

國立臺灣大學工學院環境工程學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Environmental Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



土地利用之生命週期衝擊評估工具開發

Development of Life Cycle Impact Assessment

Tools for Land Use

謝佑昫

Yu-Yun Hsieh

指導教授：闕蓓德 博士

Advisor: Pei-Te Chiueh, Ph.D.

中華民國 102 年 7 月

July 2013



國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

土地利用之生命週期衝擊評估工具開發

Development of Life Cycle Impact Assessment
Tools for Land Use

本論文係謝佑昫君(學號 R00541210)在國立臺灣大學環境工程學研究所完成之碩(博)士學位論文，於民國 102 年 6 月 21 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

論文審查委員：

李公哲

李公哲博士
國立台灣大學環境工程學研究所教授

馬鴻文

馬鴻文博士
國立台灣大學環境工程學研究所教授

關蓓德

關蓓德博士
國立台灣大學環境工程學研究所助理教授

指導教授：關蓓德

所長：張能復

摘要

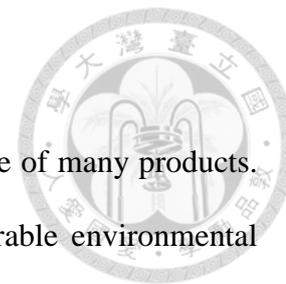


現行生命週期衝擊評估方法大多以生態相關指標來表示土地利用產生的衝擊，但有文獻指出土地利用亦會產生其他面向的影響，例如生質燃料在其生命週期中會直接及間接佔用土地並改變地表型態，從而導致所佔用土地之固定碳素總量或是溫室氣體排放量改變，進一步產生額外的溫室氣體排放；或是例如土地佔用使得地表植被覆蓋率及生長之植物種類產生變化，減少了土地的生物質，導致耗用額外的可用天然資源量。由於目前生命週期衝擊評估方法對於土地利用造成環境衝擊層面考慮的不足，本研究以近年應用生命週期評估經常被選用的衝擊評估方法 IMPACT 2002+ 衝擊評估方法為基礎，加入土地利用產生的相關衝擊，新增三個中間點衝擊類別包含直接土地利用變遷排放、間接土地利用變遷排放以及土地覆蓋變遷，建立加入土地利用衝擊之評估方法，並分別以產製酒精汽油及生質炭為案例進行生命週期評估，透過使用 IMPACT 2002+ 以及本研究修正的土地利用衝擊評估方法分別進行案例的衝擊評估，以瞭解增加土地利用衝擊對於生質燃料產生的環境衝擊以及溫室氣體減量效果之影響程度。

產製酒精汽油案例分析結果顯示，當以溫室氣體減量為評估目的，並且不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響，生質酒精確實比起車用汽油產生的溫室氣體排放來得略少，酒精汽油則介於兩者之間；但在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，環境衝擊順序出現反轉，變成以車用汽油的溫室氣體排放量為最少，酒精汽油次之，生質酒精的排放量甚至較原衝擊增加約 73 倍。產製生質炭案例分析結果則顯示同樣以溫室氣體減量為評估目的時，當不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響，生質炭的溫室氣體排放量已較燃煤要高出 4 倍；而在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，生質炭和燃煤的環境衝擊順序依然不變。以上結果均顯示出土地資源對於生質燃料為關鍵影響因素，雖可以提供更多的能源並減少資源損害，但同時也可能造成更多溫室氣體排放量，因此資源損害與氣候變遷損害分別為天平的兩端，如何平衡及取捨必須經由決策者和利害關係人充分討論。

關鍵字：土地利用、生命週期衝擊評估、生質燃料、土地利用變遷排放

Abstract



Land use is a human activity and widely exists in the life cycle of many products. Previous studies have indicated that land use has caused considerable environmental problems such as biodiversity loss, change in carbon stock, and the reduction of net primary production. Existing life cycle impact assessment (LCIA) methods can be used to quantify the environmental impact of land use. However, the characterization models for land-use in most existing methods reflect only loss of biodiversity and exclude the effect of land use on other essential environmental considerations such as climate change and net primary production. Thus, in this study, we adopted IMPACT 2002+ as a foundational methodology, accompanied by other relevant environmental aspects of land use. In addition, we used the life cycle assessment (LCA) software SimaPro 7 for modeling. The LCIA method we revised is called IMPACT 2002+ wLU, increasing three midpoint impact categories, i.e. direct land-use change, indirect land-use change and land cover change. Furthermore, we used IMPACT 2002+ and IMPACT 2002+ wLU to compare the impact difference between two methods in case studies on biofuel and fossil reference systems. These case studies have established that bioethanol produced using sugarcane and biocoal produced using rice straw represent first- and second-generation biofuels, respectively, and that the fossil reference systems correspond to the production of gasoline and the import of hard coal.

These case studies have also indicated that land-use change is a key factor in the use of bioethanol. In assessing the endpoint damage of climate change, the IMPACT 2002+ results revealed that greenhouse gases (GHGs) emissions from gasoline were slightly higher than those of gasohol and bioethanol, whereas the emissions which assessed by IMPACT 2002+ wLU were in reverse order, with bioethanol emissions exhibiting the highest effect, namely 73 times more than the original emissions. The

effects of land-use change on climate change and resource depletion are limited for biocoal, and biocoal emissions are higher than those of hard coal, regardless of land-use change. In addition, production of first-generation biofuels has occupied large amounts of land to supply energy, while causing increasingly more GHG emissions. Therefore, based on our results, land-use change is a key factor in the use of bioethanol indeed.

Keywords: Land use; Life cycle impact assessment; Biofuel; Land use change

目錄



第一章	緒論	1
1.1	研究動機與目的.....	1
1.2	研究流程.....	3
第二章	文獻回顧	5
2.1	土地利用的環境衝擊.....	5
2.1.1	生態系統衝擊.....	7
2.1.2	資源耗用衝擊.....	8
2.1.3	氣候變遷衝擊.....	10
2.2	生命週期評估與衝擊評估方法.....	11
2.2.1	不確定性與地區特性.....	14
2.2.2	衝擊評估方法與土地利用衝擊特徵化模式.....	15
2.3	生質燃料的土地利用衝擊.....	24
第三章	研究方法	27
3.1	研究對象.....	27
3.2	土地利用衝擊特徵化模式.....	29
3.2.1	資源耗用衝擊特徵化模式.....	30
3.2.2	氣候變遷衝擊特徵化模式.....	33
3.2.3	生命週期評估軟體.....	36
3.3	研究案例.....	37
3.3.1	範疇界定.....	39
3.3.2	盤查分析.....	42
第四章	結果與討論	55
4.1	生命週期衝擊評估方法.....	55
4.1.1	特徵因子之建立.....	56
4.1.2	標準化因子之建立.....	69
4.1.3	衝擊評估方法模組化.....	73
4.2	案例分析.....	73
4.2.1	增加土地利用衝擊對生質燃料之影響.....	74
4.2.2	敏感度分析.....	94
第五章	結論與建議	97
	參考文獻	101

圖目錄



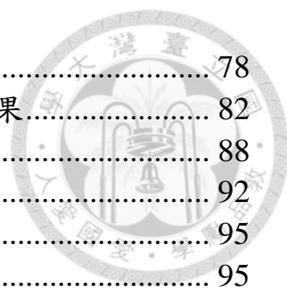
圖 1-1 研究流程圖.....	3
圖 2-1 土地利用衝擊時間動態圖.....	7
圖 2-2 人類佔用淨初級生產量示意圖.....	9
圖 2-3 生命週期評估架構.....	12
圖 2-4 衝擊評估方法不確定性示意圖.....	15
圖 2-5 土地利用衝擊之因果關係.....	17
圖 2-6 Eco-indicator 99 衝擊評估架構圖.....	18
圖 2-7 IMPACT 2002+衝擊評估架構圖.....	20
圖 2-8 LIME 衝擊評估架構圖.....	21
圖 2-9 SIMPASS 衝擊評估架構圖.....	23
圖 2-10 生質燃料及應用概要.....	26
圖 3-1 Quantis 修正之 IMPACT 2002+衝擊評估架構圖.....	29
圖 3-2 SimPro 軟體操作範例畫面.....	37
圖 3-3 酒精汽油及車用汽油之系統邊界.....	40
圖 3-4 生質炭及燃煤之系統邊界.....	41
圖 4-1 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估架構.....	55
圖 4-2 臺灣氣候分區.....	60
圖 4-3 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之衝擊特徵化結果.....	75
圖 4-4 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之損害特徵化結果.....	76
圖 4-5 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之單項得點.....	77
圖 4-6 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之衝擊特徵化結果.....	79
圖 4-7 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之損害特徵化結果.....	80
圖 4-8 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之單項得點.....	81
圖 4-9 酒精汽油及車用汽油加入土地利用衝擊對氣候變遷損害之影響.....	83
圖 4-10 酒精汽油及車用汽油加入土地利用衝擊對資源損害之影響.....	83
圖 4-11 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之衝擊特徵化結果.....	85
圖 4-12 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之損害特徵化結果.....	86
圖 4-13 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之單項得點.....	87
圖 4-14 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之衝擊特徵化結果.....	89
圖 4-15 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之損害特徵化結果.....	90
圖 4-16 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之單項得點.....	91
圖 4-17 生質炭及燃料煤加入土地利用衝擊對氣候變遷損害之影響.....	93
圖 4-18 生質炭及燃料煤加入土地利用衝擊對資源損害之影響.....	93
圖 4-19 生質酒精之特徵因子敏感度分析.....	95
圖 4-20 生質炭之特徵因子敏感度分析.....	96

表目錄



表 2- 1 Eco-indicator 99 評分結果.....	19
表 2- 2 LIME 評分結果.....	22
表 3- 1 IMPACT 2002+土地佔用特徵因子更新對照表.....	27
表 3- 2 2011 年國內車用汽油供應情形.....	39
表 3- 3 2011 年國內燃料煤供應情形.....	39
表 3- 4 甘蔗之碳平衡及能量平衡.....	42
表 3- 5 某甘蔗農場之甘蔗生產概況.....	43
表 3- 6 國內甘蔗用水情形.....	44
表 3- 7 常用肥料之成分.....	44
表 3- 8 某甘蔗農場之肥料施用量.....	44
表 3- 9 某甘蔗農場之農藥施用量.....	45
表 3- 10 某甘蔗農場之田間工作.....	45
表 3- 11 甘蔗種植階段之排放因子.....	46
表 3- 12 發酵程序之投入產出清單.....	47
表 3- 13 生質酒精及車用汽油之基本性質.....	47
表 3- 14 單位熱值酒精汽油之投入量值.....	48
表 3- 15 原油進口情形及海運距離.....	48
表 3- 16 稻作之碳平衡及能量平衡.....	49
表 3- 17 國內白米、糙米與稻穀產量.....	50
表 3- 18 國內稻作用水情形.....	51
表 3- 19 某稻田之肥料施用量.....	51
表 3- 20 某稻田之田間工作.....	52
表 3- 21 稻作種植之排放因子.....	53
表 3- 22 單位熱值生質炭之投入量值.....	54
表 3- 23 燃料煤進口情形及海運距離.....	54
表 4- 1 林地之盤查項目分類列表.....	56
表 4- 2 耕地之盤查項目分類列表.....	57
表 4- 3 人為用地之盤查項目分類列表.....	58
表 4- 4 草地之盤查項目分類列表.....	59
表 4- 5 臺灣氣候分區.....	59
表 4- 6 土地覆蓋變遷特徵化模式係數表.....	62
表 4- 7 土地覆蓋變遷之特徵因子.....	62
表 4- 8 直接土地利用變遷排放特徵化模式係數表.....	66
表 4- 9 直接土地利用變遷排放之特徵因子.....	67
表 4- 10 間接土地利用變遷排放之特徵因子.....	69
表 4- 11 全年度土地佔用情形.....	70
表 4- 12 全年度非再生能源消費情形.....	71
表 4- 13 全年度礦產消費情形.....	71
表 4- 14 氣候變遷損害總量.....	72
表 4- 15 資源損害總量.....	72
表 4- 16 IMPACT 2002+ w/LU 之標準化因子.....	72
表 4- 17 適用臺灣地區之 IMPACT 2002+標準化因子.....	73

表 4-18	酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ 評估之結果.....	78
表 4-19	酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果.....	82
表 4-20	生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ 評估之結果.....	88
表 4-21	生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果.....	92
表 4-22	生質酒精之特徵因子敏感度分析.....	95
表 4-23	生質炭之特徵因子敏感度分析.....	95



第一章 緒論



1.1 研究動機與目的

土地(land)是維持人類活動及科學文明發展的重要資源，它提供了多樣化的生物性資源(biotic resource)，如糧食、林木、動物等，以及大量的非生物性資源(abiotic resource)，如礦物、石材等。隨著人類活動強度不斷增加、對產品及服務的需求急遽成長、人口爆炸性地成長，三者交互作用的影響下，因此大量耗用各種資源以滿足我們的需求，土地資源也直接或間接被大量佔用，甚至造成衰竭(depletion)。

生命週期評估(Life Cycle Assessment, LCA)近年來被廣泛應用在評估產品或服務在生命週期中，從原料的取得到製造、使用和棄置等階段造成的環境衝擊，而生命週期評估的結果不只提供最終產品的環境衝擊資訊，亦可揭露所有投入的各種資源以及所有的污染物造成的環境衝擊，其中也包含土地佔用產生的環境衝擊，因此生命週期評估是目前可以用來評估土地利用環境衝擊的工具之一。

目前多數的終點導向(endpoint-oriented)生命週期衝擊評估方法，如Eco-indicator 99、IMPACT 2002+等，均有考量土地利用產生的環境衝擊，並且特別將其歸類於獨立的中點(midpoint)衝擊類別中，亦可與其他的中點衝擊合併計算出終點(endpoint)損害以及最終的單項得點(single score)。綜合比較這些生命週期衝擊評估方法的計算架構發現，土地利用的中點衝擊都只有納入生態系統相關的損害計算中，亦即土地利用在這些生命週期衝擊評估方法中只有考慮其對生態系統之影響。

然而，文獻指出土地利用亦會產生其他面向的影響，例如生質燃料在其生命週期中會直接及間接佔用土地並改變地表型態，從而導致所佔用土地之固定碳素總量或是溫室氣體排放量改變，進一步產生額外的溫室氣體排放(Börjesson and Tufvesson, 2011; Gnansounou et al., 2008; Liska and Perrin, 2009);或是例如土地佔用使得地表植被覆蓋率及生長之植物種類產生變化，減少了土地的生物質(biomass)，導致耗用額外的可用天然資源量(Haberl et al., 2007; Kohlheb and Krausmann, 2009; O'Neill et al., 2007)。

有鑑於目前生命週期衝擊評估方法對於土地利用環境衝擊評估過程的不足，本研究加入土地利用對其他面向的影響到現有的生命週期衝擊評估方法中，並以近年應用生命週期評估經常被選用的衝擊評估方法 IMPACT 2002+為基礎進行修正，期望建立更臻完備的土地利用環境衝擊評估工具。





1.2 研究流程

本研究以 IMPACT 2002+ 衝擊評估方法為基礎，加入土地利用對其他面向的影響，並於生命週期評估軟體 SimaPro 中建置本研究修正開發的生命週期衝擊評估方法，最後設計兩個生質燃料為案例，分別以 IMPACT 2002+ 及本研究建立之方法進行環境衝擊特徵化，比較並且討論考慮額外土地利用環境衝擊對於生質燃料之影響，本研究流程如圖 1-1 所示。

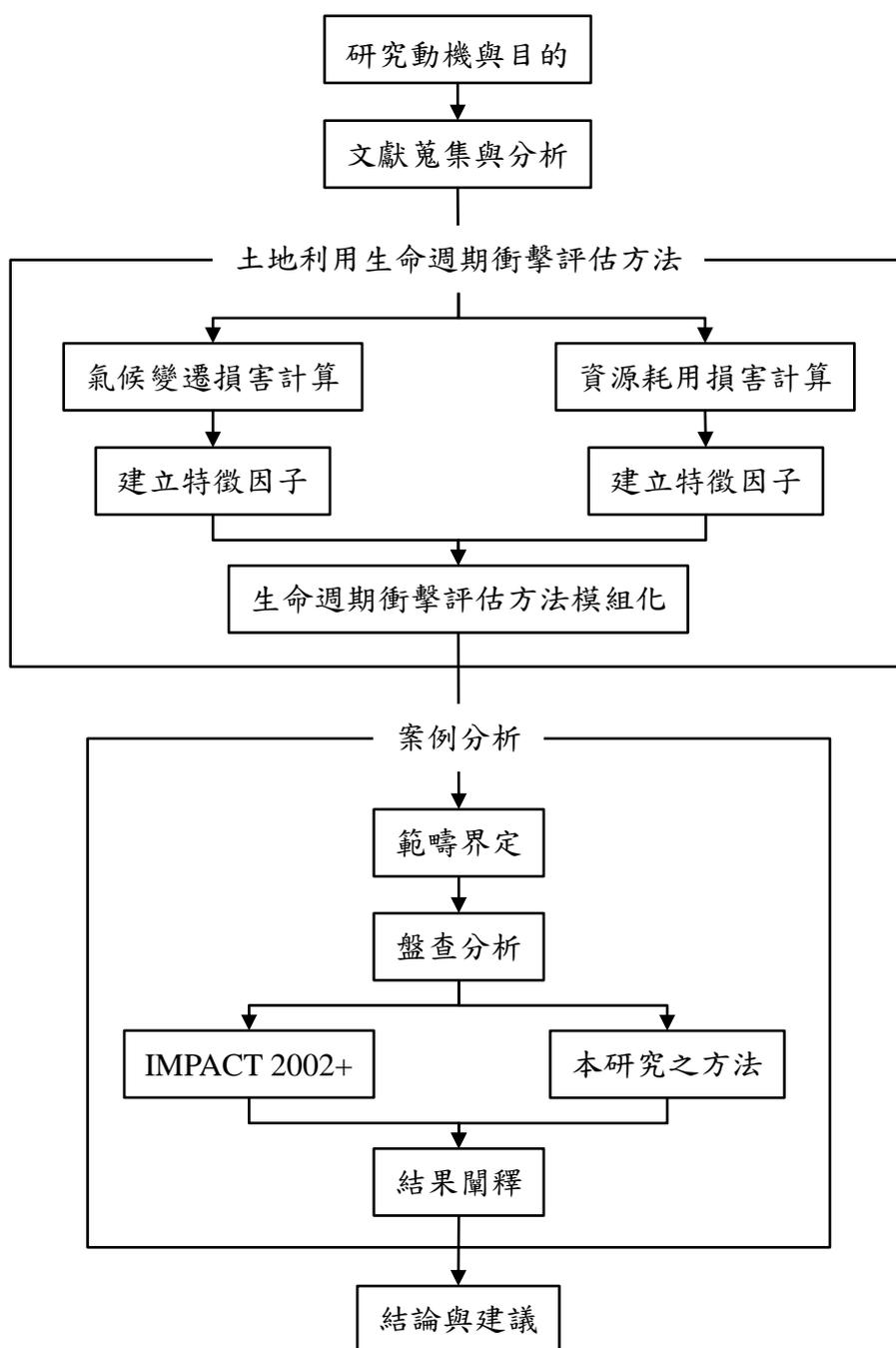


圖 1-1 研究流程圖



第二章 文獻回顧



本章分別針對土地利用產生的環境衝擊以及生命週期衝擊評估方法，彙集國內外有關文獻進行回顧，介紹相關概念與方法的發展現況，茲就各部分說明如后。

2.1 土地利用的環境衝擊

早期對於土地利用會產生何種環境衝擊仍不明確，因此初期發展的特徵化模式通常僅考量佔用土地面積多寡以線性方法評估土地利用衝擊，像是由 Baumann et al. (1992)提出的土地利用衝擊特徵化模式(Heijungs et al., 1997; Jolliet and Crettaz, 1996)，如式(1)所列：

$$S = \sum_i a_i \quad (1)$$

其中， a_i ：一個功能單位佔用的土地面積(m^2)。

另外則有文獻認為應透過土地品質的變化來評估土地利用衝擊，像是由 Heijungs et al. (1992)提出的土地利用衝擊特徵化模式建議考量土地品質的變化並將土地利用類型區分成 5 類，分別為天然地(natural systems)、修復地(modified systems)、耕地(cultivated systems)、建地(built systems)、退化地(degraded systems)，當土地利用類型發生變化時，佔用之土地面積以特徵因子的乘積修正，由品質較高轉變成品質較低的特徵因子為 1，反之則為-1，如式(2)所列：

$$S = \sum_i a_{s1 \rightarrow s2, i} \quad (2)$$

其中， $a_{s1 \rightarrow s2, i}$ ：以特徵因子修正之土地面積(m^2)。

Blonk et al. (1996)提出的土地利用衝擊特徵化模式則類似於整合 Baumann et al. (1992)以及 Heijungs et al. (1992)之概念，利用自然值(nature value)表示土地與生態系統的品質來修正土地利用造成之衝擊，如式(3)所列：



$$S = \sum_i (N_{r,i} - N_{a,i}) \times a_i$$

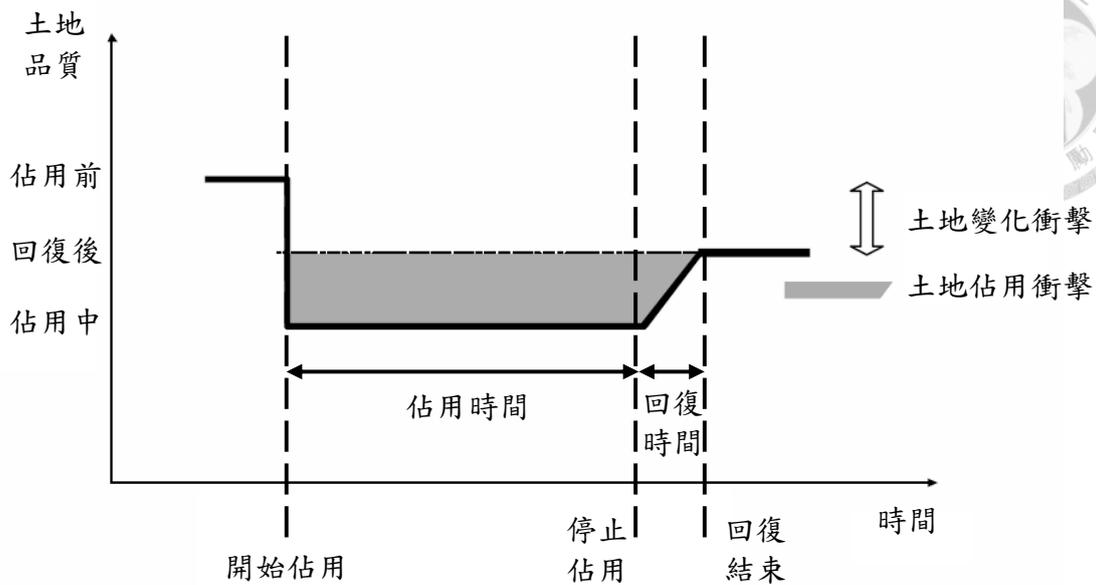
其中， a_i ：佔用的土地面積(m²)；

$N_{r,i}$ ：參考系統之自然值；

$N_{a,i}$ ：人類活動造成之自然值。

然而，這些早期發展的土地利用衝擊特徵化模式仍過於粗略，無法滿足生命週期評估應用者及相關研究者的需求，因此 SETAC-Europe WIA-1 報告將土地利用衝擊細分成土地利用對於資源的衝擊、土地利用對於生物多樣性的衝擊、土地利用對於生態功能的衝擊等(Guinée et al., 2001; Udo de Haes et al., 1996)。而之後出版的 SETAC WIA-2 報告則建議將土地利用衝擊的來源概分為 2 種類型，分別為土地佔用(land occupation)及土地變化(land transformation)，前者如因土地的居住或使用而造成的衝擊，後者則是指因土地使用完畢後，雖可花費一定時間回復品質，但復原的土地品質無法完全回到使用前的狀態，而產生土地品質改變的衝擊(Guinée et al., 2001)，圖 2- 1 可說明土地利用衝擊的時間動態。Guinée and Heijungs (1995)則將土地利用衝擊分成競爭型(competition，是指總可用土地面積的減少)衝擊及耗用型(depletion，是指特定品質的土地耗用)衝擊，競爭型衝擊通常與土地佔用有關，耗用型衝擊則與土地變化有關(Guinée et al., 2001)。

在此之後發展的衝擊特徵化模式大多遵循 SETAC WIA-2 架構，將土地利用衝擊區分成土地佔用及土地變化(Pennington et al., 2004)。此外，土地利用衝擊也會對不同的環境面向產生衝擊，例如，土地利用可能造成生態功能退化或是生物多樣性降低，也可能產生額外的溫室氣體排放以及額外的資源耗損等，以下針對土地利用對各種環境面向產生的衝擊進行回顧。



修改自 Guinée et al. (2001)

圖 2-1 土地利用衝擊時間動態圖

2.1.1 生態系統衝擊

土地利用造成地表型態的改變，往往對當地的植物覆蓋面積、棲地面積、動植物種類及數量等產生程度不一的影響，對於生態系統的衝擊是最為直接可見的，因此 Udo de Haes et al. (1999)建議土地利用衝擊特徵化模式應涵蓋三大子類別：土地競爭(land competition)、生態功能退化(degradation of life support functions)與生物多樣性降低(biodiversity degradation)。Guinée et al. (2001)也將土地利用衝擊分為三個子類別：土地競爭、生物多樣性與生態功能，並且進一步分別建立土地利用衝擊特徵化模式，其中土地競爭模式係以使用的土地面積總和表示，如式(4)所列；另外，生物多樣性模式及生態功能模式則係參考 Lindeijer et al. (1998)以及 Lindeijer (2000)提出的方法，並可分開計算土地佔用及土地變化之衝擊。土地變化衝擊的生物多樣性模式如式(5)所列，生態功能模式則如式(6)所列；而土地佔用衝擊的生物多樣性模式如式(7)所列，生態功能模式則如式(8)所列：

$$land\ competition = \sum_s U_s \quad (4)$$

$$\text{loss of biodiversity} = A \times \left(\frac{\alpha_{ini} - \alpha_{fin}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{loss of life support functions} \\ = A \times (fNPP_{ini} - fNPP_{fin}) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{loss of biodiversity} = A \times t \times \left(\frac{\alpha_{ref} - \alpha_{act}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{loss of life support functions} \\ = A \times t \times (fNPP_{ref} - fNPP_{act}) \end{aligned} \quad (8)$$

其中， U_s ：一個功能單位的土地利用狀態，單位為 $m^2 \times yr$ ；

A ：使用的土地面積；

t ：土地使用的時間；

$fNPP$ ：自由淨初級生產量(free Net Primary Production)，係指淨初級生產量扣除人類活動消耗之淨初級生產量；

α ：每 m^2 土地上的植物物種數，即植物物種密度(plant species density)。

針對土地利用可能對生態系統造成的影響，Goedkoop and Spriensma (2000)發展的 Eco-indicator 99 生命週期衝擊評估方法中更進一步將這類的影響計算成平均物種消失率(species disappeared fraction)來表示對生態系統實際產生的損害(damage)。

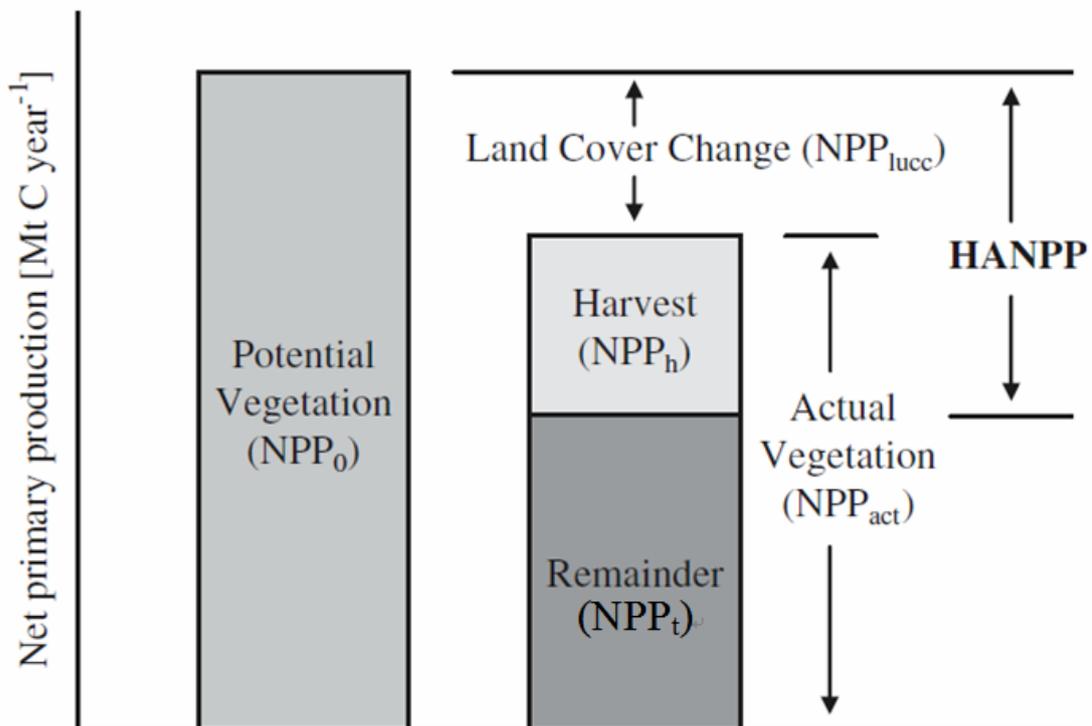
2.1.2 資源耗用衝擊

土地利用對於資源使用產生衝擊的概念係源於人類佔用淨初級生產量(Human Appropriation of Net Primary Production, HANPP)，HANPP 是由 Vitousek et al. (1986)、Wright (1990)以及 Haberl (1997)逐漸發展而來(O'Neill et al., 2007)，圖 2-2 為 HANPP 的定義圖示。



淨初級生產量(Net Primary Production, NPP)亦稱淨初級生產力(Net Primary Productivity)為植物經光合作用固定能量並扣除呼吸消耗的能量，剩餘可用於生長之能量，通常以每年每平方公尺固定之能量(J/m²/yr)或每年每平方公尺產生的生物質(biomass)乾重(g-C/m²/yr)，但是淨初級生產量當中有一部分被人類活動所佔用，如耕作、建築物等，各式各樣的人類活動導致在沒有人類干擾前的淨初級生產量(圖 2-2 中的 NPP₀)與當前生物圈所流動循環的生物質總量(圖 2-2 中的 NPP_t)產生一定的差距，兩者的差值即為 HANPP。而 HANPP 當中人類所佔用的淨初級生產量可根據其性質分為兩類，其一是被人類所利用的生物質(圖 2-2 中的 NPP_h)，如食物、木材等，這類的淨初級生產量當被人類利用完畢仍可藉由物質循環回歸生物圈；其二是因土地利用造成地表植被覆蓋率及生長之植物種類產生變化，因而減少的生物質(圖 2-2 中的 NPP_{lucc})，然而，佔用這類的淨初級生產量往往是不可逆的影響，土地利用變遷因此會使得可用的天然資源量不斷減少，而目前常見生命週期衝擊評估方法當中卻鮮少考量這類的土地利用產生的環境衝擊。

另外，HANPP 必須仰賴淨初級生產量的數據計算而得，而淨初級生產量可經由實地量測或利用模式進行推估，目前淨初級生產量的計算模型可分為：



資料來源：Haberl et al. (2007)

圖 2-2 人類佔用淨初級生產量示意圖

- 
- (1) 統計模型(statistical model)：統計模型是以統計方法估算淨初級生產量，但因其較為簡單使得估算誤差較大，常見的統計模型有 Miami 模型，該模型由 Lieth (1973)根據世界五大洲約 50 個地點的淨初級生產率與年平均溫度(t)以及降水量(r)關係的基礎上，經由回歸分析建立；
 - (2) 參數模型(parameter model)：參數模型是由植被吸收的光合有效輻射(APAR)和光能使用率(ϵ)二個因子來計算淨初級生產量，是研究淨初級生產力的最主要方法；
 - (3) 過程模型(process-based model)：過程模型則是基於參數模型並同時包含了氣象與環境參數，近年來過程模型多與遙測技術結合並成為目前淨初級生產量計算模型研究的重要發展方向，常用的過程模型有 CASA 模型和 BEPS 模型等。

2.1.3 氣候變遷衝擊

土地利用變遷產生溫室氣體排放的概念，目前廣泛存在於關於生質燃料的討論，Searchinger et al. (2008)發現當以玉米或柳枝稷製成的生質燃料取代部分的汽油使用，可能會使整體溫室氣體排放量大幅增加，而不是原先預期會降低的結果，主要原因正是肇因於土地利用變遷所額外產生的溫室氣體排放。Fargione et al. (2008)也發現類似的結果，土地利用變遷額外產生的溫室氣體排放會比以生質燃料取代汽油每年的平均溫室氣體減量效益還要多出 17 倍至 420 倍不等的排放量。而土地利用產生溫室氣體排放的來源，依其性質可分為：

- (1) 直接土地利用變遷排放(direct Land-Use Change, dLUC)：直接土地利用變遷排放由於生質燃料的生命週期中，會佔用大量土地進行各種用途，例如生質作物的耕地、生質燃料生產工廠的建地等，而土地利用會改變地表型態，從而導致所佔用的土地之固定碳素總量或是溫室氣體背景排放量產生變化，進一步產生額外的溫室氣體排放(Börjesson and Tufvesson, 2011; Gnansounou et al., 2008; Liska and Perrin, 2009)。
- (2) 間接土地利用變遷排放(indirect Land-Use Change, iLUC)：間接土地變遷利用排放則是因為生質作物會與糧食作物相互爭地，在積極發展生質能源的情況下，生質作物的經濟價值較高，而競爭結果使得生質作物耕地



面積增加而佔用了原先種植糧食作物的土地，糧食產量因而減少，連帶造成糧食的市場價格上揚，由於自由市場機制的影響以及糧食供應的安全考量，導致有更多額外的天然林地被開發成耕地，額外的土地佔用如同直接土地利用變遷排放的結果，因此產生額外的溫室氣體排放 (Börjesson and Tufvesson, 2011; Gnansounou et al., 2008; Liska and Perrin, 2009; Searchinger et al., 2008)。

直接土地利用變遷排放可以透過生命週期評估，盤查完整的土地利用清單進行溫室氣體排放量的估算(Börjesson and Tufvesson, 2011)。間接土地利用變遷排放的估算上由於新開發的糧食作物面積必須透過生質作物的產量及價格進行預測，因此較為困難且不確定性高，目前最常被應用來推估間接土地利用變遷排放的方法是利用全球性農業經濟模型(global agro-economical model)重新平衡糧食作物的產量及耕種面積，掌握額外增加的耕地面積即可估算間接土地利用變遷排放量 (Börjesson and Tufvesson, 2011; Gnansounou et al., 2008)，像是 Searchinger et al. (2008)的研究就是利用全球性農業經濟模型預測出以生質燃料取代部分汽油使用後，額外產生的溫室氣體排放量；另外，Fritsche et al. (2010)建立間接土地利用變遷因子法(iLUC Factor)來推估生質燃料的間接土地利用變遷排放，該研究嘗試利用全球貿易及生產資料，找出糧食產品的生產貿易量與生質燃料的生產貿易量之間的線性因子，藉此估算因種植生質作物可能導致額外增加的糧食作物耕地面積，進一步計算土地利用變遷所產生的溫室氣體排放量。

直接土地利用變遷排放的概念雖然是起源於生質燃料，然而其定義是因土地利用改變地表型態，導致所佔用的土地之固定碳素總量或是溫室氣體背景排放量改變而產生額外的溫室氣體排放，因此這類的排放概念並不只限於生質燃料，而可以適用於所有涉及土地利用的產品及服務。而且目前常見生命週期衝擊評估方法當中亦未考量這類的土地利用產生的環境衝擊。

2.2 生命週期評估與衝擊評估方法

生命週期評估近年來被廣泛應用在評估產品或服務在生命週期中，從原料的取得到製造、使用和棄置等階段造成的環境衝擊，生命週期評估程序主要包含四項步驟：目標及範疇界定(goal and scope definition)、盤查分析(Life Cycle Inventory,

LCI)、衝擊評估(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)、結果闡釋(Life Cycle Interpretation)(ISO, 2006a, b; Pennington et al., 2004)，生命週期評估架構如圖 2-3 所示。目標及範疇界定階段主要工作是確立評估對象的系統邊界，據以決定後續盤查範疇及衝擊評估的功能單位(functional unit)；盤查分析則係根據範疇詳細盤查生命週期各個階段物質及能源的投入(input)與產出(output)資料；衝擊評估則是將盤查資料在相同的功能單位下，進一步量化成各種類別的環境衝擊，而衝擊評估發展出的方法眾多，使得目前尚未有統一使用的衝擊評估方法，早期常用的衝擊評估方法有 EDIP 97、Eco-indicator 99 與 CML 2001 等(Dreyer et al., 2003)，另外，Joliet et al. (2003)發展 IMPACT 2002+後，該方法的使用亦相當普遍；結果闡釋則是綜合盤查分析及衝擊評估的結果提供環境建議給予決策者參考，四大工作步驟的說明如下。

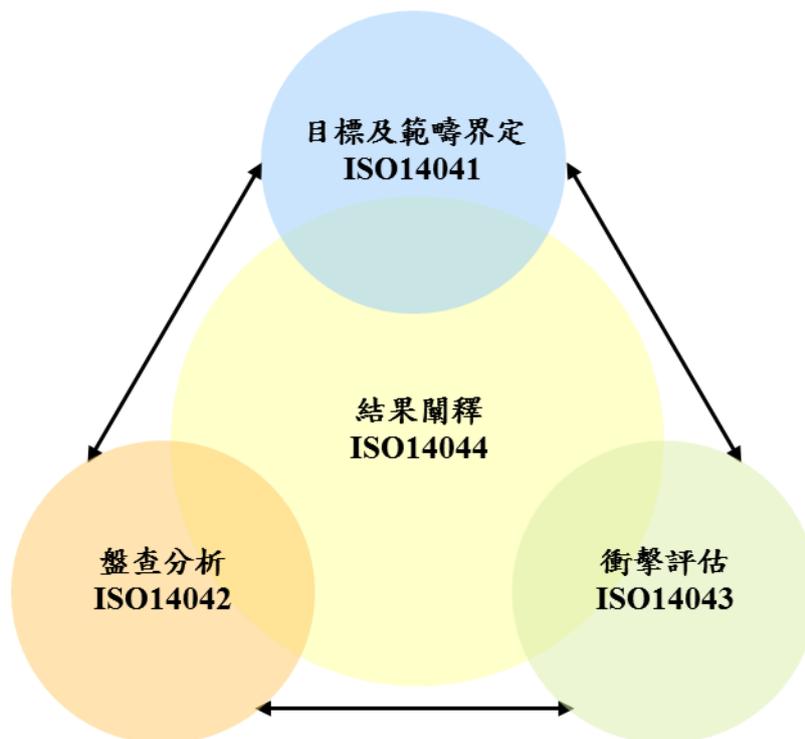


圖 2-3 生命週期評估架構

1. 目標及範疇界定

評估目標及範疇的界定是在進行生命週期評估之前的關鍵步驟，主要是確定評估作業的目標與系統邊界(system boundary)，使評估結果能有效地被應用。為確保不同的系統生命週期評估結果能在同一比較基準上進行比較，生命週期評估要求必須定義功能單位，由於一個系統可能同時存在許多不同的功能，可以依照其

評估目的與範疇決定採用的功能單位，但功能單位也必須是可供標準化之參數或量化基準以提供給投入及產出連結之參考，例如污水處理系統的生命週期評估可以定義功能單位為處理 1 m^3 的污水，也可以定義為去除 1 kg 的污染物質，抑或是定義為降低 1 mg/L 的污染物質濃度。

2. 盤查分析

盤查分析主要是投入產出資料的蒐集與計算，以建立系統的物質和能量流動情形。投入項目包含自然資源、物料、設備與能源等；輸出項目則包括產品、副產品與廢棄物等。盤查清單可以透過許多方法取得，例如問卷調查、實地盤查、文獻查閱、生命週期資料庫、模式計算等。系統的投入產出資料必須符合質量平衡(mass balance)定理，因此嚴謹的生命週期盤查應以盤查清單的質能平衡計算進行資料驗證。

3. 衝擊評估

衝擊評估是將盤查清單量化加總轉換成對環境造成之衝擊損害，衝擊評估的計算過程可分為：

- (1) 特徵化(characterization)：特徵化是指盤查清單依照衝擊類別經對應的特徵化模式計算為環境衝擊(impact)以及環境損害(damage)的過程，為使計算方便，通常會將特徵化模式預先計算為特徵因子(characterization factor)，例如盤查清單中各種具有全球暖化潛勢(Global Warming Potential, GWP)的氣體，與特徵因子相乘並加總得出全球暖化之衝擊。
- (2) 標準化(normalization)：特徵化計算的結果為各個單獨面向的環境衝擊及損害，為了提供綜合性的環境指標—單項得點，標準化之目的在於使特徵化的各個環境衝擊或損害類別之量值無因次化，用以表示衝擊或損害類別對參考地區整體環境品質影響之貢獻程度，並據以進行單項得點之加總。標準化方法是將環境衝擊或損害除上該類別之標準化因子(normalization factor)，標準化因子為參考地區每人每年所受到該衝擊或損害的總量(Goedkoop and Spriensma, 2000; Joliet et al., 2003)。
- (3) 權重化(weighting)：權重化可依據學者專家及利害關係人的意見或評估目的，給予各個衝擊或損害類別權重，決定權重方法經常受到個人主觀價

值判斷的影響，常見的方法有層級分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)、特徵價格法(Hedonic Price Method, HPM)與衝擊分析矩陣法(impact analysis matrix)等(黃，2005)。



4. 結果闡釋

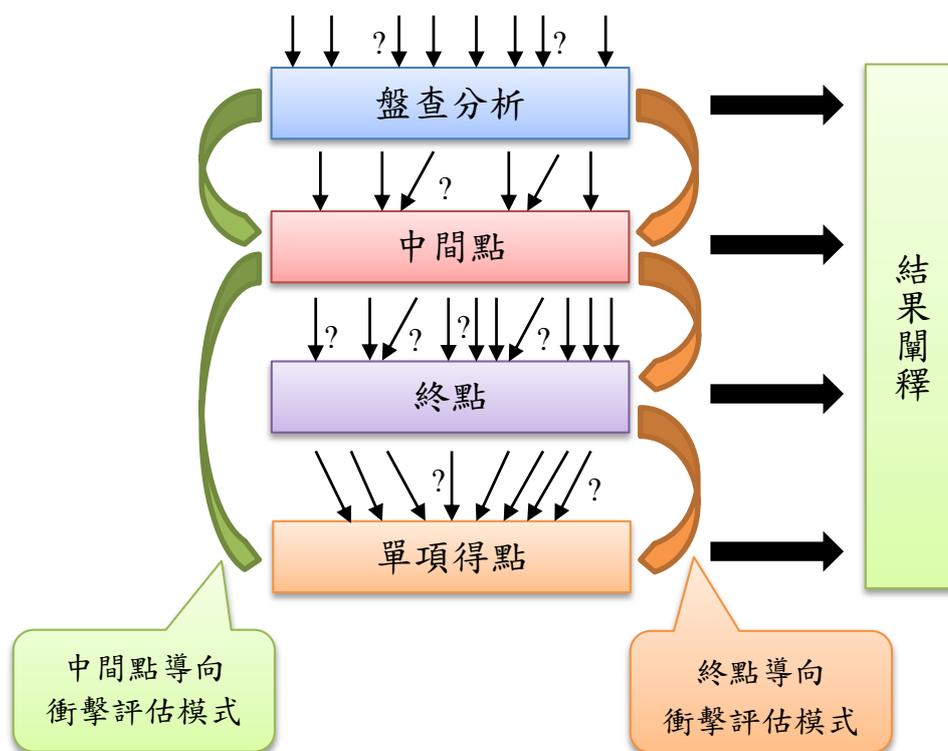
結果闡釋是生命週期評估的最後步驟，整合並分析盤查及衝擊評估的結果。結果闡釋首先為重大環境議題的鑑別，由衝擊評估結果鑑別出系統產生重大環境影響的議題；其二為評價評估結果，利用完整性查驗、敏感度分析、一致性分析等方法查核結果；最後為生命週期結論及建議，以提供決策者衡量之參考(蔣，2012)。

2.2.1 不確定性與地區特性

生命週期評估可以提供決策者瞭解產品或服務造成的環境衝擊，但是實際應用時，評估過程受到諸多限制，使得系統不斷簡化，因此結果可能存在相當的不確定性(uncertainty)。這些不確定性主要來自三個部分：範疇界定、盤查分析與衝擊評估。範疇界定的不確定性是由於研究往往受限於空間、時間以及資源，使得在評估的過程無法完全涵蓋所有應該考量的條件而必須將系統簡化，導致最終結果與真實情況有所差異；盤查分析的不確定性則是因科學技術的限制而無法量測到所有的投入及產出的物質，或是因資源的限制而無法實際量測，都將使盤查結果與真實投入產出情形有所落差，此為資料不確定性(data uncertainties)，在目前常用的生命週期評估之套裝軟體，通常會提供使用者設定每一筆盤查項目的分布函數並內建蒙地卡羅模擬(Monte Carlo simulation)功能，讓使用者可以清楚掌握盤查資料的不確定性；而衝擊評估係將盤查資料分類後(classification)透過各種模式特徵化成環境衝擊(ISO, 2006a, b)，這些模式評估環境衝擊的依據是基於環境科學理論，因此模式考慮環境機制的完整程度將影響衝擊評估的不確定性(Bare, 2010; Bare et al., 2000; Goedkoop and Spriensma, 2000)，此為模式不確定性(model uncertainties)，圖 2-4 為衝擊評估方法不確定性示意圖，圖中的問號表示未被蒐集或模式化(modeling)的資料。

衝擊評估方法最後會以單項得點呈現總環境衝擊，而在計算單項得點前需要給予權重化(ISO, 2006a, b)，但權重化仍然缺乏標準步驟提供研究者參考，過去常

用的權重評價方法，多半偏向主觀認定，不僅需費時費力進行問卷調查，不同的生命週期評估案例間，也因為給定權重的受訪者不同而得到不同的權重，造成案例間進行比較的困難(黃，2005)，亦會產生不確定性，此外，早期發展的衝擊評估方法多數仍然屬於通用性(site-generic)，缺乏考量地區特性(site-specificity) (Bare, 2010)，例如同樣在臺灣及美國排放 1 kg 的 BOD 於河川中，實際上對當地產生的環境衝擊可能因其涵容能力不同而有所差異；又或是在臺灣及美國同樣佔用 1 公頃土地，實際上對當地產生的環境衝擊亦可能因其生態特性或資源壓力不同而產生差異，但以通用性衝擊評估方法計算出的環境衝擊將是相同的，因此是否考慮地區特性也會影響衝擊評估的不確定性。



修改自 Bare et al. (2000)

圖 2-4 衝擊評估方法不確定性示意圖

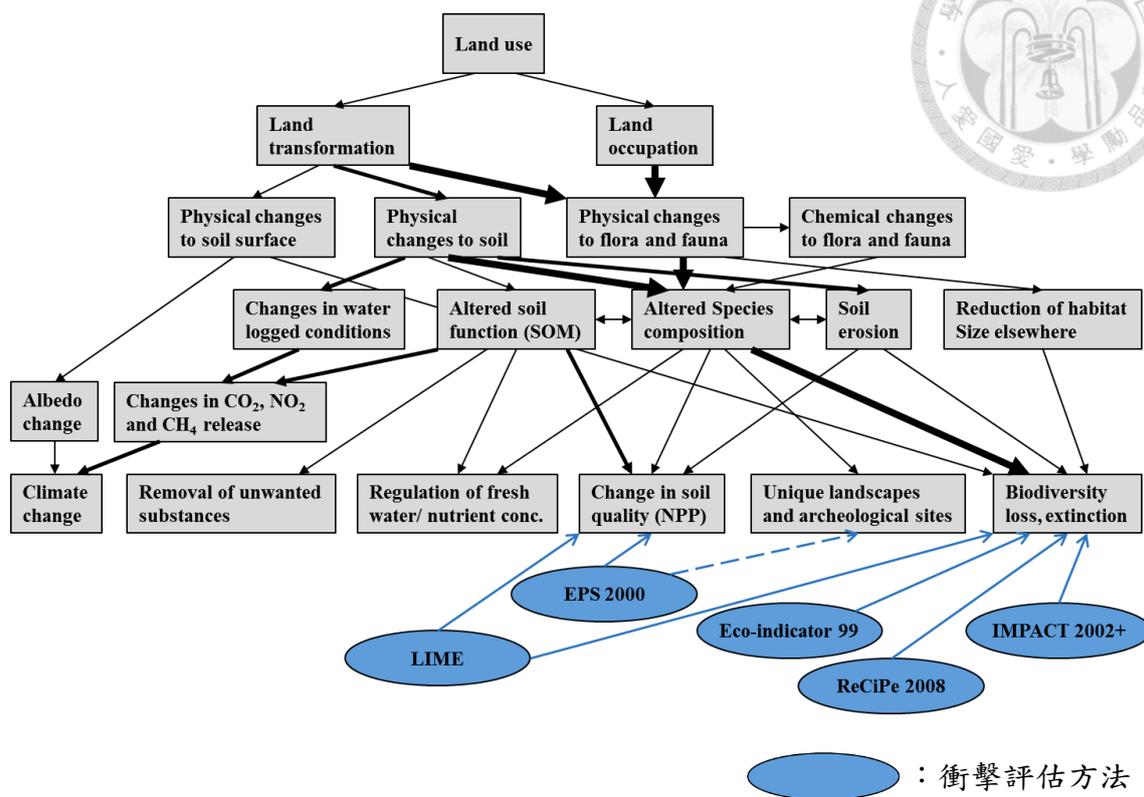
2.2.2 衝擊評估方法與土地利用衝擊特徵化模式

生命週期衝擊評估方法可概分為中間點導向(midpoint-oriented)及損害導向(damage-oriented，亦稱終點導向)，前者主要有 CML 2001 及 EDIP 97/2003，後者則有 Eco-indicator 99、EPS 2000 與 IMPACT 2002+ (Jolliet et al., 2003)。中間點導向衝擊評估方法的結果係以各種衝擊類別表示，以 EDIP 2003 為例，包含全球暖

化、臭氧層破洞、臭氧生成、酸雨化、陸域優養化、海域優養化、人體毒性及資源等 19 種衝擊類別，最後可進一步經權重化後以單項得點呈現；損害導向衝擊評估方法的結果則係以損害類別表示，以 IMPACT 2002+ 為例，包含人體健康、生態品質、氣候變遷及資源共 4 種損害類別，最後亦可經權重化後以單項得點呈現，另外，損害導向衝擊評估方法也可以中間點的衝擊類別表示。

無論是中間點導向或是損害導向的衝擊評估方法都有其優點及限制，簡言之，中間點導向衝擊評估方法因其較損害導向少了計算損害的部分，使其量化結果的不確定性較低，但損害導向衝擊評估方法因重視的是衝擊最終反應在受體的影響程度，例如中間點導向的量化結果可以表示酸雨化的嚴重程度但卻無法揭露對生態系統的影響程度，故較中間點導向來得適切，並能夠直接提供衝擊對受體的影響資訊給決策者參考(Bare et al., 2000; Chan et al., 2012)。

另外，歐洲委員會(European Commission, EC)的聯合研究中心(Joint Research Centre, JRC)於 2011 年出版之報告彙整多種中間點導向以及損害導向的衝擊評估方法，例如 Eco-indicator 99、EPS2000、IMPACT 2002+、LIME 與 ReCiPe 等，並將衝擊類別分為人體毒性(human toxicity)、游離輻射(ionizing radiation)、酸化(acidification)、和土地利用(land use)等 11 大類，分別針對各種衝擊評估方法於這些衝擊類別的特徵化模式進行評分，期望提供生命週期評估的使用者選取符合其關切議題的衝擊評估方法，評分準則包含評估範疇的完整性、環境衝擊的關聯程度、科學機制的健全性與不確定性、評估方法的透明程度等，分數由最高的 A 到最低的 E 共 5 個等第評定，在土地利用的衝擊類別中，總共評定了 8 種衝擊評估方法，然而這些衝擊評估方法的平均得分多在 C 等第以下，並且在環境衝擊關聯程度準則的得分偏低，顯示出目前的衝擊評估方法考慮的土地利用衝擊過於單一，圖 2- 5 主要說明土地利用衝擊產生之因果關係，亦明確指出目前的衝擊評估方法多著重於土地利用對於生物多樣性造成的衝擊而較少考慮其他類型的環境衝擊(EC-JRC, 2011; Hauschild et al., 2013)，Hauschild et al. (2013)根據 EC-JRC (2011)的研究結果更進一步指出由於目前的衝擊評估方法缺乏考量土地利用產生的其他環境衝擊，因此並不推薦直接使用現有的土地利用衝擊特徵化來評估衝擊。以下針對數種衝擊評估方法的土地利用衝擊特徵化模式及其他相關研究進行回顧。



修改自 EC-JRC (2011)

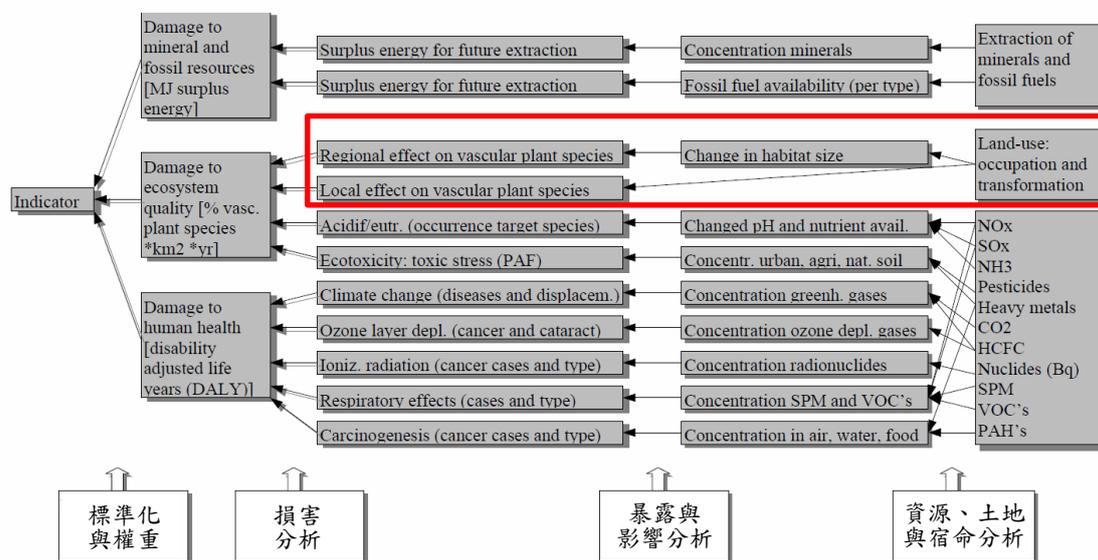
圖 2-5 土地利用衝擊之因果關係

1. Eco-indicator 99

Goedkoop and Spriensma (2000)建立 Eco-indicator 99 衝擊評估方法，其架構如圖 2-6 所示，其中土地利用衝擊特徵化模式同樣遵循 SETAC WIA-2 架構，將土地利用衝擊區分成土地佔用及土地變化，並且除了計算土地利用對當地造成地方損害(local damage)外，更加入土地利用對整個地區產生的區域影響(regional effect)，區域影響的概念是指當某產品或服務佔用當地的土地，會因自然面積的減少而造成該地的物種消失，如從地方觀點擴大至區域觀點，或許該產品或服務所佔用的土地面積是微不足道，但仍會造成整個區域的物種數降低，即使影響很低依然需要被考慮，因此區域影響是以更巨觀且嚴謹的角度來分析土地利用衝擊。Eco-indicator 99 計算土地利用衝擊必須先利用式(9)以及式(10)求出潛在物種消失率(Potentially Disappeared Fraction, PDF)，再分別根據式(11)和式(12)計算地方損害與區域影響，兩者加總即為土地利用衝擊，如式(13)所列。土地變化衝擊及土地佔用衝擊均是依據上述之邏輯進行計算，惟計算土地變化衝擊時，式(10)的參考系統



為土地之初始狀態(original state)，式(11)、式(12)與式(13)的時間為土地復原時間；而計算土地佔用衝擊時則參考系統改為土地之天然狀態(natural state)，時間則改為土地佔用時間。



修改自 Goedkoop and Spriensma (2000)

圖 2- 6 Eco-indicator 99 衝擊評估架構圖

$$S = a \times A^b \quad (9)$$

$$PDF = \frac{S_{reference} - S_{use}}{S_{reference}} \quad (10)$$

$$EQ_{local} = PDF \times A \times t \quad (11)$$

$$EQ_{regional} = PDF \times b \times A \times t \quad (12)$$

$$EQ = EQ_{local} + EQ_{regional} = (b + 1) \times PDF \times A \times t \quad (13)$$

其中，S：物種多樣性(Species diversity)；

a：物種豐富因子(species richness factor)，典型值介於 20 至 2000；

A：土地面積(m²)；



b ：物種富集因子(species accumulation factor) ，典型值介於 0.2 至 0.5 ，
Goedkoop and Spriensma (2000)建議物種富集因子的典型值為 0.2 ；

PDF ：潛在物種消失率；

$S_{reference}$ ：參考系統的物種多樣性，計算土地變化衝擊之參考系統為
土地之初始狀態，土地佔用衝擊之參考系統則為土地之天
然狀態；

EQ ：生態系統品質(Ecosystem Quality)，即為土地利用造成之衝擊；

t ：土地復原/佔用時間(yr)，計算土地變化衝擊為復原時間，土地佔用
衝擊則為佔用時間。

EC-JRC (2011)認為 Eco-indicator 99 的土地利用衝擊特徵化模式存在的問題主
要是數據過於老舊，並且只有單純考慮土地利用對物種消失的影響，缺乏其他面
向之影響，Eco-indicator 99 的評分內容如表 2- 1 所列。

表 2- 1 Eco-indicator 99 評分結果

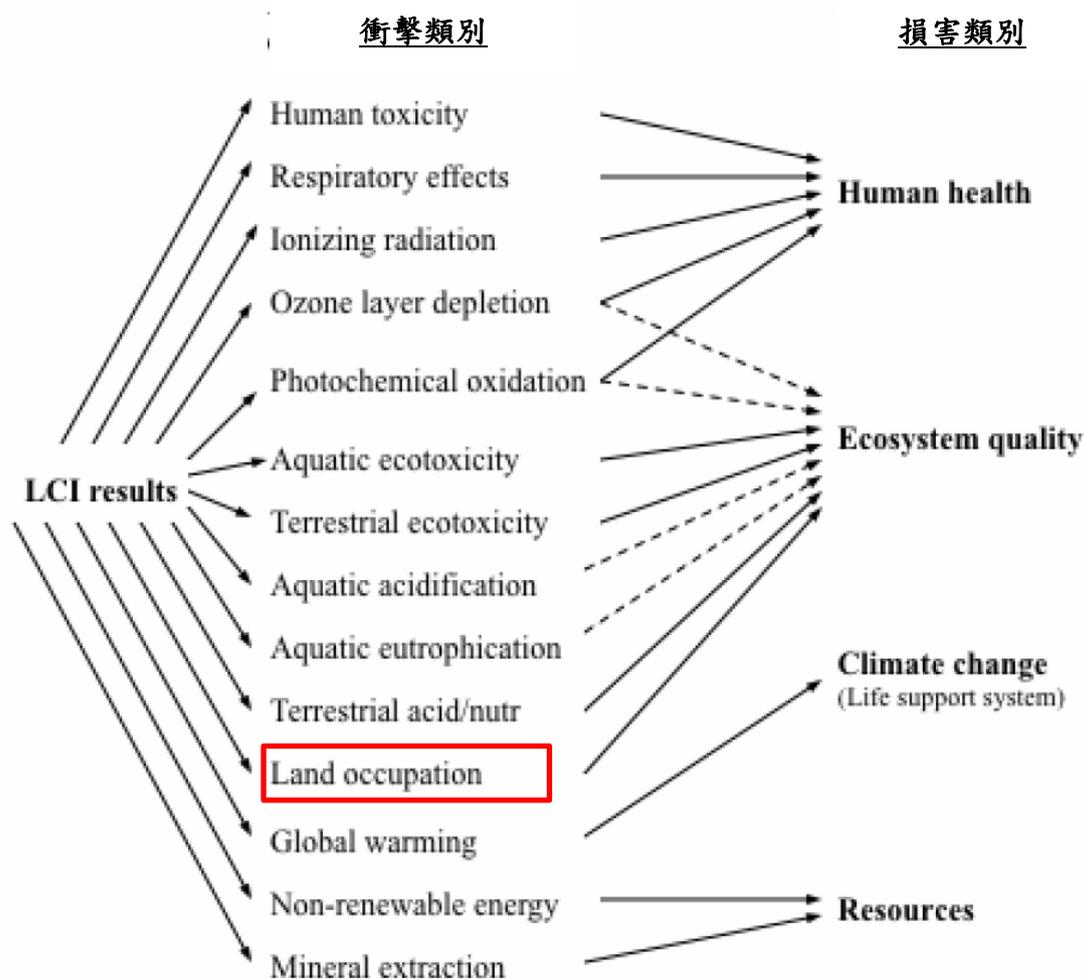
準則	得分	說明
評估範疇的完整性	C	以中歐地區的生物多樣性數據為基礎， 並且有考慮農藥及肥料的重複計算。
環境衝擊的關聯程度	D	特徵化模式單純反映物種數與土地面積 的消長關係，缺乏考量對初級生產量造 成的影響。
科學機制的健全性與不確定性	C	有提供不確定性之資訊，但模式本身使 用的數據相對較舊。
說明文件的透明程度	A	免費提供相關說明文件。
可應用性	B	有提供特徵因子，並且易於使用及更新。
以科學為基礎的總評價	D	使用的數據相對較舊也缺乏考慮土地利 用的強度，但有考慮重複計算的問題。
模式接受度	C	容易使用，但未獲得任何官方的認可。

資料來源：EC-JRC (2011)



2. IMPACT 2002+

Jolliet et al. (2003)建立 IMPACT 2002+衝擊評估方法，其架構如圖 2-7 所示，而其土地利用衝擊特徵化模式係直接引用 Eco-indicator 99 的計算方法，並未加入額外的修正(Jolliet et al., 2003)。

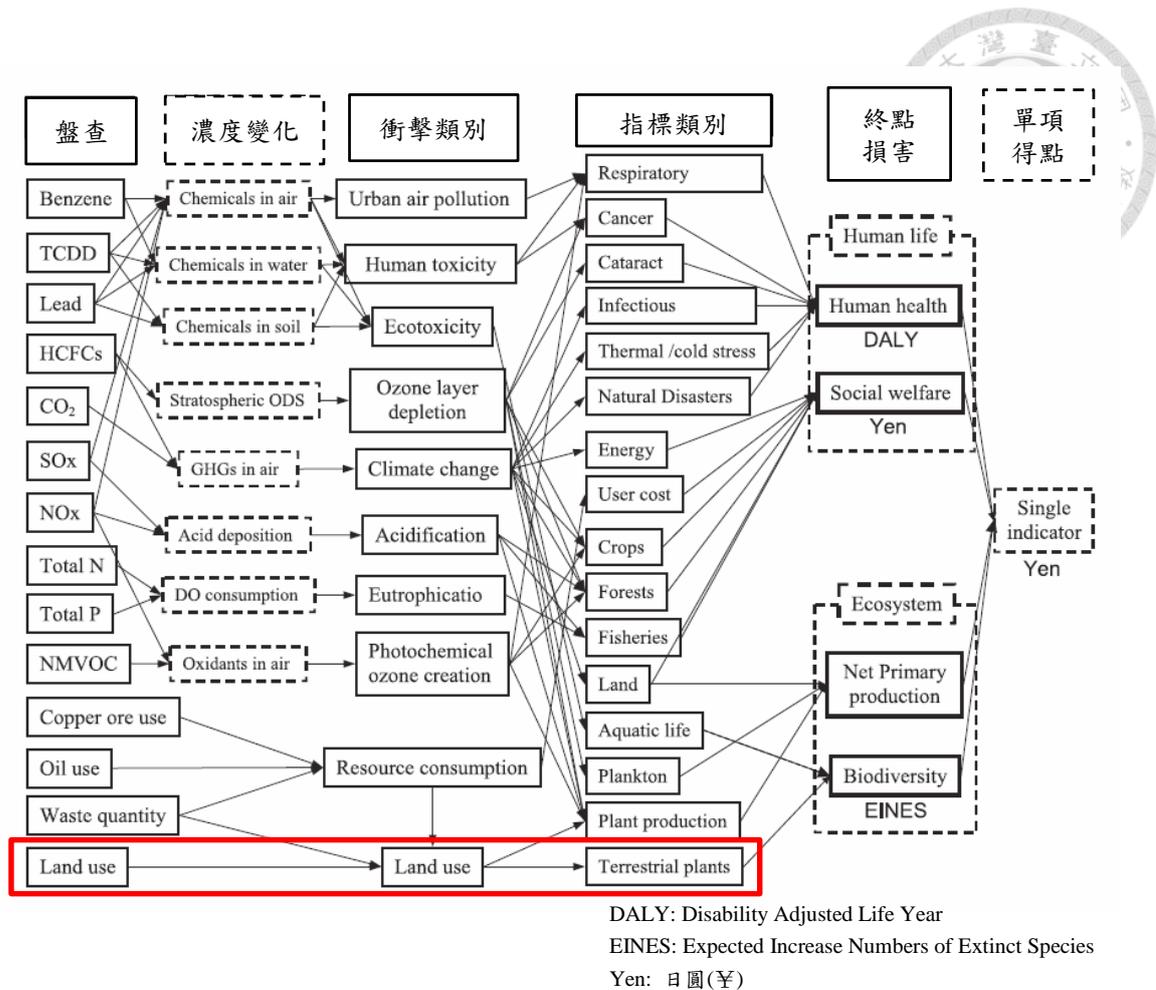


修改自 Jolliet et al. (2003)

圖 2-7 IMPACT 2002+衝擊評估架構圖

3. LIME (Life-cycle Impact assessment Method based on Endpoint modeling)

Itsubo and Inaba (2003)建立 LIME 衝擊評估方法(Pennington et al., 2004)，其架構如圖 2-8 所示，土地利用衝擊特徵化模式亦分成土地佔用及土地變化來討論。不同於 Eco-indicator 99 以物種消長的觀點來評估損害，LIME 則是以淨初級生產量的概念建立模式，亦即以生物質的多寡來評估損害程度。土地佔用衝擊模式如式(14)所列，而土地變化衝擊模式則如式(15)所列：



修改自 Pennington et al. (2004)

圖 2- 8 LIME 衝擊評估架構圖

$$DF_{NPP}^{Occ}(a) = NPP_p - NPP_a \quad (14)$$

$$DF_{NPP}^{Trans}(b, a) = \alpha_{a \rightarrow p} \times DF_{NPP}^{Occ}(a) \times T_{a \rightarrow p} - \alpha_{b \rightarrow p} \times DF_{NPP}^{Occ}(b) \times T_{b \rightarrow p} \quad (15)$$

其中， DF_{NPP}^{Occ} ：土地佔用之損害(kg/m²/yr)；

NPP ：淨初級生產量；

a 和 b ：分別代表不同的土地利用類型；

T ：土地生產力復原需要的時間(yr)；

α ：淨初級生產量回復(recovery)係數，典型值為 0.5。



EC-JRC (2011)認為 LIME 的土地利用衝擊特徵化模式本身的科學問題不大，並且也以淨初級生產量補足其他方法的缺失，但缺乏英文版本的特徵因子及說明文件，卻使得 LIME 在日本以外的國家的使用程度非常有限，LIME 的評分內容如表 2-2 所列。

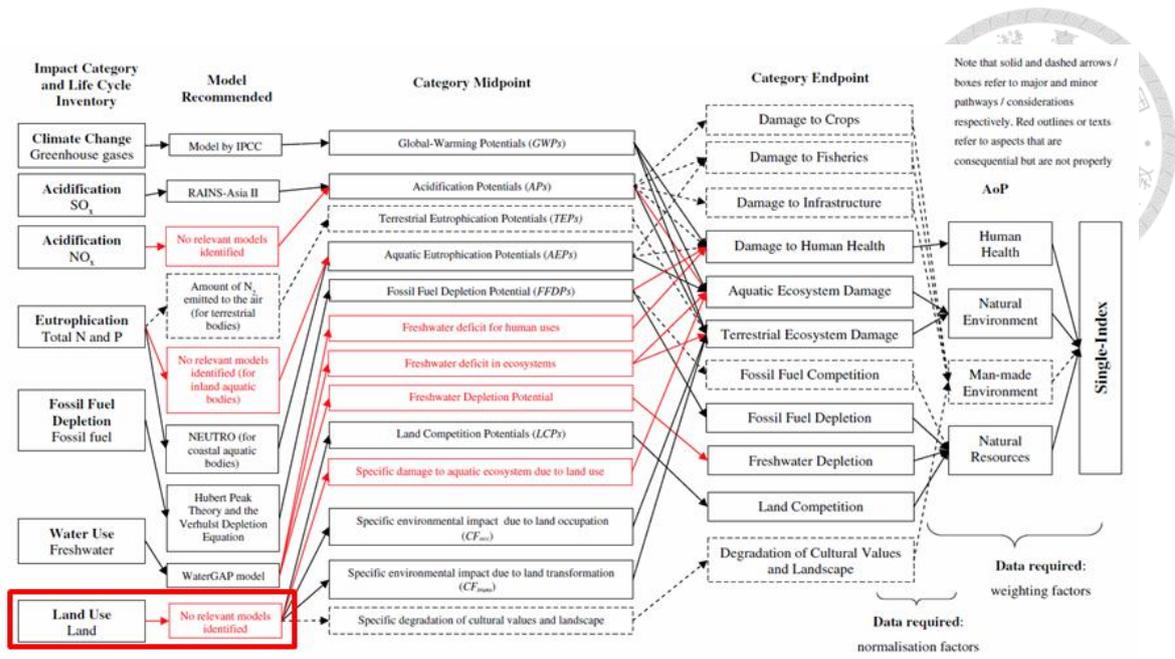
表 2-2 LIME 評分結果

準則	得分	說明
評估範疇的完整性	D	以日本地區的數據為基礎。
環境衝擊的關聯程度	C	特徵化模式同時包含對初級生產量及生物多樣性降低的影響。
科學機制的健全性與不確定性	E	缺少不確定性之資訊。
說明文件的透明程度	E	缺少英文版本的說明文件。
可應用性	D	缺少英文版本的特徵因子。
以科學為基礎的總評價	D	特徵化模式僅適用於日本地區。
模式接受度	C	容易使用，但未獲得任何官方的認可。

資料來源：EC-JRC (2011)

4. SIMPASS (Singapore IMPact ASSEssment)

Chan et al. (2012)建立 SIMPASS 衝擊評估方法，其架構如圖 2-9 所示，其土地利用衝擊特徵化模式並未進一步分成土地佔用及土地變化，且模式亦不同於 Eco-indicator 99 及 LIME 基於生態系統的角度評估損害，而是單純以資源的角度量化土地利用之損害(SIMPASS 中稱為土地競爭潛勢(land competition potential))。土地利用衝擊特徵化模式如式(16)所列：



修改自 (Chan et al., 2012)

圖 2- 9 SIMPASS 衝擊評估架構圖

$$LCP_x = \frac{DR_x/R_x^2}{DR_{ref}/R_{ref}^2} \quad (16)$$

其中， LCP_x ：土地競爭潛勢；

R ：最大可用土地面積，下標 ref 表示參考狀態；

DR ：人類活動佔用的土地面積，下標 ref 表示參考狀態。

5. 臺灣已發展之土地利用衝擊特徵化模式

目前國內已發表關於生命週期衝擊評估中土地利用衝擊特徵化模式的相關研究並不多。馬等人(2007)提出土地利用指數來估算其研究對象的製程鏈中各設施開發所造成的衝擊。土地利用衝擊特徵化模式係參考現行個案環境影響評估中敏感區位所列出的準則。再根據研究對象的開發位址所具有之特性計算準則分數，表示土地利用所造成的衝擊，如式(19)所列：

$$\text{土地利用指數} = \text{準則分數} \times \frac{\text{土地佔用面積}}{\text{參考面積}} \quad (17)$$

馬等人(2007)係援用環境影響評估的觀點來發展，上式中的準則分數為符合敏感區位準則的項目數，參考面積為環境影響評估中認定進行環評作業之開發規模。以苗栗竹南焚化廠為例，其位於溪口濕地、附近具有紫斑蝶，鄰近斷層且又位於地下水管制區、水源水質保護區與空氣污染三級防制區，因此其準則分數為六分。而竹南廠總面積為 3.58 公頃，該廠位於都市土地，開發規模需達 5 公頃才應實施環評，參考面積為 5 公頃，故其土地利用指數為 4.29 (馬等人，2007)。

綜合上述的生命週期衝擊評估方法可以觀察出目前這些方法大多只有考慮土地利用對生態系統產生的衝擊，然而根據文獻回顧的結果，土地利用亦會產生額外的資源耗用以及溫室氣體排放，Hauschild et al. (2013)及 EC-JRC (2011)也指出目前的衝擊評估方法多半缺乏考量土地利用產生的其他環境衝擊。因此本研究加入土地利用的其他環境衝擊到現有的生命週期衝擊評估方法中，期望建立更為完備的土地利用環境衝擊評估工具。

2.3 生質燃料的土地利用衝擊

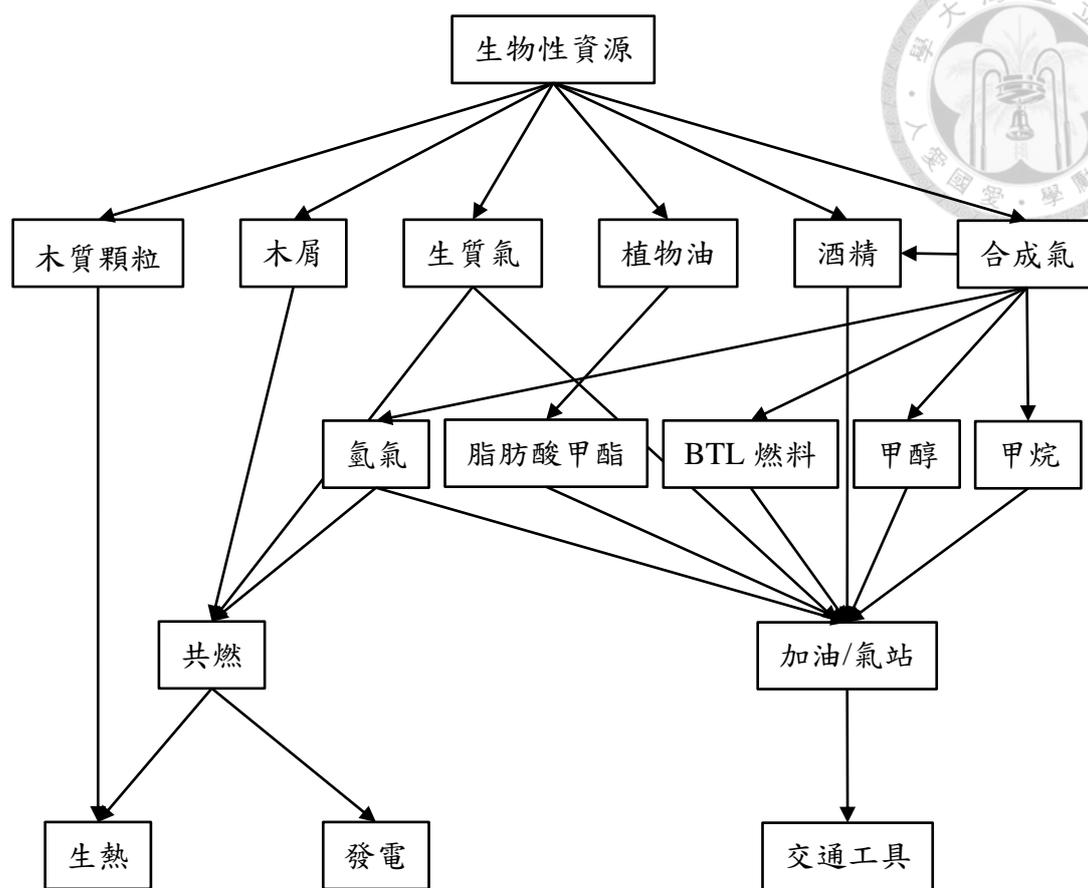
生質燃料(bioenergy)係指利用生物性資源加工提煉的能源產品，常見的產品包含生質氣(biogas)及生質燃料(biofuel)等，生質氣通常以廚餘、動物糞便或是牧草經厭氧發酵產製而成，生質燃料(biofuel)可分為生質酒精(bioethanol)及生質柴油(biodiesel)，前者多以糖質豐富的甘蔗、甜菜或是富含澱粉的甘藷、玉米以及纖維含量高的蔗渣、木材經發酵和蒸餾產製而成，而後者則是以油菜籽、大豆或麻瘋樹籽等高油脂作物榨取出大量的植物油經轉酯化反應生成，圖 2-10 為目前生質燃料及應用概要。

由於氣候變遷的威脅以及化石燃料日漸匱乏，生質燃料是近年積極發展的生質燃料，希望能降低對化石燃料的依賴並減少溫室氣體排放，根據統計，目前全世界消費的運輸燃料已有約 1.5 % 為生質燃料(IEA, 2010)，然而，卻也有愈來愈多的研究指出生質燃料比起傳統的化石燃料在整個生命週期中會造成大量的土地佔用及變遷，例如將森林地闢林為耕地種植能源作物或是由其他作物的耕地改為種植能源作物，而土地利用問題對於應用生質燃料可能產生的環境衝擊也是近年來相關研究討論的重點之一，其中部分研究指出土地利用最直接造成的環境影響係因改變土地的碳儲存量而產生額外的溫室氣體排放(Gnansounou et al., 2008; IEA,



2010; Searchinger et al., 2008)，即土地利用變遷排放，其中有與糧食作物爭地疑慮的生質燃料還會造成間接土地利用變遷排放，使得生質燃料的減碳效益和預期的結果出現落差。而土地利用變遷排放的概念也逐漸出現在部分的生質燃料能源政策中，例如美國的再生燃料標準(Renewable Fuel Standard, RFS2)以及加州低碳燃料標準(California's Low Carbon Fuel Standard, LCFS)都已經注意到間接土地利用變遷排放對應用生質燃料效益的影響(Broch et al., 2013)，亦顯示出考量間接土地利用變遷排放的重要程度，但由於土地利用變遷產生的溫室氣體排放需要大尺度及長時間觀測資料並且追蹤調查，因此目前關於生質燃料的土地利用變遷排放仍在討論階段，尚未有充分的科學證據得以證明其實際產生的影響，另外，de Sá et al. (2012)曾以 Pfaff's 土地利用模式分析亞馬遜流域熱帶雨林面積與巴西甘蔗生產面積的驅動關係，顯示雨林面積退化與甘蔗生產確實存在一定程度的關係，這項研究結果雖然無法證實間接土地利用變遷排放的存在，但經驗分析的結果卻仍然對此概念提供強而有力的支持。

生命週期評估則是經常被用來評估生質燃料產生的環境衝擊之方法，但由於現行衝擊評估方法對於土地利用衝擊考慮不足的限制下，可能低估生質燃料的環境衝擊並且研擬出過於樂觀的生質燃料政策，Pawelzik et al. (2013)也提出類似的看法，認為目前的方法評估出的土地利用衝擊無法滿足評估目的。綜合上述，本研究選擇以生質燃料存在大量土地利用衝擊的特性作為代表產品，比較考量更多土地利用衝擊後對生質燃料應用價值的影響。



修改自 Jungbluth et al. (2007)

圖 2-10 生質燃料及應用概要

第三章 研究方法



3.1 研究對象

現有的生命週期衝擊評估方法眾多，本研究選用使用相當普遍的 IMPACT 2002+作為衝擊評估架構的基礎，分別加入土地利用對於氣候變遷的衝擊以及資源耗用的衝擊。

IMPACT 2002+衝擊評估方法自 Jolliet et al. (2003)於 2003 年提出後，仍不斷進行更新及維護，主要更新的內容為特徵因子(characterization factor)以及標準化因子(normalization factor)數值的修正，而 IMPACT 2002+所有的特徵因子皆根據ecoinvent 資料庫既有的物質清單來建置，並且歷經從最初於 2003 年 9 月發布的 1.0 版特徵因子到 2011 年 12 月發布的 2.1.3 版特徵因子，IMPACT 2002+所考慮計算的物質已經愈趨完整，IMPACT 2002+每次的更新同時會將新的特徵因子表以 Excel 檔案格式發布到官方網站(<http://www.impactmodeling.org>)並提供更新內容說明文件(patch note)告知使用者主要更新的項目和係數。

目前 IMPACT 2002+的更新工作主要由 Quantis 公司負責，最新版本為 2012 年 11 月發布的 Q2.2.1 更新，更新內容不只是特徵因子的修正，更針對 IMPACT 2002+的衝擊評估架構進行修正，如圖 3- 1 所示，除了補充原本衝擊評估架構中缺少的水體酸化(aquatic acidification)及水體優養化(aquatic eutrophication)對生態系統的損害計算之外，更增加耗用水量(water consumption)及取用水量(water withdrawal)等衝擊類別來評估水資源衝擊，顯示出 IMPACT 2002+的研究團隊正積極加入水資源相關衝擊，但仍然尚未考慮土地資源可能產生的其他面向衝擊。另外，Q2.2.1 版還新增土地佔用類別部分的特徵因子，如表 3- 1 所列。

表 3- 1 IMPACT 2002+土地佔用特徵因子更新對照表

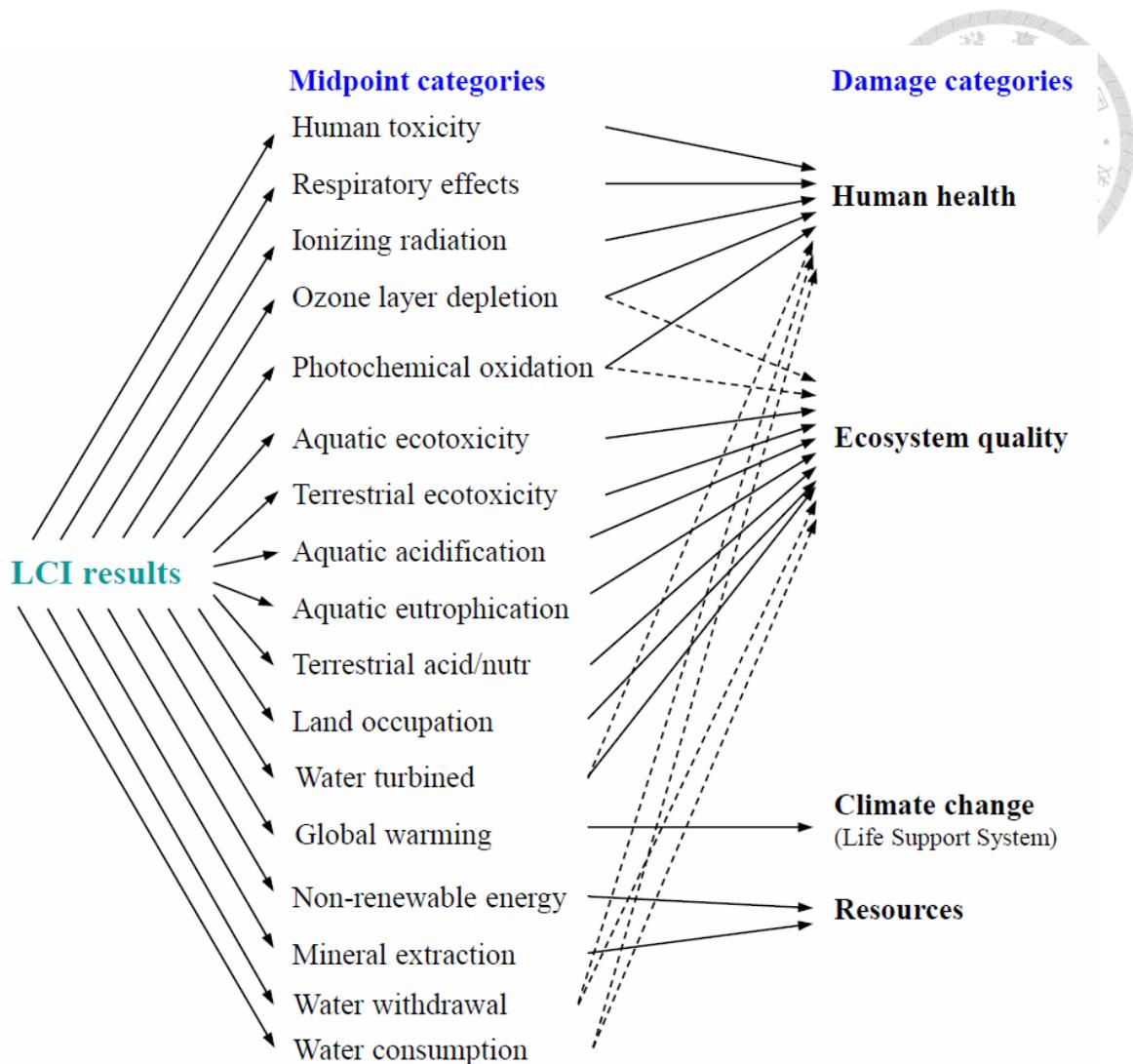
類別	盤查項目	2.1.3 版		Q2.2.1 版	
		特徵因子	損害因子	特徵因子	損害因子
Land-use	Biodiversity loss due to deforestation, 100 years horizon	n/a	n/a	45.87	50.00
Land-use	Land use II-III	0.47	0.51	0.47	0.51
Land-use	Land use II-IV	0.88	0.96	0.88	0.96

資料來源：Humbert et al. (2011)及 Humbert et al. (2012)

表 3- 1 IMPACT 2002+土地佔用特徵因子更新對照表(續)

類別	盤查項目	2.1.3 版		Q2.2.1 版	
		特徵因子	損害因子	特徵因子	損害因子
Land-use	Land use III-IV	0.88	0.96	0.88	0.96
Land-use	Land use IV-IV	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, arable	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, arable, integrated	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, arable, non-irrigated	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, arable, non-irrigated, diverse-intensive	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, arable, organic	1.00	1.09	1.00	1.09
Land-use	Occupation, forest	0.10	0.11	0.10	0.11
Land-use	Occupation, forest, intensive	0.10	0.11	0.10	0.11
Land-use	Occupation, forest, intensive, normal	0.10	0.11	0.10	0.11
Land-use	Occupation, forest, intensive, short-cycle	n/a	n/a	0.10	0.11
Land-use	Occupation, industrial area	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, industrial area, benthos	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, industrial area, built up	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, industrial area, vegetation	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, pasture and meadow, extensive	0.94	1.02	0.94	1.02
Land-use	Occupation, pasture and meadow, intensive	1.04	1.13	1.04	1.13
Land-use	Occupation, pasture and meadow, organic	0.94	1.02	0.94	1.02
Land-use	Occupation, permanent crop, fruit, intensive	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, permanent crops	n/a	n/a	1.06	1.15
Land-use	Occupation, permanent crops, irrigated	n/a	n/a	1.06	1.15
Land-use	Occupation, traffic area	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, traffic area, rail embankment	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, traffic area, rail network	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, traffic area, road embankment	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, traffic area, road network	0.77	0.84	0.77	0.84
Land-use	Occupation, urban, continuously built	1.06	1.15	1.06	1.15
Land-use	Occupation, urban, discontinuously built	0.88	0.96	0.88	0.96
Land-use	Occupation, urban, green areas	0.77	0.84	0.77	0.84

資料來源：Humbert et al. (2011)及 Humbert et al. (2012)



資料來源：Humbert et al. (2012)

圖 3-1 Quantis 修正之 IMPACT 2002+衝擊評估架構圖

3.2 土地利用衝擊特徵化模式

本研究加入土地利用的其他環境面向之衝擊到 IMPACT 2002+衝擊評估方法，而建立量化這些環境衝擊的特徵化模式是土地利用生命週期衝擊評估工具開發的重點工作。本研究針對資源耗用及氣候變遷衝擊建立的特徵化模式主要參考政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)於 2006 年發布的國家溫室氣體清冊指南第四冊之農業、林業與其他土地利用(IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, 簡稱 AFOLU 手冊)，提供計算不同土地利用類型的生物質及碳儲存量(carbon stock, 或稱碳匯)，並且依據資料尺度設定三種不同層級的方法學(IPCC, 2006)：

- 
- (1) 層級一(tier 1)：層級一方法學採用的計算模式及活動數據(activity data)較為通用，係根據大範圍的區域性統計資料所選定的典型值(typical value)，資料尺度以氣候分區以及生態系統分區為單位，如熱帶、溫帶、寒帶以及雨林、草原、高山等。
 - (2) 層級二(tier 2)：層級二方法學仍與層級一方法學同樣採用通用性計算模式，但活動數據則是以國家特性(country-specific)的資料來取代，因此計算結果更為細緻並且更具代表性。
 - (3) 層級三(tier 3)：層級三方法學採用更為進階模式及調查數據，目的在於計算特定時間或特定條件限制下的碳儲存量，資料尺度也以小型系統為主，而實際應用時，往往會連結其他複雜的計算模組來模擬特定狀況取得需要的參數值，並以地理資訊系統(Geographic Information System, GIS)為平台來展示。

本研究建立之衝擊特徵化模式主要是參考層級一方法學，計算模式的活動數據係以臺灣所處的地理及氣候分區為主要的參考空間，資源耗用及氣候變遷衝擊特徵化模式說明如下。

3.2.1 資源耗用衝擊特徵化模式

土地利用造成的資源耗用衝擊是因地表淨初級生產量產生變化，即存在於土地的植物生物質之變化，這些因土地利用所損失的淨初級生產量，本身亦存在從太陽能量所吸收並儲存的生物能，因此土地利用行為會耗用原先存在於土地上可用之生物能，使得可用資源減少。IPCC (2006)的植物生物質計算式，如式(18)所示，並依照植物的能量產率將損失淨初級生產量轉換為可用能量之損失來表示，如式(19)所示。

$$G_{total} = \sum [G_{above} \times (1 + R)] \quad (18)$$

$$E_{total} = G_{total} \times H_{biomass} \quad (19)$$

其中， G_{total} ：地上部及地下部之植物生物質年增長率，單位為 ton-dry matter/ha/yr；

G_{above} ：地上部的植物生物質年增長率，單位為 ton-dry matter/ha/yr；

R ：地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 ton-below/ton-above；

$H_{biomass}$ ：植物能量產率，典型值為 18.5 MJ/kg-dry matter (Haberl et al., 2007)；

E_{total} ：總淨初級生產量，單位為 GJ/ha/yr。

本研究發展之資源耗用衝擊特徵化模式遵循 SETAC 建議之架構，分別從土地佔用及土地變化兩面向量化土地利用造成的資源耗用衝擊，並以 IPCC (2006)的計算模式為基礎來建立特徵化模式。土地佔用的資源耗用衝擊係由於被佔用的土地之植物生物質年增長率與土地參考狀態產生差異，於佔用時間內可用的生物性資源量持續變化，因此為持續性地耗用資源，而土地佔用的參考狀態為土地的自然狀態(natural status)(Goedkoop and Spriensma, 2000)，土地佔用之資源耗用衝擊計算如式(20)所示。

$$RE_{LCC,occupation} = \left[\sum_i (E_{total,natural} - E_{total,i}) \right] \times A \times t \quad (20)$$

其中， $RE_{LCC,occupation}$ ：土地佔用之資源耗用衝擊，單位為 MJ；

$E_{total,natural}$ ：天然狀態的淨初級生產量，單位為 MJ/m²/yr；

$E_{total,i}$ ：第*i*種土地利用型態的淨初級生產量，單位為 MJ/m²/yr；

A ：土地佔用面積，單位為 m²；

t ：土地佔用時間，單位為 yr。

土地變化衝擊是由於土地利用型態變化前後的土地品質之差異(Guinée et al., 2001)，而土地品質依據其功能而定義，針對資源耗用衝擊，本研究定義土地品質為土地經常性存在的植物生物質，土地變化的資源耗用衝擊計算方法及係數同樣參考 IPCC (2006)，並依據植物的能量產率轉換為可用能量表示，如式(21)、(22)與(23)所示。土地佔用及土地變化分別的資源耗用衝擊之總和，即為由土地利用行為造成的總資源耗用衝擊，如式(24)所示。

$$W_{total} = \sum [W_{above} \times (1 + R)] \quad (21)$$

$$B_{total} = W_{total} \times H_{biomass} \quad (22)$$

$$RE_{LCC,transformation} = \left[\sum (B_{total,before} - B_{total,after}) \right] \times A \quad (23)$$

$$RE_{LCC} = RE_{LCC,occupation} + RE_{LCC,transformation} \quad (24)$$

其中， W_{total} ：地上部及地下部之經常性存在植物生物質，單位為 ton-dry matter/ha；

W_{above} ：地上部的經常性存在植物生物質，單位為 ton-dry matter/ha；

R ：地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 ton-below/ton-above；

B_{total} ：總經常性存在植物生物能，單位為 GJ/ha；

$H_{biomass}$ ：植物能量產率，典型值為 18.5 MJ/kg-dry matter；

$RE_{LCC,transformation}$ ：土地變化之資源耗用衝擊，單位為 MJ；

$B_{total,before}$ ：土地變化前的總經常性存在植物生物能，單位為 MJ/m²；

$B_{total,after}$ ：土地變化後的總經常性存在植物生物能，單位為 MJ/m²；

A ：土地變化面積，單位為 m²；

RE_{LCC} ：總資源耗用衝擊，單位為 MJ；

$RE_{LCC,occupation}$ ：土地佔用之資源耗用衝擊，單位為 MJ。



3.2.2 氣候變遷衝擊特徵化模式

土地利用造成的氣候變遷衝擊是因生長於土地的植物碳儲存量以及溫室氣體背景排放量產生變化，由於溫室氣體背景排放量會受到土地上的活動行為的影響，進而決定其排放量，以農業活動為例，種植不同作物以及施用的肥料種類和數量等因素都直接決定土地的溫室氣體排放量，因此土地的溫室氣體排放量通常會在產品的生命週期盤查清單從土地項目中被獨立出來。為避免於衝擊評估中與既有的全球暖化衝擊特徵化模式重複計算，本研究定義的土地利用氣候變遷衝擊排除土地溫室氣體排放計算，完全以土地的植物碳儲存量變化代表。IPCC (2006) 的植物碳儲存量計算式，如式(25)及(26)所示

$$G_{total} = \sum [G_{above} \times (1 + R)] \quad (25)$$

$$C_{stock} = G_{total} \times F_{carbon} \quad (26)$$

其中， G_{total} ：地上部及地下部之植物生物質年增長率，單位為 ton-dry matter/ha/yr；

G_{above} ：地上部的植物生物質年增長率，單位為 ton-dry matter/ha/yr；

R ：地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 ton-below/ton-above；

C_{stock} ：總碳儲存量，單位為 ton-C/ha/yr；

F_{carbon} ：碳素含量(carbon fraction)，典型值為 0.47 ton-C/ton-dry matter (IPCC, 2006)。

本研究發展的氣候變遷衝擊特徵化模式同樣遵循 SETAC 建議之架構，分為土地佔用及土地變化兩種面向之衝擊，土地佔用衝擊係肇因於被佔用的土地每年之碳儲存量與土地參考狀態產生差異，於佔用時間內可被植物固定的二氧化碳量持續變化，因此出現持續性的溫室氣體排放，而土地佔用氣候變遷衝擊的參考狀態亦定義為土地的天然狀態。針對氣候變遷衝擊，土地變化的衝擊則定義為土地利用型態變化前後的經常性植物碳儲存量之差異，然而，一般認為植物透過光合作用將大氣中的二氧化碳轉化成生物質，生物質在植物死亡後會再以二氧化碳的形

式回歸大氣中，此過程稱為碳中和(carbon neutrality)，生物質亦被認為是碳中性(carbon neutral)之材料，而土地利用變遷而減少的植物碳儲存量是由於原先存在的植物生物質被移除，無論這些被移除的生物質之宿命為何，根據碳中和法則，生物質的溫室氣體排放量在計算上應被扣除或是視其排放量值為零(Johnson, 2009)，因此本研究的土地變化氣候變遷衝擊皆以零計之。本研究建立之氣候變遷衝擊特徵化模式以 IPCC (2006)的計算模式為基礎，直接土地利用變遷排放的衝擊特徵化模式，如式(27)、(28)和(29)所示。

$$CC_{dLUC,occupation} = \left[\sum_i (C_{stock,natural} - C_{stock,i}) + (F_{emi,i} - F_{emi,natural}) \right] \times F_{CO_2} \times A \times t \quad (27)$$

$$CC_{dLUC,transformation} = 0 \quad (28)$$

$$CC_{dLUC} = CC_{dLUC,occupation} + CC_{dLUC,transformation} \quad (29)$$

其中， $CC_{dLUC,occupation}$ ：土地佔用之直接土地利用變遷排放量，單位為 kg CO_{2eq}；

$C_{stock,natural}$ ：天然狀態的碳儲存量，單位為 ton-C/ha/yr；

$C_{stock,i}$ ：第*i*種土地利用型態的碳儲存量，單位為 ton-C/ha/yr；

$F_{emi,i}$ ：第*i*種土地利用型態的土壤有機碳流失率，單位為 ton-C/ha/yr；

$F_{emi,natural}$ ：天然狀態的土壤有機碳流失率，單位為 ton-C/ha/yr；

F_{CO_2} ：二氧化碳當量因子，為44 g-CO₂/12 g-C；

A ：土地佔用面積，單位為 m²；

t ：土地佔用時間，單位為 yr；

$CC_{dLUC,transformation}$ ：土地變化之直接土地利用變遷排放量，單位為 kg CO_{2eq}；

CC_{dLUC} ：總直接土地利用變遷衝擊，單位為 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}$ ；

間接土地利用變遷排放是因為生質作物會與糧食作物相互爭地，使得有額外的土地被以耕地的形式佔用，額外土地佔用的氣候變遷衝擊如同直接土地利用變遷排放的結果，而間接土地利用變遷排放的估算上最困難之處在於預測額外佔用的耕地面積，目前最常被應用來推估額外增加的耕地面積之方法是利用全球性農業經濟模型，但由於本研究發展之土地利用衝擊評估方法會一步建置於生命週期評估軟體中，而實際在軟體的運算程序係以特徵因子為計算依據，如果使用全球性農業經濟模型預測的額外佔用耕地面積，進而計算特徵因子及間接土地利用變遷排放量，將會因每次評估不同的盤查清單而必須重新預測並產生新的特徵因子，但在軟體中並無法建置變動的特徵因子。因此本研究簡化預測額外佔用耕地面積的計算過程，以稻米代表糧食作物，並根據臺灣稻米產率和世界其他稻米生產國家之平均產率建立線性關係的預測因子，推估額外佔用之耕地面積，間接土地利用變遷排放衝擊特徵化模式，如式(30)、(31)與(32)所示。

$$CC_{iLUC,occupation} = \left[\sum_i (C_{stock,natural} - C_{stock,arable}) + (F_{emi,arable} - F_{emi,natural}) \right] \times F_{yield} \times F_{CO_2} \times A_{arable} \times t \quad (30)$$

$$CC_{iLUC,transformation} = 0 \quad (31)$$

$$CC_{iLUC} = CC_{iLUC,occupation} + CC_{iLUC,transformation} \quad (32)$$

其中， $CC_{iLUC,occupation}$ ：土地佔用之間接土地利用變遷排放量，單位為 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}$ ；

$C_{stock,natural}$ ：天然狀態的碳儲存量，單位為 ton-C/ha/yr ；

$C_{stock,arable}$ ：耕地的碳儲存量，單位為 ton-C/ha/yr ；

$F_{emi,arable}$ ：耕地的土壤有機碳流失率，單位為 ton-C/ha/yr ；

$F_{emi,natural}$ ：天然狀態的土壤有機碳流失率，單位為 ton-C/ha/yr ；



F_{yield} ：稻米產率因子，單位為 ha-other cropland/ha-taiwan cropland；

F_{CO_2} ：二氧化碳當量因子，為44 g-CO₂/12 g-C；

A_{arable} ：耕地佔用面積，單位為 m²；

t ：土地佔用時間，單位為 yr；

$CC_{iLUC,transformation}$ ：土地變化之間接土地利用變遷排放量，單位為 kg CO_{2eq}；

CC_{iLUC} ：總間接土地利用變遷衝擊，單位為 kg CO_{2eq}；

3.2.3 生命週期評估軟體

本研究在修改建立以 IMPACT 2002+ 為基礎的衝擊評估方法後，進一步建置於生命週期評估軟體中，並且選定 SimaPro 軟體為建置的對象，建置完成之模組可以提供本研究的案例分析進行衝擊評估之用。

SimaPro 軟體是由荷蘭 Leiden 大學於 1990 年開發出來，為國際上生命週期評估的領域中使用相當普遍的軟體，SimaPro 除了包含 ecoinvent 生命週期盤查資料庫外，同時也提供數種常見的生命週期衝擊評估方法分析環境衝擊，並可對多種複雜製程的產品進行分析與比較彼此對於環境所產生的衝擊大小，並且內建蒙地卡羅分析來計算盤查資料與環境衝擊的不確定性。此外，SimaPro 軟體還可將產品中的製程或元件之間的鏈結關係以樹狀結構展示，透過樹狀圖可以清楚表現物質及能量的流動情形以及各個製程的環境負荷，現今 SimaPro 軟體已發展至 SimaPro 8 的版本，而本研究使用的軟體版本為 7.3.0 版，軟體操作的範例畫面如圖 3- 2 所示。

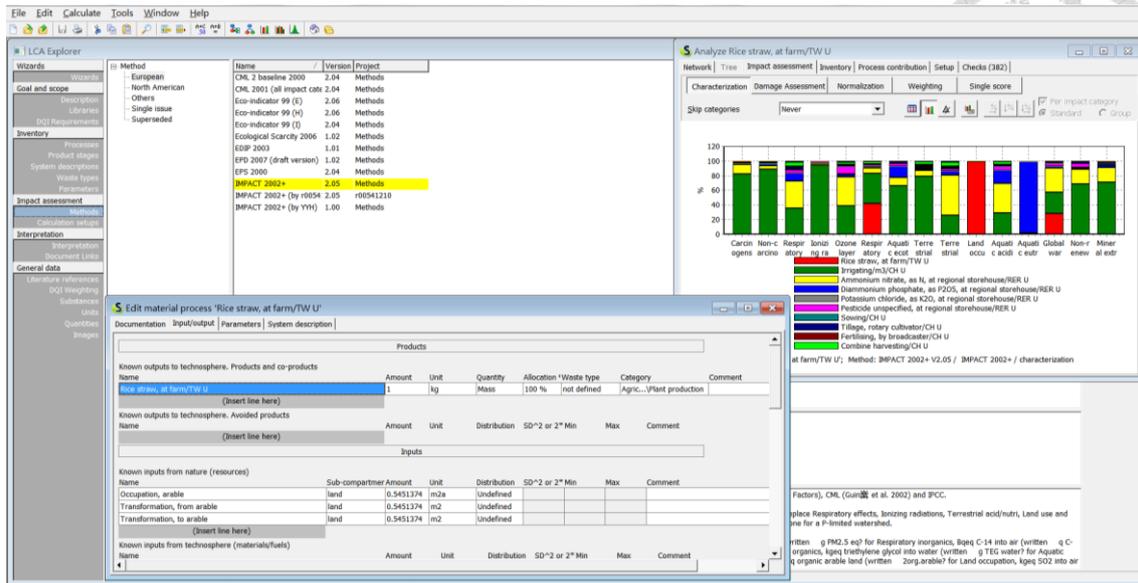


圖 3- 2 SimPro 軟體操作範例畫面

3.3 研究案例

生質燃料由於其原料為生質物，而往往佔用大量的土地以產生足夠的生質物原料滿足製造生質燃料的需求。目前國際上普遍將生質燃料區分為第一代、第二代與第三代生質燃料，可以依據技術成熟度或是使用的料源(feedstock)進行分類(IEA, 2011)，常見的分類方式是以料源來區分，第一代生質燃料係以富含澱粉、醣類或油脂的農作物進行加工提煉，如甘蔗、甜菜、大豆與甘薯等，而第一代生質燃料最主要問題是存在與糧食作物爭地之疑慮，由於現今世界上仍有部分國家面臨糧食短缺的窘境，而發達國家卻將糧食作物的耕地轉而種植生質燃料的料源的作法更招致國際人權團體的批評，除了社會層面的爭議外，Searchinger et al. (2008) 及 Fargione et al. (2008) 的研究都發現以第一代生質燃料取代化石燃料的使用，可能會使整體溫室氣體排放量大幅增加，而不是原先預期會降低的結果，主要原因是由於與糧食作物爭地導致額外的天然地被改為種植糧食作物而產生間接的溫室氣體排放，國際能源總署(International Energy Agency, IEA)於 2010 年出版的報告也明確指出間接土地利用造成的排放普遍存在於生質燃料中(IEA-Bioenergy, 2010)，而眾多關於第一代生質燃料的爭議也促使其進一步轉型；為改良第一代生質燃料的缺點，第二代生質燃料改以非食品作物(non-food biomass)為料源，主要是有機性殘餘物如稻稈、木材與廚餘等，料源可直接從目前的農林活動中取得，因此不需要佔用額外的土地來種植任何作物生產料源(IEA-Bioenergy, 2008; IEA, 2010; Sims

et al., 2010), 但第二代生質燃料目前最大的問題在於技術以及產量, 有機性殘餘物的產生有賴於其原始作物, 如稻稈的產生量會受限於稻米產量, 因此第二代生質燃料的料源產量存在上限, 無法完全被人為所控制; 為補足第二代生質燃料的不足, 第三代生質燃料則以微藻等水生植物為料源(Ahmad et al., 2011), 期望透過藻類的大量繁殖以產生足以滿足當代能源需求的生質燃料。

本研究以第一代及第二代生質燃料為案例進行生命週期評估, 並分別使用 IMPACT 2002+ 以及本研究修改建立之方法進行案例的環境衝擊評估並且比較討論之, 目的在於瞭解生質燃料的土地競爭對環境所產生的影響程度及層面。

第一個案例為甘蔗產製酒精汽油(gasohol)進行生命週期評估, 生命週期盤查主要參考陳(2008)以及 Jungbluth et al. (2007), 由於生質燃料的生命週期中的料源種植階段會佔用大量土地, 為反映作物於本土種植的真實情況, 因此以陳(2008)的研究結果建立臺灣甘蔗種植盤查清單, 而 Jungbluth et al. (2007)則是提供甘蔗產製 99.7% 無水酒精的所有處理程序之盤查清單, 產製之生質酒精可直接使用或再進一步混合生質酒精與車用汽油成為酒精汽油; 案例二則為稻稈產製生質炭進行生命週期評估, 生命週期盤查主要參考潘(2008)及許(2011), 由於稻稈為稻作種植的副產品, 建立稻稈產生階段的盤查清單必須從稻作種植開始盤查, 因此臺灣稻米種植的盤查清單係依據潘(2008)的研究結果, 焙燒產製生質炭的製程盤查清單則是根據許(2011)的製程模擬資料。

由於使用生質燃料的目的是為了因應氣候變遷與化石燃料匱乏的挑戰所尋求的替代方案, 因此評估生質燃料的效益必須和現行的能源選項進行比較, 以本研究的案例而言, 酒精汽油的應用主要是為取代傳統車用汽油, 生質炭則主要用來取代部分煤炭進行發電(許, 2011)。根據經濟部能源局發布之民國 100 年能源平衡表的統計數據顯示, 國內供應之車用汽油絕大多數都是以自行生產為主, 車用汽油進口之比例非常低, 如表 3- 2 所列, 而國內發電用之燃料煤供應則呈現與車用汽油供應完全相反的狀況是完全依賴進口, 如表 3- 3 所列。為使評估對象更符合真實狀況, 本研究以產製車用汽油作為酒精汽油案例的化石燃料參考系統, 以進口燃煤作為生質炭案例的參考系統, 以下茲就案例的範疇及盤查分析進行說明。

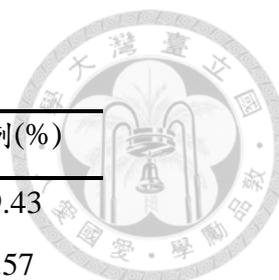


表 3- 2 2011 年國內車用汽油供應情形

來源	供給量(kL)	比例(%)
自行生產	13,272,035	99.43
進口	76,496	0.57

資料來源：經濟部能源局(2011)

表 3- 3 2011 年國內燃料煤供應情形

來源	供給量(ton)	比例(%)
自行生產	0	0.00
進口	47,232,638	100.00

資料來源：經濟部能源局(2011)

3.3.1 範疇界定

本研究評估的兩個生質燃料案例及其對應的參考系統之生命週期評估範疇係從搖籃到大門(cradle to gate)，生質燃料及化石燃料生產後的配送和使用等階段皆不在系統邊界之內，具體的評估範疇分別說明如下。

1. 酒精汽油及車用汽油

酒精汽油的系統邊界包含甘蔗種植、甘蔗運輸與酒精汽油生產等階段，如圖 3- 3 所示，甘蔗種植階段考慮包括甘蔗的碳平衡(carbon balance)及能量平衡(energy balance)，還有整地翻土、播種、灌溉、施肥、病蟲害控制及除草與收穫等農業行為的直接投入資料，如用水量、種植面積、肥料用量、農藥用量與農業機具操作量等，以及直接排放資料，如甲烷、氧化亞氮、營養鹽與農藥等，在此階段甘蔗收割後會被存放於農場；甘蔗運輸階段是甘蔗從農場運至酒精汽油工廠的過程；酒精汽油生產階段則包含甘蔗經發酵產生 95 % 無水酒精，再經蒸餾純化為 99.7 % 無水酒精，並混合車用汽油產生酒精汽油的過程。

車用汽油的系統邊界包含產地原油開採、原油運輸與汽油精煉等階段，如圖 3- 3 所示，其中原油運輸階段是原油從產地經海運運輸至我國的港口，再從港口透過輸油管線送至煉油廠的過程，汽油精煉階段則是原油經分餾、裂解等產製車用汽油過程。

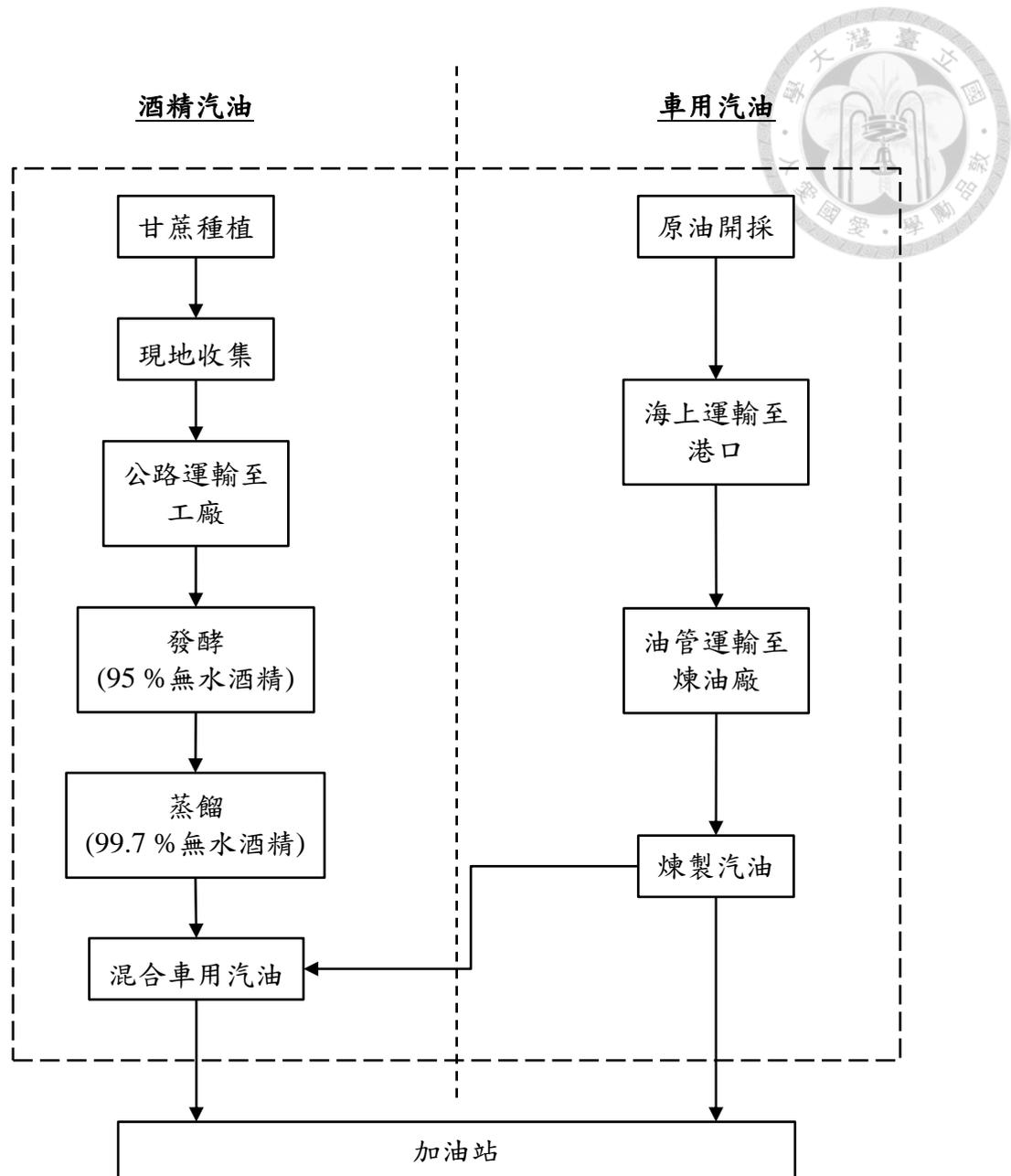


圖 3-3 酒精汽油及車用汽油之系統邊界

2. 生質炭及燃煤

生質炭的系統邊界包含稻稈生產、稻稈運輸與生質炭焙燒等階段，如圖 3-4 所示，稻稈是稻米種植的副產品，因此稻作種植的所有投入產出數據應分別分配到主產品稻穀及副產品稻稈，而稻稈在部分研究中被視為殘餘物(residue)所以不考慮稻稈生產的投入產出(Cherubini and Ulgiati, 2010)，但也有部分研究認為稻稈具有經濟價值，市場上亦存在收購價格，所以依照稻穀與稻稈的經濟價值之比例分配(許，2011)，本研究參考許(2011)以經濟價值之比例分配稻作的投入產出數據，稻

作盤查數據的 96.7 % 分配到稻穀，而剩餘的 3.3 % 則分配給稻稈。稻稈生產階段如同甘蔗種植考慮包括稻作的碳平衡、能量平衡以及整地翻土、播種、灌溉、施肥、病蟲害控制及除草與收穫等農業行為的直接投入和排放資料；由於稻穀收穫時稻稈會被收割機棄置於田間，稻稈運輸階段包括田間稻稈的收集打包並從農地運至生質炭工廠的過程；生質炭焙燒階段則包含乾燥、焙燒、冷卻及造粒產製生質炭的過程。

燃煤的系統邊界包含產地煤礦開採及煤礦運輸兩階段，如圖 3- 4 所示，其中煤礦運輸階段是煤礦從產地經海運運輸至我國的港口的過程。

本研究選用產製單位熱值的能源產品為功能單位，熱值單位為百萬焦耳 (MJ)，以評估不同能源產品在提供相同能量的情況下的環境影響。

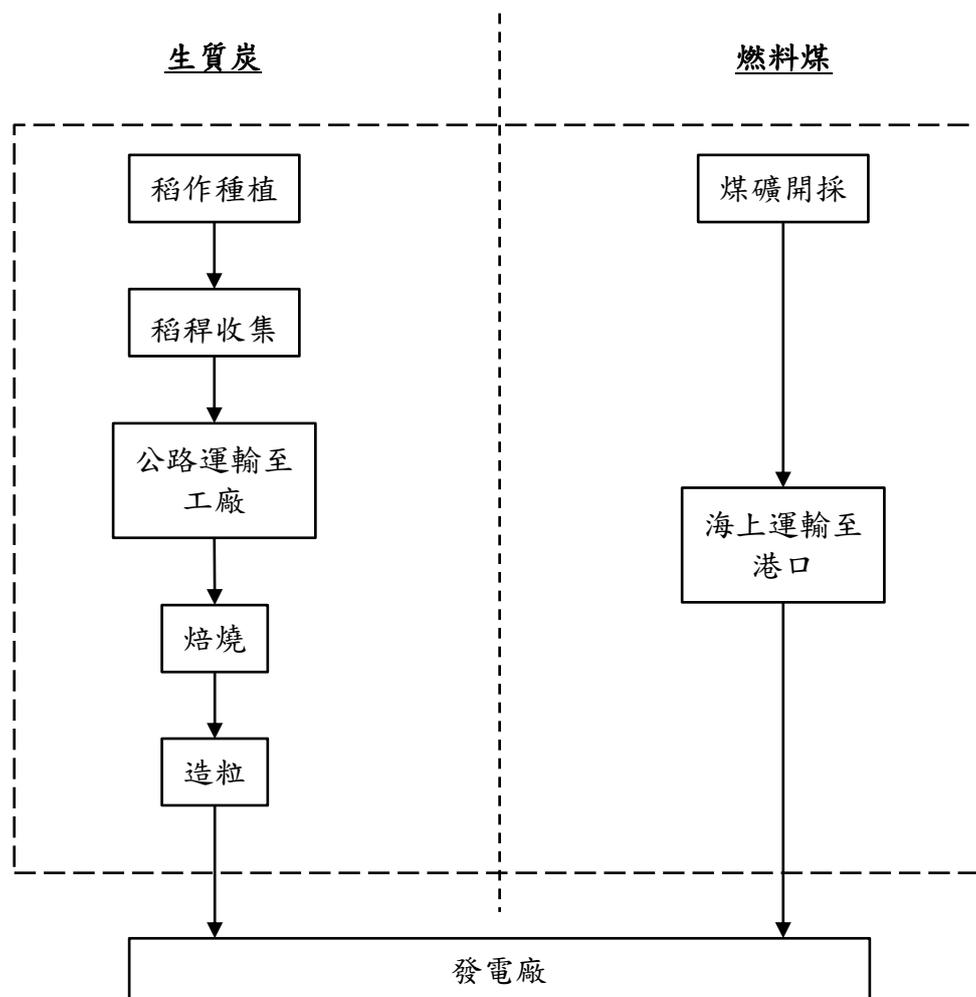


圖 3- 4 生質炭及燃煤之系統邊界



3.3.2 盤查分析

能源產品在整個生命週期所投入的資源、物料、設備以及排放物質相當複雜且資料取得亦不容易，本研究蒐集國內外文獻以及 Ecoinvent 2.0 資料庫提供的相關盤查數據來建立各個能源產品的盤查清單。由於很難從單一研究中取得完整的盤查數據，本研究盤查數據的引用，基本上以國內研究資料為優先，不足處再從 Ecoinvent 資料庫及國外文獻補正，並且針對國內實際情況進行適度調整，各個能源產品的盤查清單說明如后。

1. 酒精汽油

(1) 甘蔗種植階段

本階段主要盤查的投入項目包含二氧化碳、太陽能量、土地等天然資源，灌溉用水、肥料、農藥、農業機具等物料。二氧化碳及太陽能量的投入數據係根據碳平衡和能量平衡的計算結果，碳平衡是計算甘蔗從大氣中吸收固定的二氧化碳量，而能量平衡則是計算其從太陽能量中利用轉化的生質能量，甘蔗吸收的二氧化碳量及生質能量如表 3-4 所列；土地投入量的盤查必須建立甘蔗產量與土地的關係，甘蔗的生長期一般為 18 個月，每年一到三月是甘蔗的春植期，七到八月則是甘蔗的秋植期，實際種植時，農民通常會混合宿根(ratoon)栽培的方式，宿根栽培是指甘蔗採收時不連根拔起，而是在接近地表的莖部切割採收，留下基部讓節上的芽發芽生長成另一種甘蔗。由於本身已有完整根系因此只要 12 個月便可採收，利用生長期長短的搭配，使甘蔗生產維持為一年一期作，所以在土地的佔用時間及產量均是以一年為基準，而本研究甘蔗產量資料係參考陳(2008)的訪談紀錄，訪談對象為台糖公司某甘蔗農場，該農場的甘蔗種植方式有秋植及宿根兩種，其生產概況如表 3-5 所列。

表 3-4 甘蔗之碳平衡及能量平衡

作物	吸收二氧化碳量(kg/kg-sugar cane)	生質能量(MJ/kg-sugar cane)
甘蔗	0.45	4.95

資料來源：Jungbluth et al. (2007)

表 3-5 某甘蔗農場之甘蔗生產概況

種植方式	產量(ton)	種植面積(ha)	產率(kg/ha)
秋植	11,160	124	-
宿根	9,982	161	-
總計	21,142	285	74,182.46

資料來源：陳(2008)

甘蔗灌溉用水量則是根據經濟部水利署(2010)提供國內農田水利會統計的農業用水資料，如表 3-6 所列。

肥料及農藥施用量因農委會並未針對特定作物進行統計，故本研究參考陳(2008)的訪談紀錄，甘蔗農場使用的肥料有硫酸銨及台肥 2 號，其中台肥 2 號為複合肥料，本研究則根據台灣肥料公司(2012)提供的肥料產品成分資訊將複合肥料換算成單質肥料，單質肥料以硫酸銨、過磷酸鈣與氯化鉀分別代表氮肥、磷肥與鉀肥，肥料成分如表 3-7 所列，甘蔗農場肥料投入量則如表 3-8 所列；而根據訪談紀錄，甘蔗農場施用的農藥種類眾多，但 Ecoinvent 資料庫中僅有部分農藥可以選用，本研究只能將可以被選用農藥納入盤查清單中，因此盤查的農藥有 2,4-D、年年春(roundup)、亞脫淨(atrazine，或稱草脫淨)、亞美脫淨(ametryn，或稱草殺淨)，其中年年春的主要成分為嘉磷塞(glyphosate)，亞美脫淨的主要成分為三嗪(triazine)，並以主要成分代表之，甘蔗農場的農藥投入量如表 3-9 所列。

甘蔗種植除了物料的投入外，也需要利用農業機具來進行整地、栽種、施肥與收割等田間工作，因此農業機具的投入是必須被考慮在種植階段的盤查清單中。陳(2008)的訪談中，記錄有關於甘蔗農場實際會執行的田間工作，而實際建立盤查清單於生命週期軟體時，還需要選定生命週期盤查資料庫中對應的盤查項目，田間工作及對應盤查項目如表 3-10 所列。另外，本研究假設每次的田間工作均是以農場甘蔗的總種植面積為單位，以訪談的農場為例，其甘蔗總種植面積為 285 公頃，而種植期間會施肥 2 次，所以總施肥面積為 570 公頃。

表 3-6 國內甘蔗用水情形

項目	灌溉用水量(m ³)	灌溉面積(ha)	灌溉用水率(m ³ /ha)
甘蔗	14,507,000	6,988	2,075.91

資料來源：經濟部水利署(2010)

表 3-7 常用肥料之成分

項目	氮(as N, %)	磷酐(as P ₂ O ₅ , %)	氧化鉀(as K ₂ O, %)
單質肥料			
硫酸銨	21	0	0
過磷酸鈣	0	18	0
氯化鉀	0	0	60
複合肥料			
台肥 2 號	11	9	18
台肥 5 號	16	8	12
台肥 39 號	12	18	12
台肥 42 號	23	5	5
台肥 43 號	15	15	15

資料來源：台灣肥料公司(2012)

表 3-8 某甘蔗農場之肥料施用量

項目	肥料施用量(kg/ha)
硫酸銨	80.00
台肥 2 號	
硫酸銨	20.95
過磷酸鈣	20.00
氯化鉀	12.00

資料來源：陳(2008)；本研究整理

表 3-9 某甘蔗農場之農藥施用量

項目	農藥施用量(kg/ha)
2,4-D	1.75
嘉磷塞	4.56
亞脫淨	3.00
三嗪	2.00

資料來源：陳(2008)；本研究整理

表 3-10 某甘蔗農場之田間工作

田間工作	對應盤查項目	數量(次)
深耕	Tillage, cultivating, chiselling	1
耙地	Tillage, harrowing, by spring tine harrow	2
栽種	Planting	1
中耕	Tillage, rolling	2~3
入土	Mulching	1~2
培土	Tillage, hoeing and earthing-up, potatoes	3~4
施肥	Fertilising, by broadcaster	2
噴灑農藥	Application of plant protection products, by field sprayer	2
收割	Harvesting, by complete harvester, beets	1

資料來源：陳(2008)；本研究整理

種植的過程中會因生化作用而排放甲烷氣體以及使用肥料而產生的含氮、磷之化合物排放到空氣、地表水與地下水中，這部分的排放參數本研究參考 Jungbluth et al. (2007)彙整的甘蔗種植排放因子並依據 Nemecek and Kägi (2007)提供的營養鹽排放因子計算方法以甘蔗農場實際投入的肥料量修正，另外，由於農藥無法被植物所吸收，被噴灑到農地上的農藥會經由雨水進入土壤環境中，本研究假設進入土壤的農藥量與噴灑的農藥量相同，即過程無產生損失，甘蔗種植的排放因子如表 3-11 所列。

表 3- 11 甘蔗種植階段之排放因子

項目	單位	排放因子
排放到空氣		
氨(ammonia)	kg/kg-sugar cane	2.29E-05
氧化亞氮(dinitrogen monoxide)	kg/kg-sugar cane	3.75E-06
氮氧化物(nitrogen oxides)	kg/kg-sugar cane	7.88E-07
甲烷(methane)	kg/kg-sugar cane	2.86E-04
一氧化碳(carbon monoxide)	kg/kg-sugar cane	0.03
懸浮顆粒(particulates > 10 μm)	kg/kg-sugar cane	3.00E-03
排放到地表水		
磷酸鹽(phosphorus)	kg/kg-sugar cane	2.40E-06
排放到地下水		
磷酸鹽(phosphorus)	kg/kg-sugar cane	9.44E-07
硝酸鹽(nitrate)	kg/kg-sugar cane	7.14E-06
排放到土壤		
2,4-D	kg/ha	1.75
嘉磷塞(glyphosate)	kg/ha	4.56
亞脫淨(atrazine)	kg/ha	3.00
三嗪(triazine)	kg/ha	2.00

資料來源：Jungbluth et al. (2007); Nemecek and Kägi (2007)

(2) 甘蔗運輸階段

運輸階段假設甘蔗採收後直接運送至酒精汽油工廠，不經任何中間儲存地點，而工廠與甘蔗農場的道路距離為 15 公里，運輸方式為公路運輸。

(3) 酒精汽油生產階段

酒精汽油的生產可分為發酵、蒸餾與混合車用汽油共三個程序，發酵和蒸餾程序的投入產出係參考Ecoinvent 資料庫內建項目以及 Jungbluth et al. (2007)提供的數據，發酵程序的產率為投入約 14.898 公斤的甘蔗可產生 1 公斤的 95 %無水酒精，需要投入的物料包含水、硫酸、潤滑油、

石灰與發酵單元，並且會造成二氧化碳排放，而用電量已經包含在發酵單元中，發酵程序的投入產出資料如表 3- 12 所列；Jungbluth et al. (2007) 提供的蒸餾程序投入產出資料相當簡要，投入 1 公噸的 95 % 無水酒精及 0.08 度的市電可產生 1 公斤的 99.7 % 無水酒精並排放 0.3 百萬焦耳的廢熱，而 99.7 % 無水酒精即為生質酒精。

表 3- 12 發酵程序之投入產出清單

項目	單位	數量
投入		
水	kg/kg- sugar cane	1.04
硫酸	kg/kg- sugar cane	7.24E-04
潤滑劑	kg/kg- sugar cane	1.34E-05
石灰	kg/kg- sugar cane	9.32E-04
發酵單元	p/kg- sugar cane	4.44E-11
排放到空氣		
二氧化碳	kg/kg- sugar cane	3.15E-01

資料來源：Jungbluth et al. (2007)

本案例建立的成品，除了生質酒精之外，本研究更進一步混合車用汽油建立實際應用層面更廣泛的酒精汽油，選用兩種不同的混合比例，分別產製混合 5 % 生質酒精的 E5 酒精汽油以及混合 85 % 生質酒精的 E85 酒精汽油，由於混合比例為體積比，而本研究選用的功能單位為單位熱值，因此必須依照生質酒精及車用汽油的基本性質進行換算，兩者基本性質如表 3- 13 所列，單位熱值(1 MJ)酒精汽油的投入量值如表 3- 14 所列。另外，能源產品一般所稱之熱值係指低位發熱值(Low Heating Value, LHV)，而混合用的汽油是使用參考系統建立之產品，詳見下段說明。

表 3- 13 生質酒精及車用汽油之基本性質

項目	比重	低位發熱值(MJ/kg)	高位發熱值(MJ/kg)
車用汽油	0.750	42.8	45.8
生質酒精	0.789	26.8	29.7

資料來源：Dones et al. (2007); Jungbluth et al. (2007)

表 3-14 單位熱值酒精汽油之投入量值

項目	汽油使用量(kg/MJ)	酒精使用量(kg/MJ)
E5 酒精汽油	0.0226	0.0013
E85 酒精汽油	0.0049	0.0294
生質酒精	0	0.0373

2. 車用汽油

(1) 原油開採及運輸階段

國內所消費的原油幾乎都是從國外進口，原油開採的投入產出皆是發生於其原產地，但各地的原油開採盤查資料取得不易，因此各產地原油開採的盤查均是使用 Ecoinvent 資料庫內建盤查項目來代表。原油進口資料係根據經濟部能源局(2011)的統計數據，而海上運輸距離則依據 Sea-Rates.com 網站(<http://www.searates.com/cn/reference/portdistance/>)所估算之海運里程，估算基準為原油出口國的代表港口至高雄港，原油進口資料及海運距離如表 3-15 所列。

表 3-15 原油進口情形及海運距離

國家	代表港	進口量(千桶)	進口比例(%)	海運距離(km)
安哥拉	Cabinda	52,168.00	17.99	16440.25
剛果	Djeno	4,544.56	1.57	16512.51
伊朗	Bandar Mahshahr	11,040.08	3.81	10260.38
伊拉克	Fao	8,224.00	2.84	10245.08
科威特	Mina Al Ahmadi	66,893.96	23.06	10206.88
奈及利亞	Port Harcourt	4,836.28	1.67	17622.05
阿曼	Mina Al Fahal	4,001.56	1.38	8952.31
沙烏地阿拉伯	Ras Tanura	97,930.92	33.76	9967.76
阿拉伯聯合大公國	Das Island	17,259.81	5.95	9736.05
其他	-	23,162.35	7.99	-
總計	-	290,061.52	100.00	-

資料來源：經濟部能源局(2011)；Sea-Rates.com



(2) 汽油精煉階段

原油進口至港口後，通常會以油罐火車，油罐汽車和油管等方式將原油運送至煉油廠，本研究假設利用油管輸送原油，而港口至煉油廠的管線距離為 20 公里。煉油廠精煉程序盤查，由於缺少國內的實場數據，因此以 Ecoinvent 資料庫內建的歐洲煉油廠資料來代表。

3. 生質炭

(1) 稻作種植階段

稻作種植階段主要盤查的投入項目同樣包含二氧化碳、太陽能量、土地等天然資源，灌溉用水、稻種、肥料、農藥、農業機具等物料。稻作吸收的二氧化碳量係參考吳和房(2004)針對台北關渡地區水稻田各期作的二氧化碳吸收量計算結果，二氧化碳吸收量本研究以各種稻作品種及期作之平均值代表，生質能量則是參考 Nemecek and Kägi (2007)提供的數據，如表 3- 16 所列。土地投入量的盤查亦必須建立稻穀及稻稈產量與土地的關係，國內白米以及糙米的產量統計資料相當完整但稻穀產量的統計數據卻相當缺乏，不過由於白米和糙米都是稻穀的加工產品，稻穀收成可以選擇要碾製為白米或是糙米，而白米與糙米的碾米率分別為 65 %及 77 % (潘，2008)，因此可以依據碾米率回推稻穀產量，如表 3- 17 所列；稻稈產量同樣缺少具體的統計資料，本研究參考潘(2008)的估計值，每年每公頃稻田產生 6000 公斤的稻稈。另外，國內稻作種植普遍為一年兩期作，但兩期的產量存在一定程度的差異，如以兩期之平均產量來計算產量與土地的關係將會有所偏差，所以在土地的佔用時間及產量均為兩期作的量值加總並以一年為基準。

表 3- 16 稻作之碳平衡及能量平衡

作物	吸收二氧化碳量(kg/ha)	生質能量(MJ/ha)
稻作	76255	112041

資料來源：Nemecek and Kägi (2007); 吳和房(2004)

表 3- 17 國內白米、糙米與稻穀產量

項目	產量(ton)	收穫面積(ha)	產率(kg/ha)
一期			
白米	1,009,582	-	-
糙米	819,744	-	-
稻穀	2,617,806	148,333	-
二期			
白米	447,593	-	-
糙米	358,434	-	-
稻穀	1,154,103	103,958	-
總計			
稻穀	3,771,909	25,2291	14,950.63

資料來源：行政院農業委員會(2008)

稻作的灌溉用水量則是根據經濟部水利署(2010)提供農田水利會統計的農業用水資料，如表 3- 18 所列。目前國內培育秧苗的工作通常由專業育苗中心負責，農民只需前往當地育苗場選購秧苗即可，有研究指出種植一公頃的稻作大約需要 220 至 250 片的秧苗(潘，2008)，而每片秧苗的稻種約 250 至 280 公克(吳和林，2001)，本研究的稻種投入量以平均值代表，為每公頃投入 62.28 公斤稻種。

農委會並未特別針對稻作種植的肥料及農藥施用量進行統計，所以本研究根據潘(2008)向台東某稻農進行的訪談紀錄計算肥料及農藥投入量，稻田使用的肥料均為複合肥料有台肥 5 號、台肥 39 號、台肥 42 號、台肥 43 號，並根據表 3- 7 的肥料成分換算為單質肥料，而稻農會於一期與二期稻作之間的休耕期間會施作綠肥以改善土壤品質，訪談的稻農施作之綠肥作物為油菜籽，稻田肥料投入量如表 3- 19 所列。另外，該稻農的一、二期作種植面積均為 6.8 公頃，所以稻作種植階段的土地總投入量為 13.6 公頃。

表 3- 18 國內稻作用水情形

項目	灌溉用水量(m ³)	灌溉面積(ha)	灌溉用水率(m ³ /ha)
一期作	3,389,154,127	151,623	-
二期作	3,950,778,164	173,181	-
總計	7,339,932,291	324,804	22,598.04

資料來源：經濟部水利署(2010)

表 3- 19 某稻田之肥料施用量

項目	一期稻作肥料施用量(kg/ha)	二期稻作肥料施用量(kg/ha)
台肥 5 號		
硫酸銨	152.38	152.38
過磷酸鈣	88.89	88.89
氯化鉀	40.00	40.00
台肥 39 號		
硫酸銨	228.57	228.57
過磷酸鈣	400.00	400.00
氯化鉀	80.00	80.00
台肥 42 號		
硫酸銨	262.86	262.86
過磷酸鈣	66.67	66.67
氯化鉀	20.00	20.00
台肥 43 號		
硫酸銨	114.29	114.29
過磷酸鈣	133.33	133.33
氯化鉀	40.00	40.00
綠肥(油菜籽)	6.3	-

資料來源：潘(2008)

訪談紀錄中，稻田施用的農藥種類眾多，但 Ecoinvent 資料庫中亦只有少部分農藥可以選用，施用的農藥中只有年年春是資料庫中既有的項目，因此本研究的農藥投入只能計算年年春的部分，年年春的主要成分為嘉磷塞，經計算後，嘉磷塞的投入量為每公頃 0.46 公斤。

稻米種植主要的田間工作有整地放水、插秧施肥、收割稻穀等，整地的過程一般稱為打田，插秧前通常會進行數次的打田工作(潘，2008)，而根據訪談紀錄，稻農實際進行四次施肥及噴灑三至五次的農藥，稻田的田間工作情形如表 3- 20 所列。

稻作種植過程的溫室氣體排放量係參考 Yang et al. (2003)的研究結果，其建立 1990 年至 2000 年間臺灣各縣市的稻田甲烷及氧化亞氮排放因子，本研究選用各縣市平均值來代表。而使用肥料而產生的含氮、磷之化合物排放則參考 Nemecek and Kägi (2007)提供的方法以稻田實際投入的肥料量計算。農藥投入部份雖然只有盤查嘉磷塞，但噴灑後亦會排放到土壤環境中。另外，由於本案例是以稻稈焙燒產製生質炭，而稻稈係從農地中被收集移除，有研究指出移除稻稈會造成稻田土壤有機碳及含氮有機物量下降而增加溫室氣體排放量(Cherubini and Ulgiati, 2010; 許，2011)，本研究參考許(2011)的估計值，移除 1 公斤稻稈會增加排放 0.107 公斤的二氧化碳當量。稻作種植的排放因子如表 3- 21 所列。

表 3- 20 某稻田之田間工作

田間工作	對應盤查項目	數量(次)
打田	Tillage, rolling	2~3
插秧	Sowing	1
施肥	Fertilising, by broadcaster	4
噴灑農藥	Application of plant protection products, by field sprayer	3~5
收割	Combine harvester	1

資料來源：潘(2008)；本研究整理

表 3- 21 稻作種植之排放因子

項目	單位	排放因子
排放到空氣		
氨(ammonia)	kg/kg-rice	1.22E-03
氧化亞氮(dinitrogen monoxide)	kg/ha	2.93
氮氧化物(nitrogen oxides)	kg/kg-rice	3.99E-05
甲烷(methane)	kg/ha	102.23
二氧化碳(carbon dioxide)	kg/kg-rice straw	0.11
排放到地表水		
磷酸鹽(phosphorus)	kg/kg-rice	1.35E-05
排放到地下水		
磷酸鹽(phosphorus)	kg/kg-rice	3.34E-06
排放到土壤		
嘉磷塞(glyphosate)	kg/ha	0.46

資料來源：Nemecek and Kägi (2007); Yang et al. (2003); 許(2011)；本研究整理

(2) 稻稈運輸階段

由於稻穀收穫時稻稈會被收割機棄置於田間，必須從農地收集打包才能運送至生質炭工廠，本研究假設稻稈收集後直接運送至生質炭工廠，不經任何中間儲存地點，而工廠與稻田的道路距離為 15 公里，運輸方式為公路運輸。

(3) 生質炭焙燒階段

利用稻稈產製生質炭的程序包含乾燥、焙燒、揮發氣燃燒、冷卻與造粒等過程(許，2011)，由於國內較少關於生質炭生產製程的研究，因此本研究的生質炭生產製程投入產出資料完全參考許(2011)的製程模擬結果。另外，本研究選用的功能單位為單位熱值，所以必須根據生質炭的基本性質進行換算成單位熱值的投入量值，如表 3- 22 所列。

表 3- 22 單位熱值生質炭之投入量值

項目	熱值(MJ/kg)	生質炭使用量(kg/MJ)
生質炭	14.41	0.069

資料來源：許(2011)

4. 燃煤

根據表 3- 3 顯示國內消費的燃煤完全都從外國進口供應，所以煤礦開採的投入產出皆發生在外國的原產地，而各產地的煤礦開採盤查數據均是使用 Ecoinvent 資料庫內建盤查項目來代表。燃煤進口資料則是來自經濟部能源局(2011)的統計數據，而海上運輸距離同樣使用 Sea-Rates.com 網站所估算之海運里程，估算基準為煤礦出口國的代表港口至台中港，燃料煤進口資料及海運距離如表 3- 23 所列。

表 3- 23 燃料煤進口情形及海運距離

國家	代表港	進口量(ton)	進口比例(%)	海運距離(km)
澳洲	Newcastle	23,228,294	38.60	7904.48
加拿大	Prince Rupert	74,569	0.12	9131.77
中國	Qinhuangdao	1,821,574	3.03	1915.64
印尼	Tanjung Bara	25,947,734	43.12	2853.45
南非	Richards Bay	4,684,862	7.79	11852.37
其他	-	4,420,165	7.35	-
總計	-	60,177,198	100.00	-

資料來源：經濟部能源局(2011)；Sea-Rates.com

第四章 結果與討論



4.1 生命週期衝擊評估方法

本研究以 IMPACT 2002+ 衝擊評估方法為基礎，加入土地利用產生的氣候變遷衝擊及資源耗用衝擊，並且於 IMPACT 2002+ 的架構下新增三個中間點衝擊類別，分別為直接土地利用變遷排放(圖 4- 1 中的 Direct land-use change)、間接土地利用變遷排放(圖 4- 1 中的 Indirect land-use change)與土地覆蓋變遷(圖 4- 1 中的 Land cover change)，直接土地利用變遷排放及間接土地利用變遷排放因其衝擊性質係針對氣候變遷產生影響，而將兩者導入氣候變遷損害中；土地覆蓋變遷則是量化土地利用變遷的淨初級生產量變化，係對資源耗用造成影響，因此將之導入資源損害中。本研究建立的土地利用衝擊之 IMPACT 2002+ 修正方法定名為 IMPACT 2002+ w/LU，以下敘述均以此代稱，IMPACT 2002+ w/LU 之衝擊評估架構如圖 4- 1 所示。

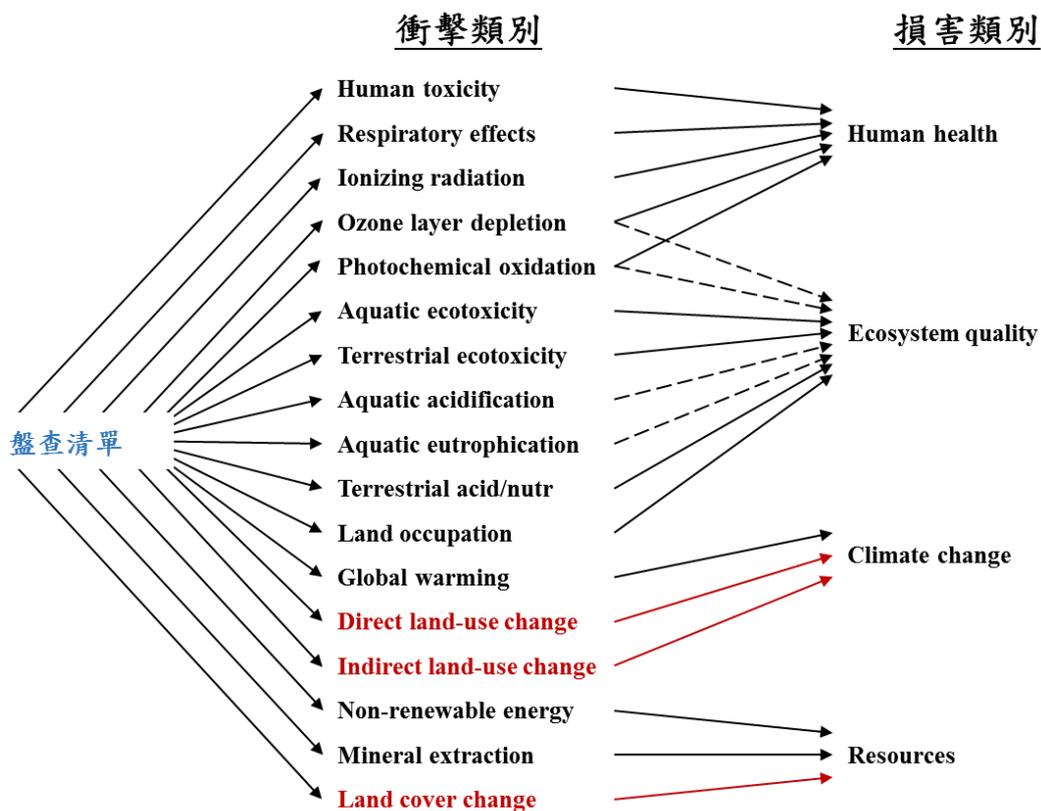


圖 4- 1 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估架構



4.1.1 特徵因子之建立

特徵化的過程是將盤查清單依照衝擊類別經對應的特徵化模式計算為環境衝擊的過程。IMPACT 2002+ w/LU 中由本研究新增的三個土地利用衝擊相關類別均是根據 3.2 節的土地利用衝擊化模式作為其特徵化模式。為了應用上的方便，通常會將特徵化模式預先將模式中的所有係數合併計算為特徵因子，來表示盤查清單與衝擊之間的線性關係，並且有利建置於生命週期評估軟體中，而本研究建立之特徵化模式的係數數值皆是參考 IPCC (2006)提供的數據，IPCC (2006)將土地利用型態分為四大類，包含林地(forest land)、耕地(crop land)、人為用地(settlements)與草地(grass land)，但生命週期盤查資料庫所定義的土地利用型態較 IPCC (2006)的分類更為精細，例如以林地為例，資料庫中的林地依照林木的生長密度以及林場的管理方式細分出 5 個子類別，本研究為連結兩者將資料庫的土地盤查項目歸類到 IPCC (2006)的四大分類之下，如表 4- 1 至表 4- 4 所列，同一分類的土地盤查項目將共用相同的特徵因子。

表 4- 1 林地之盤查項目分類列表

林地分類項目	
土地佔用盤查項目	土地變化盤查項目
Occupation, forest	Transformation, from forest
Occupation, forest, extensive	Transformation, from forest, extensive
Occupation, forest, intensive	Transformation, from forest, intensive
Occupation, forest, intensive, clear cutting	Transformation, from forest, intensive, clear cutting
Occupation, forest, intensive, normal	Transformation, from forest, intensive, normal
Occupation, forest, intensive, short-cycle	Transformation, from forest, intensive, short-cycle
	Transformation, to forest
	Transformation, to forest, extensive
	Transformation, to forest, intensive
	Transformation, to forest, intensive, clear cutting
	Transformation, to forest, intensive, normal
	Transformation, to forest, intensive, short-cycle

表 4-2 耕地之盤查項目分類列表



耕地分類項目	
土地佔用盤查項目	土地變化盤查項目
Occupation, arable	Transformation, from arable
Occupation, arable, integrated	Transformation, from arable, non-irrigated
Occupation, arable, non-irrigated	Transformation, from arable, non-irrigated, diverse-intensive
Occupation, arable, non-irrigated, diverse-intensive	Transformation, from arable, non-irrigated, monotone-intensive
Occupation, arable, non-irrigated, monotone-intensive	Transformation, from heterogeneous agricultural
Occupation, arable, organic	Transformation, from permanent crop
Occupation, heterogeneous agricultural	Transformation, from permanent crop, fruit
Occupation, permanent crop	Transformation, from permanent crop, fruit, intensive
Occupation, permanent crop, fruit	Transformation, from permanent crop, vine
Occupation, permanent crop, fruit, extensive	Transformation, from permanent crop, vine, extensive
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	Transformation, from permanent crop, vine, intensive
Occupation, permanent crop, vine	Transformation, to arable
Occupation, permanent crop, vine, extensive	Transformation, to arable, non-irrigated
Occupation, permanent crop, vine, intensive	Transformation, to arable, non-irrigated, diverse-intensive
	Transformation, to arable, non-irrigated, monotone-intensive
	Transformation, to arable, organic
	Transformation, to heterogeneous agricultural
	Transformation, to permanent crop
	Transformation, to permanent crop, fruit
	Transformation, to permanent crop, fruit, extensive
	Transformation, to permanent crop, fruit, intensive
	Transformation, to permanent crop, vine
	Transformation, to permanent crop, vine, extensive
	Transformation, to permanent crop, vine, intensive

表 4-3 人為用地之盤查項目分類列表



人為用地分類項目	
土地佔用盤查項目	土地變化盤查項目
Occupation, industrial area	Transformation, from industrial area
Occupation, industrial area, benthos	Transformation, from industrial area, benthos
Occupation, industrial area, build up	Transformation, from industrial area, build up
Occupation, industrial area, vegetation	Transformation, from industrial area, vegetation
Occupation, traffic area	Transformation, from traffic area, rail embankment
Occupation, traffic area, rail embankment	Transformation, from traffic area, rail network
Occupation, traffic area, rail network	Transformation, from traffic area, road embankment
Occupation, traffic area, road embankment	Transformation, from traffic area, road network
Occupation, traffic area, road network	Transformation, from urban, continuously built
Occupation, urban, continuously built	Transformation, from urban, discontinuously built
Occupation, urban, discontinuously built	Transformation, to industrial area
Occupation, urban, green areas	Transformation, to industrial area, benthos
	Transformation, to industrial area, build up
	Transformation, to industrial area, vegetation
	Transformation, to traffic area
	Transformation, to traffic area, rail embankment
	Transformation, to traffic area, rail network
	Transformation, to traffic area, road embankment
	Transformation, to traffic area, road network
	Transformation, to urban, continuously built
	Transformation, to urban, discontinuously built
	Transformation, to urban, green areas

另外，本研究建立的三個土地利用衝擊特徵化模式都需要計算植物的年生長量，然而，植物年生長量主要會因氣候、地形與品種等因素而有所差異，IPCC (2006) 提供世界主要氣候區的植物生長係數，本研究係以臺灣為參考地區，選用的係數也要能盡量符合臺灣的地區特性。臺灣的國土面積雖然不大，但地理位置卻是極為特殊，同時位居熱帶、亞熱帶地區以及海洋、大陸板塊之交界處，島上多有地形崎嶇陡峭的高山地區，形成非常獨特的生態環境，無法以單一氣候區反映出臺灣的地區特性，因此參考陳等人(2011)依據 IPCC (2006)的氣候區分類條件及國內村里氣象資料繪製的臺灣氣候分區圖，如圖 4-2 所示，氣候分區詳細資料如表 4-5 所列，本研究選用的係數則係以氣候分區面積比例加權平均之數值，以下茲就三個土地利用衝擊類別的特徵因子進行說明。

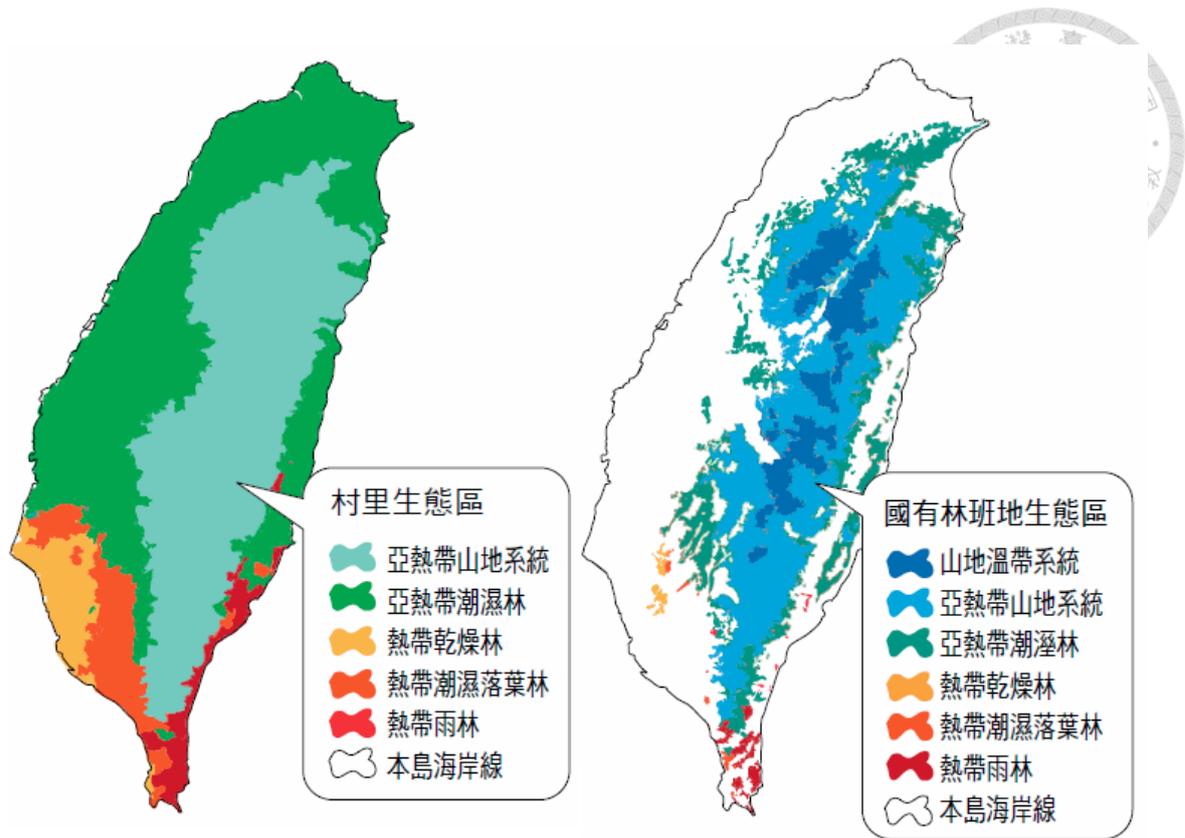
表 4-4 草地之盤查項目分類列表

草地分類項目	
土地佔用盤查項目	土地變化盤查項目
Occupation, pasture and meadow	Transformation, from pasture and meadow
Occupation, pasture and meadow, extensive	Transformation, from pasture and meadow, extensive
Occupation, pasture and meadow, intensive	Transformation, from pasture and meadow, intensive
Occupation, pasture and meadow, organic	Transformation, to pasture and meadow
	Transformation, to pasture and meadow, extensive
	Transformation, to pasture and meadow, intensive
	Transformation, to pasture and meadow, organic

表 4-5 臺灣氣候分區

氣候區	面積(ha)	比例(%)
溫帶山地系統	183,129	5.06
亞熱帶山地系統	1,564,841	43.24
亞熱帶潮濕林	1,546,753	42.74
熱帶乾燥林	101,943	2.82
熱帶潮濕落葉林	154,130	4.26
熱帶雨林	68,199	1.88
總計	3,618,995	100.00

資料來源：陳等人(2011)



資料來源：陳等人(2011)

圖 4-2 臺灣氣候分區

1. 土地覆蓋變遷

土地覆蓋變遷衝擊特徵化模式為式(18)至式(24)，特徵因子計算方法如式(33)、(34)與(35)所示，參考 IPCC (2006)所選用之係數經加權平均的數值如表 4- 6 所列，特徵因子計算結果如表 4- 7 所列。

$$\begin{aligned}
 CF_{LCC,occupation,i} &= E_{total,natural} - E_{total,i} \\
 &= [G_{above,natural} \times (1 + R_{natural}) - G_{above,i} \times (1 + R_i)] \times H_{biomass}
 \end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{aligned}
 CF_{LCC,transformation\ from,i} &= B_{total,i} \\
 &= W_{above,i} \times (1 + R_i) \times H_{biomass}
 \end{aligned} \tag{34}$$

$$CF_{LCC,transformation\ to,i} = (-CF_{LCC,transformation\ from,i}) \tag{35}$$

其中， $CF_{LCC,occupation,i}$ ：土地佔用之土地覆蓋變遷特徵因子，單位為 $MJ/m^2/yr$ ；

$E_{total,natural}$ ：天然狀態的淨初級生產量，單位為 $MJ/m^2/yr$ ；

$E_{total,i}$ ：第*i*種土地利用型態的淨初級生產量，單位為 $MJ/m^2/yr$ ；

$G_{above,natural}$ ：天然狀態的地上部的植物生物質年增長率，單位為 $ton-dry\ matter/ha/yr$ ；

$R_{natural}$ ：天然狀態的地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 $ton-below/ton-above$ ；

$G_{above,i}$ ：第*i*種土地利用型態的地上部的植物生物質年增長率，單位為 $ton-dry\ matter/ha/yr$ ；

R_i ：第*i*種土地利用型態的地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 $ton-below/ton-above$ ；

$H_{biomass}$ ：植物能量產率，典型值為 $18.5\ MJ/kg-dry\ matter$ ；

$CF_{LCC,transformation\ from,i}$ ：土地狀態變化前的土地覆蓋變遷特徵因子，單位為 MJ/m^2 ；

$B_{total,i}$ ：第*i*種土地利用型態的總經常性存在植物生物能，單位為 MJ/m^2 ；

$W_{above,i}$ ：第*i*種土地利用型態的地上部經常性存在植物生物質，單位為 $ton-dry\ matter/ha$ ；

$CF_{LCC,transformation\ to,i}$ ：土地狀態變化後的土地覆蓋變遷特徵因子，單位為 MJ/m^2 。

表 4-6 土地覆蓋變遷特徵化模式係數表

項目	G_{above} (ton-dry matter/ha/yr)	R (ton-below/ton-above)	W_{above} (ton-dry matter/ha)
天然地	2.55	0.26	242.62
林地	6.54	0.26	133.43
耕地	4.99	0	38.61
草地	1.17	2.21	4.17
人為用地	1.17	2.21	2.29

資料來源：IPCC (2006)；本研究整理

表 4-7 土地覆蓋變遷之特徵因子

盤查項目	單位	特徵因子(MJ/unit)
Occupation, arable	m ² a	-3.30
Occupation, arable, integrated	m ² a	-3.30
Occupation, arable, non-irrigated	m ² a	-3.30
Occupation, arable, non-irrigated, diverse-intensive	m ² a	-3.30
Occupation, arable, non-irrigated, monotone-intensive	m ² a	-3.30
Occupation, arable, organic	m ² a	-3.30
Occupation, forest	m ² a	-9.31
Occupation, forest, extensive	m ² a	-9.31
Occupation, forest, intensive	m ² a	-9.31
Occupation, forest, intensive, clear cutting	m ² a	-9.31
Occupation, forest, intensive, normal	m ² a	-9.31
Occupation, forest, intensive, short-cycle	m ² a	-9.31
Occupation, heterogeneous agricultural	m ² a	-3.30
Occupation, industrial area	m ² a	3.78
Occupation, industrial area, benthos	m ² a	3.78
Occupation, industrial area, build up	m ² a	3.78
Occupation, industrial area, vegetation	m ² a	3.78
Occupation, pasture and meadow	m ² a	3.78
Occupation, pasture and meadow, extensive	m ² a	3.78
Occupation, pasture and meadow, intensive	m ² a	3.78

表 4-7 土地覆蓋變遷之特徵因子(續)



盤查項目	單位	特徵因子(MJ/unit)
Occupation, pasture and meadow, organic	m ² a	3.78
Occupation, permanent crop	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, fruit	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, fruit, extensive	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, vine	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, vine, extensive	m ² a	-3.30
Occupation, permanent crop, vine, intensive	m ² a	-3.30
Occupation, traffic area	m ² a	3.78
Occupation, traffic area, rail embankment	m ² a	3.78
Occupation, traffic area, rail network	m ² a	3.78
Occupation, traffic area, road embankment	m ² a	3.78
Occupation, traffic area, road network	m ² a	3.78
Occupation, urban, continuously built	m ² a	3.78
Occupation, urban, discontinuously built	m ² a	3.78
Occupation, urban, green areas	m ² a	3.78
Transformation, from arable	m ²	71.42
Transformation, from arable, non-irrigated	m ²	71.42
Transformation, from arable, non-irrigated, diverse-intensive	m ²	71.42
Transformation, from arable, non-irrigated, monotone-intensive	m ²	71.42
Transformation, from forest	m ²	310.80
Transformation, from forest, extensive	m ²	310.80
Transformation, from forest, intensive	m ²	310.80
Transformation, from forest, intensive, clear cutting	m ²	310.80
Transformation, from forest, intensive, normal	m ²	310.80
Transformation, from forest, intensive, short-cycle	m ²	310.80
Transformation, from heterogeneous agricultural	m ²	71.42
Transformation, from industrial area	m ²	13.59
Transformation, from industrial area, benthos	m ²	13.59
Transformation, from industrial area, build up	m ²	13.59
Transformation, from industrial area, vegetation	m ²	13.59

表 4-7 土地覆蓋變遷之特徵因子(續)



盤查項目	單位	特徵因子(MJ/unit)
Transformation, from pasture and meadow	m ²	24.80
Transformation, from pasture and meadow, extensive	m ²	24.80
Transformation, from pasture and meadow, intensive	m ²	24.80
Transformation, from permanent crop	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, fruit	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, fruit, extensive	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, fruit, intensive	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, vine	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, vine, extensive	m ²	71.42
Transformation, from permanent crop, vine, intensive	m ²	71.42
Transformation, from traffic area, rail embankment	m ²	13.59
Transformation, from traffic area, rail network	m ²	13.59
Transformation, from traffic area, road embankment	m ²	13.59
Transformation, from traffic area, road network	m ²	13.59
Transformation, from urban, continuously built	m ²	13.59
Transformation, from urban, discontinuously built	m ²	13.59
Transformation, to arable	m ²	-71.42
Transformation, to arable, non-irrigated	m ²	-71.42
Transformation, to arable, non-irrigated, diverse-intensive	m ²	-71.42
Transformation, to arable, non-irrigated, monotone-intensive	m ²	-71.42
Transformation, to arable, organic	m ²	-71.42
Transformation, to forest	m ²	-310.80
Transformation, to forest, extensive	m ²	-310.80
Transformation, to forest, intensive	m ²	-310.80
Transformation, to forest, intensive, clear cutting	m ²	-310.80
Transformation, to forest, intensive, normal	m ²	-310.80
Transformation, to forest, intensive, short-cycle	m ²	-310.80
Transformation, to heterogeneous agricultural	m ²	-71.42
Transformation, to industrial area	m ²	-13.59
Transformation, to industrial area, benthos	m ²	-13.59
Transformation, to industrial area, build up	m ²	-13.59

表 4-7 土地覆蓋變遷之特徵因子(續)

盤查項目	單位	特徵因子(MJ/unit)
Transformation, to industrial area, vegetation	m ²	-13.59
Transformation, to pasture and meadow	m ²	-24.80
Transformation, to pasture and meadow, extensive	m ²	-24.80
Transformation, to pasture and meadow, intensive	m ²	-24.80
Transformation, to pasture and meadow, organic	m ²	-24.80
Transformation, to permanent crop	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, fruit	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, fruit, extensive	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, fruit, intensive	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, vine	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, vine, extensive	m ²	-71.42
Transformation, to permanent crop, vine, intensive	m ²	-71.42
Transformation, to traffic area	m ²	-13.59
Transformation, to traffic area, rail embankment	m ²	-13.59
Transformation, to traffic area, rail network	m ²	-13.59
Transformation, to traffic area, road embankment	m ²	-13.59
Transformation, to traffic area, road network	m ²	-13.59
Transformation, to urban, continuously built	m ²	-13.59
Transformation, to urban, discontinuously built	m ²	-13.59
Transformation, to urban, green areas	m ²	-13.59

2. 直接土地利用變遷排放

直接土地利用變遷排放衝擊特徵化模式為式(25)至式(29)，特徵因子計算方法如式(36)所示，參考 IPCC (2006)所選用之係數經加權平均的數值如表 4-8 所列，特徵因子計算結果如表 4-9 所列。

$$\begin{aligned}
 &CF_{dLUC,occupation,i} \\
 &= [(C_{stock,natural} - C_{stock,i}) + (F_{emi,i} - F_{emi,natural})] \times F_{CO_2} \\
 &= \{[G_{above,natural} \times (1 + R_{natural}) - G_{above,i} \times (1 + R_i)] \times F_{carbon} \\
 &\quad + (F_{emi,i} - F_{emi,natural})\} \times F_{CO_2}
 \end{aligned} \tag{36}$$



其中， $CF_{dLUC,occupation,i}$ ：土地佔用之直接土地利用變遷排放特徵因子，單位為 $\text{kg CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^2/\text{yr}$ ；

$C_{stock,natural}$ ：天然狀態的碳儲存量，單位為 $\text{ton-C}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

$C_{stock,i}$ ：第*i*種土地利用型態的碳儲存量，單位為 $\text{ton-C}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

$F_{emi,i}$ ：第*i*種土地利用型態的土壤有機碳流失率，單位為 $\text{ton-C}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

$F_{emi,natural}$ ：天然狀態的土壤有機碳流失率，單位為 $\text{ton-C}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

F_{CO_2} ：二氧化碳當量因子，為 $44 \text{ g-CO}_2/12 \text{ g-C}$ ；

$G_{above,natural}$ ：天然狀態的地上部的植物生物質年增長率，單位為 $\text{ton-dry matter}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

$R_{natural}$ ：天然狀態的地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 $\text{ton-below}/\text{ton-above}$ ；

$G_{above,i}$ ：第*i*種土地利用型態的地上部的植物生物質年增長率，單位為 $\text{ton-dry matter}/\text{ha}/\text{yr}$ ；

R_i ：第*i*種土地利用型態的地上部與地下部植物生物質之比值，單位為 $\text{ton-below}/\text{ton-above}$ ；

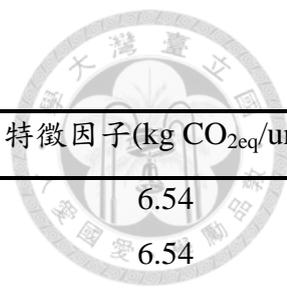
F_{carbon} ：碳素含量(carbon fraction)，典型值為 $0.47 \text{ ton-C}/\text{ton-dry matter}$ 。

表 4-8 直接土地利用變遷排放特徵化模式係數表

項目	G_{above} (ton-dry matter/ha/yr)	R (ton-below/ton-above)	F_{emi} (ton-C/ha/yr)
天然地	2.55	0.26	1.33
林地	6.54	0.26	1.33
耕地	4.99	0	20.00
草地	1.17	2.21	4.87
人為用地	1.17	2.21	2.67

資料來源：IPCC (2006)；本研究整理

表 4-9 直接土地利用變遷排放之特徵因子



盤查項目	單位	特徵因子(kg CO _{2eq} /unit)
Occupation, arable	m ² a	6.54
Occupation, arable, integrated	m ² a	6.54
Occupation, arable, non-irrigated	m ² a	6.54
Occupation, arable, non-irrigated, diverse-intensive	m ² a	6.54
Occupation, arable, non-irrigated, monotone-intensive	m ² a	6.54
Occupation, arable, organic	m ² a	6.54
Occupation, forest	m ² a	-0.87
Occupation, forest, extensive	m ² a	-0.87
Occupation, forest, intensive	m ² a	-0.87
Occupation, forest, intensive, clear cutting	m ² a	-0.87
Occupation, forest, intensive, normal	m ² a	-0.87
Occupation, forest, intensive, short-cycle	m ² a	-0.87
Occupation, heterogeneous agricultural	m ² a	6.54
Occupation, industrial area	m ² a	0.84
Occupation, industrial area, benthos	m ² a	0.84
Occupation, industrial area, build up	m ² a	0.84
Occupation, industrial area, vegetation	m ² a	0.84
Occupation, pasture and meadow	m ² a	1.65
Occupation, pasture and meadow, extensive	m ² a	1.65
Occupation, pasture and meadow, intensive	m ² a	1.65
Occupation, pasture and meadow, organic	m ² a	1.65
Occupation, permanent crop	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, fruit	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, fruit, extensive	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, fruit, intensive	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, vine	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, vine, extensive	m ² a	6.54
Occupation, permanent crop, vine, intensive	m ² a	6.54
Occupation, traffic area	m ² a	0.84
Occupation, traffic area, rail embankment	m ² a	0.84
Occupation, traffic area, rail network	m ² a	0.84

表 4-9 直接土地利用變遷排放之特徵因子(續)

盤查項目	單位	特徵因子(kg CO _{2eq} /unit)
Occupation, traffic area, road embankment	m ² a	0.84
Occupation, traffic area, road network	m ² a	0.84
Occupation, urban, continuously built	m ² a	0.84
Occupation, urban, discontinuously built	m ² a	0.84
Occupation, urban, green areas	m ² a	0.84

3. 間接土地利用變遷排放

間接土地利用變遷排放衝擊特徵化模式則為式(30)至式(32)，特徵因子計算方法如式(37)所示，模式中使用的係數基本上和直接土地利用變遷排放特徵化模式相同，其中的稻米產率因子是本研究為簡化預測額外佔用耕地面積的計算過程所建立的特殊參數，係以稻米代表糧食作物，並依照臺灣和世界其他稻米生產國家的平均產率之關係來表示。

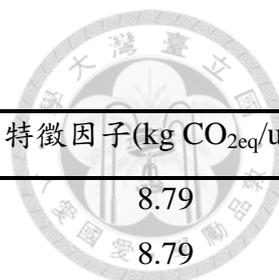
根據聯合國糧農組織(Food and Agricultural Organization, FAO)的 FAO ProdSTAT 資料庫統計資料顯示 2008 年全球共有 115 個稻米生產國家，並提供所有生產國的稻米收穫面積及產率，本研究以收穫面積將 115 個國家的稻米產率進行加權平均，世界平均產率為每公頃 4298 公斤，而 2008 年臺灣稻米產率為每公頃 5776 公斤(行政院農業委員會，2008)，在總稻米產量維持不變的前提下，計算稻米產率因子為佔用 1 公頃的臺灣耕地相當於佔用 1.34 公頃的世界其他地區耕地，間接土地利用變遷排放特徵因子計算結果如表 4-10 所列。

$$\begin{aligned}
 CF_{iLUC,occupation} &= CF_{dLUC,occupation,arable} \times F_{yield} \times F_{CO_2} \\
 &= \{ [G_{above,natural} \times (1 + R_{natural}) - G_{above,arable} \times (1 + R_{arable})] \\
 &\quad \times F_{carbon} + (F_{emi,arable} - F_{emi,natural}) \} \times F_{yield} \times F_{CO_2}
 \end{aligned} \tag{37}$$

其中， $CF_{iLUC,occupation}$ ：土地佔用之間接土地利用變遷排放特徵因子，單位為 kg CO_{2eq}/m²/yr；

F_{yield} ：稻米產率因子，單位為 ha-other cropland/ha-taiwan cropland。

表 4- 10 間接土地利用變遷排放之特徵因子



盤查項目	單位	特徵因子(kg CO _{2eq} /unit)
Occupation, arable	m ² a	8.79
Occupation, arable, integrated	m ² a	8.79
Occupation, arable, non-irrigated	m ² a	8.79
Occupation, arable, non-irrigated, diverse-intensive	m ² a	8.79
Occupation, arable, non-irrigated, monotone-intensive	m ² a	8.79
Occupation, arable, organic	m ² a	8.79

4.1.2 標準化因子之建立

特徵化計算的結果為各個單獨面向的環境衝擊及損害，為了提供綜合性的環境指標—單項得點，標準化之目的在於使特徵化的各個環境衝擊或損害類別之量值無因次化，用以表示衝擊或損害類別對參考地區整體環境品質影響之貢獻程度，並據以進行單項得點之加總。

標準化因子為參考地區每人每年所受到該衝擊或損害的總量，由於 IMPACT 2002+ w/LU 新增三個衝擊類別並且導入對應的損害類別中，必定造成原先定義之每人每年所受到的氣候變遷以及資源損害總量增加，標準化因子也將會隨之改變，因此本研究必須修正 IMPACT 2002+原有的標準化因子。而除了氣候變遷以及資源損害總量的計算之外，建立標準化因子還需要定義參考地區，並且建立該地區全年度的衝擊相關物質投入清單，才能推估每人每年所受到的損害總量。

以 IMPACT 2002+為基礎修正的 IMPACT 2002+ w/LU 標準化因子，參考地區從原本預設的歐洲地區改為臺灣，而原有的標準化因子中的人體健康與生態系統品質皆未受到新增衝擊類別之影響，故予以保留，只針對氣候變遷以及資源的標準化因子進行調整及修正。

在 IMPACT 2002+ w/LU 的衝擊評估架構中，氣候變遷損害係包含全球暖化衝擊、直接土地利用變遷排放衝擊和間接土地利用變遷排放衝擊，而資源損害則包括非再生能源衝擊、礦產開採衝擊與土地覆蓋變遷衝擊，衝擊總量的計算方法如式(38)所示。



$$IMPACT_{total,i} = \sum_j \frac{CF_{i,j} \times Q_{i,j}}{Pop_{taiwan}} \quad (38)$$

其中， $IMPACT_{total,i}$ ：第*i*個衝擊類別的衝擊總量；

$CF_{i,j}$ ：第*i*個衝擊類別的第*j*個盤查項目之特徵因子；

$Q_{i,j}$ ：第*i*個衝擊類別的第*j*個盤查項目之全年消費/投入/排放量；

Pop_{taiwan} ：臺灣人口總數，截至 2013 年 4 月內政部戶政司統計為 23,335,580 人。

全球暖化衝擊總量計算需要的全年排放量資料係根據行政院環境保護署公布的 2008 年溫室氣體排放清冊之數據，2008 年臺灣的總溫室氣體排放量為 264,708 公噸二氧化碳當量，本研究選用此數值作為全球暖化衝擊總量。而直接土地利用變遷排放衝擊總量計算需要的全年土地投入量則是參考行政院農業委員會的農業動態統計資料庫，提供 2011 年的土地利用資料包含耕地面積、林地面積、畜牧用地面積與其他用地面積，本研究將其他用地都歸類於都市用地，並根據這些資料計算直接土地利用變遷排放衝擊總量，土地利用情形如表 4-11 所列。而間接土地利用變遷排放衝擊總量的計算，由於國內的生質燃料仍處於發展階段，生質作物大多為小規模的種植計畫，種植面積的實際統計資料取得不易，因此間接土地利用變遷排放衝擊總量無法被估算。

表 4-11 全年度土地佔用情形

項目	對應盤查項目	土地利用面積 (ha×yr/yr)
耕地	Occupation, arable	808,293.81
林地	Occupation, forest	2,101,718.85
畜牧用地	Occupation, pasture and meadow	8,327.78
都市用地	Occupation, urban, continuously built	700,654.15
總計	-	3,618,994.59

資料來源：農業動態統計資料庫

非再生能源衝擊總量計算需要的能源消費資料是使用經濟部能源局(2011)提供的各項能源產品國內消費量(domestic consumption)之數據，如表 4- 12 所列。而礦產開採衝擊總量計算使用的礦產消費資料則是參考林等人(2012)彙整 2011 年的臺灣地區進出口礦物量值，並假設國內存貨量為零，則進出口之差值即為國內消費量，礦產消費情形如表 4- 13 所列。土地覆蓋變遷衝擊總量的計算亦需要全年土地投入量，如同直接土地利用變遷排放衝擊總量以表 4- 11 之數據進行估算。

表 4- 12 全年度非再生能源消費情形

項目	對應盤查項目	單位	國內消費量
硬煤	Occupation, arable	ton/yr	45,278,781
原油	Occupation, forest	kL/yr	46,928,134
天然氣	Occupation, pasture and meadow	ton/yr	24,226,141
鈾金屬	Occupation, urban, continuously built	ton/yr	991

資料來源：經濟部能源局(2011)

表 4- 13 全年度礦產消費情形

項目	對應盤查項目	國內消費量(ton/yr)
鋁礦(砂)	aluminium (in ore)	27,047
鉻礦(砂)	chromium (in ore)	10,226
鐵礦(砂)	iron (in ore)	20,506,868
鉬礦(砂)	molybdene (in ore)	825

資料來源：林等人(2012)

損害總量為其對應的衝擊類別之衝擊總量總和，如式(39)所示，而在 IMPACT 2002+ 中的單項得點係定義參考地區中每人每年所受到的損害總量為 1 個得點 (point, Pt)，因此標準化因子的換算如式(40)所示。氣候變遷損害總量與資源損害總量的計算結果分別如表 4- 14 及表 4- 15 所列，IMPACT 2002+ w/LU 的標準化因子則如表 4- 16 所列。另外，本研究也提供單純將參考地區改為臺灣後，適用 IMPACT 2002+ 的氣候變遷及資源標準化因子，如表 4- 17 所列。



$$DAMAGE_{total,i} = \sum_j IMPACT_{i,j}$$

$$NF_i = \frac{1}{DAMAGE_{total,i}}$$

(39)

(40)

其中， $DAMAGE_{total,i}$ ：第*i*個損害類別的損害總量；

$IMPACT_{i,j}$ ：第*i*個損害類別的第*j*個衝擊項目之衝擊總量；

NF_i ：第*i*個損害類別的標準化因子。

表 4- 14 氣候變遷損害總量

類別	量值(kg CO ₂ eq/pers/yr)
全球暖化衝擊總量	1.13E+04
直接土地利用變遷排放衝擊總量	1.74E+03
間接土地利用變遷排放衝擊總量	-
氣候變遷損害總量	1.31E+04

表 4- 15 資源損害總量

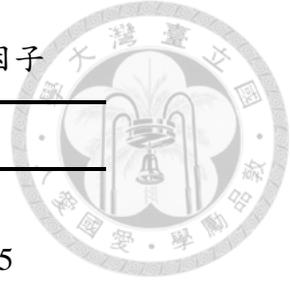
類別	量值(MJ/pers/yr)
非再生能源衝擊總量	1.92E+05
礦產開採衝擊總量	4.94E+01
土地覆蓋變遷衝擊總量	-8.38E+03
資源損害總量	1.84E+05

表 4- 16 IMPACT 2002+ w/LU 之標準化因子

項目	單位	量值
人體健康	Pt/DALY	141
生態系統品質	Pt/PDF/m ² /yr	7.30E-05
氣候變遷	Pt/kg CO ₂ eq	7.64E-05
資源	Pt/MJ primary	5.43E-06

表 4- 17 適用臺灣地區之 IMPACT 2002+標準化因子

項目	單位	量值
人體健康	Pt/DALY	141
生態系統品質	Pt/PDF/m ² /yr	7.30E-05
氣候變遷	Pt/kg CO ₂ eq	8.82E-05
資源	Pt/MJ primary	5.20E-06



4.1.3 衝擊評估方法模組化

本研究完成 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估方法後，已經更進一步於 SimaPro 生命週期評估軟體之中建置計算模組，但考量間接土地利用變遷排放只存在於具有土地競爭現象的第一代生質燃料，因此分別建置出兩套計算模組，一套排除間接土地利用變遷排放衝擊類別以適用於評估一般性的產品，名為 IMPACT 2002+ w/LU；另一套則專用於第一代生質燃料，名為 IMPACT 2002+ w/LU (for 1st gen Bioenergy)。

計算模組的檔案大小僅約 12.7 MB，可完全相容於 SimaPro 第 7.X 版的所有版本，但目前尚無法提供支援其他的生命週期評估軟體，如需在其他軟體中使用 IMPACT 2002+ w/LU 可以根據 4.1 節的特徵因子列表，自行輸入特徵因子至 IMPACT 2002+方法中。

IMPACT 2002+ w/LU 計算模組之檔案發布位址為 <http://ppt.cc/4Wai>，使用者可以透過軟體內建的匯入(import)資料庫功能，並於函式庫(library)中開啟匯入之模組，即可使用 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估方法來評估各式產品。

4.2 案例分析

本研究分別以第一代及第二代生質燃料為案例進行生命週期評估，並分別使用 IMPACT 2002+以及 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估方法進行案例的衝擊評估，目的在於瞭解增加土地利用衝擊對於生質燃料產生的環境衝擊以及溫室氣體減量效果之影響程度。由於本研究已經分別針對 IMPACT 2002+和 IMPACT 2002+ w/LU 修正其標準化因子，以下的案例分析都是選用以台灣為參考地區之標準化因子進行單項得點的計算，即表 4- 16 與表 4- 17 之內容。



4.2.1 增加土地利用衝擊對生質燃料之影響

IMPACT 2002+ w/LU 增加的土地利用衝擊只會影響特定衝擊類別與損害類別以及單項得點的評估結果，受影響的衝擊類別有直接土地利用變遷排放、間接土地利用變遷排放和土地覆蓋變遷，而損害類別則為氣候變遷及資源，因此本節的內容將特別針對這些類別的結果進行討論。

1. 酒精汽油及車用汽油

本案例中評估的產品包含生質酒精、E5 酒精汽油、E85 酒精汽油與車用汽油，以 IMPACT 2002+ 評估之結果分別如圖 4-3、圖 4-4、圖 4-5 所示，以及表 4-18 所列，而以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果則分別如圖 4-6、圖 4-7、圖 4-8 所示，以及表 4-19 所列。結果顯示當不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響時比較其氣候變遷終點損害，生質酒精確實比起車用汽油產生的溫室氣體排放來得略少，酒精汽油則介於兩者之間，但本研究盤查的生質酒精溫室氣體排放量與其他文獻或是 Ecoinvent 資料庫內建的巴西生質酒精相比較則明顯偏高，主要原因在於臺灣的甘蔗種植型態與其他國家不同，特別是灌溉方式，以巴西為例，當地的甘蔗於生長期中通常無須灌溉，只要每五年整地一次即可，而國內蔗農仍會引水灌溉，因此灌溉用水的投入使得種植階段的產生的衝擊就已較高，連帶增加最終成品的溫室氣體排放量。

而在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，環境衝擊順序隨即反轉，對氣候變遷及資源損害的增量影響如圖 4-9 及圖 4-10 所示，反倒以車用汽油的溫室氣體排放量為最少，酒精汽油次之，生質酒精的排放量甚至較原衝擊增加約 73 倍，增加的這些溫室氣體排放量中約有 43 % 的比例係由直接土地利用變遷排放所產生，而另外 57 % 則是由間接土地利用變遷排放所造成；但在資源損害的部分，生質酒精則呈現正面的減量效益，較原衝擊減少約 72 % 的資源損害，主要因為耕地被用來甘蔗，其淨初級生產量係高於天然地，所以能提供更多的生物質，以資源管理的觀點而言，佔用耕地可以產生更多的能源並支持各種人類活動。顯示出土地資源對於生質酒精為關鍵影響因素，雖可以提供更多的能源並減少資源損害，但同時也可能造成更多溫室氣體排放量，因此資源損害與氣候變遷損害分別為天平的兩端，如何平衡及取捨必須經由決策者和利害關係人(stakeholder)充分討論。

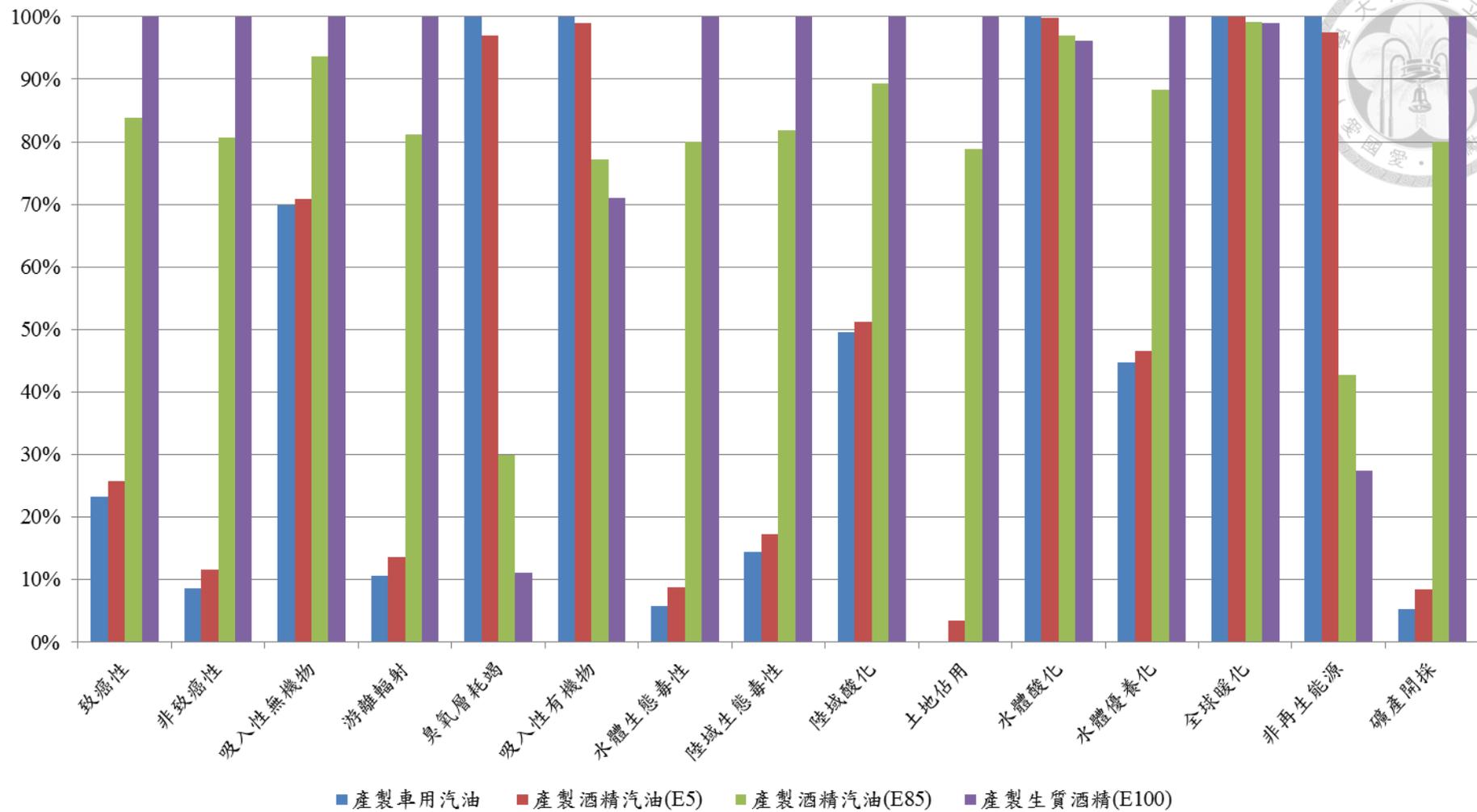
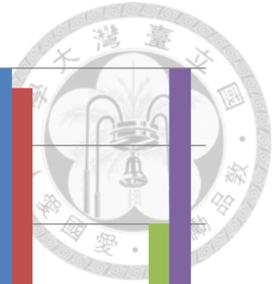


圖 4-3 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之衝擊特徵化結果

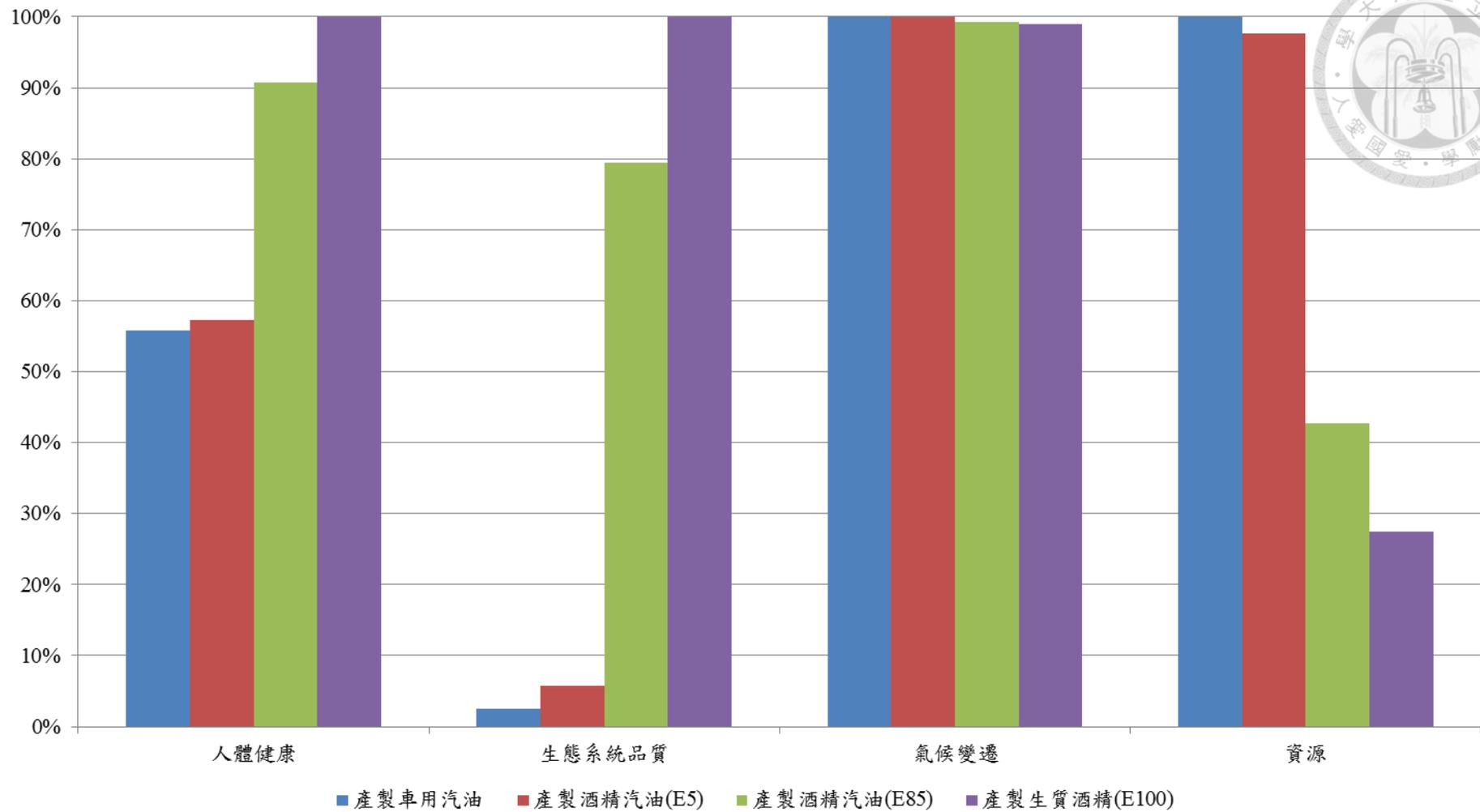


圖 4-4 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之損害特徵化結果

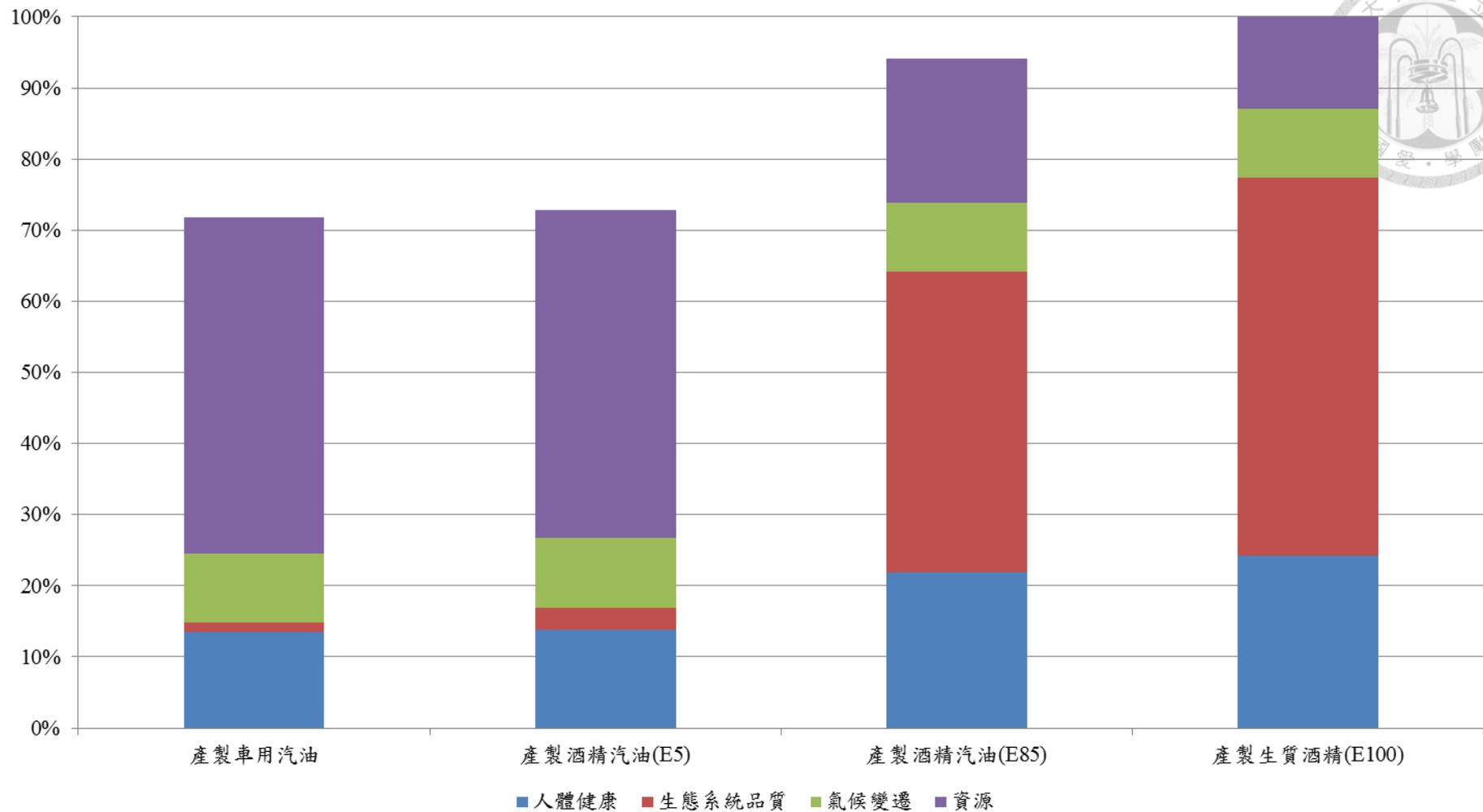
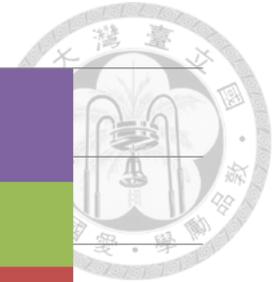


圖 4-5 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之單項得點

表 4-18 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+評估之結果



類別	單位	車用汽油	酒精汽油 (E5)	酒精汽油 (E85)	生質酒精
衝擊類別					
致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.75E-04	1.94E-04	6.30E-04	7.52E-04
非致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.15E-04	1.57E-04	1.09E-03	1.35E-03
吸入性無機物	kg PM _{2.5} eq	1.81E-05	1.84E-05	2.43E-05	2.60E-05
游離輻射	Bq C-14 eq	1.18E-01	1.52E-01	9.09E-01	1.12E+00
臭氧層耗竭	kg CFC-11 eq	1.70E-08	1.65E-08	5.09E-09	1.90E-09
吸入性有機物	kg C ₂ H ₄ eq	1.61E-05	1.60E-05	1.25E-05	1.15E-05
水體生態毒性	kg TEG water	1.40E+00	2.17E+00	1.97E+01	2.46E+01
陸域生態毒性	kg TEG soil	2.68E-01	3.22E-01	1.53E+00	1.87E+00
陸域酸化	kg SO ₂ eq	3.57E-04	3.69E-04	6.44E-04	7.21E-04
土地佔用	m ² org.arable	3.49E-05	2.69E-03	6.26E-02	7.94E-02
水體酸化	kg SO ₂ eq	1.29E-04	1.29E-04	1.25E-04	1.24E-04
水體優養化	kg PO ₄ P-lim	3.11E-06	3.23E-06	6.13E-06	6.93E-06
全球暖化	kg CO ₂ eq	1.57E-02	1.57E-02	1.56E-02	1.55E-02
非再生能源	MJ primary	1.29E+00	1.26E+00	5.51E-01	3.53E-01
礦產開採	MJ surplus	4.40E-05	7.03E-05	6.63E-04	8.28E-04
損害類別					
人體健康	DALY	1.36E-08	1.39E-08	2.21E-08	2.43E-08
生態系統品質	PDF×m ² ×yr	2.60E-03	5.98E-03	8.21E-02	1.03E-01
氣候變遷	kg CO ₂ eq	1.57E-02	1.57E-02	1.56E-02	1.55E-02
資源	MJ primary	1.29E+00	1.26E+00	5.52E-01	3.54E-01
單項得點	Pt	1.02E-05	1.03E-05	1.33E-05	1.42E-05

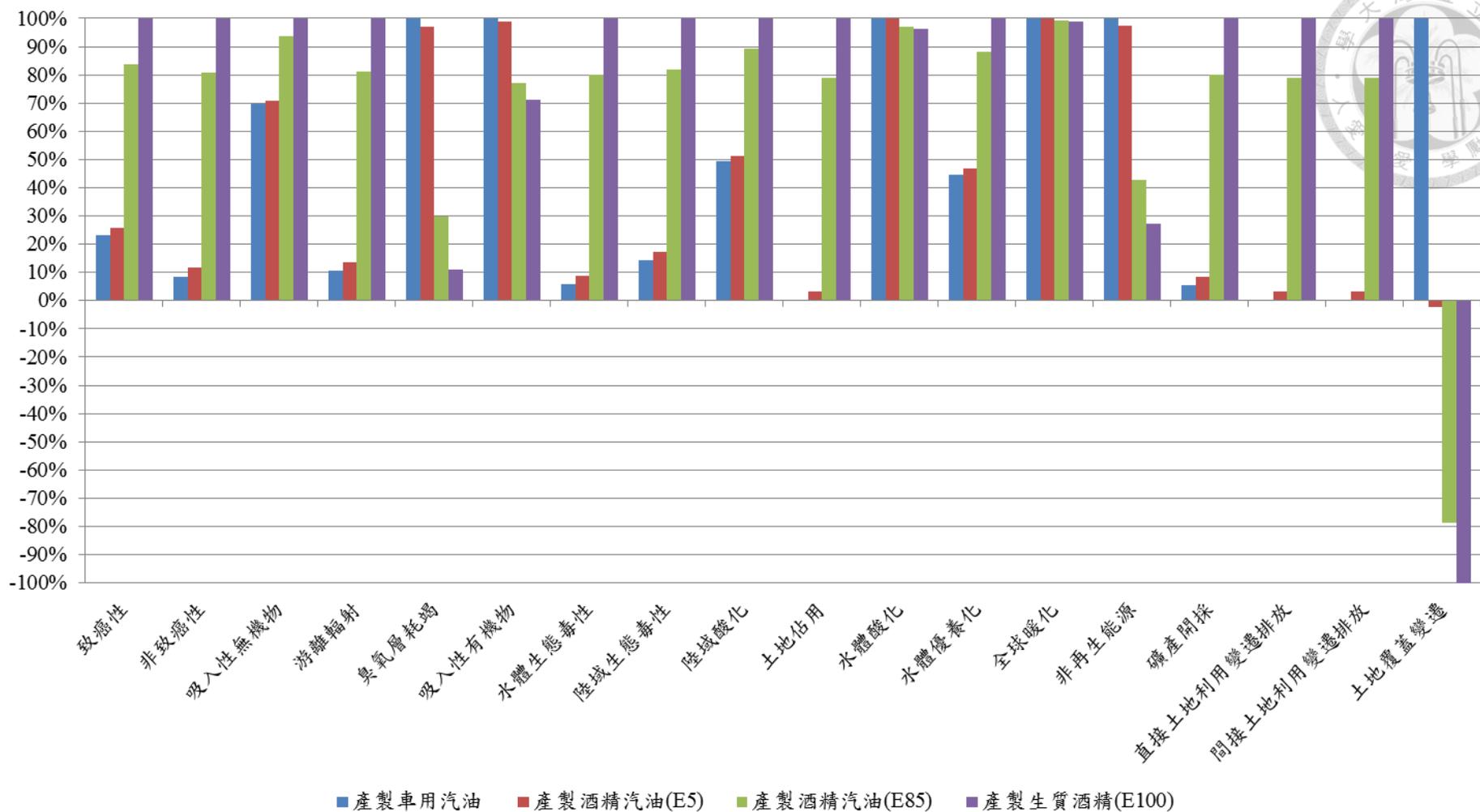


圖 4-6 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之衝擊特徵化結果

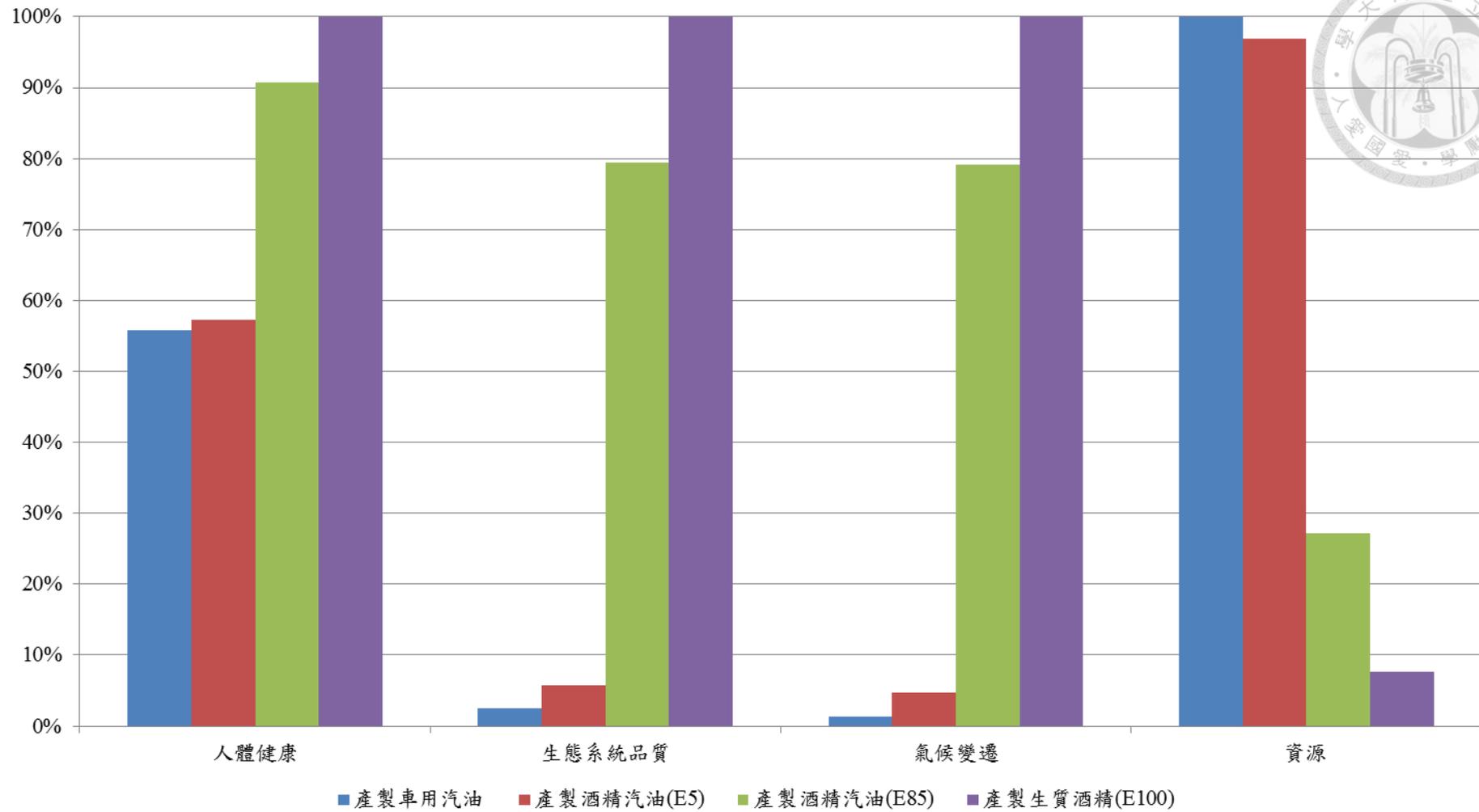


圖 4-7 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之損害特徵化結果

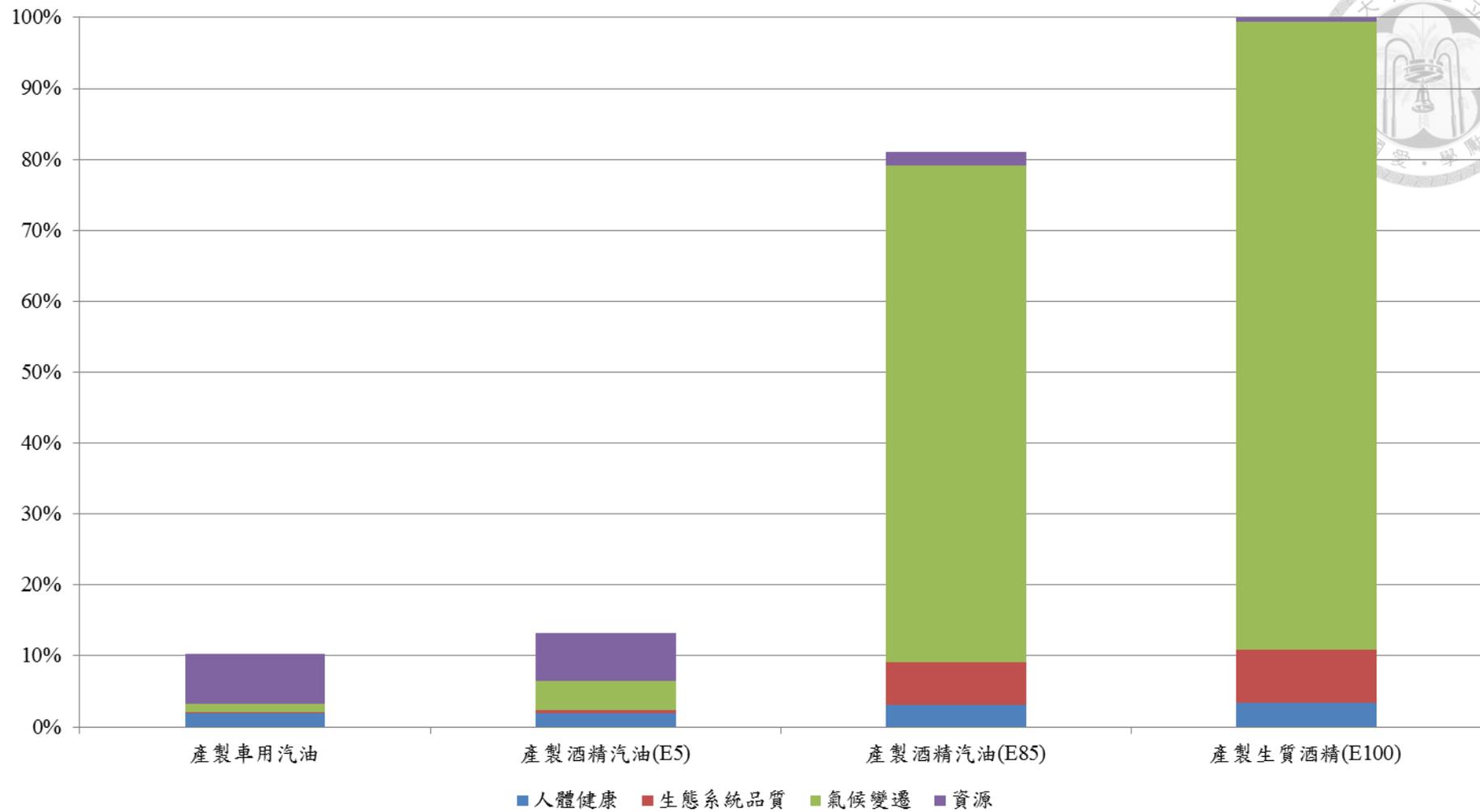


圖 4-8 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之單項得點

表 4-19 酒精汽油及車用汽油以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果

類別	單位	車用汽油	酒精汽油 (E5)	酒精汽油 (E85)	生質酒精
衝擊類別					
致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.75E-04	1.94E-04	6.30E-04	7.52E-04
非致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	1.15E-04	1.57E-04	1.09E-03	1.35E-03
吸入性無機物	kg PM _{2.5} eq	1.81E-05	1.84E-05	2.43E-05	2.60E-05
游離輻射	Bq C-14 eq	1.18E-01	1.52E-01	9.09E-01	1.12E+00
臭氧層耗竭	kg CFC-11 eq	1.70E-08	1.65E-08	5.09E-09	1.90E-09
吸入性有機物	kg C ₂ H ₄ eq	1.61E-05	1.60E-05	1.25E-05	1.15E-05
水體生態毒性	kg TEG water	1.40E+00	2.17E+00	1.97E+01	2.46E+01
陸域生態毒性	kg TEG soil	2.68E-01	3.22E-01	1.53E+00	1.87E+00
陸域酸化	kg SO ₂ eq	3.57E-04	3.69E-04	6.44E-04	7.21E-04
土地佔用	m ² org.arable	3.49E-05	2.69E-03	6.26E-02	7.94E-02
水體酸化	kg SO ₂ eq	1.29E-04	1.29E-04	1.25E-04	1.24E-04
水體優養化	kg PO ₄ P-lim	3.11E-06	3.23E-06	6.13E-06	6.93E-06
全球暖化	kg CO ₂ eq	1.57E-02	1.57E-02	1.56E-02	1.55E-02
非再生能源	MJ primary	1.29E+00	1.26E+00	5.51E-01	3.53E-01
礦產開採	MJ surplus	4.40E-05	7.03E-05	6.63E-04	8.28E-04
直接土地利用變遷排放	kg CO ₂ eq	9.19E-06	1.64E-02	3.86E-01	4.89E-01
間接土地利用變遷排放	kg CO ₂ eq	-	2.21E-02	5.20E-01	6.59E-01
土地覆蓋變遷	MJ primary	3.17E-03	-5.51E-03	-2.01E-01	-2.56E-01
損害類別					
人體健康	DALY	1.36E-08	1.39E-08	2.21E-08	2.43E-08
生態系統品質	PDF×m ² ×yr	2.60E-03	5.98E-03	8.21E-02	1.03E-01
氣候變遷	kg CO ₂ eq	1.57E-02	5.42E-02	9.21E-01	1.16E+00
資源	MJ primary	1.29E+00	1.25E+00	3.51E-01	9.82E-02
單項得點	Pt	1.03E-05	1.33E-05	8.14E-05	1.00E-04

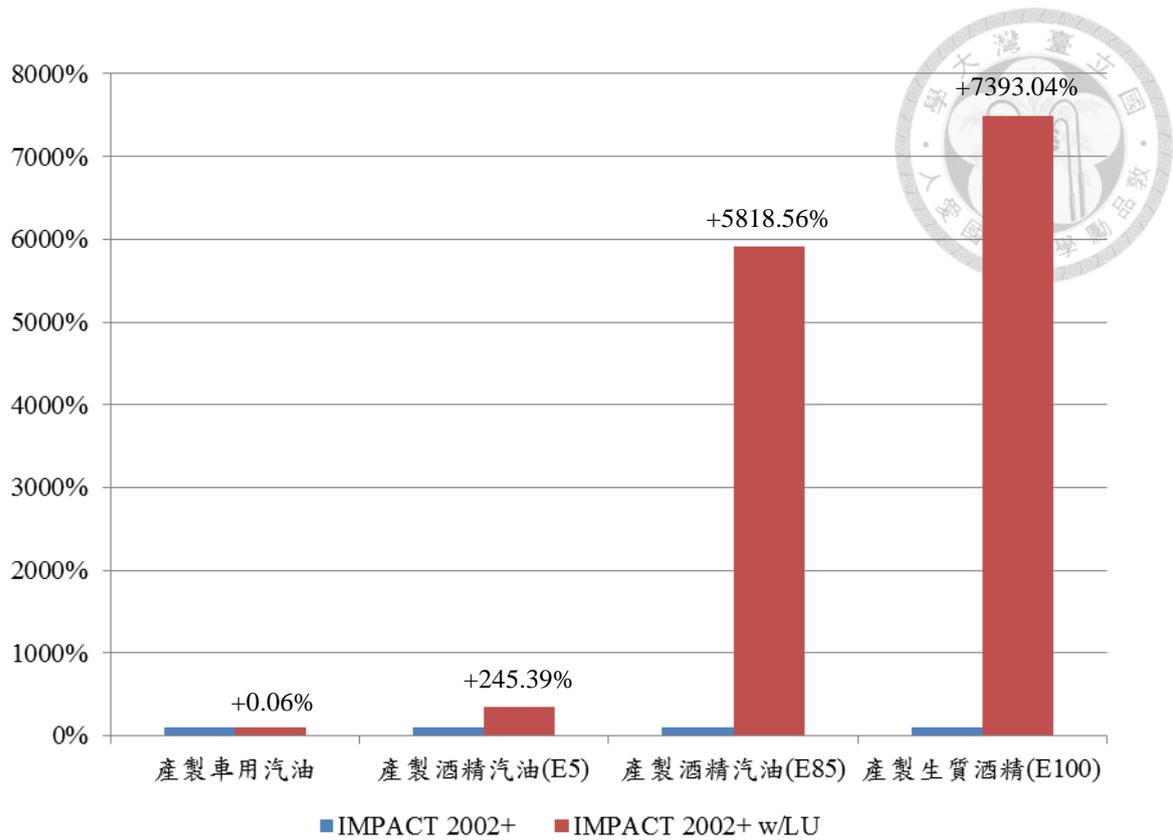


圖 4-9 酒精汽油及車用汽油加入土地利用衝擊對氣候變遷損害之影響

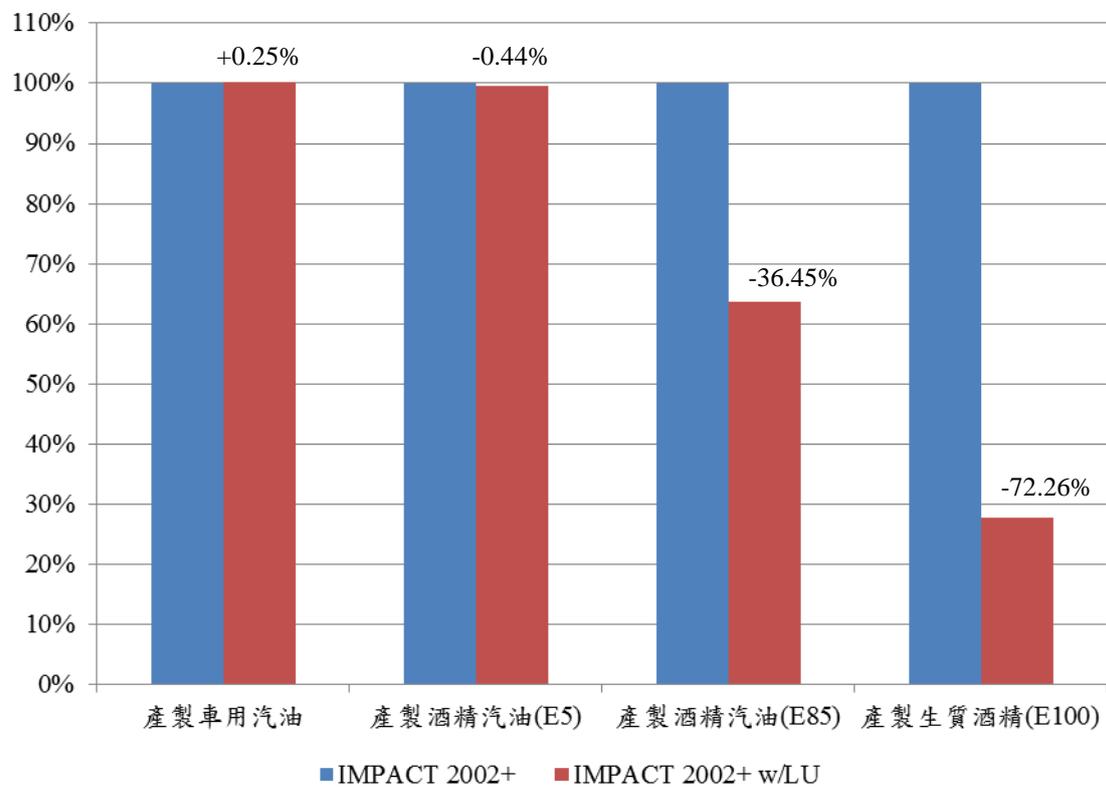


圖 4-10 酒精汽油及車用汽油加入土地利用衝擊對資源損害之影響

2. 生質炭及燃料煤

本案例中評估的產品包含生質炭及燃料煤，以 IMPACT 2002+ 評估之結果分別如圖 4-11、圖 4-12、圖 4-13 所示，以及表 4-20 所列，而以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果則分別如圖 4-14、圖 4-15、圖 4-16 所示，以及表 4-21 所列。結果顯示同樣當不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響，生質炭的溫室氣體排放量已較燃煤要高出 4 倍，分析生質炭的各個生命週期階段更進一步指出單以焙燒程序的溫室氣體排放量就已經和進口燃煤系統的整體排放量相當，所以即使本研究參考 Cherubini and Ulgiati (2010) 的方法是稻稈為殘餘物而不計算其投入產出，生質炭的全球暖化衝擊仍會高出燃煤許多。但若改以單項得點作為環境永續性之綜合評估指標，則生質炭的表現明顯較燃煤來得優秀，主要原因為燃煤於煤礦開採階段造成相對較大的生態系統品質損害以及資源損害。

而在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，對氣候變遷及資源損害的增量影響如圖 4-17 及圖 4-18 所示，生質炭和燃煤的環境衝擊順序依然不變，其中值得注意的是燃煤的直接土地利用變遷排放及土地覆蓋變遷之衝擊皆為負值，並且造成氣候變遷損害降低，主要是因為燃煤於整個生命週期的土地投入包含直接佔用大量的採礦地以及間接佔用少量的耕地和林地，但 IMPACT 2002+ w/LU 目前尚未建立採礦地的特徵因子，使得模式只有計算到那些少量的耕地和林地佔用衝擊，造成衝擊評估結果出現誤差。因此目前以 IMPACT 2002+ w/LU 評估燃煤的氣候變遷損害及資源損害之結果為低估，實際上燃煤可能產生更高的氣候變遷和資源損害，而生質炭的衝擊評估結果則再次顯示出土地利用對氣候變遷及資源之間的衝突性。

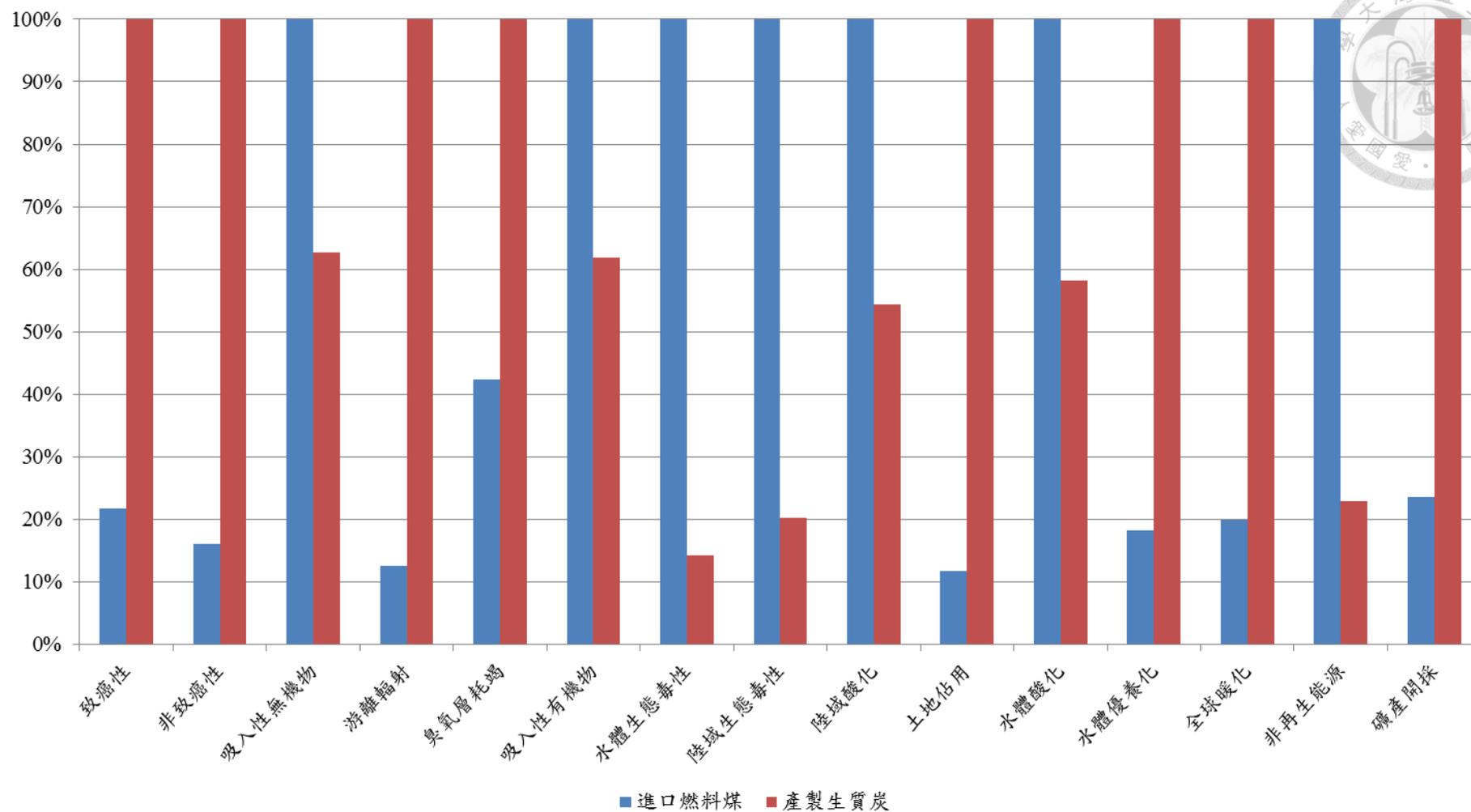
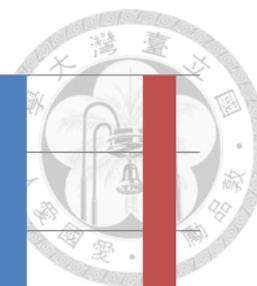


圖 4-11 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之衝擊特徵化結果

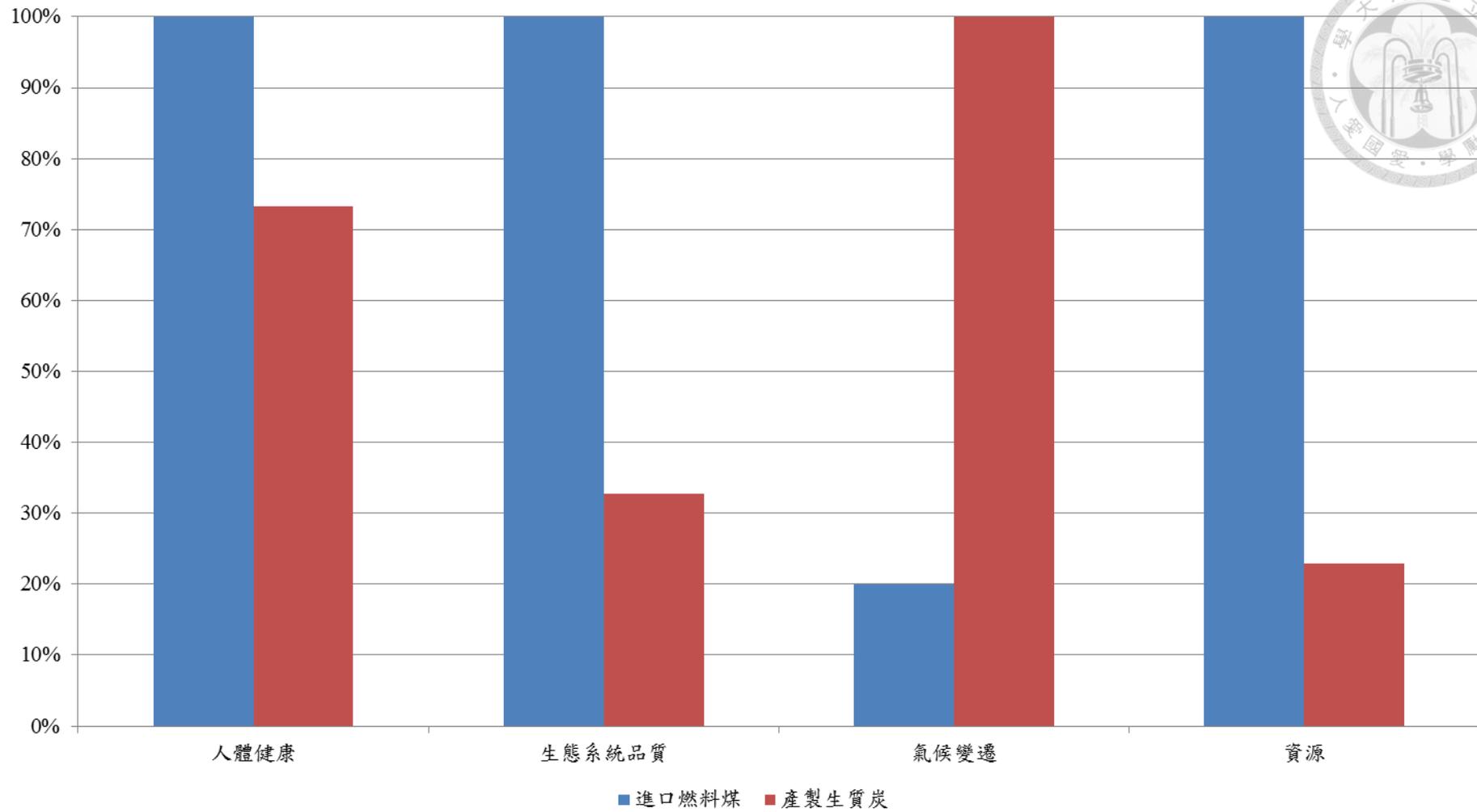


圖 4- 12 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之損害特徵化結果

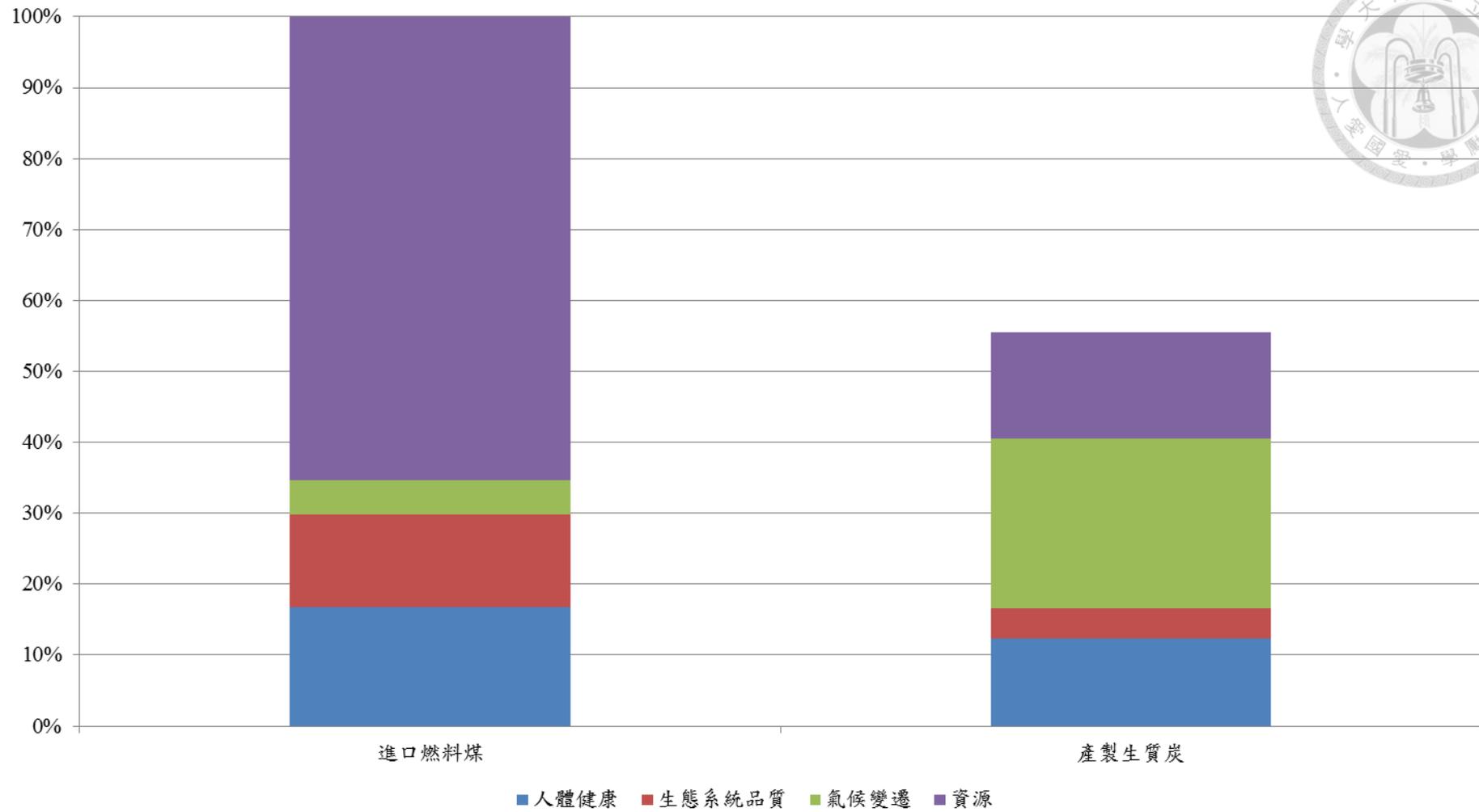


圖 4- 13 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之單項得點

表 4- 20 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+評估之結果

類別	單位	燃料煤	生質炭
衝擊類別			
致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3.19E-05	1.47E-04
非致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	4.83E-05	3.00E-04
吸入性無機物	kg PM _{2.5} eq	1.69E-05	1.06E-05
游離輻射	Bq C-14 eq	1.20E-01	9.47E-01
臭氧層耗竭	kg CFC-11 eq	4.44E-10	1.05E-09
吸入性有機物	kg C ₂ H ₄ eq	6.33E-06	3.92E-06
水體生態毒性	kg TEG water	8.41E+00	1.20E+00
陸域生態毒性	kg TEG soil	2.15E+00	4.36E-01
陸域酸化	kg SO ₂ eq	5.92E-04	3.21E-04
土地佔用	m ² org.arable	2.30E-04	1.97E-03
水體酸化	kg SO ₂ eq	1.11E-04	6.47E-05
水體優養化	kg PO ₄ P-lim	2.90E-07	1.59E-06
全球暖化	kg CO ₂ eq	5.51E-03	2.77E-02
非再生能源	MJ primary	1.28E+00	2.93E-01
礦產開採	MJ surplus	5.08E-05	2.16E-04
損害類別			
人體健康	DALY	1.21E-08	8.87E-09
生態系統品質	PDF×m ² ×yr	1.83E-02	5.98E-03
氣候變遷	kg CO ₂ eq	5.51E-03	2.77E-02
資源	MJ primary	1.28E+00	2.94E-01
單項得點	Pt	1.02E-05	5.65E-06

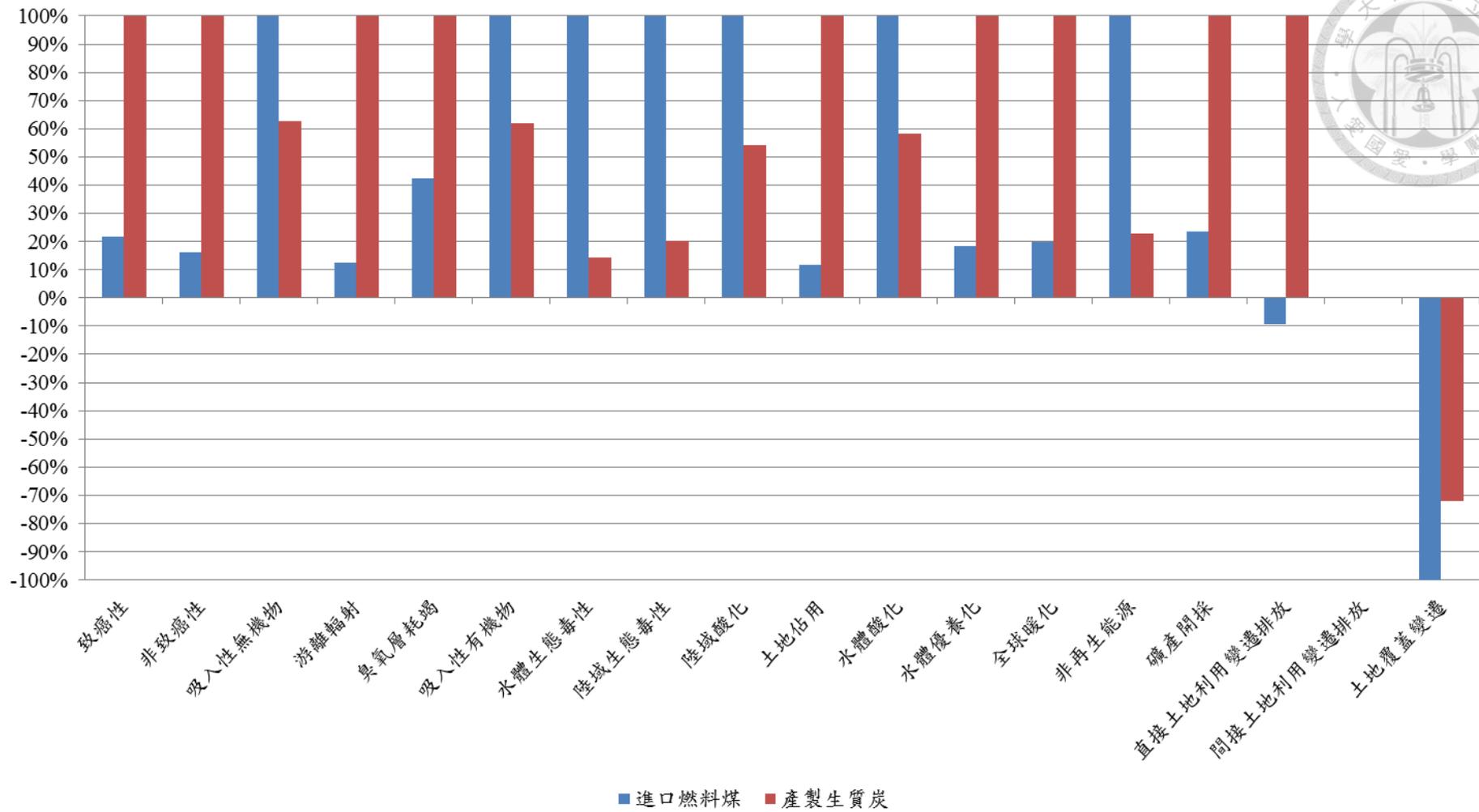
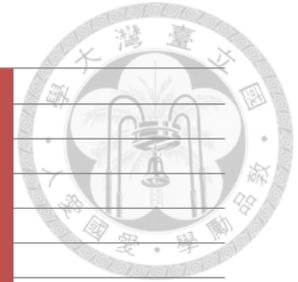


圖 4- 14 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之衝擊特徵化結果

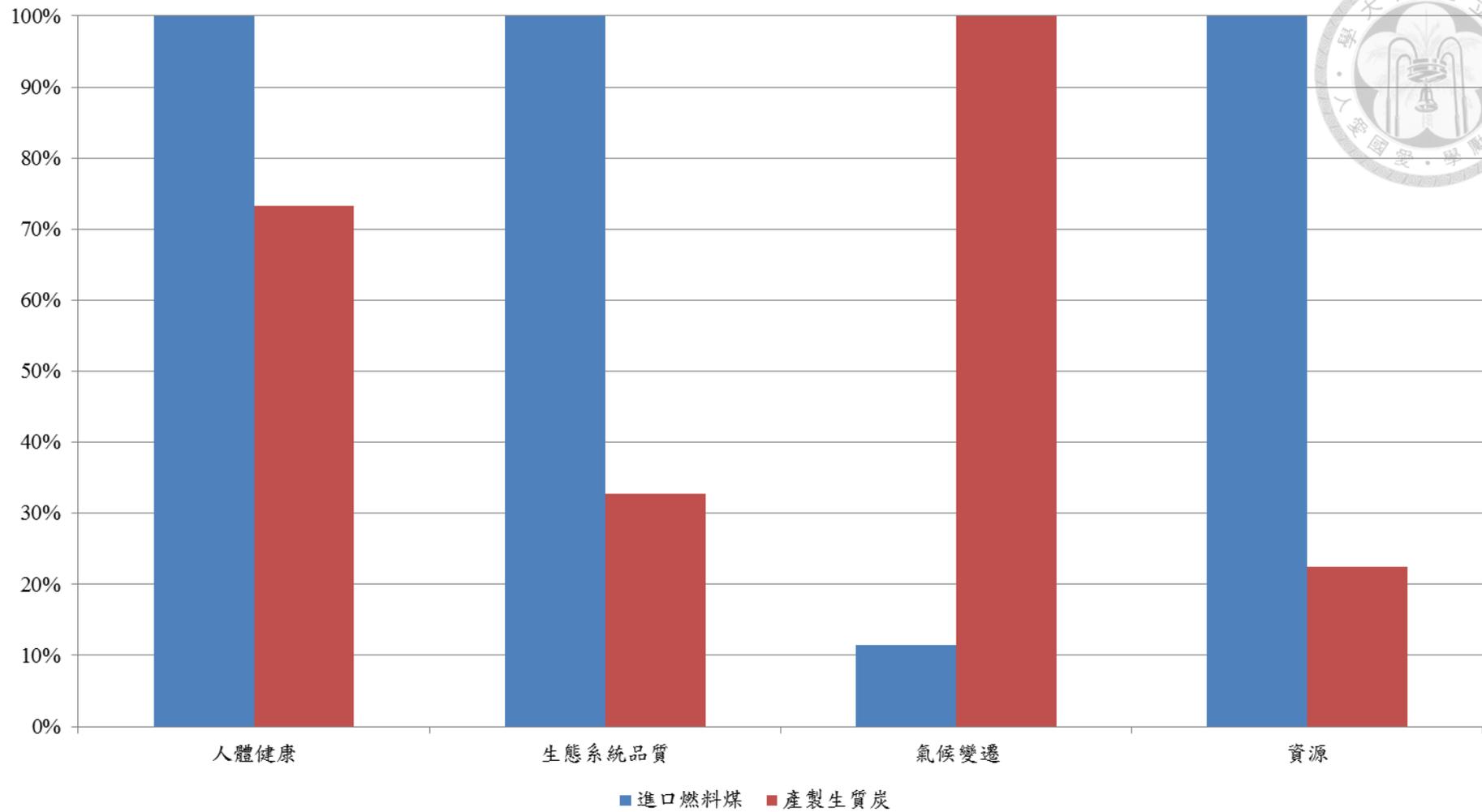


圖 4-15 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之損害特徵化結果

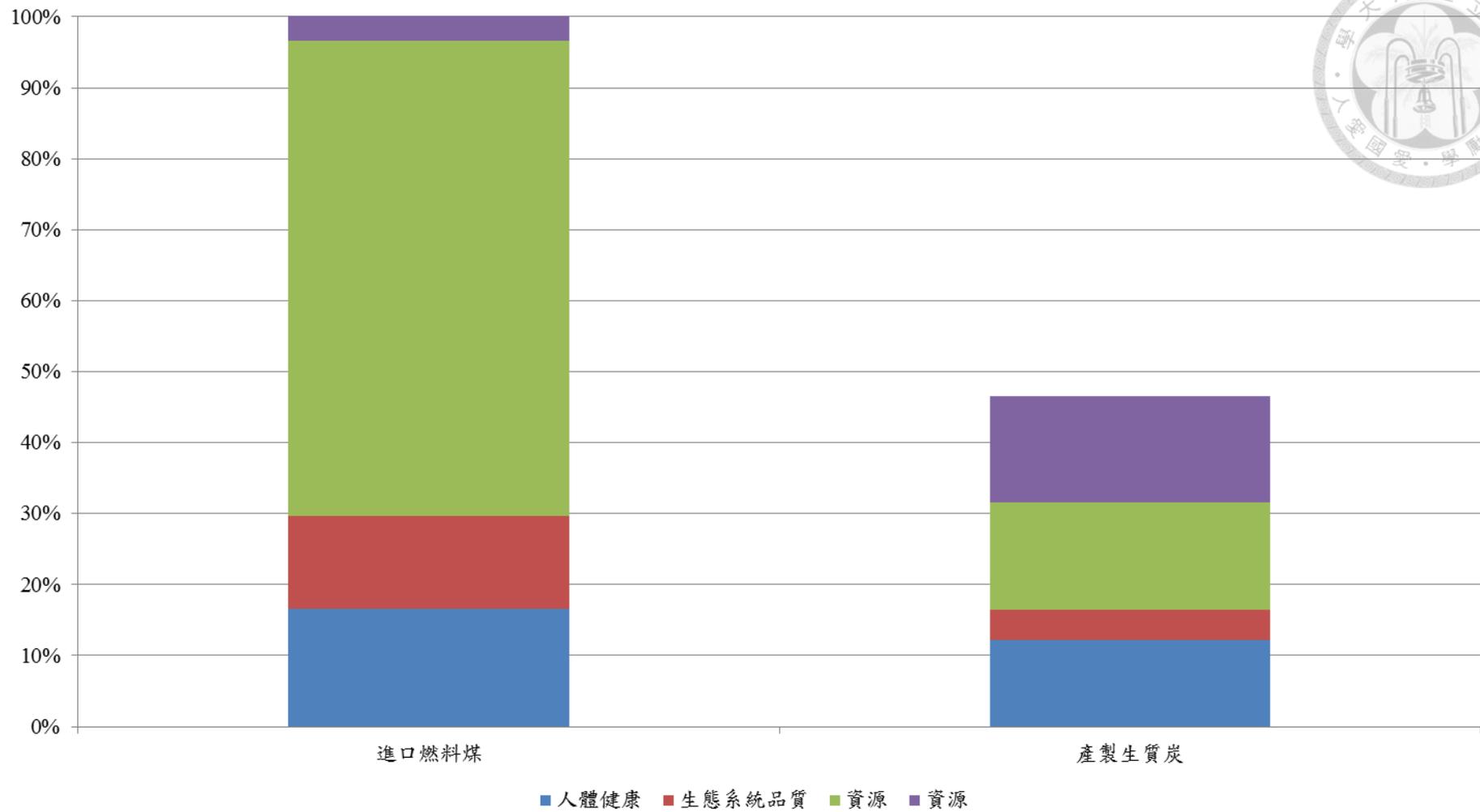


圖 4- 16 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之單項得點

表 4- 21 生質炭及燃料煤以 IMPACT 2002+ w/LU 評估之結果

類別	單位	燃料煤	生質炭
衝擊類別			
致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	3.19E-05	1.47E-04
非致癌性	kg C ₂ H ₃ Cl eq	4.83E-05	3.00E-04
吸入性無機物	kg PM _{2.5} eq	1.69E-05	1.06E-05
游離輻射	Bq C-14 eq	1.20E-01	9.47E-01
臭氧層耗竭	kg CFC-11 eq	4.44E-10	1.05E-09
吸入性有機物	kg C ₂ H ₄ eq	6.33E-06	3.92E-06
水體生態毒性	kg TEG water	8.41E+00	1.20E+00
陸域生態毒性	kg TEG soil	2.15E+00	4.36E-01
陸域酸化	kg SO ₂ eq	5.92E-04	3.21E-04
土地佔用	m ² org.arable	2.30E-04	1.97E-03
水體酸化	kg SO ₂ eq	1.11E-04	6.47E-05
水體優養化	kg PO ₄ P-lim	2.90E-07	1.59E-06
全球暖化	kg CO ₂ eq	5.51E-03	2.77E-02
非再生能源	MJ primary	1.28E+00	2.93E-01
礦產開採	MJ surplus	5.08E-05	2.16E-04
直接土地利用變遷排放	kg CO ₂ eq	-1.04E-03	1.11E-02
間接土地利用變遷排放	kg CO ₂ eq	-	-
土地覆蓋變遷	MJ primary	-1.16E-02	-8.36E-03
損害類別			
人體健康	DALY	1.21E-08	8.87E-09
生態系統品質	PDF×m ² ×yr	1.83E-02	5.98E-03
氣候變遷	kg CO ₂ eq	4.47E-03	3.88E-02
資源	MJ primary	1.27E+00	2.85E-01
單項得點	Pt	1.03E-05	6.20E-06

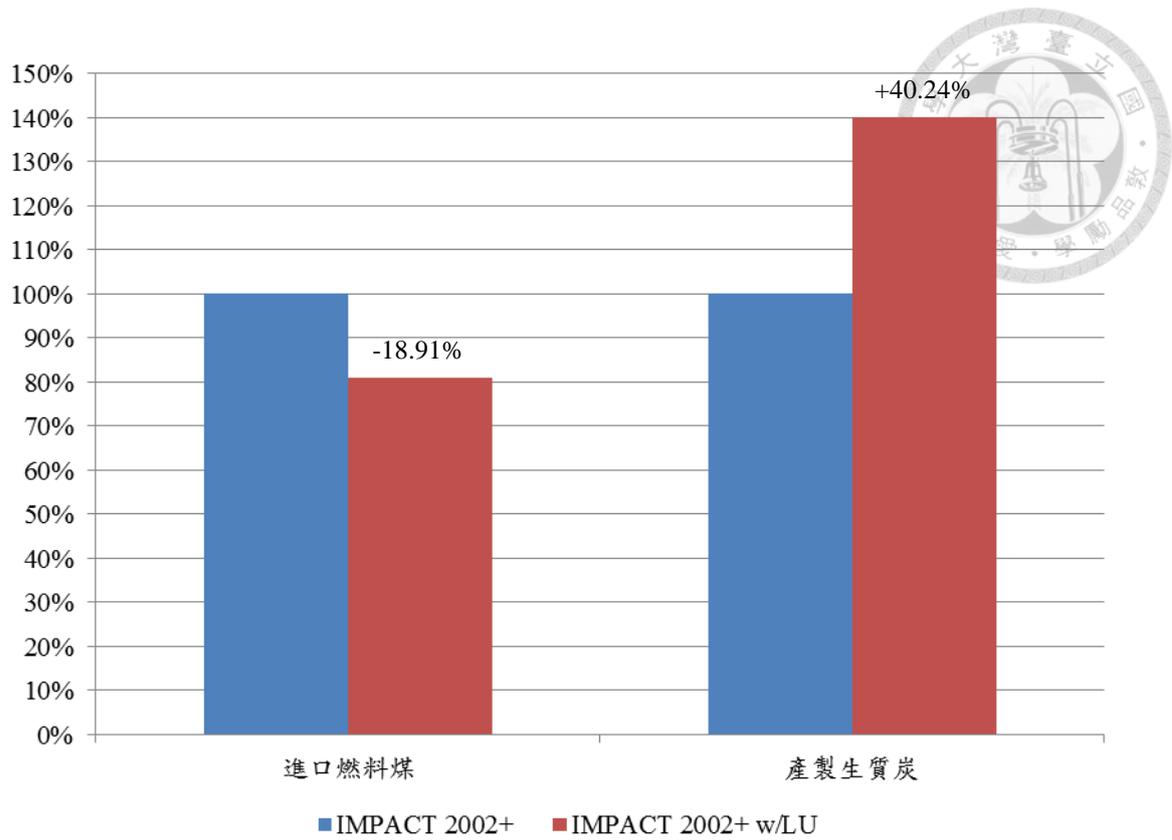


圖 4- 17 生質炭及燃料煤加入土地利用衝擊對氣候變遷損害之影響

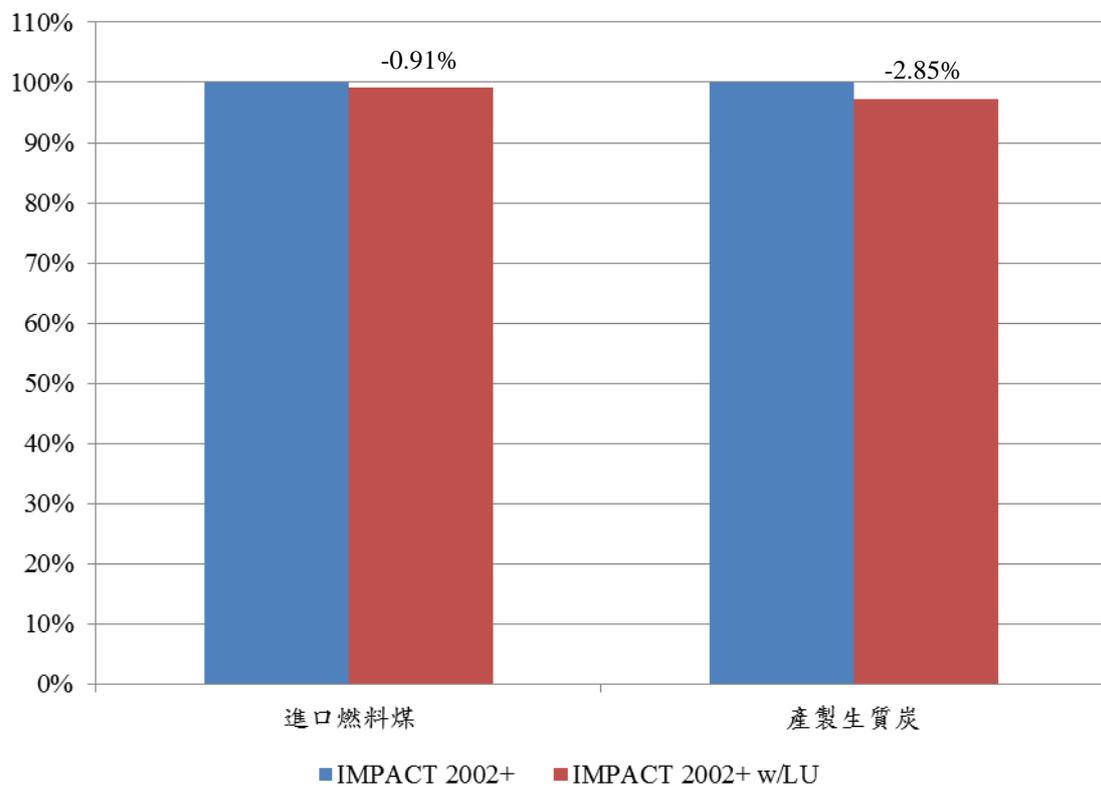


圖 4- 18 生質炭及燃料煤加入土地利用衝擊對資源損害之影響



4.2.2 敏感度分析

由於本節討論重點為增加土地利用衝擊對於生質燃料產生的環境衝擊之影響程度，而其中所使用的 IMPACT 2002+ w/LU 係本研究自行修正建立，新增的三個土地利用衝擊類別之特徵因子是評估結果的關鍵部分，然而，任何數據的調查或是蒐集過程中都存在一定程度的不確定性，因此必須進行不確定性分析(uncertainty analysis)及敏感度分析(sensitivity analysis)以釐清每個衝擊類別的數值分布情形和敏感程度，但本研究所參考的 IPCC (2006)係數並未提供量化的不確定性資訊，所以無法進行不確定性分析。而敏感度分析係指經由變動一個或數個不確定性因子於特定的數值範圍，比較其導致評估指標之變動幅度，以判斷各個因子對評估對象的影響程度，並可根據式(41)，分別計算出各個因子變動產生評估指標之變化量對於所有因子加總之總變動量的貢獻程度，用以表示其敏感程度並可以龍捲風圖(tornado diagram)形式呈現。

$$Sensitivity_{i,j} = \frac{Variation_{i,j}}{\sum_i |Variation_{i,j}|} = \frac{X_{i,j} - X_0}{\sum_i |X_{i,j} - X_0|} \quad (41)$$

其中， $Sensitivity_{i,j}$ ：第*i*個不確定性因子於變動*j*%時之敏感程度；

$Variation_{i,j}$ ：第*i*個不確定性因子於變動*j*%時之評估指標變化量；

$X_{i,j}$ ：第*i*個不確定性因子於變動*j*%時之評估指標值；

X_0 ：第*i*個不確定性因子未變動前之評估指標值。

本研究分別以生質酒精及生質炭進行敏感度分析，分別以±5%及±20%的範圍分別變動三個衝擊類別的特徵因子，並比較單項得點的變動程度，結果如表 4-22、

表 4-23 所列，以及圖 4-19、圖 4-20 所示，分析結果顯示對於生質酒精最敏感的因子為間接土地利用變遷排放衝擊類別的特徵因子，而對於生質炭則是直接土地利用變遷排放衝擊類別的特徵因子最為敏感，另外在兩個評估對象中土地覆蓋變遷衝擊類別的特徵因子相較之下顯得不敏感，表示當希望提升衝擊評估的準確性時，可以優先考慮提高這兩種類別特徵因子的資料品質。



表 4-22 生質酒精之特徵因子敏感度分析

因子變動率	直接土地利用變遷排放		間接土地利用變遷排放		土地覆蓋變遷	
	單項得點	變動率	單項得點	變動率	單項得點	變動率
+20%	1.08E-04	7.45%	1.10E-04	10.02%	1.00E-04	-0.28%
+5%	1.02E-04	1.86%	1.03E-04	2.51%	1.00E-04	-0.07%
0%	1.00E-04	-	1.00E-04	-	1.00E-04	-
-5%	9.85E-05	-1.86%	9.79E-05	-2.51%	1.00E-04	0.07%
-20%	9.29E-05	-7.45%	9.04E-05	-10.02%	1.01E-04	0.28%

表 4-23 生質炭之特徵因子敏感度分析

因子變動率	直接土地利用變遷排放		土地覆蓋變遷	
	單項得點	變動率	單項得點	變動率
+20%	6.37E-06	2.74%	6.19E-06	-0.15%
+5%	6.24E-06	0.69%	6.20E-06	-0.04%
0%	6.20E-06	-	6.20E-06	-
-5%	6.16E-06	-0.69%	6.20E-06	0.04%
-20%	6.03E-06	-2.74%	6.21E-06	0.15%

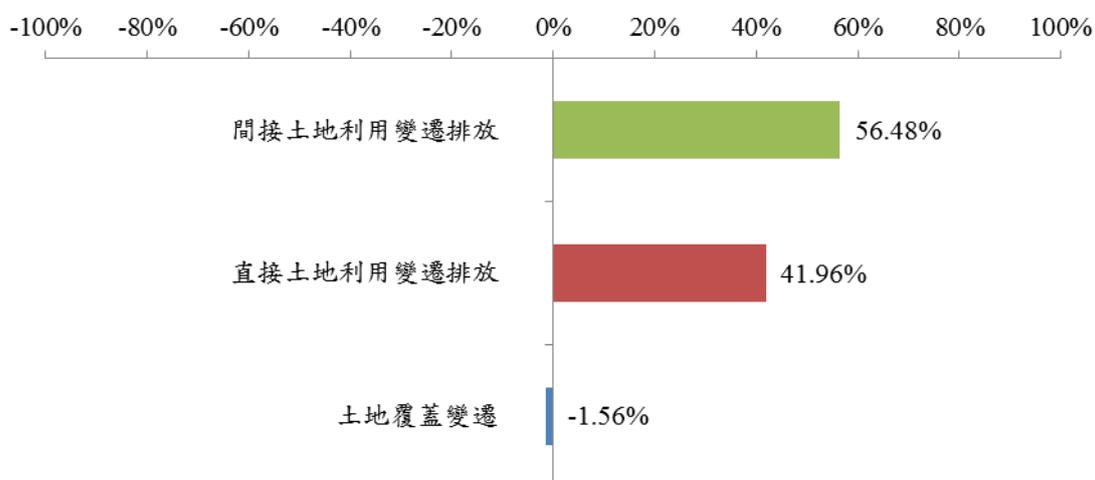


圖 4-19 生質酒精之特徵因子敏感度分析

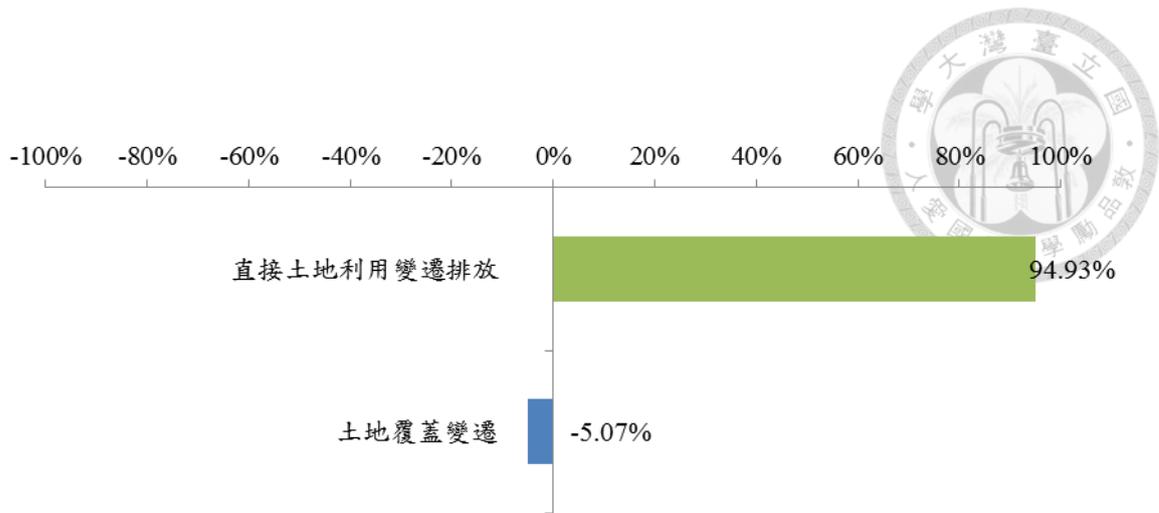


圖 4-20 生質炭之特徵因子敏感度分析

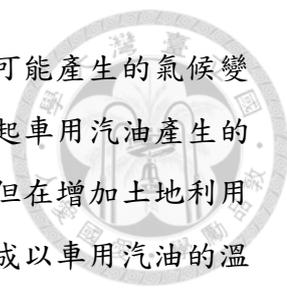
第五章 結論與建議



本研究以 IMPACT 2002+ 衝擊評估方法為基礎，加入土地利用產生的氣候變遷衝擊及資源耗用衝擊，建立 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估方法，並分別以第一代及第二代生質燃料為案例進行生命週期評估，透過使用 IMPACT 2002+ 以及 IMPACT 2002+ w/LU 分別進行案例的衝擊評估，瞭解增加土地利用衝擊對於生質燃料產生的環境衝擊以及溫室氣體減量效果之影響程度。以下總結本研究之成果，並提出開發土地利用的生命週期衝擊評估方法之幾點建議。

1. 結論

- (1) 本研究根據 IPCC 於 2006 年發布的 AFOLU 手冊所提供計算不同土地利用類型的生物質及碳儲存量之方法，建立土地利用的氣候變遷及資源耗用衝擊特徵化模式。
- (2) IMPACT 2002+ w/LU 包含三個新增的中間點衝擊類別，分別為直接土地利用變遷排放、間接土地利用變遷排放與土地覆蓋變遷，而直接土地利用變遷排放及間接土地利用變遷排放衝擊係導入氣候變遷損害中，土地覆蓋變遷則是導入資源損害中。
- (3) 由於 IMPACT 2002+ w/LU 新增三個衝擊類別並且導入對應的損害類別中，造成原先定義之每人每年所受到的氣候變遷以及資源損害總量增加，因此針對氣候變遷以及資源損害類別修正 IMPACT 2002+ 原有的標準化因子，並將參考地區從原本預設的歐洲地區改為臺灣，而原有的標準化因子中的人體健康與生態系統品質皆未受到新增衝擊類別之影響，故予以保留。
- (4) 本研究完成 IMPACT 2002+ w/LU 衝擊評估方法後，更進一步於 SimaPro 生命週期評估軟體之中建置計算模組，但考量間接土地利用變遷排放只存在於具有土地競爭現象的第一代生質燃料，因此分別建置出兩套計算模組，一套排除間接土地利用變遷排放衝擊類別可以適用於評估一般性的產品，另一套則專用於第一代生質燃料。計算模組可完全相容於 SimaPro 第 7.X 版的所有版本，但目前尚無法提供支援其他生命週期評估軟體。

- 
- (5) 產製酒精汽油案例分析結果顯示，當不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響時比較其氣候變遷終點損害，生質酒精確實比起車用汽油產生的溫室氣體排放來得略少，酒精汽油則介於兩者之間；但在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，環境衝擊順序出現反轉，變成以車用汽油的溫室氣體排放量為最少，酒精汽油次之，生質酒精的排放量甚至較原衝擊增加約 73 倍，增加的這些溫室氣體排放量中約有 43 % 的比例係由直接土地利用變遷排放所產生，而另外 57 % 則是由間接土地利用變遷排放所造成。
- (6) 本研究盤查的生質酒精之溫室氣體排放量與其他文獻或是 Ecoinvent 資料庫內建的巴西生質酒精相比較則明顯偏高，主要原因在於臺灣的甘蔗種植型態與其他國家不同，特別是灌溉方式，以巴西為例，當地的甘蔗於生長期中通常無須灌溉，只要每五年整地一次即可，而國內蔗農仍會引水灌溉，因此灌溉用水的投入使得種植階段的產生的衝擊就已較高，連帶增加最終成品的溫室氣體排放量。
- (7) 產製生質炭案例分析結果顯示，同樣當不考慮土地利用可能產生的氣候變遷影響時，生質炭的溫室氣體排放量已較燃煤要高出 4 倍，分析生質炭的各個生命週期階段更進一步指出單以焙燒程序的溫室氣體排放量就已經和進口燃煤系統的整體排放量相當；而在增加土地利用產生的氣候變遷影響後，生質炭和燃煤的環境衝擊順序依然不變。

2. 建議

- (1) IMPACT 2002+ w/LU 是基於 AFOLU 手冊提供的係數並依層級一方法學而建立，其中層級一係數的資料尺度雖為區域性之代表數值，但土地品質與各種性質在地理空間上的變異程度大，資料尺度必須盡可能縮小才可以反映出土地利用衝擊的地區特性，因此建議計算特徵因子需要的參數值採用次序為先以當地現地調查之數據，政府統計資料次之，最後為其他相關研究提供之代表值並且可以根據敏感度分析的結果針對直接及間接土地利用變遷排放的特徵因子參數來優先採用更高層級的數值與方法學，使評估結果能夠更加快速接近實際情形。

- 
- (2) IMPACT 2002+ w/LU 所建立的特徵因子，目前只限於 AFOLU 手冊定義的耕地、林地、草地與人為用地，雖然已經囊括多數產品的土地利用型態，但在生質炭案例中，燃煤於煤礦開採階段佔用大量採礦地卻無法被模式化，導致衝擊評估結果可能低估，因此建議未來特徵因子計算可以針對兩個面向強化，其一為加入更多的土地利用型態，例如建立採礦地的特徵因子，其二為加入更精細的土地利用型態，例如將人為用地細分為都市用地、工業用地、交通用地等，並從原先共用特徵因子的方式變成有其單獨的特徵因子。
- (3) IMPACT 2002+ w/LU 的標準化因子，目前只針對氣候變遷及資源損害類別進行修正，而人類健康及生態系統品質損害類別仍持續沿用，因此建議蒐集國內化學物質全年度投入及排放清單，並將 IMPACT 2002+ 原有的人類健康及生態系統品質標準化因子的參考地區從歐洲替換成臺灣，以提供一套適用臺灣的完整標準化因子給國內生命週期評估相關研究使用。
- (4) 根據 EC-JRC (2011) 提出的土地利用衝擊關係圖(見圖 2- 5)，土地利用最終造成的衝擊可能有生物多樣性降低、氣候變遷、淨初級生產量改變、影響水中營養鹽濃度以及獨特地景與考古遺址的破壞，IMPACT 2002+ w/LU 已經加入部分的土地利用衝擊到現有的衝擊評估方法中，建議未來研究可以嘗試增加其他部分的衝擊，使得應用生命週期評估來量化投入土地資源產生的環境衝擊資訊能夠支持更為完整的範疇。

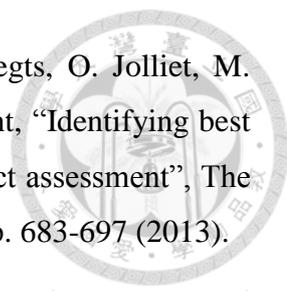


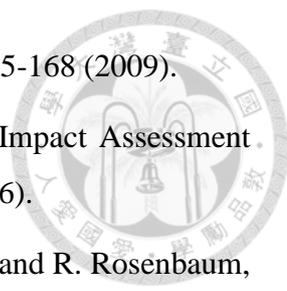
參考文獻

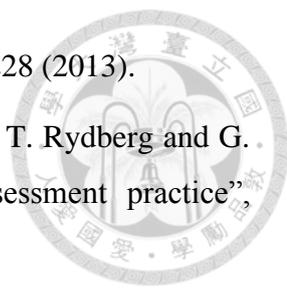


- Ahmad, A.L., N.H.M. Yasin, C.J.C. Derek and J.K. Lim, “Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 1, pp. 584-593 (2011).
- Bare, J., “Life cycle impact assessment research developments and needs”, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 12, No. 4, pp. 341-351 (2010).
- Bare, J., P. Hofstetter, D. Pennington and H. de Haes, “Midpoints versus endpoints: The sacrifices and benefits”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 5, No. 6, pp. 319-326 (2000).
- Baumann, H., T. Ekvall, G. Svensson, T. Rydberg and A.M. Tillman, “Aggregation and operative units”, In: Anonymous (1992).
- Blonk, T.J., M. Davidson and M.C.C. Lafleur, “Feasibility of operationalization of depletion of abiotic resources in LCA via the key resources energy and land”, Final draft (1996).
- Börjesson, P. and L.M. Tufvesson, “Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 2–3, pp. 108-120 (2011).
- Broch, A., S.K. Hoekman and S. Unnasch, “A review of variability in indirect land use change assessment and modeling in biofuel policy”, *Environmental Science & Policy*, Vol. 29, No. 0, pp. 147-157 (2013).
- Chan, Y., R. Tan and H. Khoo, “Characterisation framework development for the SIMPASS (Singapore IMPact ASSESSment) methodology”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17, No. 1, pp. 89-95 (2012).
- Cherubini, F. and S. Ulgiati, “Crop residues as raw materials for biorefinery systems – A LCA case study”, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 1, pp. 47-57 (2010).
- de Sá, S.A., C. Palmer and S. Di Falco, “Dynamics of indirect land-use change Empirical evidence from Brazil”, *Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment Working Paper No. 74* (2012).
- Dones, R., C. Bauer, R. Bolliger, B. Burger, M. Faist Emmenegger, R. Frischknecht, T. Heck, N. Jungbluth, A. Röder and M. Tuchschnid, “Life Cycle Inventories of

- 
- Energy Systems”, ecoinvent report No. 5 (2007).
- Dreyer, L., A. Niemann and M. Hauschild, “Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8, No. 4, pp. 191-200 (2003).
- EC-JRC, “Recommendations based on existing environmental impact assessment models and factors for life cycle assessment in European context - based on existing environmental impact assessment models and factors”, *ILCD Handbook EUR24571EN* (2011).
- Fargione, J., J. Hill, D. Tilman, S. Polasky and P. Hawthorne, “Land Clearing and the Biofuel Carbon Debt”, *Science*, Vol. 319, No. 5867, pp. 1235-1238 (2008).
- Fritsche, U.R., K. Hennenberg and K. Hünecke, “The iLUC Factor as a Means to Hedge Risks of GHG Emissions from Indirect Land Use Change”, Working Paper (2010).
- Gnansounou, E., L. Panichelli, A. Dauriat and J.D. Villegas, “Accounting for indirect land-use changes in GHG balances of biofuels”, Working Paper REF.437.101 (2008).
- Goedkoop, M. and R. Spriensma, “The Eco-indicator 99 A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment”, *Methodology Report 2nd Ed.* (2000).
- Guinée, J.B., M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A.d. Koning, L.v. Oers, A. Wegener Sleeswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H.d. Bruijn, R.v. Duin and M.A.J. Huijbregts, “Life cycle assessment - An operational guide to the ISO-standards Part 3: Scientific background”, *Final Report* (2001).
- Guinée, J.B. and R. Heijungs, “A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment”, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 14, No. 5, pp. 917-925 (1995).
- Haberl, H., “Human Appropriation of Net Primary Production as an Environmental Indicator: Implications for Sustainable Development”, *Ambio*, Vol. 26, No. 3, pp. 143-146 (1997).
- Haberl, H., K.-H. Erb and F. Krausmann, “Human appropriation of net primary production (HANPP)”, Entry prepared for the *Internet Encyclopaedia of Ecological Economics* (2007).

- 
- Hauschild, M., M. Goedkoop, J. Guinée, R. Heijungs, M. Huijbregts, O. Jolliet, M. Margni, A. Schryver, S. Humbert, A. Laurent, S. Sala and R. Pant, “Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 18, No. 3, pp. 683-697 (2013).
- Heijungs, R., J. Guinée and G. Huppes, “Impact categories for natural resources and land use”, CML report 138 (1997).
- Heijungs, R., J.B. Guinée, G. Huppes, R.M. Lankreijer, H.A. Udo de Haes, A. Wegener Sleswijk, A.M.M. Ansems, P.G. Eggels, R. van Duin and H.P. de Goede, *Environmental Life Cycle Assessment of Products. I: Guide - October 1992. II: Backgrounds - October 1992*, CML, Leiden (1992).
- Humbert, S., A. De Schryver, X. Bengoa, M. Margni and O. Jolliet, “IMPACT 2002+: User Guide”, Draft for version Q2.21 (2012).
- Humbert, S., M. Margni and O. Jolliet, “IMPACT 2002+: User Guide”, Draft for version 2.1 (2011).
- IEA-Bioenergy, “From 1st to 2nd Generation Biofuel Technologies - An overview of current industry and RD&D activities”, (2008).
- IEA-Bioenergy, “Bioenergy, Land Use Change and Climate Change Mitigation”, (2010).
- IEA, “Sustainable Production of Second-Generation Biofuels - Potential and perspectives in major economies and developing countries”, (2010).
- IEA, “Technology Roadmap - biofuels for Transport”, (2011).
- IPCC, “2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (2006).
- ISO, “Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework”, ISO 14040 2nd Ed. ISO 14040:2006(E) (2006a).
- ISO, “Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines”, ISO 14044 1st Ed. ISO 14044:2006(E) (2006b).
- Itsubo, N. and A. Inaba, “A new LCIA method: LIME has been completed”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 8, No. 5, pp. 305-305 (2003).
- Johnson, E., “Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right”,

- 
- Environmental Impact Assessment Review, Vol. 29, No. 3, pp. 165-168 (2009).
- Jolliet, O. and P. Crettaz, Critical Surface-Time 95: A Life Cycle Impact Assessment. Methodology Including Fate and Exposure, EPFL, Lausanne (1996).
- Jolliet, O., M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer and R. Rosenbaum, “IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 8, No. 6, pp. 324-330 (2003).
- Jungbluth, N., M. Chudacoff, A. Dauriat, F. Dinkel, G. Doka, M. Faist Emmenegger, E. Gnansounou, N. Kljun, K. Schleiss, M. Spielmann, C. Stettler and J. Sutter, “Life Cycle Inventories of Bioenergy”, ecoinvent report No. 17 (2007).
- Kohlheb, N. and F. Krausmann, “Land use change, biomass production and HANPP: The case of Hungary 1961–2005”, Ecological Economics, Vol. 69, No. 2, pp. 292-300 (2009).
- Lieth, H., “Primary production: Terrestrial ecosystems”, Human Ecology, Vol. 1, No. 4, pp. 303-332 (1973).
- Lindeijer, E., “Biodiversity and life support impacts of land use in LCA”, Journal of Cleaner Production, Vol. 8, No. 4, pp. 313-319 (2000).
- Lindeijer, E., M. van Kampen, P. Fraanje, H. van Dobben, G.-J. Nabuurs, E. Schouwenberg, D. Prins, N. Dankers and M. Leopold, “Biodiversity and life support indicators for land use impacts in LCA”, W-DWW-98-059 (1998).
- Liska, A.J. and R.K. Perrin, “Indirect land use emissions in the life cycle of biofuels: regulations vs science”, Biofuels, Bioproducts and Biorefining, Vol. 3, No. 3, pp. 318-328 (2009).
- Nemecek, T. and T. Kägi, “Life Cycle Inventories of Agricultural Production Systems”, ecoinvent report No. 15 (2007).
- O’Neill, D., P. Tyedmers and K. Beazley, “Human appropriation of net primary production (HANPP) in Nova Scotia, Canada”, Regional Environmental Change, Vol. 7, No. 1, pp. 1-14 (2007).
- Pawelzik, P., M. Carus, J. Hotchkiss, R. Narayan, S. Selke, M. Wellisch, M. Weiss, B. Wicke and M.K. Patel, “Critical aspects in the life cycle assessment (LCA) of bio-based materials – Reviewing methodologies and deriving recommendations”,

- 
- Resources, Conservation and Recycling, Vol. 73, No. 0, pp. 211-228 (2013).
- Pennington, D.W., J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg and G. Rebitzer, “Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice”, Environment International, Vol. 30, No. 5, pp. 721-739 (2004).
- Searchinger, T., R. Heimlich, R.A. Houghton, F. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes and T.-H. Yu, “Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change”, Science, Vol. 319, No. 5867, pp. 1238-1240 (2008).
- Sims, R.E.H., W. Mabee, J.N. Saddler and M. Taylor, “An overview of second generation biofuel technologies”, Bioresource Technology, Vol. 101, No. 6, pp. 1570-1580 (2010).
- Udo de Haes, H.A., M. Bovy, K. Christiansen, G. Finnveden, R. Frischknecht, J. Giegrich, M.Z. Hauschild, R. Heijungs, P. Hofstetter, A.A. Jensen, O. Jolliet, E. Lindeijer, R. Müller-Wenk, P. Nichols, J.M.B. Potting, H.W. Christensen and P. White, “Discussion of general principles and guidelines for practical use”, In: Towards a methodology for life cycle impact assessment, Brussels, Belgium (1996).
- Udo de Haes, H.A., O. Jolliet, G. Finnveden, M. Hauschild, W. Krewitt and R. Müller-Wenk, “Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment”, The International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 4, No. 2, pp. 66-74 (1999).
- Vitousek, P.M., P.R. Ehrlich, A.H. Ehrlich and P.A. Matson, “Human Appropriation of the Products of Photosynthesis”, BioScience, Vol. 36, No. 6, pp. 368-373 (1986).
- Wright, D.H., “Human Impacts on Energy Flow through Natural Ecosystems, and Implications for Species Endangerment”, Ambio, Vol. 19, No. 4, pp. 189-194 (1990).
- Yang, S.-S., C.-M. Liu, C.-M. Lai and Y.-L. Liu, “Estimation of methane and nitrous oxide emission from paddy fields and uplands during 1990–2000 in Taiwan”, Chemosphere, Vol. 52, No. 8, pp. 1295-1305 (2003).
- 台灣肥料公司，2012，農友牌肥料產品系列及主要作物施肥手冊。
- 行政院農業委員會，2008，97年農業統計年報。
- 吳文政、林國清，2001，水稻育苗介質之研發，台南區農業專訊，第36期，14-16。

吳富春、房志懿，2004，水田生態環境微氣候及二氧化碳流通量模式分析，行政院農業委員會專題研究計畫，93 農發-8.2-利-01。

林再遷、吳榮華、朱明昭、鄒若齊、張士桐、李輝隆、伏和中、童遷祥、陳逸偵、申永輝、廖峻德、唐自標、陳志恒、魏稽生、胡毅、賴錦文、溫紹炳、林景崎，2012，中華民國 100 年台灣鑛冶工業之進展（下），鑛冶：中國鑛冶工程學會會刊，第 53 期，第 3 卷，89-120。

馬鴻文、洪明龍、趙家緯、蘇俊賓、陳起鳳、張宇欣，2007，台灣永續廢棄物管理決策支援系統之建立—物質流、生命週期評估與環境風險評估之整合研究，行政院國家科學委員會專題研究計畫，95-2621-Z-002-013。

許富翔，2011，稻稈焙燒產製生質煤炭之生命週期評估，碩士論文，臺灣大學環境工程學研究所，臺北，臺灣。

陳朝圳、陳建璋、魏浚紘，建立台灣主要造林樹種之碳儲存推估系統，2011，台灣林業第 37 期，第 2 卷，10-15。

陳詩評，2008，評估臺灣以甘蔗製造之酒精燃料的溫室氣體排放，碩士論文，成功大學環境工程學系，臺南，臺灣。

黃建中，2005，生命週期衝擊評估之客觀權重方法，博士論文，臺灣大學環境工程學研究所，臺北，臺灣。

經濟部水利署，2010，99 年農業用水量統計年報。

經濟部能源局，2011，100 年能源統計手冊。

潘滢如，2008，台灣地區稻米生產之生命週期評估，碩士論文，臺北大學自然資源與環境管理研究所，臺北，臺灣。

蔣在文，2012，區域性水資源耗用之生命週期衝擊評估，碩士論文，臺灣大學環境工程學研究所，臺北，臺灣。