運送，故以往文獻的模式不適用於本研究。此外，在實務營運時，當環保公司自有車輛不足時，可向租車公司租賃車輛（可訂長期的合約），以協助營建廢棄物的清運。然而，此將會增加營運成本，因此，如何有系統地調派自有與租賃車輛完成任務，並降低成本，一直以來都是環保公司的目標。實務上，對於營建廢棄物清運規劃，從處理場的選擇到自有或租賃車輛的調派，大多依靠人工經驗，除了較無效率外，亦可能導致成本增加，且在選擇營建廢棄物處理場位置時，往往以土地租金和地理位置為重要的考量，如果沒有周全地衡量，可能導致成本支出的增加。緣此，本研究以環保公司的立場，透過數學規劃方法，發展一最佳化的營建廢棄物清運車輛排程暨處理場選址模式，以提供決策者在調派清運車輛與選擇合適處理場之決策參考。本研究模式為大型含額外限制之整數網路流動問題，屬於 NP-Hard 問題，當問題規模變大時，難以直接利用現有的數學規劃軟體在合理時間內求得最佳解，因此本研究亦發展一啟發式演算法，以增進求解效率。

本文後續內容如下：第二節建構營建廢棄物清運車輛排程規劃與處理場選址模式，第三節發展啟發式演算法，第四節進行範例測試與分析，第五節為結論與建議。

二、模式建構

時空網路可有效地表達物體在空間與時間中的流動情形，且在輔助建立模式時頗具彈性，所以應用的範圍相關廣泛，尤其是針對運輸領域的排程規劃問題，曾有相當良好的效果，如 Yan 與 Shih^[15]、Yan 等人^[16,17]等。因此，本研究參考實務上的相關限制，利用時空網路流動技巧，以定式車輛在時空中清運營建廢棄物的流動，並據以構建營建廢棄物清運車輛排程暨處理場選址模式。本節針對模式基本假設與已知資訊、時空網路設計及數學模式等進行說明。

2.1 模式基本假設與已知資訊

為確保本研究模式之合理性且能符合實際之應用，在模式構建前提出基本假設及已知資訊如下：

1. 候選的營建廢棄物處理場位置皆已知；
2. 環保清運公司自有車輛、租車公司可租用車輛數量為已知；
3. 各工地位置及其每日需要清運的營建廢棄物量為已知；
4. 自有車輛之操作成本、每日出車固定成本和處理場租金費用為已知；
5. 依合約方式，租車成本為每輛車每日的租金，至於車輛油耗、車輛折舊、車輛維修、人員薪資等成本係由環保公司來支出；
6. 每輛清運車可多趟載運，且清運車由環保公司統一派車，並於當日工作結束後返回環保公司；

7. 自用車輛與租用車輛車種相同、車輛間性能類似；
8. 每輛車之作業時間、成本相同；
9. 所有自用與租用車輛均可使用，不考量清運過程中的車輛故障情形。

2.2 時空網路設計

本研究利用時空網路流動技巧，以定式營建廢棄物在時空清運情形，如圖 1 所示。網路橫軸代表租車公司、環保公司、各工地及各處理場位置之「空間分布」，而縱軸則為「時間延續」。網路規劃長度為 7 天，每天營運時間從上午 8 時到下午 6 時，每一節點間距為 10 分鐘，故一天有 60 個時點，而 7 天總計有 420 個時點，決策者於未來使用時，可依實際需求情況進行調整。以下分別說明網路的節點與節線之設計。

1. 節點

代表清運車輛在某一特定時間之時空點。可分成租車公司之租車節點與還車節點、環保公司之發車節點與匯集節點、工地時點及處理場時點等 6 種。每一天上午 8 時，清運車從環保公司出發至工地載運營建廢棄物並送至處理場，再返回工地直到清運完成，最後於下午 6 時前回到環保公司。此外，當自有車輛不足時，每天均可向租車公司租賃車輛，且須於每日下午 6 時清運結束後歸還。如圖 1 所示，SS 為租車公司租車節點，可視為網路供給點，其供給量為租車公司可租用車數量，DD 則為租車公司還車節點，可視為網路需求點，其需求量为租車公司可租用車數量。S1 為環保公司第一天發車節點，亦為網路之供給點，其供給量為自有車數量，D1 為環保公司第一天車輛匯集節點，亦為網路之需求點，其需求量为自有車數量，以此類推，S7 為環保公司第 7 天發車節點，D7 為環保公司第 7 天車輛匯集節點。除了租車節點、還車節點、發車節點與匯集節點外，其餘皆為網路轉運點。

2. 節線

表示車輛在時空中的移動情形，可分為發車節線、滯留節線、任務節線、空渡節線、匯集節線、不服務節線、租車節線、不租車節線以及還車節線，其說明如下：

(1) 發車節線

此類節線係連接發車節點至各工地時點，表示車輛由環保公司出發，如圖 1 中 (1) 所示。節線的起點時間為每日上午 8 時，迄點時間為環保公司到達工地之旅行時間加上起點時間。節線成本為每日出車之固定成本（即司機薪資等成本）以及車輛操作成本（即車輛油耗、車輛折舊、車輛維修等成本）。此節線流量上限為最大車輛數（等於環保公司自有車輛數與租車公司可租賃車輛數），表示每日可供使用的車輛數，下限為 0，表示沒有車輛提供服務。

(2) 滯留節線

此類節線為同一工地或處理場不同時點之連線，表示車輛於同一地點等候，如圖 1 中 (2) 所示。節線的起點時間為開始滯留時點，迄點時間為車輛於同一地點的滯留時間加上起點時間。節線成本為 0，表示等候無成本支出。滯留節線流量上限為最大車輛數；節線流量下限為 0，表示沒有車輛在等候。

(3) 任務節線

此類節線係連接各工地至各處理場時點，表示廢棄物被載運至處理場，如圖 1 中 (3) 所示。節線的起點時間為清運車出發時間，迄點時間為出發時間加上旅行與裝卸時間。節線成本為車輛操作成本再加上處理場收取之處理費。節線流量上限為最大車輛數，代表一個工地在單一時點能發出多部車輛至其他處理場；節線流量下限為 0，表示沒有任何車輛行駛至工地。

(4) 空渡節線

此類節線係連接處理場至工地時點，表示車輛返回工地繼續載運任務，如圖 1 中 (4) 所示。由於此種情況下車輛為空渡狀態，不需考慮廢棄物的裝卸時間，節線的起點時間為出發時間，迄點時間為出發時間加上旅行時間。此節線成本僅有車輛操作成本。節線流量上限為最大車輛數，表示一個工地在單一時點能發出多部車輛至其他工地；節線流量下限為 0，表示沒有任何車輛行駛至工地。

(5) 匯集節線

此類節線係連接處理場至環保公司時點，表示每日工作結束後，車輛由處理場返回環保公司，目的為使車流時空網路能流量守恆，如圖 1 中 (5) 所示。節線的起點時間為各日下午 6 時，迄點時間為車輛由各處理場返回環保公司的旅行時間加上起點時間。而節線成本為車輛操作成本。節線流量上限為最大車輛數，表示有最大車輛數完成服務結束當天作業；流量下限為 0。

(6) 不服務節線

此類節線係連接發車節點與匯集節點，表示有車輛並未被指派清運作業任務，如圖 1 中 (6) 所示。此類節線成本為 0，表示車輛並未被指派任務不會產生額外成本。節線流量上限為最大車輛數，表示最大車輛數未被使用；而節線之流量下限為 0，則表示所有車輛均被指派清運作業任務。

(7) 租車節線

此類節線係連接租車公司至環保公司時點，表示環保公司的自有車輛無法滿足需求時，就需要租借車輛，如圖 1 中 (7) 所示。此節線成本為每日每輛車的租賃費，車輛折舊與車輛維修等成本由租車公司負責，而車輛油耗、司機薪資等營運成本則由環保公司負責。此節線流量上限為最大可租用車數；節線流量下限為 0，表示不租借。

(8) 不租車節線

此節線係連接租車公司的租車節點及還車節點，表示當天的自有車輛數有滿足需求

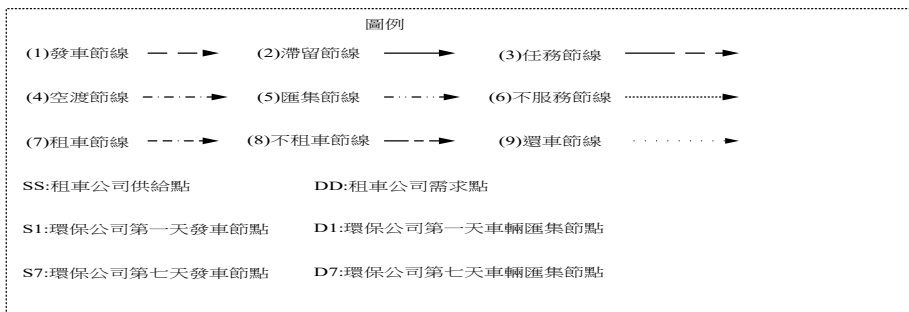
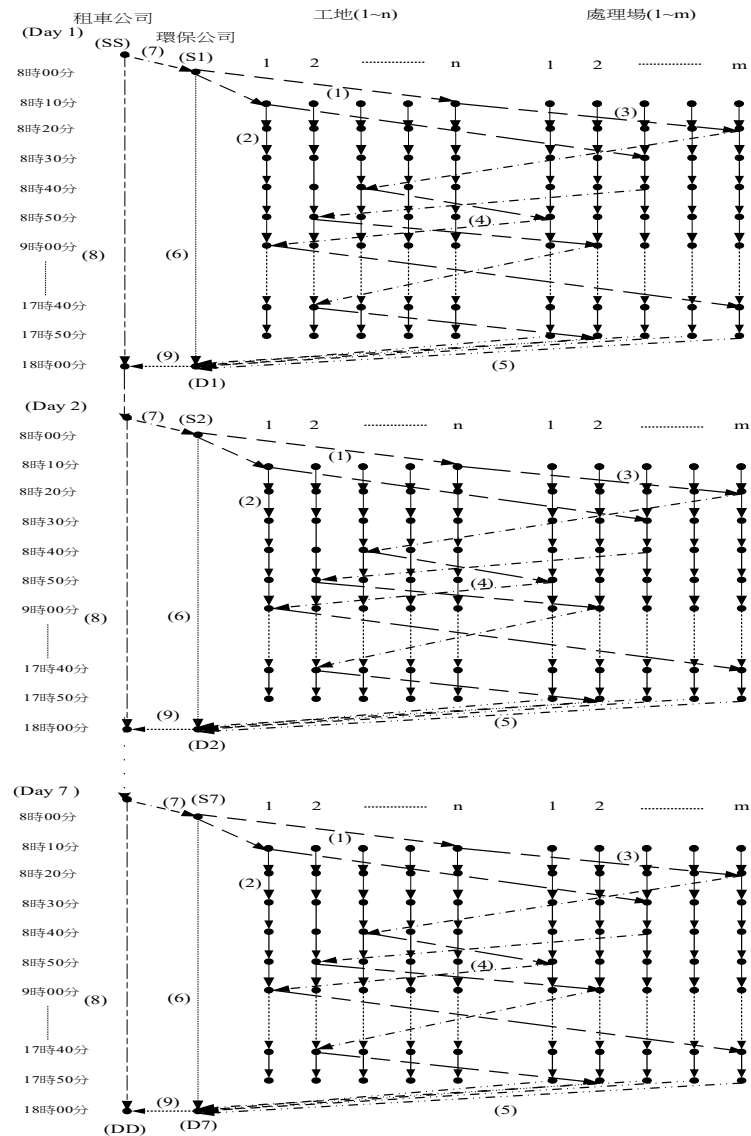


圖 1 時空網路示意圖

量，並不需要租用車輛，如圖 1 中 (8) 所示。此節線成本為 0，表示不需要租車，就不需額外付租車費用。節線流量上限為最大可租用車數；下限為 0。

(9) 還車節線

此節線係連接租車節點與匯集節點，表示將租用的車輛歸還給租車公司，如圖 1 中(9) 所示。節線成本為 0，表示還車無需收費。節線流量上限為最大可租用車數；下限為 0，表示沒有需要歸還的車輛。

2.3 數學模式

符號說明

於模式定式前，茲定義本模式所使用之參數、集合及決策變數如下。

參數定義：

c_{ij} ：節線 (i,j) 之成本；

r_d ：第 d 處理場設置時之租金；

a_i ：節點 i 之供給量／需求量；

d^s ：第 s 工地的廢棄物最小清運量 (趟次)；

f_i^s ：第 s 工地於第 i 時點可運送之廢棄物最大量 (趟次)；

p_j^d ：第 d 處理場於第 j 時點可處理之廢棄物最大量(趟次)；

G ：一極大值。

集合定義：

A ：所有節線之集合；

N ：所有節點之集合；

B^d ：第 d 處理場任務節線之集合；

D ：所有需求點之集合；

F ：所有工地之集合；

T ：所有工地與處理場時點之集合；

W^s ：第 s 工地時點之集合；

B_t^s ：第 t 天第 s 工地至所有處理場任務節線之集合；

BO_i ：從第 i 時點流出的所有任務節線之集合；

BI_j ：流入第 j 時空點的所有任務節線之集合。

變數定義：

x_{ij} ：節線 (i,j) 流量；為非負整數值；

w_d ：第 d 處理場是否設置的決策變數；1 代表設置；0 代表不設置。

數學定式

$$Min = \sum_{ij \in A} c_{ij} x_{ij} + \sum_{d \in D} r_d w_d \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{j \in N} x_{ij} - \sum_{k \in N} x_{ki} = a_i, \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{ij \in B_t^s} x_{ij} \geq d^s, \forall s \in F, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{ij \in BO_i} x_{ij} \leq f_i^s, \forall i \in W^s, s \in F \quad (4)$$

$$\sum_{ij \in BI_j} x_{ij} \leq p_j^d, \forall j \in W^d, d \in D \quad (5)$$

$$\sum_{ij \in B^d} x_{ij} \leq G \times w_d, \forall d \in D \quad (6)$$

$$w_d \in \{0, 1\}, \forall d \in D \quad (7)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad x_{ij} \in INT, \forall ij \in A \quad (8)$$

目標式 (1) 為最小化總成本，其總成本包括廢棄物清運成本與處理場設置租金加總。限制式 (2) 為各節點流量守恆限制式。限制式 (3) 為各工地最小清運量之趟數限制。限制式 (4) 為各工地在一時點內可運送之營建廢棄物最大量限制。限制式 (5) 為處理場在一時點內能處理之營建廢棄物最大量限制。限制式 (6) 為處理場設置之限制式，若處理場不設置時不會有流量流入。限制式 (7) 為處理場設置之決策變數為 0-1 變數限制式。限制式 (8) 為相關車輛運作之決策變數為非負整數限制式。

值得一提的是，長期規劃在實際營運時，其需求會有一週期性循環。此週期時間長度可能為一季、一個月或一星期。本研究的廢棄物清運需求量週期為一星期，故將長期的區位選址成本與車輛排程需求平均分配至一星期，並以此週期為規劃期長度。因此，本研究看似為短期營運模式，實則為以平均成本的觀念分配至短期來作規劃，故本研究事實上為一長期規劃模式。其優點是縮小決策模式的規模，可提升求解效率。然而，在實務營運時，廢棄物的清運需求量可能會遭受突發事件擾動而跟著改變，因此，無法以平均需求量來作規劃。後續研究可針對需求量依實際可能之變動，來探討隨機性需求規劃之研究。

三、求解演算法設計

本研究模式為一含額外限制之整數多重貨物網路流動問題，屬於 NP-hard 問題。由於實務上所遭遇的問題規模龐大，若直接以既有之最佳化軟體（如 CPLEX 數學規劃軟體）進行求解，將難以在合理的時間內取得最佳解，缺乏效率。此外，以往求解車輛排程與區位選擇的區位途程問題（location-routing problem, LRP）之方式有禁忌搜尋法（Karimi^[18]）、

適應性大規模鄰域搜尋法 (Schiffer 與 Walther^[19])、適應性變動鄰域搜尋法 (Hof 等人^[20])。而使用全域搜尋演算法則有：Fazayeli 等人^[21] 利用基因演算法求解具時窗限制與模糊需求下之複合運輸與區位途程問題。Zhang 等人^[22] 結合仿真與基因演算法解決在不確定訊息下，緊急物流中之緊急設施選址與車輛路線問題；然而，這些演算法都存有收斂效果不好之可能性。因此本研究依問題特性發展一分解式啟發解法，以在合理時間內收斂，獲得一較佳之啟發解。

3.1 啟發解法

NP-hard 問題的複雜度隨著問題的規模 (變數量及限制式量) 增加而大幅增加，因此本研究為避免直接求解大規模複雜的問題，在啟發解法的設計上，運用分解概念，將求解分為兩階段，第一階段為解決處理場的選址問題，第二階段則為求解清運車輛的排程規劃。首先，在第一階段中，將流量決策變數 x_{ij} 的非負整數限制式 (即限制式 (8)) 放鬆為非負實數，初步先在所有候選處理場位置中，求得較合適之處理場。接著固定第一階段所選定的處理場位置，於第二階段中，進行清運車輛的排程規劃，最後得到啟發解之結果，其流程如圖 2 所示，而步驟說明如下述。

第一階段：處理場選址

先放鬆流量決策變數 x_{ij} 為非負實數，即將限制式(8)修改成非負實數限制：

$$x_{ij} \geq 0, \forall ij \in A \quad (9)$$

此做法將變數 x_{ij} ，即網路上所有節線流量由正整數放鬆為非負實數，可在較短時間內，初步先篩選較合適之處理場位置 w_d ，以決定第 d 處理場是否設置。

第二階段：清運車輛排程規劃

將第一階段求得之合適處理場位置 w_d 固定為常數 1，代表該處理場已選定。而其他沒有被選擇的處理場則不予考慮 (即 w_d 設為 0)，即將限制式(7)中所選定之第 d 處理場位置 w_d 修正如下式：

$$w_d = 1, \forall d \in D \quad (10)$$

接著在第二階段中，恢復流量變數 x_{ij} 為非負整數限制 (即將限制式(9)還原成限制式 (8))，並利用 CPLEX 求解本研究模式，以得清運車輛的排程。此做法可在第二階段求解時，減少模式中的零壹變數，增進求解效率。

3.2 下限解法

為適當地評估啟發解法的求解績效，本研究利用調整限制式的方式，以設計模式最佳解之下限解。其作法係放鬆流量變數 x_{ij} 的非負整數限制為非負實數限制 (即將限制式 (8) 改為限制式(9))，故此下限解亦即為第一階段的目標值。

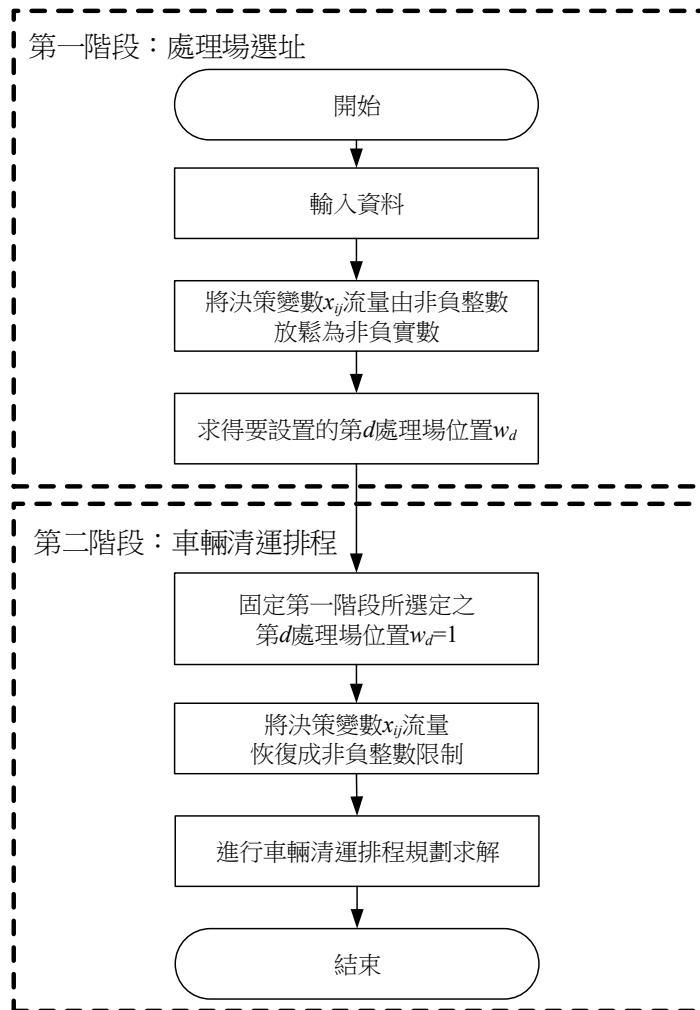


圖 2 啟發解流程圖

四、範例測試

為初步測試本研究模式與啟發解法之績效，本研究以某環保公司之資料，針對臺灣兩直轄市（X 與 Y 直轄市）之工地與處理場為例進行範例測試。本研究先透過實際訪談，並蒐集其相關資料，經系統性整理及合理性假設後，彙整基本輸入資料。接著以 C++ 電腦語言撰寫模式與啟發解法，並配合利用數學規劃軟體 CPLEX 12.6 進行模式求解，最後於電腦規格為 Intel(R) Core(TM) i7-3770CPU @ 3.40GHz，與 8.00GB RAM、Windows 7 64 位元作業系統之個人電腦上執行。此外，本研究亦比較此啟發解與下限解之差異，以評估演算法之績效。最後，本研究並進行參數敏感度分析。

4.1 基本輸入資料

1. 車輛旅行時間

車輛於各工地與處理場間之旅行時間為平均旅行時間，計算上係參考 Google Map 網站以及實務調查之資料，以估算各場站位置間之行駛距離，並假設清運車輛平均時速為 20 公里／小時，最後以此計算各場站位置間的平均旅行時間。

2. 各工地最小清運量

在實務上，各工地負責人須於每日工作結束後，回報環保公司隔天需要清運的廢棄物量，故各工地最小清運量為一已知固定值。本研究經由實務訪談後彙整出各工地一星期平均所需的廢棄物清運數量，以此做為各工地最小清運量，如表 1 所示。

表 1 各工地最小清運量 (卡車趟次)

編號	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
工地 1	6	5	8	4	5	8	8
工地 2	6	8	6	8	8	5	7
工地 3	6	7	5	5	8	8	7
工地 4	5	5	4	6	7	6	7
工地 5	6	6	7	5	5	8	4
工地 6	7	4	5	8	6	5	5
工地 7	6	8	8	4	4	5	5
工地 8	7	5	6	5	5	8	5
工地 9	6	6	5	6	8	7	6
工地 10	6	7	7	8	6	7	6
工地 11	7	5	8	7	5	7	5
工地 12	6	6	4	5	4	5	8
工地 13	6	4	6	6	7	6	7
工地 14	7	8	8	5	4	5	5
工地 15	7	5	7	8	5	4	6
工地 16	6	5	8	7	6	8	5
工地 17	6	8	6	5	5	5	4
工地 18	7	7	5	6	8	6	5
工地 19	7	5	4	8	5	5	8
工地 20	6	6	7	7	6	4	5
工地 21	7	8	8	4	5	5	7
工地 22	7	7	6	5	4	6	6

表 1 (續) 各工地最小清運量 (卡車趟次)

編號	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天	第 5 天	第 6 天	第 7 天
工地 23	7	5	7	6	7	5	5
工地 24	7	8	8	7	4	8	4
工地 25	7	6	6	8	5	7	4
工地 26	7	5	5	5	8	7	7
工地 27	6	8	7	6	5	5	8
工地 28	8	5	8	8	6	8	5
工地 29	8	5	5	7	5	4	8
工地 30	6	8	6	5	8	5	7

3. 候選處理場相關資料

在候選處理場位置部份，X 直轄市有 5 個，分別為 a 區 2 個、b 區 2 個以及 c 區 1 個。Y 直轄市則有 10 個，分別為 d 區與 e 區各 2 個，f 區、g 區、h 區、i 區、j 區及 k 區各 1 個。而處理場租金的部分係參考 X 與 Y 兩直轄市的地價公告，假設所有處理場的土地面積均為 300 坪，經詢問相關廠商後，進行合理推估，如表 2 所示。

表 2 處理場土地租金

編號	候選處理場位置	土地租金(元／週)
1	X 直轄市 a 區	318,462
2	X 直轄市 a 區	318,462
3	X 直轄市 b 區	107,031
4	X 直轄市 b 區	98,077
5	X 直轄市 c 區	24,323
6	Y 直轄市 d 區	7,154
7	Y 直轄市 d 區	17,308
8	Y 直轄市 e 區	15,000
9	Y 直轄市 e 區	32,308
10	Y 直轄市 f 區	23,077
11	Y 直轄市 g 區	290,769
12	Y 直轄市 h 區	94,615
13	Y 直轄市 i 區	36,923
14	Y 直轄市 j 區	486,162
15	Y 直轄市 k 區	85,385

資料來源：X 直轄市地政局、Y 直轄市地政局、本研究整理。

4. 清運作業成本

清運作業成本參考 Yan 等人^[4]之研究，如表 3 所示，可分為司機薪資、車公里成本及處理場費用以及租車費用等。司機薪資為每日 2,212 元；車公里成本為每公里 16.73 元；處理場費用為每趟 2,200 元；租車成本為每輛 3,300 元。

表 3 清運成本資料

成本項目	金額
司機薪資	2,212 (元/日)
車公里成本	16.73 (元/km)
處理場費用	2,200 (元/趟)
租車成本	3,300 (元/輛)

5. 其他相關參數資料

本範例計有 1 間環保公司、1 間租車公司、30 處工地及 15 個候選處理場。規劃時間為 7 天，每日營運時間為上午 8 時至下午 6 時，並以 10 分鐘為一時點間距，一星期總計有 420 個時點。該環保公司的自有車隊規模為 15 輛，而租車公司可租賃的車輛數則為無上限（模式的應用上可設為一相對大值）。

4.2 測試結果分析

本研究的問題含 374,270 個變數，其中有 374,255 個整數變數（即網路節線數）及 15 個零壹變數，而限制式中含 18,298 個流量守恆限制式（即網路節點數）及 18,180 個額外限制式。由於此問題規模甚為龐大，無法以 CPLEX 直接求解，因此，本研究以第三節所開發之啟發解法求解模式。

如表 4 所示，第一階段處理場選址後之目標值為 4,459,800.25 元，土地租金為 154,708 元，求解結果則會選擇 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個，求解時間為 176.86 秒。而第二階段清運車輛排程規劃之目標值為 4,481,072 元，求解時間為 492.89 秒，兩階段演算法求解時間共計有 669.75 秒，其結果顯示本研究所開發的啟發解法可增進求解效率。請注意，第二階段結果為模式最終解，亦即為模式之啟發解，因此模式之測試目標值為 4,481,072 元，求解時間 669.75 秒，共選擇 4 個處理場，除用自有 15 輛車外，亦租用 111 輛車，總清運廢棄物計有 1,290 趟次。

此外，表 5 為第二階段之各項成本細部解結果，圖 3 則為其比例，其中人員成本部分為 477,792 元，占 11%；租車成本為 366,300 元，占 8%；處理場費用為 2,838,000 元，占 63%；運輸成本為 644,272 元，占 14%，租金成本為 154,708 元，占 4%。值得一提的是，

此等項目中，占最大比例之處理場費用一項，主要與要清運之工地廢棄物量至處理場的運送趟數相關，其費用大致為一固定值，與最佳化目標值較不相關，此亦可在後面敏感度分析看出。

表 4 範例測試結果

第一階段	
目標值(元)	4,459,800.25
土地租金(元)	154,708 元
處理場選址結果	X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個 Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個
求解時間(秒)	176.86
第二階段	
目標值(元)	4,481,072
求解時間(秒)	492.89 秒
總求解時間(秒)	669.75

表 5 第二階段各項成本細部解

人員成本 (元)	477,792
租車成本 (元)	366,300
處理場費用 (元)	2,838,000
運輸成本 (元)	644,272
租金成本 (元)	154,708

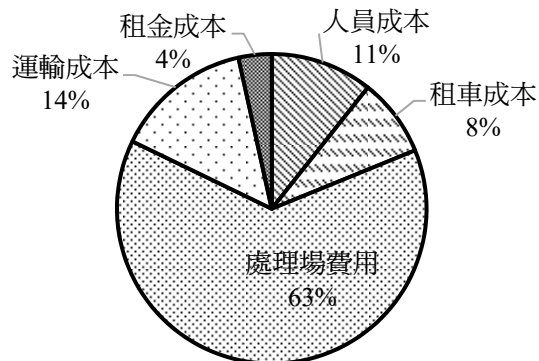


圖 3 測試結果成本比例圖

4.3 啟發解與下限解比較

本研究放鬆相關車輛運作之決策變數的非負整數為非負實數作為下限解，以評估啟發解法之績效。如表 6 所示，啟發解目標值為 4,481,072 元，當放鬆變數之非負整數限制式作為模式下限解時，其目標值為 4,459,800.25 元，啟發解與下限解差距為 0.47%，代表啟發解效果良好。

表 6 啟發解與下限解比較

	啟發解	下限解 放鬆非負整數限制式
目標值(元)	4,481,072	4,459,800.25
求解時間(秒)	669.75	176.86
差距	—	0.47%

4.4 敏感度分析

本節探討不同參數，如車隊規模、各工地最小清運量、車公里成本、司機薪資、處理場費用以及土地租金等，視其變化對本模式目標值之影響程度，以供規劃時之參考。至於其他參數亦可依此作法分析，為節省篇幅，不再詳述。

1. 車隊規模

實務上，清運車輛數多寡會影響規劃之結果，因此，車隊規模為環保公司重要考量因素。本研究將某環保公司現有清運車 15 輛各增減 5 輛，即針對清運車數為 5、10、15、20、25 輛時進行測試與分析。在自有車隊規模為 5 輛時，環保公司需租車 181 輛，目標值增加 5.16%；自有車輛規模為 25 輛時，則租車數量為 41 輛，目標值減少 5.15%。隨著自有車隊規模的增加，目標值有減少的趨勢，其原因為當減少自有車輛數時，則需要額外增加租車成本，所以成本會隨租車成本增加；反之，增加自有車輛數時，租車成本隨之減少，故總成本亦隨之減少。此外，不論自有車輛數的增減為何，處理場選址求解結果皆選擇 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個，其結果如表 7 所示。值得注意的是，在各情況下總清運趟次皆為 1,290 趟，係因要清運之工地廢棄物量至處理場的運送需求固定，亦即皆為 1,290 趟。

2. 各工地最小清運量

實務上廢棄物運送至處理場時，需依卡車所載運數量（趟次）收取相關費用，因此各工地最小清運量亦影響整體規劃之結果。當各工地最小清運量依序變動為-2~+2 時，其目

表 7 車隊規模敏感度分析結果

自有車輛數(輛)	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運(趟次)	求解時間(秒)	相對差距 (%)	選址結果
5	4,712,214	181	1,290	2,804.13	5.16%	4
10	4,599,518	146	1,290	447.57	2.64%	4
15	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00%	4
20	4,367,503	76	1,290	543.9	-2.53%	4
25	4,250,395	41	1,290	440.66	-5.15%	4

標值變化與其他相關結果均列於表 8 中。由表 8 可知，清運量減少，目標值隨之減少。值得注意的是，理論上清運量應與租車數成正比，然而，當清運量增加 1 單位時，租車數比 base case 的租車數少，究其原因為此處理場選擇增為 5 個，而其增加的處理場離某些工地較近，故自有車及租車可增加運送趟次，使得租車數量相對下降。清運量減少 2 和 1 單位時，求解結果會選 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個；而清運量增加 1 和 2 單位時，求解結果則選 5 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區 g 區各 1 個。

表 8 各工地最小清運量敏感度分析結果

清運數	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運 (趟次)	求解時間 (秒)	相對差距 (%)	選址結果
-2	2,962,113	41	870	656.78	-33.90	4
-1	3,721,900	76	1,080	474.29	-16.94	4
base case	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00	4
+1	5,188,025	105	1,500	486.5	15.78	5
+2	5,901,328	135	1,710	333.2	31.69	5

3. 車公里成本

車公里成本依原範例測試之成本的 80%、90%、100%、110%及 120%比例變動，即將車公里成本乘上一縮小與放大倍率，其結果如表 9 所示。當變動比例降低為 80%時，目標值為 4,355,232 元，而變動幅度為-2.81%；而當變動比例提升為 120%時，目標值為 4,610,372 元，變動幅度為 2.89%，由此可知，目標值與車公里成本為正相關。另外，車公里成本如何變動，其處理場求解結果皆會選 4 個，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個。

表 9 車公里成本敏感度分析結果

車公里成本比例	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運 (趟次)	求解時間 (秒)	相對差距 (%)	選址結果
80%	4,355,232	111	1,290	282.76	-2.81%	4
90%	4,418,039	111	1,290	292.59	-1.41%	4
100%	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00%	4
110%	4,546,829	111	1,290	480.79	1.47%	4
120%	4,610,372	111	1,290	892.6	2.89%	4

4. 司機薪資

司機薪資依原範例測試 80%、90%、100%、110%及 120%比例變動，其結果如表 10 所示。當變動比例降低為 80%時，目標值為 4,386,366 元，變動幅度為-2.11%；而當變動比例提升至 120%時，目標值為 4,576,930 元，變動幅度為 2.14%。故可得知目標值與司機薪資呈正相關，而求解結果皆會選 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個。

表 10 司機薪資敏感度分析結果

司機薪資比例	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運 (趟次)	求解時間 (秒)	相對差距 (%)	選址結果
80%	4,386,366	111	1,290	571.45	-2.11%	4
90%	4,434,037	111	1,290	797.43	-1.05%	4
100%	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00%	4
110%	4,529,155	111	1,290	754.47	1.07%	4
120%	4,576,930	111	1,290	485.71	2.14%	4

5. 處理場費用

處理場費用依原範例測試之 80%、90%、100%、110%及 120%比例變動。由表 11 可知，當處理場費用降低為 80%時，目標值為 3,914,245 元，變動幅度為-12.65%；而當處理場費用提升至 120%時，目標值為 5,049,179 元，變動幅度為 12.68%。隨著處理場費用比例增加，目標值呈現上升的趨勢，故此處理場費用與目標值呈正相關，而求解結果皆會選 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個。

表 11 處理場費用敏感度分析表

處理場費用比例	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運 (趟次)	求解時間 (秒)	相對差距 (%)	選址結果
80%	3,914,245	111	1,290	358.05	-12.65	4
90%	4,200,148	111	1,290	466.46	-6.27	4
100%	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00	4
110%	4,765,746	111	1,290	734.7	6.35	4
120%	5,049,179	111	1,290	869.27	12.68	4

6. 土地租金

土地租金依原範例測試之 80%、90%、100%、110%及 120%比例變動，其結果如表 12 所示。當變動比例降低為 80%時，目標值為 4,381,648 元，變動幅度為-2.81%；而當變動比例提升至 120%時，目標值為 4,650,864 元，變動幅度為 3.79%，因此目標值與土地租金呈正相關。此外，當土地租金比例為 80%與 90%時，處理場選 5 個，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區 g 區各 1 個；然而當土地租金比例為 110%與 120%時，則會選 4 個處理場，分別為 X 直轄市的 b 區與 c 區各 1 個，Y 直轄市的 d 區與 e 區各 1 個。

表 12 土地租金敏感度分析結果

土地租金比例	目標值 (元)	總租車數 (輛)	總清運 (趟次)	求解時間 (秒)	相對差距 (%)	選址結果
80%	4,381,648	111	1,290	405.42	-2.81%	5
90%	4,470,178	111	1,290	575.45	-1.41%	5
100%	4,481,072	111	1,290	669.75	0.00%	4
110%	4,606,316	111	1,290	976.56	2.79%	4
120%	4,650,864	111	1,290	1065.6	3.79%	4

五、結論與建議

由於地球自然資源耗竭情形日益嚴重，各國均致力於各產業的廢棄物回收再利用。臺灣營建工程每年產生大量營建廢棄物，而這些廢棄物的回收再利用，可減少原來材料之開墾與消耗，達到環境永續發展目的。然而因營建廢棄物之體積與數量，均較一般廢棄物大

且多，故須由環保公司的專門車輛運送至特定處理場進行回收處理。目前實務上，營建廢棄物的清運從處理場選擇到清運車輛排程規劃，仍是以人工方式進行。此種作法依靠決策者的經驗判斷，常導致決策結果不穩定，且當需清運廢棄物的工地與可選擇的處理場較多時，可能使得決策結果不是最佳，導致營運損失。值得一提的是，當環保公司自有車輛不足時，可另外再租賃車輛協助營建廢棄物的清運作業。因此，如何將自有車輛與租賃車輛有系統地調派，並選擇最適的處理場，以避免資源浪費及節省營運成本，一直以來都是環保公司相當重視的議題。緣此，本研究同時考量自有與租賃清運車輛調派以及處理場之選址，以數學規劃方法構建營建廢棄物清運車輛排程暨處理場選址模式。在求解方法上，本研究針對問題特性發展適合之啟發式演算法，不僅避免人為誤差及判斷錯誤，導致資源浪費、增加成本，亦縮短求解時間。此外，未來決策者可依實際需求情況調整部分參數，增加本模式與演算法應用之彈性。

本研究以某環保公司之資料，以臺灣兩個直轄市之處理場為範例進行測試，其求得的啟發解結果與下求解接近，而求解時間約 10 分鐘左右，表示本研究啟發解法效果佳且有效率，故本研究模式與啟發解法可供實務應用之參考。此外，本研究亦針對車隊規模、各工地最小清運量、車公里成本、司機薪資、處理場費用以及土地租金等參數進行敏感度分析。在車隊規模中，當自有車數量越多，租車數量會減少，目標值會下降，處理場的選址結果則沒有變化。在各工地最小清運量敏感度分析中，當清運量增加，目標值上升，且會影響處理場的選址結果。在車公里成本、司機薪資以及處理場費用等敏感度分析可以發現，目標值與此三項參數為正相關，而處理場的選址結果則沒有影響。另外，當土地租金減少時，目標值下降，處理場的選址結果增加。此等敏感度分析結果可提供為模式應用之參考。

在後續研究部分，建議可進一步考慮多種車型與其裝載能力，則可使模式之車輛調派更具彈性。此外本研究係用長期營運需求平均分攤至短期來估算，為一確定的營運需求，未來長期營運時，其需求可能隨現實世界情況而有所變動，故可進一步考量隨機的營運需求，構建隨機模式，以更符合實務所需。

參考文獻

1. 張傑，「營建廢棄物處理場與再利用機構之差異分析」，朝陽科技大學環境工程與管理系碩士論文，民國 102 年。
2. 蔡文夏，「營建混合物清運調派最佳決策模式之研究」，國立中央大學土木工程學系碩士論文，民國 102 年。
3. Gangolells, M., Casals, M., Forcada, N., and Macarulla, M., "Analysis of the Implementation of Effective Waste Management Practices in Construction Projects and Sites", *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 93, 2014, pp. 99-111.
4. Yan, S., Chen, Y. C., and Chang, C. F., "Optimal Truck Dispatching for Construction Waste

- Conveyance”, *International Journal of Advance Research in Engineering*, Vol. 3, No. 1, 2017, pp. 9-15.
5. Weber, A., *Theory of Location of Industries*, The University of Chicago Press, Chicago, 1929. (Translated by Carl J. Friedrich from Weber’s 1909 Book)
 6. Sumathi, V. R., Natesan, U., and Sarkar, C., “GIS-Based Approach for Optimized Siting of Municipal Solid Waste Landfill”, *Waste Management*, Vol. 28, No. 11, 2008, pp. 2146-2160.
 7. 詹曙嘉, 「地理資訊系統應用於營建廢棄物掩埋場選址之研究」, 國立雲林科技大學營建工程系碩士論文, 民國 102 年。
 8. Eiselt, H. A. and Marianov, V., “Location Modeling for Municipal Solid Waste Facilities”, *Computers & Operations Research*, Vol. 62, 2015, pp. 305-315.
 9. Habibi, F., Asadi, E., Sadjadi, S. J., and Barzinpour, F., “A Multi-Objective Robust Optimization Model for Site-Selection and Capacity Allocation of Municipal Solid Waste Facilities: A Case Study in Tehran”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 166, 2017, pp. 816-834.
 10. Yu, B. and Yang, Z. Z., “An Ant Colony Optimization Model: The Period Vehicle Routing Problem with Time Windows”, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 47, No. 2, 2011, pp. 166-181.
 11. Erdoğan, S. and Miller-Hooks, E., “A Green Vehicle Routing Problem”, *Transportation Research Part E*, Vol. 48, No. 1, 2012, pp. 100-114.
 12. Yan, S., Lin, C. K., and Chen, S. Y., “Logistical Support Scheduling under Stochastic Travel Times Given an Emergency Repair Work Schedule”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 67, 2014, pp. 20-35.
 13. Mirmohammadsadeghi, S. and Ahmed, S., “Memetic Heuristic Approach for Solving Truck and Trailer Routing Problems with Stochastic Demands and Time Windows”, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 15, No. 4, 2015, pp. 1093-1115.
 14. Liao, C. S., Lu, S. H., and Shen, Z. J. M., “The Electric Vehicle Touring Problem”, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 86, 2016, pp. 163-180.
 15. Yan, S. and Shih, Y. L., “A Time Space Network Model for Work Team Scheduling after a Major Disaster”, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol. 30, No. 1, 2007, pp. 63-75.
 16. Yan, S., Wang, S. S., and Wu, M. W., “A Model with a Solution Algorithm for the Cash Transportation Vehicle Routing and Scheduling Problem”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 63, No. 2, 2012, pp. 464-473.
 17. Yan, S., Chu, J. C., and Shih, Y. L., “Optimal Scheduling for Highway Emergency Repairs Under Large-Scale Supply–Demand Perturbations”, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, No. 6, 2014, pp. 2378-2393.
 18. Karimi, H., “The Capacitated Hub Covering Location-Routing Problem for Simultaneous Pickup and Delivery Systems”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 116, 2018, pp. 47-58.
 19. Schiffer, M. and Walther, G., “An Adaptive Large Neighborhood Search for the Location-routing Problem with Intra-route Facilities”, *Transportation Science*, Vol. 52, No. 2, 2018, pp. 331-352.

20. Hof, J., Schneider, M., and Goeke, D., “Solving the Battery Swap Station Location-Routing Problem with Capacitated Electric Vehicles Using an AVNS Algorithm for Vehicle-Routing Problems with Intermediate Stops”, *Transportation Research Part B*, Vol. 97, 2017, pp. 102-112.
21. Fazayeli, S., Eydi, A., and Kamalabadi, I. N., “Location-Routing Problem in Multimodal Transportation Network with Time Windows and Fuzzy Demands: Presenting a Two-Part Genetic Algorithm”, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 119, 2018, pp. 233-246.
22. Zhang, B., Li, H., Li, S., and Peng, J., “Sustainable Multi-Depot Emergency Facilities Location-Routing Problem with Uncertain Information”, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 333, 2018, pp. 506-520.