

第六章 第三階段：生命週期衝擊評估 (LCIA) - 核



心準則

生命週期衝擊評估是將生命週期盤查階段所彙整的量化物質與能量流，轉化為對環境潛在影響的關鍵步驟。此階段的核心在於建立盤查數據與環境影響之間的因果關係模型，使評估者能夠理解各項輸入與輸出對不同環境議題的相對貢獻。盤查分析提供了「有多少」的數據，例如排放了多少公斤的二氧化碳或消耗了多少立方公尺的水，但這些數據本身並未直接說明其環境意義。衝擊評估則透過科學模型，將這些離散的數據歸類並轉換為可比較的環境衝擊指標，從而回答「影響有多大」的問題。這個轉化過程使得決策者能夠超越單純的物質清單，進入到環境影響的評估層面，為後續的解釋與決策提供科學基礎。

在生命週期衝擊評估中，首先必須確立評估所涵蓋的環境影響類別及其對應的類別指標。影響類別是根據環境問題的科學共識所定義，例如全球暖化潛勢、酸化潛勢、優養化潛勢、臭氧層破壞潛勢、水資源耗竭等。每一類別都有一個特定的類別指標，用以量化該類別的衝擊。以最常見的全球暖化潛勢為例，其類別指標通常是以二氧化碳當量來表示，這意味著將不同溫室氣體（如甲烷、氧化亞氮）的輻射強迫效應，依據其在大氣中的存留時間與吸收紅外線的能力，轉化為相當於多少二氧化碳的暖化能力。這種標準化的指標使得來自不同過程、不同氣體的排放得以加總和比較，是進行跨類別或跨方案比較的基石。

為了將盤查數據中的各種物質流轉換為類別指標的貢獻值，需要依賴特徵化模型與特徵化因子。特徵化模型是描述特定物質如何導致特定環境影響的因果機制或經驗關係的數學表達。例如，在酸化潛勢的評估中，模型描述了硫氧化物、氮氧化物等物質排放到大氣後，經化學反應形成酸雨，並對土壤和水體造成酸化的過程。特徵化因子則是該模型產出的係數，它將一單位盤查物質（如一公斤的二氧化硫）轉換為對應於參考物質（通常是一公斤的二氧化硫當量）的衝擊潛勢。這些因子通常由科學機構或資料庫提供，並會隨著科學認知進步而更新。透過將每項盤查數據乘以其對應的特徵化因子，即可計算出該物質對各影響類別的貢獻值，此過程稱為特徵化。

生命週期衝擊評估的架構通常區分為中點水平與終點水平兩種路徑。中點水平評估聚焦於環境機制鏈中的某個中間節點，例如溫室氣體濃度增加、土壤酸度變化或水體中磷酸鹽濃度升高。這些節點距離盤查數據較近，科學上的不確定性相對較低，因果關係也較為明確。終點水平評估則試圖將衝擊進一步推導至最終對保護對象（如人類健康、生態系統品質、資源可用性）造成的損害程度。例如，將全球暖化潛勢連結到對人類健康損失的影響（如疾病負擔年數），或將水資源耗竭連結到對生態系統品質的損害。終點評估提供了更直觀的決策資訊，但由於環境機制鏈更長、更複雜，涉及更多的不確定性和價值判斷。在實務中，許多評估方法會同時提供中點與終點的指標，讓使用者能根據評估目的與對不確定性的容忍度來選擇使用。

6.1 LCIA 目的與強制性元素：盤查數據與環境影響類別的關聯。

生命週期衝擊評估是生命週期評估方法論框架中至關重要的第三階段，其主要目的在於將前一階段所蒐集與計算出的生命週期盤查數據，轉化為對環境影響的具體理解與量化指標。盤查分析階段產生了大量關於資源消耗與排放的數據，例如多少公斤的二氧化碳、多少立方公尺的水資源，或是多少克的特定化學物質。然而，這些原始數據本身並不能直接告訴決策者或研究者，這些輸入與輸出對環境系統的意義為何，也無法在不同類型的環境壓力之間進行比較。因此，LCIA 的核心任務，便是透過一套科學化的模型與分類系統，將這些離散的盤查數據歸類到不同的環境影響類別中，並計算出每個類別的潛在影響程度，從而將複雜的盤查數據轉譯為可解釋、可比較的環境衝擊輪廓。

為了確保生命週期衝擊評估的科學嚴謹性與結果的可比較性，國際標準 ISO 14040 與 14044 明確定義了 LCIA 必須包含的強制性元素。這些元素構成了 LCIA 階段的基本骨架，無論評估者選擇何種具體的衝擊評估方法或數據庫，都必須遵循此結構。首要的強制性元素是「選擇影響類別、類別指標及特徵化模型」。這意味著評估者必須明確界定本次研究將評估哪些環境問題，例如是聚焦於氣候變遷、水資源優養化，還是人體毒性。每一影響類別都需對應一個科學上公認的類別指標，例如氣候變遷類別通常使用全球暖化潛勢作為指標，並採用政府間氣候變化專門委員會

所發展的特徵化模型來計算。這個選擇過程必須與研究之初設定的目標與範疇緊密結合，確保所評估的影響類別能回應研究目的與利害關係人的關注點。

第二個強制性元素是「分類」。此步驟是將生命週期盤查清單中的每一項基本流，根據其對環境系統的潛在作用機制，分配至一個或多個預先選定的影響類別中。例如，甲烷排放會被分類至氣候變遷類別，因為它是一種溫室氣體；同時，若在特定模型下，它也可能被分類至光化學臭氧生成類別。分類的基礎是物質的環境歸宿與效應，這需要依賴既定的科學知識與數據庫中的分類資訊。此過程將看似無關的各種排放物與資源消耗，有系統地組織到幾個關鍵的環境議題籃子裡，為後續的量化奠定基礎。沒有經過適當的分類，盤查數據就只是一堆數字，無法與具體的環境問題產生關聯。

第三個強制性元素是「特徵化」。這是 LCIA 中最核心的量化步驟。在分類之後，特徵化旨在將分配至同一影響類別下的所有盤查數據，透過特徵化模型與特徵化因子，轉換為該類別的共通單位，從而匯總出一個單一的類別指標結果。特徵化模型描述了從盤查數據到潛在環境影響的因果鏈，例如描述溫室氣體如何吸收紅外線輻射導致全球增溫的模型。特徵化因子則是一個係數，用於將不同物質的排放量，轉換為與一個參考物質相當的影響潛勢。以全球暖化潛勢為例，二氧化碳的因子被定義為 1，而甲烷在百年時間尺度下的因子約為 25，意味著排放 1 公斤甲烷對全球暖化的潛在貢獻，相當於排放 25 公斤的二氧化碳。透過將每種物質的排放量乘以其對應的特徵化因子並加總，即可得到以二氧化碳當量表示的氣候變遷衝擊總值。這個步驟最終實現了將異質的盤查數據，整合為可解釋、可比較的環境衝擊分數。

除了上述強制性元素，LCIA 階段還包含一些可選的元素，例如歸一化、分組與權重。這些可選元素旨在進一步解釋特徵化後的結果，例如將某個產品系統的衝擊值與一個參考系統進行比較，或基於價值判斷對不同影響類別的重要性進行排序。然而，必須強調的是，這些可選步驟並非 LCIA 的核心，且涉及更多的主觀選擇，因此在應用時需要格外謹慎並保持高度透明。LCIA 的強制性元素確保了評估的科學基礎與客觀性，將盤查數據與宏觀的環境影響類別建立了清晰、可重複的關聯。這個轉譯過程使得決策者能夠超越繁雜的物質流清單，直觀地理解產品系統在氣候變遷、生態系統質量、資源消耗等關鍵面向上的表現，從而為生態設計、策略規劃或政策制定提供實質的科學依據。

6.2 影響類別與類別指標：如氣候變遷 (GWP)、臭氧層破壞 (ODP) 等。

生命週期衝擊評估的核心任務，在於將盤查分析階段所彙整的、種類繁雜的物質與能量輸入輸出數據，轉化為對環境影響的具體理解。此一轉化過程的基礎，便是建立一套系統性的影響類別架構。影響類別代表著一組特定的環境議題，例如氣

候變遷、酸化或優養化，這些議題是由於產品系統的活動對環境產生壓力所導致。每個影響類別都必須對應一個科學上可量化的類別指標，該指標用以衡量該類別環境影響的相對貢獻程度。透過這套架構，原本物理意義各異的盤查數據，例如二氧化碳、甲烷的排放量，或是磷酸鹽的排放量，得以被歸類並匯總到相應的影響類別中，從而提供一個關於產品系統潛在環境影響的全面性輪廓。

在眾多影響類別中，氣候變遷無疑是最受關注且方法學最為成熟的類別之一。其類別指標通常採用全球暖化潛勢，這是一種衡量特定溫室氣體在一定時間範圍內（常為一百年）相對於二氧化碳的輻射強迫能力。透過將各種溫室氣體（如甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物等）的排放量乘以其對應的全球暖化潛勢因子，便可將所有排放轉換為二氧化碳當量，從而計算出產品系統對氣候變遷的總貢獻。另一個歷史悠久的影響類別是平流層臭氧層破壞，其類別指標為臭氧層破壞潛勢，用以評估如氯氟烴、哈龍等物質對平流層臭氧的耗損能力，通常以CFC-11為參考基準進行當量化。

除了上述全球性影響，區域性或局部性的影響類別同樣至關重要。例如，酸化潛勢類別關注的是硫氧化物、氮氧化物及氨等物質排放到大氣後，經由濕沉降或乾沉降過程導致土壤與水體酸度增加的影響。其類別指標通常以二氧化硫當量表示，透過特徵化因子將不同酸性物質的酸化能力進行統一量化。與之相關的優養化潛勢類別，則評估氮、磷等營養物質進入水體後，導致藻類過度生長、耗盡水中氧氣並破壞生態平衡的影響。淡水與海洋優養化可能使用不同的指標物質（如磷酸鹽當量或氮當量）進行計算，反映了營養鹽在不同環境介質中的影響機制差異。

人體健康與生態系統品質的影響，則常透過毒性潛勢的評估來呈現。這類評估更為複雜，通常細分為人類毒性潛勢（癌症與非癌症效應）和生態毒性潛勢（淡水、海洋、陸域）。其類別指標的建立，需要綜合考慮污染物的排放、在環境中的命運與傳輸、暴露途徑以及最終的劑量-反應關係。因此，毒性潛勢的計算模型涉及大量的參數與不確定性，不同評估方法（如USEtox模型）可能產生差異化的結果。此外，光化學臭氧生成潛勢（亦稱夏季煙霧潛勢）是另一個重要的區域性空氣品質影響類別，它評估揮發性有機化合物與氮氧化物在陽光作用下生成地面臭氧（光化學煙霧）的能力，通常以乙烷或非甲烷揮發性有機化合物當量作為指標。

資源消耗是另一大類關鍵的環境影響。這不僅包括對化石能源、金屬礦物等不可再生資源的耗用，也逐漸涵蓋對水資源、甚至土地資源的佔用與競爭。類別指標的設計可能從不同的角度出發，例如以資源的採掘量（如公斤石油當量）、其熱值（如兆焦耳）、或是基於資源稀缺性的加權因子（如資源耗竭潛勢）來衡量。特別是水資源的使用，已發展出獨立的水足跡評估，考量水資源消耗對當地可用水量的壓力，區分為藍水（地表與地下水）、綠水（雨水）與灰水（污染稀釋所需水量）等不同面向。

在實際應用中，選擇哪些影響類別與類別指標進行評估，需視研究目標與範疇而定。國際標準與各國指引通常會提供一套建議的核心影響類別清單，例如歐盟的

產品環境足跡方法便規定了強制性的評估類別。這些類別指標的科學基礎不斷演進，其背後的模型會隨著氣候科學、毒理學與生態學研究的進展而更新。因此，進行生命週期衝擊評估時，必須明確說明所採用的影響類別架構、具體的類別指標及其版本來源，以確保評估結果的透明度、可比性與科學嚴謹性。這套將盤查數據系統性地連結至環境壓力的框架，為後續的特徵化計算、乃至於歸一化與權重分析，奠定了不可或缺的基礎。

6.3 特徵化模型與特徵化因子：將不同流轉換為共通單位。

特徵化模型是生命週期衝擊評估中，將盤查分析階段所蒐集到的各類環境交換數據，轉化為可量化且具比較意義的環境衝擊指標之核心計算工具。這些模型基於環境科學的因果鏈概念，建立從環境壓力因子到潛在環境影響之間的量化關係。例如，在氣候變遷此一影響類別中，盤查結果會列出多種溫室氣體的排放量，如二氧化碳、甲烷、氧化亞氮等。然而，這些氣體對全球暖化的貢獻能力各不相同，無法直接以質量單位相加。特徵化模型的作用，便是透過一套公認的科學模型，將每種溫室氣體的排放量，根據其輻射強迫效應與在大氣中的存留時間，轉換為相當於二氧化碳的當量值，此即為全球暖化潛勢模型。因此，特徵化是將異質的盤查數據進行同質化處理的關鍵步驟，使得來自產品系統不同階段的各種排放與資源消耗，能夠在統一的度量基準下進行匯總與比較。

特徵化因子則是特徵化模型中的具體轉換係數，它是一個將盤查數據中的「環境交換流」與「影響類別指標結果」連結起來的數值。每一個影響類別都有其對應的特徵化模型，並衍生出該類別下各種特定物質的特徵化因子。以臭氧層破壞潛勢為例，其模型考慮了不同臭氧耗損物質對平流層臭氧的破壞效率及其大氣壽命，從而為每種物質如 CFC-11、哈龍等賦予一個以 CFC-11 為參考的當量因子。這些因子通常由國際科學機構，如聯合國政府間氣候變化專門委員會或世界氣象組織，基於最新的科學共識進行訂定與更新。在實際操作中，執行 LCA 的研究人員或軟體工具，會將盤查數據中每一筆物質排放量或資源提取量，乘上其在對應影響類別中的特徵化因子，從而得到該物質對該影響類別的貢獻值，此過程稱為特徵化計算。

特徵化模型的建立依賴於複雜的環境機制研究與劑量反應關係，其科學嚴謹性直接決定了 LCIA 結果的可信度。這些模型可以分為兩大類：一是基於實證科學歸納出的經驗模型，例如許多毒性影響類別的模型，是透過實驗室生物測試數據外推而來；另一類則是基於對環境系統物理化學過程理解的機理性模型，如全球暖化潛勢模型便是建立在對大氣輻射傳遞的物理模擬之上。然而，無論哪種模型，都包含一定程度的不確定性和簡化假設。例如，區域性影響類別如酸化和優養化，其特徵化因子可能因排放地點的地理與氣候條件不同而異，但大多數通用資料庫僅提供全球或區域平均的因子，這便引入了空間代表性的不確定性。因此，理解所選用特徵化模型的背景、適用範圍與限制，對於正確解讀衝擊評估結果至關重要。

在實際應用中，研究人員通常依賴於內建於 LCA 軟體或標準化方法手冊中的特徵化模型套組，例如 CML、ReCiPe 或 TRACI 等方法。這些套組是一組經過協調、涵蓋多個影響類別的特徵化模型與因子的集合，確保評估的系統性與一致性。選擇不同的特徵化模型套組，可能會對最終的衝擊評估結果產生顯著影響，因為它們所基於的科學假設、時間尺度與空間層級可能不同。例如，對於生物資源的使用，有的模型僅考慮開採的能源消耗，有的則會納入對生態系統生產力的潛在影響。因此，在目標與範疇定義階段，就必須明確說明後續將採用哪一套特徵化模型與因子，並在生命週期解釋階段，探討此選擇對研究結論可能產生的敏感性。特徵化將龐雜的盤查數據凝煉為一系列環境衝擊的量化分數，為後續的歸一化、權重分析以及最終的解釋與決策提供了清晰的科學基礎。

6.4 中點與終點 (Midpoint vs. Endpoint) 水平：直接衝擊與最終損害的區分。

生命週期衝擊評估的核心任務，是將盤查階段所彙整的、種類繁多的環境交換數據（如二氧化碳排放、水資源消耗、重金屬釋放等），轉化為對環境影響的量化理解。為了達成此一理解，衝擊評估模型發展出兩種互補但概念不同的表述水平：中點水平與終點水平。這兩種水平構成了從環境干擾到最終損害的因果鏈條，其區分對於正確解讀評估結果、選擇適當的評估方法，以及與不同利害關係人進行有效溝通，具有至關重要的意義。

中點水平代表著環境機制因果鏈中的一個中間節點。它聚焦於單一的環境機制，將盤查清單中的物質流，透過特徵化模型轉換為對某個特定環境問題的潛在貢獻量。例如，氣候變遷潛勢即是一個典型的中點類別指標，它將各種溫室氣體（如二氧化碳、甲烷、氧化亞氮）的排放量，依據其全球增溫潛勢轉換為二氧化碳當量。其他常見的中點類別包括臭氧層破壞潛勢、酸化潛勢、優養化潛勢、光化學臭氧生成潛勢等。中點評估的優勢在於其科學基礎相對穩固，不確定性較低。因為從物質排放到引發中點效應（如輻射強迫增加、平流層臭氧濃度下降）之間的物理、化學機制，已有較為明確的科學共識與量化模型。因此，中點評估結果被視為客觀、可重複性高的科學指標，廣泛應用於產品比較、生態標章認證及政策制定中。

相較之下，終點水平則試圖描述環境干擾所導致的最終損害後果，這些後果通常與人類社會所關切的保護對象直接相關。主要的保護領域一般劃分為三類：人類健康、生態系統品質以及資源可用性。終點評估旨在量化環境壓力最終對這些領域造成的損害程度。例如，氣候變遷這個中點問題，在終點水平上可能轉化為對人類健康造成的疾病負擔（如熱壓力、傳染病擴散）、對生態系統造成的物種損失，或因海平面上升導致的土地資源喪失。終點評估需要將多個中點效應匯聚到同一個終點領域，並建立從中點到終點的損害路徑模型，這涉及更複雜的因果關係和更高的不確定性。

從方法論的角度來看，中點與終點評估的差異不僅在於所處因果鏈的位置，更在於其背後的建模哲學與應用情境。中點評估採取的是一種「問題導向」的途徑，它將環境影響分解為多個相對獨立的問題類別，便於識別產品系統在特定環境議題上的熱點。這種方式對於工程設計與製程改善特別有用，因為工程師可以明確知道是哪些排放物質、在哪個生命週段，對酸雨或優養化等問題貢獻最大，從而進行精準的改善。而終點評估則是一種「損害導向」的途徑，它試圖提供一個更整合的視角，將不同類型的環境壓力匯總到少數幾個終點領域，甚至透過權重進一步整合為單一指標。這種方式對於高層次的策略決策、成本效益分析，或向非技術背景的決策者與公眾傳達整體環境績效時，可能更具直觀性。

然而，終點評估面臨著顯著的科學挑戰與不確定性。從中點到終點的損害路徑往往漫長且複雜，涉及大量的社會經濟與生態系統參數。例如，同樣的二氧化碳排放量，對不同地區人口健康的影響，會因當地基礎設施、醫療水準、人口年齡結構而異；對生態系統的影響，則取決於當地的生物多樣性與生態脆弱性。這些地域化與情境化的變數，使得建立普適性高、精確度佳的終點模型極為困難。因此，許多終點評估方法，如 ReCiPe 或 IMPACT World+，會提供多套包含不同建模選擇與價值取向的版本，以反映這種內在的不確定性。

在實務應用中，選擇中點或終點水平，需緊密扣合研究目標與範疇定義中所設定的決策情境。若研究目的在於識別製程改善機會、符合特定法規要求，或進行產品層級的環境宣告，強調科學穩健性與透明度的中點評估通常是首選。若研究旨在支持宏觀的政策分析、永續投資決策，或需要向公眾傳達一個易於理解的整體環境得分，則經過謹慎解釋的終點評估可能更具參考價值。許多先進的衝擊評估方法學已將兩者結合，提供從中點到終點的完整架構，讓使用者能根據需求，在不同水平上檢視與解釋結果。理解這兩種水平的區別與聯繫，是進行嚴謹的生命週期解釋、避免誤解評估結果的關鍵基礎，並為後續的歸一化與權重步驟提供了必要的概念框架。