

2. 項目簡介

(項目所屬科學技術領域、主要研究內容、發現點、科學價值、同行引用及評價等內容。)

所屬科學技術領域

生態學其他學科(代碼 1804499)，亦同時屬於環境管理學(代碼 6101050)

主要研究內容

生態學涉及生物和地球的能量和物質交換，生態經濟學不同於傳統經濟學，它認為經濟須包含在生態系統中，人類經濟不能長久地超越環境和生態系統的存載力。城市必須仰賴城市以外的生態系統，從周圍輸入越來越多的資源，同時大量積累物質和廢棄物。現代生態學之父 Odum 在系統生態學的研究上作出了巨大貢獻，並獲得了 Craafort Prize(生態學的諾貝爾獎)。Odum (1996) 論述了城市是一個非自養的生態系統，脫離為其提供能量、食物、原料和排放廢棄物的偏遠地域的穩定的聯繫，城市的自組織體系將不能維繫。過去十多年，人類發展和資源環境之間綜合的尺度和複雜性已經增加。生態系統能夠提供人類生態服務例如能源、食物、水，保持大氣的空氣品質，農業和營養循環，它們服務人類經濟體系的功能是不可替代的。離開了城市經濟存在的資源基礎--生態系統，將不能充分地認識城市經濟系統。

生態能量學 (Ecological energetics) 是研究生態系統內之能流的科學。Odum 透過大量實驗和實證研究極大地推動了生態能量學的發展，並確立了其研究方法和理論基礎。由於其研究跨越人造資本和自然資本，被系統生態學家和經濟學家所應用。其所擬定的生態能量由於隱含生態系統同化和轉化的過程，而被簡稱為能值 (Emergy，或 Energy Memory)，以區別於物理學的能量 (Energy)。

城市系統作為遠離平衡態的耗散體系，需要不斷從外界環境中輸入負熵流，同時排出廢棄物。澳門由於地域有限，故被理解為包含人類和自然兩相體系的有限系統。澳門，作為典型的有限系統，本研究選取了兩個核算尺度來量化澳門及其周圍生命支援系統的資源流和能量流，即基於生態能量學的等效太陽能值 (Solar joule 或 Sej) 尺度，及與植物合光轉換有關相關於平均土地生產力的生態足跡(ha)，從賭場、旅遊業、澳門城市生態系統及國家四個尺度進行了論述。

1) 能值核算及動態模擬(Sej): 能值(包含能)是指能量轉換過程中製造一種產品或服務所累積的直接或間接源於太陽能的能量的總和，能值能綜合測度物質的、能量的、商品的和貨幣的等量的太陽能流值。能值綜合計算使在一個共同的框架下，將人類或非人系統的能量和物質流量按系統生態的過程定量化。此過程亦包含有限系統元素如人口、遊客、垃圾及水資源等方面之動態量化和模擬。

在上述 2004 生態能量流整體研究的基礎上，本研究由面到點對澳門系統之各重要組分，包括旅遊業、賭彩業、週期性填海，及廢棄物處理業，在不同時空跨度和城市代謝內涵上進行量化分析，籍與世界上類似地區或城市的生態能量研究結果進行對比，多角度定位澳門有限城市系統之生態能量研究特點，並由此對生態能量學在城市有限系統的表現形式進行規納綜合。最後，結合前述有限系統的研究技巧，將研究範圍擴大到涵蓋全球 100 多個主要國家的大尺度範圍，借助於美國佛羅里達大學完成的 100 多個國家能值研究的數據庫(National Environmental Accounting Database, 簡稱 NEAD)，選取人均能量供

給和耗用這兩個核心參數，對 NEAD 數據進行再處理及二次量化，數據結果以簡明圖表展示全球主流 17 國的資源可持續狀況、及偏離絕對和相對可持續資源消耗線的程度，完成在精細剖析澳門小系統的基礎上向國家全球大尺度系統的跨躍。

2) 足跡尺度核算(ha)：生態足跡方法通過將區域的資源和能源消費轉化為提供這種物質流所必須的各種生物生產性土地的面積，並同區域能提供的供給性土地面積進行比較，量化研究地域的可持續發展狀態。本研究中除了研究澳門，還對足跡的貿易和可持續的人口量進行了探討，並給出了計算公式。

發現點

1).旅遊業生態能量流之計量方法：首次提出了旅遊能值的比例計算法。由於澳門的資源實際上由遊客和本地居民分享，基於遊客的消費能值(Mt) 佔能值總量(U)一定比例的假設，第一次提出了旅遊業生態能量流（能值）的數學計量方法。並提出遊客消費能值和遊客支付的貨幣等價能值（Odum 稱之為 Buyer's Power）兩個概念之生態能量學概念和內涵上的根本區別。在分析旅遊地與遊客之間的錢物交易時，將遊客消費的實物能值和遊客支付的貨幣購買能值這兩個相互依存的能值流進行各自計量，揭示澳門旅遊業大量淨生態能量流入的事實,並歸納總結出了世界上旅遊業能值計算的四種核算途徑、計量公式及各自的優點和缺陷。

2). 拓展有限系統的可持續評價方法：對澳門的實證研究發現，能值可持續發展指數(ESI)在評估國家或地區可持續發展時具有局限性，透過擴展 Odum 和 Brown 的淨能值概念，並引用世界銀行之淨儲蓄計算框架，作者提出了系統淨能值概念（Net Emergy），並提出了淨能值率（Net emergy ratio）及其計量方法。同時提出了對於一個有限系統，正的、較低的淨能值有利於維持該系統長期的可持續發展的觀點。

3).拓展城市廢棄物處理能值量化分析方法：首次計算出了 2004 年澳門城市有限系統分解過程中廢氣排放的生態能量值($47.6 \times 1020 \text{ sej}$)。並推導出了污水、飛灰、爐渣的能值轉換率(transformity)，這些計算豐富和補充了廢物處理領域的生態能量學資料。研究發現有限系統(澳門)在廢棄物處理上的能值投入值遠小於廢棄物包含的能值的事實，揭示密集城市人工處理廢棄物的合理性和必要性。研究還發現了 Odum 系統生態學能值理論在面對廢棄物處理或系統異化過程時存在理論上的局限性，指出生態能量學如果對廢物處理理論上沒有突破，其方法論上將遭遇瓶頸。

4).城市週期性填海引致的物質輸入之生態能量流量化模擬研究：以澳門過去近三十年週期性填海為案例，透過數據處理及統計學分析，量化主要能流因子和參數，在此基礎上再借用系統動力學軟件 Stella，對未來澳門城市系統的能流演替走向進行了模擬和預測，研究擴展了系統動力學於城市有限系統之應用。證實系統動力學適用且有利於提升（澳門）有限系統之生態能量學研究。同時，根據生態能量學理論，澳門目前生態能量的輸入大於輸出，澳門城市系統處在積累和生長階段。

5).博彩業的生態能量學量化研究：首次量化了賭場中的食物、水、電、設施和人力資源的生態能量流，藉其投入與產出的對比分析，揭示澳門的賭場王國以更高的能值貨幣比率換得他們豐厚的生態能量淨值的實質，是對澳門龍頭產業推動力來源的深層次分析。

6).全球主流 17 國人均生態能量值供求和可持續性研究：基於國家能值統計數據庫（NEAD）數據，第 1 次系統分析了在能量消耗公平性原則下，世界主流 17 國之人均能量消耗及供給現狀，並圖示這些國家的可持續性，最後對全球可持續能源消費量進行了分析，指出達致全球長遠可持續發展的必由之路是減少人口數量和降低人均能耗。此文獲得華南理工大學環境學院 2013 年優秀論文獎勵。

7).足跡尺度核算：運用生物物理學方法，拓展城市生態足跡計量方法，結合足跡可貿易觀點，提出生態足跡的貿易轉移概念，繼而對 Van den Bergh 之生態足跡人口存載線進行了改進，提出了計算區域可持續人口數量的概念及計算框架，並籍 case study 分析多個城市或地區生態系統的人口和資源可持續性及成因。此部分發表了 1 篇 SCI 收錄的論文和 1 篇 CSEI 收錄的論文。

科學價值

在系統生態學子學科--生態能量學方面的價值：

□有限系統多層面多角度之生態能量學時空研究：Odum 將系統生態學的方法引入能量學研究，創立了生態能量學的能值核算體系。透過將上述能值核算運用在澳門這個有限經濟體系，結合澳門典型異養性旅遊城市的實情，在旅遊業、博彩業、廢物處理業之多個層面對 Odum 之方法論進行了實證研究及探索，拓展了量化框架和計算方法，豐富和充實了生態能量學的計算方法。同時，對旅遊業生態能量的核算計量方法進行了歸類和總結，並透過追蹤澳門城市能值流和庫的量化分析，推導出了氣體排放和污水處理的能值轉化率，豐富了全球能值轉換率參數庫，探索了相關學科在城市領域的應用。

□系統動力學和生態能量學結合研究：Odum 認為不穩定的波動普適原理與系統的可持續性密切相關，小系統的波動較常見且緩沖力較弱。本研究透過澳門過去二十年的週期性填海產生的能值流數值，借用系統動力學的研究方法和專用軟件，對未來 20 年之變化趨勢進行了模擬，闡明澳門城市系統在未來仍處於膨脹的事實，並對主要能量數據進行了量化預測，對有限系統之未來規劃具有潛在的指導意義，亦使系統動力學研究領域得到擴展。

□拓展全球資源能值量化方法：改進了由 Brown 所描繪的人類能源使用曲線圖，基於資源耗用的公平性原則，論述了人均資源供給和資源消耗對評價國家或全球生態能量的關鍵作用，並展示運用全球環境能值核算資料庫數據的技巧。並透過世界上 100 多個國家及主流 17 國人均能量資源供需分析，簡表直觀地圖示了全球 17 國資源可持續性的差別，並量化目前之資源耗用絕對不可持續的程度，對生態能量學在大尺度的空間研究的一次大膽嘗試。

上述在生態能量學領域的價值，導致了 Springer 接受本系列研究之大部分內容，並編輯成專著，該專著專門論述城市有限系統的生態能量學核算體系方理論和實踐。

在生物物理學方面的價值：

□豐富和拓展了生態足跡研究方法：充實了生態足跡理論在足跡轉移和貿易領域之計量方法，推導了生態經濟尺度下的可持續人口承載量之計算公式，並演示透過生態赤字、生態承載力、足跡貿易和實際的人口數量之實證分析，研判國家或區域的可持續狀況之推算過程，將前述的生態和經濟因子之計算納入了科學量化的軌道。

同行引用

選報的 10 篇論文分佈於兩個範疇。

生態能量學範疇：

1. 中文論文“澳門環境經濟能值綜合和可持續性分析”國內引用 75 次。
2. SCI 論文共 7 篇，總引用 74 次。
3. 專著“Ecological Emergy Accounting for a Limited System: General Principles and a Case Study of Macao”，將在 2014 年 2 月底出版，無引用記錄。

生態足跡範疇：

1. 中文論文“澳門 2001 年生態足跡分析”國內引用 349 次。
2. SCI 論文“An analysis of ecological footprint trade and sustainable carrying capacity of the population in Macao.”，國外引用 5 次。