

# 環境生命週期評估

## 第一章 生命週期評估 (LCA) 導論



### 1.1 LCA 的歷史與演進：從 1969 年可口可樂研究到 ISO 標準的建立。

生命週期評估作為一種系統性的環境管理工具，其思想根源可追溯至二十世紀中葉工業社會對資源消耗與環境污染日益增長的關注。然而，具備現代雛形的首次系統性研究，普遍被認為是 1969 年由美國中西部研究所為可口可樂公司所進行的飲料容器評估。該研究旨在比較不同材質包裝（如玻璃瓶與塑膠瓶）的資源消耗與環境排放，其創新之處在於嘗試追蹤從原料開採、製造、運輸到最終處置的完整過程，而非僅聚焦於單一製造或使用環節。這項開創性工作雖然方法論上仍顯粗糙，數據也相對有限，但它確立了「從搖籃到墳墓」的系統性分析視角，為後續方法發展播下了關鍵的種子，並揭示了環境影響評估必須超越工廠圍牆，考量產品整個生命歷程的重要性。

整個 1970 年代至 1980 年代初期，生命週期評估的概念在學術界與工業界緩慢醞釀，並因能源危機而獲得進一步推動。各國政府與研究機構，特別是美國環境保護署與歐洲的一些研究單位，開始資助一系列針對能源與材料系統的類似研究，這些研究常被稱為「資源與環境概況分析」或「生態平衡」。此階段的特點是方法各異，缺乏統一的標準，研究重點多放在能源消耗與有限的幾種污染物排放上，且盤查數據的蒐集極為耗時費力。然而，這些探索性工作逐步累積了實務經驗，並凸顯

出建立一套共通語言與方法框架的迫切需求，以確保不同研究之間的可比較性與科學嚴謹性，避免因方法歧異導致結論矛盾。

1980年代末至1990年代初，隨著全球環境議題如臭氧層破壞、全球暖化與廢棄物問題進入公眾視野，生命週期評估迎來了第一個快速發展期。瑞士的環境毒理與化學學會在此時扮演了關鍵角色，於1990年開始組織一系列工作坊，致力於將散落各處的方法與經驗系統化。SETAC於1993年出版的「生命週期評估操作指南」被視為一個重要的里程碑，它首次提出了LCA的基本框架，將其結構化為四個相互關聯的階段：目標與範疇定義、盤查分析、衝擊評估及解釋。這份指南為當時混亂的領域帶來了秩序，促進了國際間的方法交流與共識形成，使得LCA從一系列個案研究，逐漸轉變為一門具有共同方法論基礎的學科。

國際標準化組織的介入，標誌著生命週期評估進入成熟與制度化的階段。ISO於1997年至2000年間發布了ISO 14040系列標準，包括ISO 14040（原則與框架）與ISO 14044（要求與指南）。這些標準吸納了SETAC等組織的前期成果，並將其進一步精煉與規範化。ISO標準的建立具有多重深遠意義：首先，它為LCA提供了全球認可的權威性方法論框架，明確了研究的原則、階段與最低要求，極大地提升了研究結果的可信度與可比性。其次，它將LCA與環境管理體系相連結，使其成為企業環境績效評估與生態設計的正式工具。最後，標準化過程本身促進了全球範圍內數據庫與評估方法的協調發展，為商業化LCA軟體與專業資料庫的興起奠定了基礎。

進入二十一世紀後，生命週期評估的應用範圍持續擴張，方法論也不斷深化。其演進體現在幾個主要方向：一是從單一產品評估擴展到更複雜的系統，如建築、社區乃至城市尺度，並發展出相應的專屬標準（如EN 15978）。二是衝擊評估模型日益精緻化，從早期的少數類別發展到涵蓋資源耗竭、生態毒性、人體健康、土地利用等數十種影響類別的中點與終點模型。三是數據可得性與質量大幅提升，得益於全球性商業與公共資料庫的建立，以及產業鏈環境數據透明化的趨勢。四是與其他工具整合，例如將LCA與成本分析結合為生命週期成本分析，或與社會評估結合為社會生命週期評估，邁向更全面的永續性評估。從1969年單一企業的包裝研究，到今日成為支撐綠色政策、生態標章、產品環境宣告與企業永續策略的基石科學工具，生命週期評估的歷史演進正是一部人類試圖以系統化、量化方式理解自身經濟活動與環境關聯，並尋求更負責任發展路徑的持續努力歷程。

## 1.2 定義與核心目的：評估產品、過程或服務整個生命週期的環境影響，避免負擔轉移。

生命週期評估是一種系統性的量化方法，旨在評估產品、過程或服務從原材料取得、生產製造、分銷運輸、使用維護到最終廢棄處理或回收再利用等所有階段的潛在環境影響。其核心定義在於採取一種全面且連貫的視角，將研究對象視為一個嵌合於複雜工業與生態網絡中的系統，而非孤立的存在。這種方法論的建立，是為

了回應傳統環境管理工具往往只聚焦於單一地點或單一過程的局限性，例如僅關注工廠端的排放或產品使用階段的能耗，而忽略了上游的原料開採或下游的廢棄物處理所帶來的環境負荷。透過 LCA，決策者得以洞察環境影響在產品系統內部的轉移現象，例如為了降低使用階段的能耗而採用某種高效能材料，卻可能導致該材料在生產階段消耗更多能源與資源，甚至產生更難處理的廢棄物。因此，LCA 的根本目的不僅是計算總影響，更在於揭示這些隱藏的權衡與取捨，避免決策過程中無意間將環境負擔從一個生命週期階段轉移到另一個階段，或從一種環境問題轉移到另一種問題。

LCA 的核心目的可以進一步細分為幾個相互關聯的層面。首先，它提供了一個客觀的比較基礎，使不同產品或技術方案能在同等功能基礎上進行環境績效的對比。這對於生態設計、綠色採購或政策制定至關重要，因為它超越了單一屬性的宣傳，例如「可回收」或「節能」，轉而提供一個全面的環境剖面圖。其次，LCA 旨在識別產品系統中的環境熱點，即那些對整體環境影響貢獻最大的過程或物質流。這有助於企業或組織將有限的資源與改善措施精準地投入最具減量潛力的環節，從而實現最有效的環境效益。再者，作為一種決策支持工具，LCA 的結果能夠為產品開發、流程優化、策略規劃乃至公共環境政策的制定提供科學依據，促進更具永續性的選擇。最後，透過標準化的框架與透明的報告，LCA 有助於提升企業的環境資訊透明度，滿足供應鏈客戶、消費者及投資者日益增長的環境資訊需求，並支持如環境產品宣告等溝通工具。

「避免負擔轉移」是 LCA 方法論中一個至關重要的指導原則與核心目的。負擔轉移可能發生在多個維度上，包括生命週期階段的轉移、地理空間的轉移、環境影響類別的轉移，以及社會經濟層面的轉移。階段轉移是最常見的一種，如前所述，改善一個階段的性能可能惡化另一個階段的表現。地理轉移則可能發生於將高污染工序外包至環境法規較寬鬆的地區，從全球視角看，總環境影響並未減少，只是轉移了地點。影響類別轉移則涉及不同類型環境問題之間的取捨，例如為了減少溫室氣體排放而推廣生質燃料，卻可能導致水資源消耗加劇或生態毒性增加。LCA 透過其系統邊界的完整性要求，力求納入所有相關的過程與流，並透過生命週期衝擊評估階段，同時評估多種環境影響類別，從而系統性地揭露這些潛在的轉移風險。這使得決策者能夠在更全面的認知下，評估所謂的「綠色解決方案」是否真的在整體上對環境更友善，抑或只是轉移了問題。

要實現上述定義與目的，LCA 必須建立在幾個關鍵概念之上。其一是「從搖籃到墳墓」或更理想的「從搖籃到搖籃」的系統邊界思維，確保評估的完整性。其二是「功能單位」的定義，它為不同系統的比較提供了公平的基準，例如比較紙杯與陶瓷杯時，功能單位可能是「盛裝 200 毫升熱咖啡一次」，這確保了比較是在提供相同服務的基礎上進行。其三是對「產品系統」的建模，將實現該功能所涉及的所有單元過程及其間的物質與能量流動描繪出來，形成一個相互關聯的網絡。這些方法論要素共同作用，使 LCA 有別於單點評估，成為一個強大的系統分析工具。然而，也正因其系統性與複雜性，執行一項嚴謹的 LCA 需要大量的數據、明確的假設

與專業的判斷，其結果的解釋也必須謹慎，需充分理解研究的前提與限制。這也引出了後續章節將詳細探討的 ISO 標準框架，該框架正是為了規範 LCA 的執行，確保其科學性、透明度與可比性，從而真正達成其核心目的。

### 1.3 生命週期思維 (Life Cycle Thinking)：從搖籃到墳墓 (Cradle-to-Grave) 的系統觀點。

生命週期思維是一種根本性的系統觀點，它要求我們在評估任何產品、服務或系統的環境影響時，必須超越單一、孤立的階段或過程，轉而檢視其從資源開採到最終廢棄處理的完整歷程。這種思維方式的核心在於認識到環境影響並非集中於某個特定環節，而是分散並潛藏於整個價值鏈之中。例如，一個看似節能的電器，其製造過程可能消耗大量能源與稀有金屬，而最終的回收處理若不當，亦可能造成土壤或水體污染。因此，僅關注使用階段的能耗，而忽略上游生產或下游廢棄階段的影響，將導致決策的偏誤與環境負擔的無意轉移。生命週期思維正是為了克服這種片面的視角，提供一個全面、連貫的分析框架，確保所有潛在的環境交換與衝擊都能被納入考量，從而支持更為永續的設計、生產與消費選擇。

「從搖籃到墳墓」是生命週期思維最具象的比喻，它描繪了一個線性且完整的系統邊界。所謂「搖籃」，指的是自然資源的開採或原料的初級生產階段，例如礦石開採、原油萃取或農作物種植。接著，這些原料經過加工、製造、組裝成為產品，並透過配送與銷售網絡到達消費者手中。產品在「使用階段」可能消耗能源、水或其他輔助材料，並可能產生維護需求。最終，產品達到其生命終點，進入「墳墓」階段，即廢棄、處理、回收或最終處置。這個完整的脈絡強調了各個階段之間的相互關聯性：上游的設計選擇會深刻影響下游的效能與終結處理方式；而下游的回收基礎設施與技術，也會反過來影響上游對材料選擇的決策。例如，設計一個易於拆解回收的產品，雖然可能增加些許製造成本，卻能大幅降低其生命終點對環境的衝擊，並可能回收有價值的材料重新投入搖籃階段，形成潛在的循環。

然而，隨著循環經濟理念的興起，更為積極的「從搖籃到搖籃」概念也逐漸融入生命週期思維之中。此概念挑戰了傳統線性「墳墓」的終點，主張應將廢棄物視為資源，透過設計使材料能在生物循環或工業循環中無盡循環。在生命週期評估的實踐上，這意味著系統邊界可能需要擴展或改變。例如，在評估一個採用回收鋁材製造的產品時，其「搖籃」可能不是鋁土礦的開採，而是報廢產品的回收站。系統邊界需要納入回收過程的能耗與排放，並透過適當的分配方法，將部分環境負擔歸屬於前一個生命週期。這種思維促使評估者不僅關注如何減少線性過程中的負面影響，更進一步思考如何透過閉環設計，創造正面的環境效益。它將生命週期從一條有終點的線，轉變為一個可能不斷循環的圓，要求評估方法更具動態性與前瞻性。

將生命週期思維應用於決策過程中，能有效避免問題轉移或次優化解決方案。常見的環境管理失誤，即是為了解決某個階段的問題，卻在無意中加劇了其他階段

的影響。例如，為了減輕車輛使用階段的化石燃料消耗與空氣污染，轉而推廣電動車。若僅聚焦於使用階段的尾氣排放為零，便可能忽略電動車電池生產所涉及的高能耗、稀有金屬開採的社會環境成本，以及電力來源若為燃煤發電所導致的間接排放。唯有透過生命週期思維進行全面評估，才能比較電動車與內燃機車在整個生命週期中的淨環境效益，並識別出真正的關鍵改善領域，如推動電網脫碳與建立高效的電池回收體系。這種系統性比較是理性環境決策的基石，確保改善措施是整體環境績效的淨提升，而非僅僅將污染從一個地點、一種介質或一個時間點，轉移到另一個地方。

在組織與政策層面，生命週期思維的導入意味著管理範疇的擴展與協作需求的提升。企業不再能僅滿足於優化自身工廠圍牆內的環境績效，而必須與上游供應商及下游客戶合作，共同管理整個價值鏈的影響。這催生了產品環境宣告、綠色採購準則以及延伸生產者責任等制度。對政策制定者而言，制定法規或獎勵措施時，也需基於生命週期思維，以避免制定出鼓勵「漂綠」或產生意外後果的政策。例如，對生物塑膠袋的獎勵政策，若未考慮其原料（如玉米）種植所需的農地、水資源、化肥及可能涉及的糧食競爭問題，以及其工業堆肥設施的普及率，則其整體環境效益可能遠低於預期。因此，無論是企業策略還是公共政策，生命週期思維都提供了一個至關重要的框架，引導各方從更宏觀、更長遠的系統角度，權衡利弊，追求真正的永續性。

## 1.4 永續發展與 LCA 的關聯：應對氣候變遷與資源枯竭的決策工具。

永續發展的核心目標在於滿足當代需求，同時不損及後代滿足其自身需求的能力。這項宏觀理念具體落實在環境層面，便是應對氣候變遷、資源枯竭、生物多樣性喪失等全球性挑戰。然而，永續決策常面臨一個根本困境：如何避免在解決一個環境問題時，無意間加劇另一個問題，或將環境負擔從一個生命週期階段轉移到另一個階段，或從一個地理區域轉移到另一個區域。生命週期評估正是為了解決此一困境而發展出的關鍵決策支持工具。它提供了一個系統性、量化且科學化的框架，使決策者能夠超越單一議題或局部階段的視角，全面評估產品、服務或系統從資源開採、製造、運輸、使用到最終廢棄處理的整個生命歷程中所產生的環境影響，從而識別真正的環境熱點，並支持更具永續性的設計與選擇。

氣候變遷作為當前最迫切的全球環境議題，其緩解策略的制定尤其需要生命週期評估的輔助。例如，評估一種被宣稱為低碳的替代能源技術，若僅考慮其使用階段的零排放，而忽略其製造過程中所消耗的能源與材料、基礎設施建設的影響，或是其廢棄處理的難題，便可能得出過於樂觀甚至誤導的結論。LCA 能夠系統性地計算從「搖籃到墳墓」的溫室氣體排放總量，即碳足跡，從而比較不同技術方案的真實氣候效益。這對於政策制定至關重要，例如在推動電動車、氫能經濟或生物燃料

時，LCA 有助於釐清這些技術在整個生命週期下是否確實比傳統化石燃料方案更能減少溫室氣體排放，避免因狹隘的系統邊界而導致「碳洩漏」或負擔轉移。

資源枯竭問題，包括礦物、金屬、水資源及化石燃料的過度消耗，同樣需要生命週期思維來應對。線性經濟「開採-製造-丟棄」的模式被認為是資源壓力的主要驅動力。LCA 透過盤查分析，能夠詳細追蹤產品系統對各種自然資源的消耗量，並在衝擊評估階段將其轉化為對資源稀缺性的潛在影響指標。這使得企業在進行生態設計或材料選擇時，不僅能考慮材料的性能與成本，更能評估其資源效率與長期可得性。例如，在電子產品設計中，LCA 可以幫助識別哪些稀有金屬的使用構成關鍵的資源風險，從而推動材料回收、輕量化設計或替代材料的研發，促進循環經濟的實踐，從源頭減少對初級資源的依賴。

在企業策略與政策層面，LCA 已成為實踐永續發展不可或缺的工具。企業透過進行 LCA，可以識別其產品價值鏈中的環境熱點，從而優化生產流程、選擇更環保的供應商、開發環境績效更佳的产品，並據此進行可信的環境溝通，如發布環境產品宣告。在政策領域，許多環境標章與綠色採購規範，如歐盟的生態標章或各國的綠色公共採購，其標準的制定都依賴於 LCA 的研究成果。此外，諸如歐盟的產品環境足跡倡議，更是旨在建立統一的 LCA 方法學，以提供可比較的產品環境資訊，引導市場向永續消費轉型。這些應用都體現了 LCA 如何將抽象的永續發展原則，轉化為具體、可操作的評估指標與管理行動。

儘管 LCA 是強大的工具，但其在支持永續決策時也需認識到自身的局限性。永續發展包含環境、社會與經濟三大支柱，而傳統 LCA 主要聚焦於環境層面。雖然社會生命週期評估與生命週期成本分析正在發展中以補足另外兩個面向，但整合性評估仍具挑戰。此外，LCA 是一種相對評估工具，其結果高度依賴於設定的系統邊界、功能單位和所選的衝擊評估方法。這意味著不同的假設可能導致不同的結論，因此透明度與關鍵審查在 LCA 研究中至關重要，以確保其結果能為永續決策提供穩健的科學依據。最終，LCA 的目的並非提供一個絕對的「綠色」答案，而是透過系統性的分析，揭示權衡取捨，減少決策中的不確定性，引導我們朝向更具資源效率、更低環境衝擊的發展路徑前進。