

第五章

人類與熵

羅馬俱樂部在 20 世紀 70 年代初提出了它的第一份研究報告《增長的極限》，揭開了人們對以 GNP 增長為核心的經典發展方式的全面懷疑。這份報告發表之後，引起了廣泛而激烈的爭論。差不多在十年之後，《熵：一種新的世界觀》（以下簡稱《熵》）於 1981 年在美國問世。這本書的作者以一種極其徹底的態度，用熵定律對人類經濟社會迄今為止的發展過程及其後果和趨勢作了大膽而全面的探討和評價，並由此得出了很多驚人的結論和判斷，同時提出了很多具有普遍意義的問題。鑒於這些問題的深刻程度和廣泛程度，本書難作全面探討。本章僅從下述三個方面展開討論。第一，首先對該書的主要觀點作一簡要概述，並提出該書的不足之處；第二，對熵的各種含義作出盡可能清楚的說明，並指出其與人類經濟社會的生存、發展的關係；第三，分析人類社會的活動對熵的影響。

◎ 風波再起

《熵》所探討的問題絕大部分在近二三十年中已為各種學者從各個側面做過分析。但該書的獨到之處在於：依據熱力學第二定律，把有關人類生存和發展的幾乎所有重大的問

題統一起來進行了分析，再一次挑起了對人類發展的全面討論。《熵》把熱力學第二定律發揮到如此徹底的程度，實屬罕見。下面我們就來看看該書作者的主要觀點。

該書的主要前提是：地球實際上是一個封閉系統，它和太陽交換能量，但由於種種實際原因，極少和太陽系的其他部分交換物質。

在這個主要假定或前提下，該書作者把熱力學第二定律推廣到整個地球以及在地球上生存和發展的人類社會的各個側面（如經濟的發展，思維的發展……）。

由於熱力學中的熵是不能再被轉化為作功的能量總和的測度。因此，當能量從一種狀態轉化到另一種狀態時，我們會受到一定的懲罰，也就是說我們損失了一定數量的能在將來用以作某種功的能量。熵向我們表明，物質與能量只能沿著一個方向轉換，即從可利用到不可利用，從有效到無效，從有序到無序。熵的增加，意味著有效能量的減少；被轉化成無效狀態的能量構成污染。污染是熵的同義詞。

據此，傳統的機械論世界觀——我們積累的物質財富越多，世界就必然越有秩序、越進步——應予以拋棄。

該書認為，熵定律是客觀存在的，人類社會是無從規避的。它存在於我們生活的每一方面，成為人類一切活動的基礎。人類歷史也是熱力學第二定律的反映，人類歷史的變更原因是現存能源的耗散，而不是財富的積累。因此，熵定律摧毀了傳統的關於歷史是進步的觀念，認為歷史實際上是一個不斷倒退、衰亡的過程；同時認為，人類思想發展也不見得是一個進步過程，而是正朝著更加複雜、抽象和浪費的狀態發展。

一切生命的基礎最初來自太陽的能量。因此，生命也不能逃脫熵定律。有機體通過從環境中吸取負熵藉以生存

和進化，並不斷從環境中攝取秩序。如此，熵定律就表明了這樣一條真理：所謂進化，便意味著為建立愈加有序的孤島，必然導致其周圍的熵海洋的波濤愈加洶湧。

熵定律也推翻了關於依靠科學與技術建立起一個更有秩序的世界的觀念。熵定律認為，技術不過是能量轉化器，技術的變革增加了產品輸入功，加快了熵過程和周圍世界的混亂；世界的現代化程度越高，混亂程度就越大。技術社會的指數增長正是一張通向生命和地球俱告毀滅的單程車票。

經濟的和政治的機構和組織也是能量的轉化器，它們的職能是促進社會的能量流通。不斷成長和加快的能量流通總是加快熵過程，增加混亂的積累，並導致機構和組織的複雜化。增長並不意味著給世界帶來更大的價值或秩序，而是適得其反。熵定律表明，經濟增長越快，離末日就越近。熵定律是各種經濟活動的主導原則。目前的經濟學理論解決不了世界經濟面臨的日益嚴重的危機。如果我們認識不到這個原理，並以此調整經濟政策，那麼地球將更快地蒙受經濟和生態災難。

熵定律最終將控制著政治制度的興衰、國家的自由與奴役、商務與實業的命脈、貧困與富裕的起源，以及人類的禍福。《熵》最後的結論是：只有當我們承認自己世界的有限性，有意識地尊重地球資源的極限，我們才能真正領會到地球的寶貴，從而做出對人類繼續生存有重大意義的調整。我們的生存，以及所有其他形式生命的生存，都取決於我們與自然的和解、與生態系統和平共處的決心。如果我們一意孤行，繼續用我們的殖民方式摧毀地球上的一切，那麼人類總有一天會走上窮途末路，那時我們就會大難臨頭。無論願意與否，我們已不可挽回地走向低能耗社會。低熵社會採用合適的或適中的技術，工業生產

和服務行業規模受到大幅度削減，跨國公司的統治被結束。這裡，有兩條路可供我們選擇：一是我們理解並自覺地進入低熵（或低能耗）社會；一是我們死死抱住現有的機械論世界觀不放，從而到頭來被迫痛苦地進入低能耗社會。

我們的世界觀和社會傳統正經歷一場作繭自縛的痛苦。極目四望，世界的熵已增大到驚人的程度，正在走向歷史性熵臨界線的邊緣。在相當複雜的混亂中，我們掙扎著保全自己。我們勢必要進行一場大規模的制度改革，我們的制度及形式、目的、目標和運轉方式，都得發生急劇的變化。

此外，作者還對第三世界國家提出這樣的告誡：第三世界不應再奢望達到近幾十年來美國的豐富物質水平，其他地區也不可能像美國那樣發展。窮國若走上美國經濟工業化的老路，由於熵過程加快接近臨界線，這些國家經濟政策的這種失誤，會把自己國家和整個星球引向災難。第三世界國家應當尋求不同於西方工業化國家的發展模式，高能、高集中化的技術應讓位於適用技術。只有全面地安排經濟發展的輕重緩急，第三世界才能成功地發展。

以上就是《熵》書的主要觀點和結論。該書作者以大量的資料、數據和處處可見的驚人之筆，簡潔、徹底、系統地討論了各種重大問題。不僅如此，作者在書中宣稱，以牛頓為代表的機械論世界觀行將滅亡，指出人類科學技術的發展，正在產生比它「創造」出來的「財富」更多、更有害於人類的「垃圾」和污染。人們只有以熵定律作為新的世界觀來考查社會的各個方面，才能減慢熵的增長和延緩走向「熱寂」的速度。此外，作者還以熵定律為依據，探討了哲學、經濟、政治、文化、教育、宗教等領域過去、現在和未來的重大問題。《熵》書見微知著，見解

深邃，讀來實在令人深思。

對於該書的主要觀點和結論，仁者見仁，智者見智。我們認為，該書最可取之處在於以一種徹底的手法，使人們不得不面對人類社會迄今為止所經歷過的變化（或稱為進步）及為此付出的代價。

當人們看清了為得到這種進步所付代價的所有含義時，就不得不承認這種進步並不像原來所想像的那樣輝煌，而是蒙上了一層不祥的陰影，從而要打不少的折扣。這通過下面的一筆賬就可看出。

1987年世界人口達到50億。假設到21世紀末此數不變（這肯定是一個過低的估計），假設那時世界人均GNP相當於日本1980年的水平（美國1970年的水平），即人均GNP4800美元（1970年美元），則到21世紀末這50億人口的總GNP相當於50個1980年的日本（日本1980年人口約1.1億）。由於人均GNP達到4800美元（1970年美元）時，在各發達國家中日本的物資消耗量最低，僅為美國的一半左右，所以在21世紀末全球物資消耗量可折合成12個美國的（1970年的）物資消耗量。再假設從21世紀末開始，世界經濟的增長以每年1%的物資消耗增長率為依據，則五百年後（即26世紀末）的物資消耗水平為21世紀末的128倍，相當於1536個（1970年）美國的消耗量。美國在1970年消耗了世界資源產量的三分之一，則26世紀末世界資源年消耗量為1970年的五百倍。

在這五六百年間，對於地球的地質活動來說，絕不可能合成多少對人類有意義的資源。因此，從人類的長期發展來看，物質消耗的零增長絕非聳人聽聞的悲觀論調，相反倒有些過於樂觀了。看來在某一時期之後，物質消耗逐年下降才是更為現實的道路（至少在一段時間內）。從這個意義上說，該書的基本觀點——對目前以存量技術為

主要技術基礎的經典發展方式的全面批判——是站得住腳的，此其一。

另外，該書作者對想用新型的高技術來挽救和維持經典發展方式（其主要基礎是存量資源）的批判，我們認為也是基本上站得住腳的。因為這只是改變了能量獲得方式（如採用微波、核能、氫能、生物技術等），而只要經典發展方式不變，它所對應的能量傳輸、使用過程——汽車、高速公路、摩天大樓、空調等——就不會有根本的變化。因此，就算能量的取得不依賴於石油或煤炭——不可更新的不能重複利用的物質資源，但使用能量的過程仍在大量吞沒著不可更新的、難以完全重複利用的物質資源——非能源礦物（如銅、鐵、鋅、鎳、鋁）。因此，想用新技術走老路，同樣不可能長期行得通。這通過上述的那筆賬目便可一目瞭然的。總之，物質財富高速增長的道路或模式行將就木的日子不會太遙遠了。此其二。

但是，該書作者把人類的一切發展都看成是熵增加過程的觀點，則令我們不敢苟同，而且在某些分析和結論中，還隱含著一些危險的含糊之處，破綻頗大。我們認為，這是該書的主要問題。例如，該書作者認為，自然界從一個有序狀態日益走向無序狀態。在後面，我們將會看到這個結論的根據不足。

對此，我們必須對熱力學中的熵及其各種推廣中的不同具體含義，作出盡可能清楚的說明和限制，才能看出各種推廣的有效性。

◎ 熵增原理

「熵」本是熱力學中的一個概念，是對分子運動無序

程度的量度。但近來這個概念已在社會科學的各種文獻中頻繁出現，而且其具體含義在各種不同場合頗有差別。因此，首先應對其原意加以說明，然後才能看清它在各種推廣下的有效性。

能量守恆定律構成了熱力學第一定律，指出機械功必須由能量的轉變獲取，因此否定了創造機械功的所謂第一類永動機的可能。但是，它對於熱能轉變為機械功並未加以任何限制，也就是說能量守恆定律沒有排除第二類永動機的可能，例如，能否利用一池沒有溫差的水來單獨作功。

開耳芬（原名湯姆遜，1824~1907年）在1848年根據卡諾在1824年所發表的定理，規定了絕對溫標，指出從單一熱源取出熱量來完全變為機械功而不附帶其他效果——所謂第二類永動機——的不可能性。克勞修斯（1822~1888年）又在1850年根據同一定理建立了熱力學第二定律。上述兩個定律組成了完整的熱力學系統。

後來，玻爾茲曼（1844~1906年）系統地運用統計的概念和方法作為理論基礎，引入了體系的微觀狀態的概念和體系在某一微觀狀態的幾率的概念，把體系的宏觀平均態視為它的微觀狀態的平均，因而能正確地作出熱力學第二定律的統計理解。

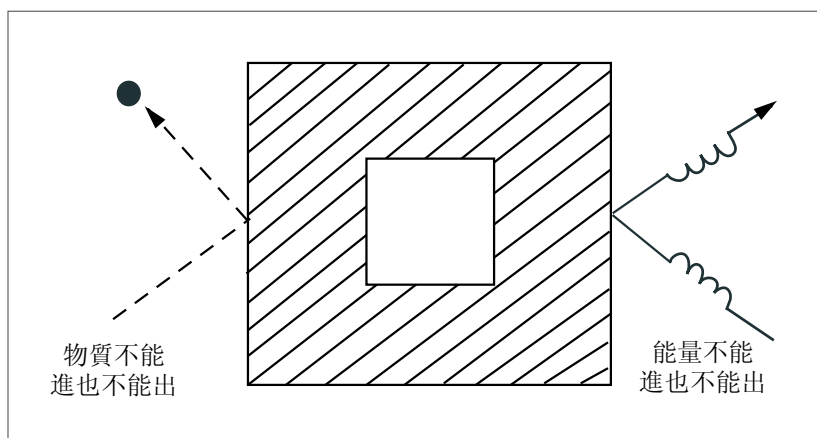
換言之，要把能量轉化為功，在一個系統的不同部分之間就必須有能量集中程度的差異（即溫差）。當能量從一個較高的集中程度轉化到一個較低的集中程度（或由較高溫度變為較低溫度）時，就說它作了功。更重要的是，每次能量從一個水平轉化到另一個水平時，都意味著下一次能再作功的能量減少了。例如，河水越過水壩流入湖泊，當河水下落時，它可被用來驅動水輪機發電，或作其他形式的功，然而水一旦落到壩底，就處於不能再作功

的狀態了。在水平面上，沒有任何勢能的水是連最小的輪子也帶不動的。這兩種不同的能量狀態分別被稱為「有效的」或「自由的」能量（有落差的水），和「無效的」或「封閉的」能量（沒有落差的水）。

熵的增加就意味著有效能量的減少。根據熱力學第一定律，能量既不能產生又不會消失，而根據熱力學第二定律，能量只能沿著一個方向——即耗散的方向——轉化。因此，熵是某一系統中存在的一定單位的、無效能量的度量。下面我們將在稍微嚴格一點的基礎上，對此多做些分析。

開放系統與耗散結構 可以這樣說，任何系統都可由孤立性、封閉性和開放性做出區分。孤立系統是與外界既沒有物質交換，又沒有能量（及信息）交換的系統（見圖~7）。嚴格地說，世界上不存在真正的孤立系統，只有近似的孤立系統。

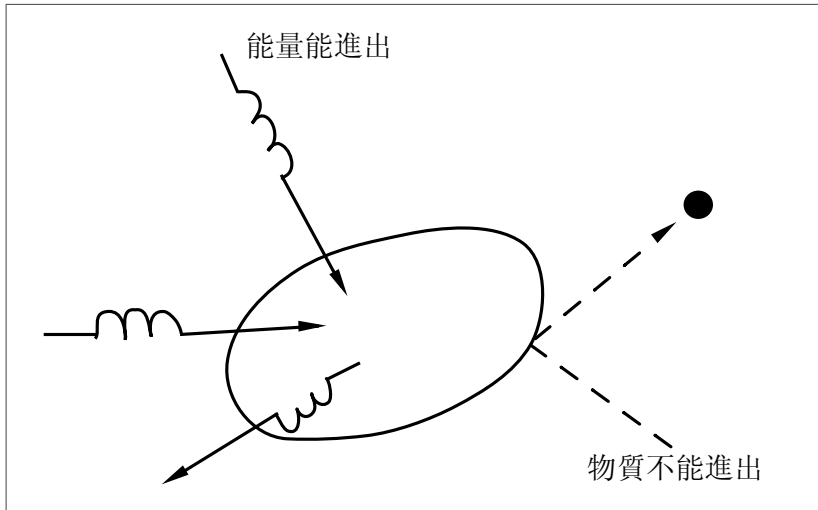
圖~7：孤立系統



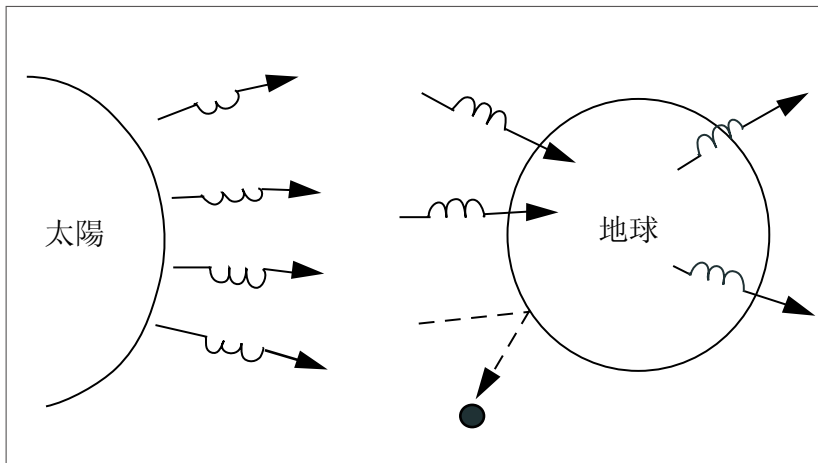
封閉系統是與外界有能量（及信息）交換，但沒有物質交換的系統（見圖~8）。如果我們忽略隕落的流星和宇

宙塵埃，地球就可以看成是一個封閉系統。地球接收到太陽和其他天體的輻射，而它自己又向星際的輻射冷區進行輻射（見圖~9）。自然，如果我們把生活在地球上的人類和地球一起看成一個複合系統，那麼這個大系統也可近似地看成是一個封閉系統。

圖~8：封閉系統

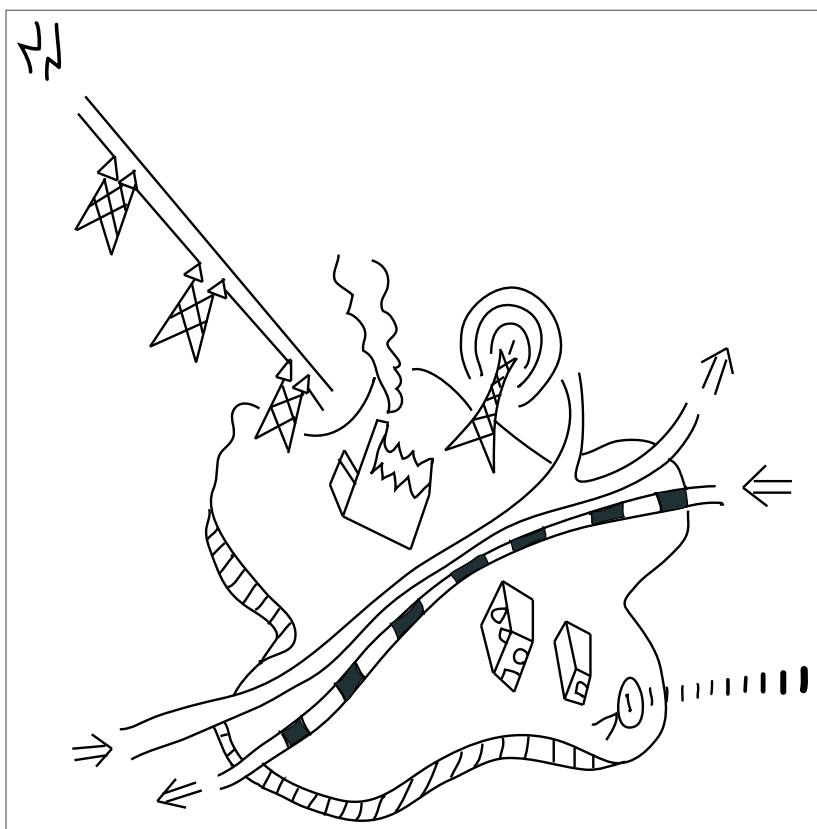


圖~9：地球近似地是一個封閉系統



開放系統是一種與外界自由地進行物質和能量（及信息）交換的系統。例如，城市就是一個典型的開放系統（見圖~10）。顯然，它既是一個輸進食物、燃料、建材、各種信息等等的中心，同時它又送出製成的產品及廢料。任何一個現代企業都是一個開放系統。

圖~10：城市——一個開放系統



近年來興起了一門新學科——耗散結構理論，其主要研究對象就是開放系統。在宇宙中的各種系統，無論是有生命的還是無生命的，無論是自然的還是社會的，實質上無一不是與周圍環境有著相互依存和相互作用的開放系統。

耗散結構的概念是相對於平衡結構的概念而提出的，它的嚴格的本義來自於物理學（即非平衡態熱力學）。長期以來，在物理學中人們研究的主要對象是平衡系統的穩定有序結構，例如晶體的平衡結構。在溫度比較低的條件下，構成這種系統的分子有序地排列著，並且保持著一種穩定的結構。這時，系統內部的熱運動只能使分子在平衡位置附近振動，而不能破壞系統的整體有序狀態。只有當溫度不斷增加並達到一定的臨界點時，原有的穩定有序狀態才會遭到破壞，產生相變（即結構的改變）。例如，晶體（固相）變成液體（液相），再變成氣體（氣相），整個系統由平衡的穩定有序狀態轉變成不穩定的相對無序的混亂狀態，或變成穩定的有序程度較低的平衡狀態。這些都是從有序到無序的物理現象。有關它們的運動機制和穩定性等問題，一般以平衡態熱力學（及其拓廣）就可以處理了。然而，有關非平衡態以及從無序到有序的機制問題，就要求助於新的方法了。

在人們通常的想像中，一般總認為系統若處於一種混亂的非平衡狀態，是不可能自發地形成一種穩定的有序結構的。傳統的熱力學定律也是如此。但是，耗散結構理論的創立者普里高津卻指出，一個遠離平衡的開放系統，通過與外界不斷地交換能量和物質，可以在一定條件下產生自組織現象，形成新的穩定的有序結構，實現無序向有序、較低程度的有序向較高程度的有序的轉化。這種非平衡態下的新的穩定有序結構，被普里高津等人稱之為耗散結構（有時也稱為恆定開放系統）。用「耗散」這一詞的含義在於指出系統要不斷地消耗能量。這種有序穩定結構與平衡結構不同。穩定的平衡結構（如晶體）或不與外界交換物質和能量，或不改變內部的運動格局（保持變量數及變量間的關係），可以說是一種靜止的穩定平衡狀態，

是一種永遠不變的「死」結構。而耗散結構卻隨時與外界交換能量和物質（否則，這種結構就無法保持下去），其內部的運動格局也有所改變，可以說是一種動態的穩定有序結構。它充滿生機，是一種「活」的穩定有序結構。生命就是一種遠離平衡態的高度有組織的有序結構，它要不斷地新陳代謝、吐故納新，才能存在、延續和發展。

進化與熵 有序現象和無序現象是自然界和社會經濟中普遍存在的一對矛盾。過去人們往往把物質運動分為兩類，一類有嚴格的秩序和結構，如晶體；一類則雜亂無章，沒有一定的秩序和結構，如氣體分子的熱運動。現代科學指出這種絕對的劃分是不正確的。有序和無序之間並無不可逾越的鴻溝，它們之間有著密切的聯繫，並可以在一定條件下相互轉化。

在熱力學中，用「熵」這個概念來量度系統有序程度的大小。那麼，什麼是熵呢？為此，我們先介紹一下可逆和不可逆的概念。在自然界和人類社會中所發生的一切現象，嚴格地說，都是不可逆的，可逆只是近似而言的。不可逆的直觀涵義就是變化發生後無法在一切條件都不變的情況下又恢復到原狀。其實，人類社會的總演進過程就是典型的不可逆過程。例如，人是從猿而來的，但人卻不能再退化到猿；人類社會是從原始社會發展而來的，卻再也不能復歸到原始社會。

在物理學中，可逆過程和不可逆過程有著本質的區別。例如，在衣服上滴上一滴墨水，墨水會自動地向周圍擴散，但擴散開的墨跡絕不會再自動聚攏為原來的一點。這種情況已為「熱力學第二定律」所描述。

熱力學的一般原理描述了由大量分子構成的宏觀系統的運動和變化。熱力學第一定律著重在「運動量」的問題上，它表述了能量守恆：系統內能量的任何改變一定是

相同大小的能量通過邊界傳遞的結果。熱力學第二定律則著重在「運動方向」的問題上，它論述了可逆過程和不可逆過程之間的區別，指出在一定的條件下的系統狀態將有一定的運動方向（如，墨跡只會自動地擴散，而不可能自發地收攏）。為了作定量的表述，人們引入了一個新的函數，叫做「熵」。簡言之，熵是一個系統的狀態的函數。這個函數可以度量一個系統組織（或無組織）程度的高低。

熵與能量不同，是不守恆的，通常用符號 S 來表示。熵 (S) 在一個很短的時間間隔 (dt) 中的變化寫作 dS ，稱為熵變化。熵變化 (dS) 由兩項構成：第一項 $d_e S$ 是通過系統邊界的熵的傳輸，第二項 $d_i S$ 是系統內的熵產生。由此我們得到如下關係式：

$$dS = d_e S + d_i S$$

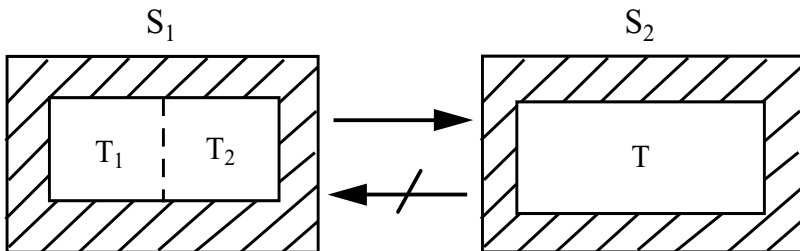
熵產生 $d_i S$ 的基本特徵是：通過它能辨別不可逆過程。熱力學第二定律指出，對於整個熱力學過程而言，熵產生都是非負的，即：

$$d_i S \geq 0 ;$$

當過程是不可逆時，有

$$d_i S > 0 。$$

圖~11：不同溫度的氣體混合



現舉一個例子具體說明：兩種不同溫度的氣體混合（見圖~11）。假定這個系統是孤立的，即 $d_c S = 0$ （即通過系統邊界的熵傳輸為零）。因此，在這種情況下，我們得到：

$$S_2 - S_1 = \Delta S = \int d_i S > 0$$

上式中的 ΔS 是系統從狀態 S_1 變至 S_2 時的熵 S 的改變量（ ΔS ）。 $\Delta S > 0$ 的直觀含義是：在 S_1 時，由於 $T_1 \neq T_2$ （即在箱子內部，左邊氣體的溫度與右邊的不同），故在系統內部存在著能量差。這種能量差可用來作功，也就是說系統處於狀態 S_1 時，具有有效能量 $\Delta T = T_1 - T_2 > 0$ （無妨設 $T_1 > T_2$ ）。隨著時間的流逝，這種系統內部的能量差自發地趨於消失（可以設想為較熱的氣體分子與較冷的氣體分子不斷混合的結果），即有效能量 ΔT 隨著時間的流逝而趨於零。這樣，系統即從一個較低熵 S_1 的狀態（因為它有有效能量 $T_1 - T_2 = \Delta T > 0$ ）變為較高熵 S_2 的狀態（因為它的有效能量 $T - T = \Delta T = 0$ ，即系統內部沒有能量差，其中 $T_1 > T > T_2$ ）。

於是，在這個例子中，熱力學第二定律歸結為通常的經典提法：在一個孤立系統中，熵是增加的。熵改變 $\Delta S > 0$ ，說的就是熵增加。

當 $d_c S = 0$ 時，只有可逆過程才能進行。因為熵是狀態的函數，這時可以在條件不變的情況下，由初態開始經歷變化過程又返回初態。

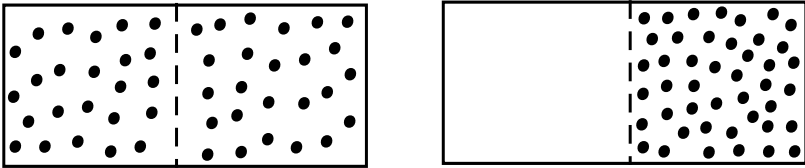
熵具有獨特的地位，它的變化和過程的方向有著密切的關係。因此，熱力學第二定律給我們提供了宏觀演進的普遍定律，這就是在孤立系統中的熵增加原理，或一般熱力學系統的熵產生（ $d_i S$ ）非負原理。

現在我們要問：這樣的熵增加對於所涉及到的分子系

統來說究竟意味著什麼？為了給予明確的回答，我們必須研究熵的微觀意義。讓我們具體地討論一種氣體或液體，來看一看熵以及熵增加概念的含意。玻爾茲曼在 1872 年第一個指出，熵是分子無序的量度，因此，熵增加定律是一個簡單的增加混亂度的定律。舉例來說，討論一個用可滲透的隔板分成相等的兩部分體積的容器（見圖~12）。其中所盛氣體共有 N 個分子。這 N 個分子可以分成數目 N_1 和 N_2 兩組 ($N_1 + N_2 = N$)，分法共有 P 種，這可由一個簡單的組合公式來確定，量 P 叫做配容數，即：

$$P = \frac{N!}{N_1! N_2!}$$

圖~12：氣體分子的分佈



從 N_1 和 N_2 的任一初始值開始，我們可以發現在一個足夠長的時間後，容器中氣體達到了平衡狀況，即除了小漲落以外，分子在兩個間隔當中均勻地分佈，即 $N_1 = N_2 = N/2$ 。顯然，這一狀況相當於 P 的極大值，並且在變化過程中 P 在增加。這種考慮使得配容數 P 與熵的關係為：

$$S = k \log P$$

這裡， k 是玻爾茲曼普適常數。這一關係式明確指出，熵增加表示分子無序的增長，正如配容數 P 的增加所反映的一樣。在這樣一種演化過程中，初始狀態被「忘記」了，即無論開始時 N_1 、 N_2 取何值，到頭來 N_1 與 N_2 都趨於 $N/2$ 。如果在初始狀態，一個室中的粒子數目比另一室

中多得多（即兩個室中的粒子數目極不對稱；在本例中這種不對稱性越強，則系統的這一狀態的有序程度就越高；聯想未擴散開的墨跡和有能量差的系統具有較低的熵或較高的有序程度，可知它們都具有較大的不對稱性或不均勻性），則這種不對稱性遲早總將會被破壞。

在上面的例子中，我們討論的是孤立系統。現在我們來看看封閉系統。這種情況類似於孤立系統的情況。只要引入一個新的狀態函數：亥姆霍茲自由能 F 或吉布斯自由能 G ，來代替狀態函數熵 S ，就可以得出類似的關於系統狀態運動方向的結論。現在定義：

$$F = E - TS \text{ 或 } G = E - TS - XY$$

其中： E 為系統的內能， T 是絕對溫度， X 為廣義位移（如體積 V ）， Y 為廣義力（如壓強 P ）。

結論是：在 T 和 X 恆定的情況下，封閉系統的演化取 F 減少的方向，達到平衡時 F 取極小值，即 $(\Delta F)_{T, X} \leq 0$ ；或在 T 和 Y 恆定的情況下，封閉系統的演化取 G 減少的方向，達到平衡時 G 取極小值，即 $(\Delta G)_{T, Y} \leq 0$ 。這個結論是熱力學第二定律對於封閉系統的表述，指出了在封閉系統的情況下有序和無序的轉化方向。粗略地說，封閉系統向著其自由能量減少的方向演化。

然而，在系統處於開放的非平衡態的過程時，上述判斷就不適用了。為此，就產生了描述非平衡態熱力學的耗散結構理論。社會經濟系統一般都是開放系統，而且往往處於非平衡態的過程中，需要借用類似於耗散結構這種理論來分析有關問題。然而，無論是引入 F 或 G 這類概念來處理平衡態的封閉系統，還是採用耗散結構這類理論來處理非平衡態的開放系統，都和熵這一基本概念及其不同推廣的涵義有關。因此，首先要在社會經濟領域中把熵的概

念加以拓廣。通常以熵來量度無序程度，而以負熵來量度有序程度。在社會經濟領域中，常採用負熵的概念。

對於開放系統，關鍵在於它的熵傳輸 $d_e S$ （見前文）可以大於、等於或小於零，人們通常稱 $d_e S$ 為負熵流。如 $d_e S < 0$ ，且其絕對值 $|d_e S|$ 又大於 $d_i S$ ，則 $dS = d_e S + d_i S \leq 0$ ，這時系統的總熵 S 可以逐步減小，從而使系統從無序走向有序。這樣，在不違反熱力學第二定律的條件下，非平衡系統可以通過負熵流的增加來減少總熵，並達到一種新的穩定的有序結構。作為開放系統的生物機體，其進化過程就是一個有序程度提高的過程，這就要使總熵 S 不斷地降低，而這就必須不斷通過和外界交往的過程來補充進「秩序」。例如，動物的覓食和消化過程是一種與外界交往的有序過程，形象地說就是「吃進秩序」。相反，如果生物系統孤立起來不與外界發生聯繫，「負熵流」沒有了來源，則內部熵產生越積越多，系統終將死亡、腐爛、分解，日益趨向混亂無序。

社會經濟系統的一個共同特徵，是它們的結構產生於開放系統，而且這種系統只有與周圍環境的介質進行物質和能量（以及信息）的不斷交換，才能維持其生命力。然而，僅僅是一個開放系統並沒有充分的條件保證出現耗散結構（即非平衡態中有較高有序程度的穩定結構）。耗散結構理論認為，所有的耗散結構有三個共同的特點：（1）存在於開放系統之中，（2）保持遠離平衡的條件，（3）系統內各要素之間存在著非線性的相互作用。因此，普里高津指出，非平衡是有序之源。這是耗散結構理論的一個基本觀點。

以上所述就是與熱力學第二定律有關的主要內容。第二定律表明，在孤立體系中，所有可逆過程，熵的總值不變（ $dS = 0$ ，即熵 S 的改變為零）；在不可逆過程中，熵值

增加 ($dS > 0$)。因此，在孤立體系中所發生的變化，最後結果是體系的熵不斷增加，達到最大值，這時系統內的各種能量差別（如溫差）消失。這就是熵增原理。

但是，熱力學第二定律是建立在有限的空間和時間中的，是依託於實驗概括出來的，它在無限大的空間和無限長的時間裡的意義至少在目前還是十分不清楚的。

◎ 歧義紛生

當把上述熱力學第二定律推廣到整個自然界中時，會產生一些意想不到的結果。

自然界的變化顯然不能完全看成為週期性的運動——循環往復、重複性的運動，它還包括了另一種運動——演化，如事物從簡單到複雜的運動，或從複雜到簡單的運動。

然而，遺憾的是，熱力學第二定律所預言的不可逆轉的發展和演化，並不是我們所期望的從簡單到複雜的那種演化。相反，熱力學第二定律預言的是，宇宙萬物發展的總趨勢是各部分的溫度達到相同，這就是歷史上著名的宇宙熱寂說。

即使是前文中所說的耗散結構理論也遠未解決宇宙熱寂論的問題。我們知道，耗散結構依賴於從環境輸入負熵流而產生有序，因此，這種有序化是以環境中的更大熵增加為代價的。如果把耗散結構與其外界環境所組成的整體看成一個系統，那麼這個系統仍然服從於熵增原理。

但是，前些年的某些研究表明，對於一個膨脹的宇宙，熱力學的結論是：即使原來的溫度是一致的，也有可能產生溫度差。證明的大致過程如下：同樣是一箱氣體分子，在無引力時，演化的方向從非均勻→均勻，有結構

→ 無結構；在沒有引力時，均勻是個穩定的平衡態。但有了引力之後，這個平衡態就變成不穩定的了。因為，只要有某個局部區域，由於起伏密度變得稍高一點，則這個區域引力就變得更強，會吸引更多的物質，形成更高的密度。反則反之。因此，只要有小的起伏就會徹底破壞均勻狀態。可見，在引力較高的體系中，演化的方向是：無結構→有結構，均勻→非均勻。在宇宙範圍內，引力是主導的，所以哪怕宇宙開始是均勻的、無結構的，它也會自動地生長出非均勻的有結構的狀態。各種尺度上的星體或星體體系，就是依靠這種非均勻化的過程聚集而成的。當然，這種過程的實現，除了引力和宇宙的膨脹性外，還必須要求宇宙中含有輻射及粒子等不同類型的物質，上述機制才能發揮作用（見表~5）。

表~5：演化的理論根據

理論基礎	能否說明從簡到繁的演化
純引力	不能（循環運動）
無引力的熱力學	不能（熱寂）
引力 ~ 熱力學	有可能（免於熱寂）

引力是一種長程力，又是自然界中一種最弱的相互作用力。因此，不可能用它來單獨解釋在較小尺度內發生的正向演化作用（如生命的產生），這就牽涉到非平衡物理學及化學的最新發展——如耗散結構理論。

以上討論說明，即使在自然界中也不能無條件地推廣熱力學第二定律。那麼，對於熱力學第二定律在社會領域中的推廣就必須更加小心、更有限制性。

不過，儘管表~5 所示的演化理論根據對於避免宇宙

範圍的熱寂說提供了某些希望，但最近的研究表明，「大爆炸」理論正面臨著嚴肅的挑戰。^① 20多年來，人們認為「大爆炸」理論是解釋宇宙起源、膨脹和最終命運的最好理論。然而在1989年2月下旬召開的一次會議上，等離子體宇宙論引起物理學家和天文學家的注意。這次會議討論了似乎是同大爆炸理論基本原則相違背的一些最新觀測。一些實驗室研究、計算機模擬和天文學家的最新發現似乎都支持這一新的理論。

新理論的創造者和支持者們確信，稱為等離子體的帶電熱氣體，在宇宙、恆星、星系等等形成過程中起了目前尚不知道的關鍵作用。他們認為，等離子體的電磁力和引力一起提供了由物質組成的星系和其他大宇宙體的基礎。等離子體宇宙論認為，宇宙永遠存在，既看不到開始，也看不到終點。相比之下，大爆炸理論認為，引力是宇宙形成的主要力量，宇宙是兩百億年前在一次大爆炸瞬間從一點開始，一直不斷膨脹，而且將繼續膨脹，最終本身又要逆轉，坍縮成一點。顯然，當這種膨脹性質不是普遍成立的時候，上述避免宇宙熱寂的機制也就無法發生作用了。

總之，現在回答宇宙是否趨於熱寂的問題還為時過早。因此，在把熵增原理從熱力學的特定領域中向外推廣時，特別是向社會經濟領域推廣時，更要十分小心。在這方面，處處都是陷阱和歧路。

首先我們來看一個例子。例如，某種礦藏完全集中在一個地區（超過了經濟開採所要求的規模幾十倍），或者相對均勻地分佈在十幾個地區（在每個地區，這種礦藏的集中程度都超過了經濟開採的要求）；或者分散在幾百

① 〈等離子體宇宙論向「大爆炸」理論提出嚴肅挑戰〉，《科技日報》1989年3月7日。

個地區（每個地區都沒有達到經濟開採的規模要求）。上述三種分佈，如果單純從熱力學第二定律的推廣來看，有序程度最高的顯然是第一種分佈，其次是第二種分佈，最差為第三種分佈。但就人類社會而言，第二種分佈的「有序」程度顯然最高，因為它有利於降低運輸成本。可見要把熵或熱力學第二定律推廣到社會領域中來，其意義並不是唯一確定的。因為這時的「有序性」已和一定的人類活動的目的性和有效性聯繫在一起了，否則就沒有明確的意義。因此，我們要對熵的推廣作出如下的區分。

第一，無法由人類活動改變的熵（這是一種最純粹的自然過程），稱之為宏觀熵。例如，太陽演化所引起的熵變，這種熵變，無論是增加還是減少（或不變），幾乎都不受人類活動的影響。儘管這種熵變對人類生存的影響極大，但人類的活動對它卻完全沒有影響或控制能力。我們既不能減弱它對人類的不利影響，也不能增強它對人類的有利影響，而只能聽之任之。在談到這種熵變時，我們是在嚴格的物理學意義上來使用熵這個概念的。

第二，很多過程由於受到人類活動的不同程度影響，已不再是純粹的自然過程。這種過程中的熵變，我們稱之為附加熵或局部熵。這是人類活動可以影響和加以控制的熵變過程。例如，假定一切其他條件都不變，過度放牧或濫砍濫伐使草原或森林生態系統的長期生產能力降低和多樣性喪失，從而加劇了自然的局部熵增加過程；反之，適當地控制森林火災，則減小了自然界的局部熵增加過程。

在談到這種熵變時，我們多少已脫離了嚴格的物理學意義上的熵概念。例如，在談到生態系統的多樣性時，這已不是嚴格的熱力學中的熵了。但一般來說，這類概念（如信息論中對多樣性的度量）可以在一定程度上與熱力學中的熵較好地聯繫起來，例如，生態系統的多樣性與其

乾物質生產力有較好的正向對應性。所以，在使用這類概念時，稍作說明，就不會引起混淆。

第三，與人類活動的目的性和有效性相聯繫的「熵變」，我們稱之為條件熵或意義熵。這種熵變也是人類活動可以加以控制的。例如，降雨量過於集中，且在時間分佈上不利於農作物充分利用。如在不破壞生態的條件下搞一些蓄水工程或引水工程，可使降水量的利用較為均勻，從而更有利於農作物的生長。

在談到這種熵變時，最易引起歧義。這就如同用申農的信息量公式去衡量生物體的有序程度一樣，是沒有多少實際意義的。有人曾對此作過具體的分析：計算表明，生物體的有序程度與一塊同質量岩石的有序程度在數量級上並無多少差別。人們可以計算細胞生物聚合物的信息量及相應熵，但是這種計算並不能使人理解生物分子的特性；真正重要的並不是DNA中的信息量，而是DNA中所包含的蛋白質合成的指令。換言之，對生物學而言，重要的並不是信息的含量，而是信息的含義，亦即在編譯指令過程中信息的價值，或說是信息的質。^② 我們正是在這種含義上來使用條件熵（或意義熵）這個概念的。但是由於在這個方面尚未形成統一的理論，因此，我們在下面的分析中，將對使用這個概念的條件做出嚴格的限制和詳細的說明，以免引起混淆。

有時，第三種熵變與第二種熵變相互交叉。例如，極端一點說，當降雨量有越來越集中的趨勢時，從不均勻性或不對稱性增加的角度看，這時物理學意義上的熵減小了，但從人類有效地利用降水的角度看，條件熵則增大

② M. V. 伏爾更斯坦：《現代物理學與生物學概論》第104、105頁。

了。假設二者相加為零，這時如其他一切條件不變，則三種熵變之和為零。但從直觀上說，總熵顯然增加了，這就破壞了熵這種廣延量的可加性。對此，我們只能針對具體問題加以特殊的處理。

對於第一種熵變過程，不論你是否利用它，對其毫無影響。例如，更好地利用太陽能，不但不會增加太陽本身的熵增加速度，反而可能提高地球上的有序程度。這時，宏觀熵變無變化，而局部熵減小，這使地球～太陽系統的總熵相對減小。然而，《熵》的作者對於此點卻完全忽視了。

對於第二種熵變過程，利用過度導致局部熵增加（這是顯然的），利用不足有時也會導致局部熵加（如林業中的過熟林），利用適度則導致熵不變或減小。

對於第三種熵變過程，例如雨量的均勻利用，對自然熵變無影響（在蓄水工程不影響生態的條件下），但對人類有意義的條件熵卻減少了。

上述分析說明，問題並不那麼簡單。在把熱力學第二定律推廣用於分析人類社會的各種問題時，要十分小心謹慎。否則就會出現很多似是而非的說法和判斷。下面，我們要更具體地討論人類活動對熵變的影響。

◎ 山重水複

從上面的分析中並不能得出熱力學第二定律完全不能用於分析人類社會的問題。但在應用時，必須把前提和限制搞得清楚明白。

假定 1（關於空間尺度的限制）：討論的對象限於太陽和地球組成的系統，並假定在這個系統之外所發生的事件，既不能受到人類活動的任何影響，也對人類的活動沒

有任何意義（包括積極、消極和中性的意義）。

假定 2（關於時間尺度的限制）：人類不可能在地球上無限期地生存下去，上限不妨設為 50 億年。因為，例如在幾十億年以後，當我們的太陽有朝一日離開主星序，或者甚至比這還早一些的時候，太陽就會變得很熱，使地球上的生命無法生存下去。^③ 這意味著我們必須假定人類在地球上的生存期限是有限的。

假定 3（關於主要負熵流來源的限制）：假定在這幾十億年內太陽還能繼續為我們正常工作，不會發生太陽變成新星的事情（但這是完全可能的，一旦發生這種事情，它將毀掉地球上的一切生命，甚至可能會使地球這顆行星完全揮發掉。而在這樣一場爆發後，恆星只拋掉它的質量的百分之一二，此後，它又恢復適當的正常生活。事實上，有的恆星看來已週期性地反復經歷過幾次這樣的爆發，而它們仍然存在到今天^④）。因此，假定在這幾十億年裡，無論宇宙是熵增加或熵減小，對於我們這個太陽系都沒有直接影響。

假定 4（關於流動性的限制）：在百萬年這個數量級內，作為人類整體脫離地球，飛往其他星球，並在哪裡定居，既無實際意義，在經濟上也無法承受。

假定 5（關於不同因素之間相互作用的限制）：假設短線約束原理成立（其含義如下：人類生存依賴於各種因素，這些因素之間不可能無限制地相互替代。例如，陽光不能替代空氣，一旦大氣出了問題，陽光再充分，人類也無法生存；這時是大氣這條短線約束著人類的生存）。

在上述假定下，可得到如下結論：

③ I. 阿西摩夫：《宇宙、地球和大氣》。

④ I. 阿西摩夫：《宇宙、地球和大氣》。

結論 1：由假定 1、2，在十億年這個數量級內，由太陽和地球組成的系統，對於人類活動的時間尺度而言，可近似地看為孤立系統。因此，對於前述的宏觀熵，這個系統服從熵增原理。

說明這個結論的思路如下：根據目前已有的知識，天體的凝聚和彌散的「週期」過程在百億年這個數量級上。因此，當太陽在幾十億年後變得無法為我們工作時，假定把太陽～地球與更大的宇宙背景（如銀河系）聯繫起來考察，那麼，整個天體的運動使太陽重新啟動，使宏觀熵減小，至少要在百億年以上。而在十億年這個數量級上，太陽是在逐漸地消耗著其內部的有效能量，其本身的熵是在增加的。這種熵增加在太陽～地球這個系統內部居於主導地位。目前還沒有足夠的知識可以斷定，在太陽～地球之外的宇宙活動可以使這種熵增加逆轉。

結論 2：由假定 1、2 和結論 1，可以得出：地球上的人類在其生存上限內，不可能有時間等到與我們生存有關的宇宙重新發生一次凝聚，使人類所耗散掉的能量（如燒掉的石油）重新聚集起來。

結論 3：由假定 3、4 和結論 1、2 以及宏觀熵的定義，可得到：對於太陽～地球系統之內的人類，關鍵不在於宏觀熵的變化（因為在十億年的數量級內，它對人類的生存不構成有效的約束），而在於人類如何利用太陽熵增過程的「副產品」——為人類提供的基礎有效能量——太陽能及其貯存形式的其他資源。

這個結論的含義是：雖然太陽～地球系統在更大的時間尺度（如十億年以上的數量級）上服從熵增原理，但在較小的時間尺度上（如千萬年或億年的數量級），該原理對人類生存顯現不出消極的影響，或不構成有效的約束。因此，在這個較小的時間尺度內，局部熵和意義熵這種人

可以控制和影響的熵變，對於人類的生存和發展才是至關重要的。儘管後兩種熵變（無論是減小或增加）在數量級上與宏觀熵相比，要低若干個數量級。

結論 4：由假定 5 可知，對於僅使用存量資源的工業化社會而言，地球可以近似地看成孤立系統。這個結論的含義是明顯的：因為沒有其他的來源，能夠補充存量資源的大規模消耗，陽光再充分也做不到這一點。

現在我們可以依據上述假定和結論，對與人類社會、經濟長期發展有關的某些重大問題進行分析了。

自人類社會進入工業化社會以來，不過三四百年的時間，而工業化社會所賴以生存的存量資源（不可更新的資源）的形成並富集到有經濟開採價值的程度，卻要經歷一個漫長的地質過程（千萬年以至上億年的時間）。在幾千年的時間裡所形成的存量資源的增量，對於已有的存量而言，是一個可以忽略不計的數字。因此，即使自然界的長期變化對於這些資源的形成和富集是一個熵減小的過程，但就工業化時代大規模存量技術使用這些資源的方式和程度而言，卻是一個明顯的熵增加過程——把自然富集的資源又變成耗散的過程。對於人類有意義的熵變的總和而言，後一過程居於主導地位。因為對存量資源而言，自然富集的流量遠小於目前人類的使用流量。所以，對於存量資源的這種利用方式，可以運用熱力學第二定律來作近似分析。

對於核聚變能源來說（對其副作用——如產生熱污染——略去不論），它可以維持工業化社會的需求上千年。然而，即使是宇宙間最奇妙的機器也不能僅僅從能量中大量地生產出物質來。在本章第一節未曾算過一筆賬，那是根據物資消耗增長率為 1% 來計算的，把這個增長率降為 0.1%，也不過是使原來的五百年延長至五千年，也就

是說五千年之後全世界資源年消耗量相當於 1970 年的五百倍。就算在這段時間裡能源不成問題，但非能源的礦物卻絕對支撐不了這麼長的時間。同時，重複利用不可能達到 100%，替代則往往是用品位更低、消耗能量更大的方式來製造出同樣的問題。

顯然，由此可知，對於工業化社會的生產方式和消費方式而言，地球是個孤立系統這個結論是成立的。在地球上，有兩個有效能量的來源：一個是地球本身所蘊藏的能量，另一個是太陽能。地球本身的能量貯備來自於兩個方面：一種是在對人類有意義的時間內可以更新的能源；另一種是只在地質時間尺度內可更新的，而對人類來說卻只能被看成是不可更新的能源。同時，地球上可更新的能源也是有限的，而且其一旦消耗殆盡，它們也會變成不可更新的能源。太陽能雖然就其總能量而言是「永不」枯竭的，但按其到達地球的速率和形式而言，卻又是十分有限的了。

關鍵之處還在於太陽和能量本身並不能創造出生命。要讓生命茁壯成長，太陽和能量就必須與地球上由礦物質、金屬和其他物質所組成的系統相互發生作用，並把這些物質轉化為生命，以及生命所需的養料。工業化社會的生產方式和消費方式使這種相互作用加快了構成地表的有限物質的耗散。因此，雖然太陽能量的總和每秒鐘都在遞減，但遠在它的熵達到最大值之前，地球上的能源就早已告罄了。

上述那些不同種類的資源在終極形式上構成互補系統，對於互補系統而言，它服從短線約束原理。因此，我們的基本結論是：以大規模消耗存量資源為特徵的工業社會的趨勢可以用熱力學第二定律來描寫。

我們運用本章第一節末所舉的例子來作出進一步的

說明。到 21 世紀末，世界仍保持 50 億人，且達到 1980 年日本人均 GNP 水平和物資消耗水平，約相當於 12 個（1970 年的）美國的消耗量。即 21 世紀末的世界資源消耗量是 1970 年的 4~5 倍。1974 年，美國人均用掉十噸礦產品，如包括礦物燃料和木材則為 20 噸，以此推算 21 世紀末的當年礦產品總消耗量為 264 億噸，加上能源和木材則為 530 億噸。

假設從 22 世紀開始，全球經濟以年物質消耗增長率為 0.7% 的水平繼續發展，則每隔一百年，世界經濟的物質消耗總量就要翻一番。地殼的總質量為 5×10^{19} 噸，其中鋁、鐵等元素約佔 14%，則這些元素的總質量為 7×10^{18} 噸。據此可算出，從 22 世紀開始，再過兩千年，這些元素將被全部消耗殆盡。如果以一百億人口為根據，則只能再維持一千年，如假定短線約束原理在更大的範圍內起作用，則工業化社會的壽命至多再能延續幾百年。

因此，以物質財富迅速增長為主要特徵的工業社會——其技術基礎是大批量生產的存量技術，其資源基礎就是不可更新的存量資源，不可能逃脫熱力學第二定律的約束，它的停滯是必然的，只不過是時間早晚的問題。而企圖以新興的高技術來維持和延續這樣一種生產和消費體制，同樣也不可能長久。

但是，物質財富增長的停滯並不意味著人類社會的停滯，工業化社會無法擺脫熱力學第二定律的約束，並不意味著新的發展方式在其面前同樣束手無策。在這一點上，我們與《熵》一書的觀點大不相同。

◎ 出路何在

經典發展方式一手造成了不可更新資源的大量耗竭；

另一手又導致了嚴重的環境污染，這也可用熵增原理來加以分析。槌田敦等人根據熵的理論對現代的地球及生態系統危機的原因進行了研究。他們首先假設地球由四個部分組成：即岩石圈、大氣圈、水圈和包括人類社會的生態圈；然後對不同情況作了計算和分析。^⑤

其方法如下：第一，先假定地球只由岩石圈組成。這時，太陽光到達地球表面的平均熱量為 $q=257$ 千卡/年·平方釐米。設它為 100，則其中的 30 會被反射掉（即對地球而言，變成了無效能量）；剩下的 70 使地球變暖，這部分熱量還將向宇宙空間輻射出去。根據 T^4 定律（即物體的放熱量與該物體表面絕對溫度的四次方成正比）進行計算，這種「地球」的表面溫度應為負 18°C （相當於 255K ， K 為絕對溫度）。

第二，假定地球上空氣。考慮到大氣對直射日光的吸收、大氣對地表輻射熱量的吸收和送還給地球的熱量，以及空氣的對流作用，用 T^4 定律計算得到「地球」表面的平均溫度為 28°C （ 301K ）。這是一個酷熱的地球，生命難以存在。這種假定情況相當於沙漠。

第三，考慮既有大氣循環又有水循環的現實的地球。水遇到乾燥的空氣便要蒸發，並從周圍吸取熱量。由於水的分子量為 18，空氣的平均分子量為 29，所以含水蒸汽的空氣變輕，形成上昇氣流。但在上昇過程中，由於絕熱膨脹又會引起溫度下降，使水蒸汽凝結，形成雨或雪降下來，這就是水循環。水在大氣上層結冰或結露時會放熱，這些熱量便向宇宙中輻射出去。這種由水循環從地表向宇宙送出的熱量是空氣循環帶走熱量的四倍。用 T^4 定律算出

⑤ 槌田敦等：〈水、生物、人類與熵的理論〉，《世界科學》1986年第9期。

的地表平均溫度為 15°C (288K) ，這與現實的地球相符。這種在高溫下吸熱（從地球表面）、在低溫下放熱（向大氣外層），並存在著循環的過程便是一種熱力學機制，對於熵的考慮有著重要意義。

被這種水（和空氣）的循環所減少的熵可以計算出來： $0.3 \times q (1/288 - 1/255) = 34.6 \text{ 卡/K} \cdot \text{平方釐米} \cdot \text{年}$ （其中 K 為絕對溫度）。地球上發生的各種運動變化就是在這部分被拋棄的熵的範圍內得以進行的。例如，下雨時產生的摩擦熱、河水流動、颶風，以及生命活動的進行等等；所有這些活動都要產生熵，這些熵的總和不超過上述數字。也就是說，由於水（和空氣）循環的存在，地球表面各種活動產生的熵增加部分被拋棄到宇宙空間中。總之，正是由於水（和空氣）循環的存在：我們的地球才成為一個生命的星球，35 億年來生命持續存在，而沒有達到所謂「熱寂」的世界。

第四，考慮包括岩石、大氣、水和人類社會在內的生態系統。植物在光合作用中使用的日光只佔很少一部分，其餘部分全部變成植物體內的熱，即變成了熵。那麼植物是怎樣把這些過剩的熵排出體外的呢？應當注意到，植物是具有蒸發機能的，蒸發時液態的水變成氣態的水，在帶走熱的同時熵也被帶走了。也就是說，植物除了依賴於製造葡萄糖所需要的水以外，還依賴於蒸發所需要的水。如果地球只有植物存在，且不斷進行光合作用的話，空氣中的二氧化碳將被耗盡，植物就無法存在下去。但是，動物和微生物則用 0.21 大氣壓的氧氣來分解光合作用的生成物，維持著二氧化碳的濃度。把光合作用與分解結合在一起，就得到一個生物循環。在這種循環中，吸收了日光和水，放出了水蒸汽和熱。生物循環所產生的熱和水蒸汽，被水（或空氣）循環帶到高空，並將熱向宇宙中散發出

去，因此，可以說生物循環也是水循環的一部分。

如上所述，生物循環以及它的部分反應都是滿足熵增原理的，因而是可能進行的。但這些反應在現實中是否發生則是另一個問題。要使生物循環不斷進行，需要有整體性的協調。如果在其中間階段被打斷，就將破壞植物、動物、微生物的協調，從而使生物循環停滯下來。一般所說的生物污染，如湖泊的富營養化就屬於這類問題。

另一類污染是地下物質的污染，它是與生物污染無關的物質引起的。這種例子在公害史上屢見不鮮。例如銅礦開採對流域造成的長期污染，這是與石油文明有關的環境污染。許多人認為，農業與工業一樣都是在破壞環境。當然，確有這類現象。但人類也可以通過農、林、漁業使生物循環興旺起來。例如，防止沙漠化，種草植樹，培養地力，可使生物循環再度生機勃勃。這些都是人類加強生物循環的實例。但是目前石油文明的普遍後果則是破壞了生物循環。看來，決定性的問題還是在於人類活動是否有利於恢復水（氣）循環和生物循環（岩石圈中表土的破壞是不利於生物循環的），進而是否加強這些循環。

現代的石油文明，產生了地球水（氣）循環無法處理的鉅大的熱熵和物質熵，以及放射能熵。所謂熱熵就是各種廢熱的排放——又稱熱污染（以此來考慮核聚變技術，即使它能商業化，但如果人均能量消耗繼續增加，則這種熱污染也是上述水循環和生物循環難以對付的）。所說的物質熵就是在開採和使用不可更新資源過程中所造成的各種物質性污染：大氣、水源污染以及生物污染等。所謂的放射能熵是指放射性核廢料等造成的污染。這些污染都是水循環和生物循環對付不了的，也就是說水循環無法把這些熵增加帶到大氣外層去，從而維持地球——它是地球和太陽所組成的系統中的子系統——繼續以一個開放的恆定

系統（即耗散結構）存在下去。因此，這些熵就在地球子系統內部積存起來。而開放恆定系統的存在是以系統內部的熵增加不斷被拋到其外部為必要條件的。這些熵的逐步累積勢必威脅到人類的繼續存在。

這是過去任何文明都未遇到過的、極為嚴重的全球性危機。出路在於我們是否能立即開始縮小與大量耗用不可更新資源（如石油）有關的技術所支配的領域；依託水、土、生物等技術的運用，擺正人類在生物循環中的位置：人類活動應有利於恢復乃至加強水氣循環和生物循環，而不是反之；重新創造以相互承認彼此多樣性的人群合作關係為中心的經濟、社會和文化。