

研究論文

從碳鎖定到低碳吸引子： 土地開發系統的臨界轉折

徐聰*、林左裕*

摘要

本研究基於複雜系統理論和多維耦合分析，構建了土地開發系統低碳轉型分析的全新理論框架，通過構建土地利用、房地產開發和碳排放的動態模型，做出了幾個關鍵的理論貢獻。首先，建立了一個全面的數學公式，捕捉了系統組成部分之間的非線性相互作用和耦合機制，超越了傳統的線性或靜態方法。其次，通過嚴格的分岔分析和穩定性理論，本研究識別並描述了三種不同的轉型路徑——漸進式、過渡式和混合式，揭示了系統演化的內在模式。第三，本研究基於臨界轉型理論引入了創新的預警指標和穩健性指標，為檢測和分析系統臨界點提供了新工具。一個重大的理論突破在於開發了一個多層次控制框架，將即時回饋與歷史累積效應相結合，從而能夠更精確地理解跨時間和空間尺度的系統動態。本研究通過將隨機過程和空間異質性納入分析框架，進一步推進了方法論前沿。這些理論創新為理解複雜城市系統及其低碳轉型提供了新的視角。未來的研究方向包括加強模型的數學基礎、探索多尺度耦合效應以及研究所確定的轉型模式在不同系統背景下的普遍性。這項工作代表了將複雜系統理論應用於城市可持續轉型的重要一步，並為分析土地開發系統演變提供了堅實的理論基礎。

關鍵詞：土地開發、低碳轉型、複雜系統、分岔分析、調控機制

收稿日期：2024 年 12 月 24 日；修訂日期：2025 年 12 月 23 日；接受日期：2026 年 07 月 23 日。

* 青島黃海學院副教授（通訊作者）。Email: cong.xu@alumni.aalto.fi

** 國立政治大學地政系教授。Email: tsoyulin@nccu.edu.tw

一、引言

全球氣候變化正推動人類社會向低碳發展模式深刻轉型。面對全球碳中和目標的迫切要求 (Davis et al., 2018)，城市土地開發活動的碳排放問題日益受到關注。研究表明，土地開發及其誘導的城市空間結構變化不僅直接貢獻了全球約 15-20% 的碳排放 (Zhang et al., 2017)，更通過空間形態鎖定效應對未來幾十年的碳排放路徑產生深遠影響 (Pu et al., 2023)。在此背景下，深入探究土地開發系統向低碳模式轉型的內在機理與演化規律，對於理解城市系統的可持續發展路徑具有重要的理論意義。

近年來，土地開發與碳排放的關係已成為學術界關注的焦點。以複雜系統視角研究城市，已揭示城市演化普遍存在的非線性與尺度律特徵 (Batty, 2013; Bettencourt, 2013)；在此基礎上，相關研究進一步揭示了城市空間擴張與碳排放之間存在顯著的非線性關聯 (Wu et al., 2014)。土地開發強度、空間形態與碳排放的耦合機制研究表明，不同開發模式會導致碳排放強度的顯著差異 (Qiao et al., 2024)。同時，低碳導向的土地管理理論也取得重要進展，如結合碳中和目標之土地利用與空間規劃優化研究 (Tang et al., 2024) 等。然而，現有研究仍存在明顯侷限：其一，多從靜態角度考察土地開發的碳效應，難以揭示系統動態演化特徵；其二，對土地開發、房地產開發與碳排放等多維要素的耦合互動關係缺乏系統認識；其三，在關鍵轉捩點識別和干預機制設計方面的理論探索尚顯不足。

本研究基於 Scheffer et al. (2015) 提出的系統臨界轉型理論，將土地開發活動視為一個由土地利用、房地產開發和碳排放等多維要素構成的複雜耦合系統。通過構建動力學模型，重點探究系統要素間的非線性耦合關係、演化過程中的分岔特徵，以及低碳轉型的關鍵路徑與優化控制機制。這一研究框架的主要創新在於：首次將複雜系統動力學方法引入土地開發碳中和研究，發展了多維耦合演化分析範式；通過嚴格的數學推導和系統的視覺化分析，揭示了轉型過程中的關鍵機制；提出了基於系統演化特徵的動態干預策略，豐富了土地開發系統理論。研究成果不僅有助於深化對土地開發碳排放問題的理論認識，也為城市系統低碳轉型提供了新的分析框架。

二、土地開發系統的多維耦合演化機理

在全球低碳轉型背景下，土地開發模式的演變對於引導城市向可持續方向發展具有關鍵意義。當前全球城市化進程呈現快速擴張態勢，城市建設用地規模、

房地產開發活躍度與碳排放水準在傳統發展模式下往往呈現同步上升格局。然而，隨著環境約束日益凸顯，土地規劃優化、市場機制調節與碳定價機制的協同作用，正推動城市系統向低碳化方向轉型。這一複雜進程不但涉及土地、資本與環境資源的動態博弈，也體現出城市系統在多維度耦合下的非線性特徵。為揭示此類轉型的內在機理，本研究在前人工作基礎上，構建了多維耦合的動力學框架。

(一) 多維狀態表徵與動力學方程構建

本研究將土地開發系統抽象為由三維狀態變數構成的動態系統：(1) 土地開發強度 $L(t)$ ，用於描述在規劃管控與用地指標約束下，建設用地規模的漸進擴張與利用結構的反覆運算升級；(2) 房地產開發活躍度 $R(t)$ ，體現從資本密集型建設週期到穩定增長期的市場預期變化、信貸政策調控與產業結構調整；(3) 碳排放水準 $C(t)$ ，作為衡量土地開發與房地產建設過程所誘導之能源消耗、建築運營、交通出行與產業代謝的綜合碳效應指標。

引入狀態向量

$$S(t) = [L(t), R(t), C(t)]^T.$$

這一描述方法建立在人地耦合系統理論框架之上 (Liu et al., 2007)，並結合近年來對於城市碳排放與空間格局關聯的研究 (Seto et al., 2016; Gudipudi et al., 2016)。在此基礎上，將系統表示為非線性隨機偏微分方程體系，以刻畫其在空間異質性與隨機擾動下的多維耦合演化動力學。

首先給出系統的基本動力學方程式：

$$\begin{aligned}\frac{dL}{dt} &= \alpha_1 L \left(1 - \frac{L}{K_1}\right) - \beta_1 LR + D_1 \nabla^2 L + \sigma_1 dW_1 \\ \frac{dR}{dt} &= \alpha_2 R \left(1 - \frac{R}{K_2}\right) - \beta_2 RC + D_2 \nabla^2 R + \sigma_2 dW_2 \\ \frac{dC}{dt} &= \gamma_1 L + \gamma_2 R - \delta C + D_3 \nabla^2 C + \sigma_3 dW_3.\end{aligned}$$

此處， α_i 與 K_i 描述在資源與制度約束下的內生增長趨勢和容量上限； β_i 體現不同維度之間的非線性耦合效應(如房地產市場變化對土地開發進程的促進

與約束，以及碳排放對經濟決策與資源再配置的回饋)； γ_1, γ_2 描述土地與房地產對碳排放的貢獻； δ 為碳清除率或碳排放衰減係數，可能通過碳稅、碳交易、清潔能源部署、綠色建築標準提升加以影響； $D_i \nabla^2 X$ 為擴散項，展示空間異質性在區域尺度上對系統演化的影響 (Turing, 1952; Barthelemy, 2019)； $\sigma_i dW_i$ 為隨機擾動項，捕捉宏觀經濟週期波動、自然災害衝擊、國際氣候談判變動等不確定性因素。

從系統理論視角來看，面對不同區域的資源稟賦差異、城市發展階段的異質性，以及區域間發展潛力的多層次格局，擴散項 $D_i \nabla^2 X$ 可反映不同城市群與區域間的土地開發與房地產市場聯動關係，從而在宏觀層面描述區域空間結構的動態演化與功能分異 (Wilson, 2014)。同時，隨機擾動項使模型可以捕捉制度創新與政策實驗的不確定效果，例如某些區域率先採用更嚴格的建築節能標準或碳排放管控措施，進而分析其對整體空間系統產生的擴散效應與動態影響。

(二) 穩定性與分岔分析：從臨界轉折到政策啟示

為理解系統在參數擾動和政策干預下的穩定性與可能出現的臨界轉折，需要對上述方程體系在平衡點進行線性化與特徵值分析。設平衡點為 $S^* = [L^*, R^*, C^*]^T$ ，將非線性系統在該處展開一階泰勒近似，其 Jacobian 矩陣為：

$$J(S^*) = \begin{bmatrix} \alpha_1 \left(1 - \frac{2L^*}{K_1}\right) - \beta_1 R^* & -\beta_1 L^* & 0 \\ 0 & \alpha_2 \left(1 - \frac{2R^*}{K_2}\right) - \beta_2 C^* & -\beta_2 R^* \\ \gamma_1 & \gamma_2 & -\delta \end{bmatrix}.$$

通過求解特徵方程

$$\det(J - \lambda I) = 0$$

可獲特徵值 λ 。若所有特徵值的實部均為負，則平衡點為穩定狀態，土地開發、房地產市場與碳排放受到微小擾動後最終回歸平衡。然而，參數變化——例如碳定價政策提高導致 δ 上升、土地供應總量受制於嚴格規劃導致 α_1 或

K_1 下降、或房地產信貸收緊使 β_1, β_2 相對權重變化——均可能引起特徵值分佈的改變。一旦某個特徵值實部由負轉正，系統將發生分岔 (May, 1976; Thom, 1977)，即臨界轉折 (Scheffer et al., 2009)：此時，系統可能從傳統的高碳鎖定路徑轉向低碳發展新軌道 (Seto et al., 2016)。

從系統理論角度看，當土地資源管理更趨精細化、碳排放管理機制逐步完善、綠色技術創新不斷湧現之時，系統參數 ($\delta, \beta_i, \gamma_i$) 可能越過臨界門檻，促使土地開發強度和房地產發展模式從「高密度—高排放」的路徑轉向低碳高效的創新平衡態。此一過程可理解為制度變遷與市場力量共同作用下的結構性轉變。多主體博弈與反身性 (Holling, 1973; Batty, 2017) 在此得以體現：當更嚴格的空間規劃與碳排放約束形成時，開發主體將調整預期，增大對綠色技術與低能耗產業的投入；土地利用模式將傾向緊湊式與功能混合的空間格局，房地產市場在低碳轉型中逐漸重構其發展模式。

上述理論分析揭示了系統演化的關鍵機制。首先，識別系統的臨界點有助於理解轉型的關鍵時機。通過參數敏感性分析，可探索不同調控手段的臨界強度，從而理解系統向低碳軌跡轉移的條件。其次，多維耦合框架強調系統要素協同演化的重要性。在理論層面，單一維度的干預（如簡單的供給約束）可能引發系統波動，而要素間的協同演化才能實現系統的穩定優化與可持續發展。

對於理論拓展而言，一方面可在模型中引入時變參數與非線性響應函數，以描述系統在不同發展階段的動態演化特徵；另一方面，可利用大數據與空間信息技術估計擴散項參數，更精確地刻畫區域間的相互作用與演化路徑。同時，引入非平穩隨機過程與多尺度分佈格局，有助於識別快速城市化與工業化進程下的非平衡穩態 (Grimm et al., 2008; Kennedy et al., 2015)。

（三）低碳轉型的動力學機制

土地開發系統向低碳模式轉型的內在機制可通過分岔分析與穩定性研究加以揭示。當土地利用結構、房地產市場預期與碳減排約束相互作用時，系統參數的微小變動便可能導致宏觀格局的顯著演化。這一分析框架在全球低碳轉型背景下具有普遍意義。傳統的土地開發模式正從簡單的空間擴張邏輯，逐步向綜合的系統治理轉變。這種轉變不僅涉及資源的優化配置和土地利用方式的科學調整，也在碳排放層面產生深遠影響。過去研究更多聚焦於局部的碳足跡評估、土地利用結構變化及短期的碳代謝特徵，但對從規劃準備、建設實施、恢復調整到持續收益、最終停滯的全生命週期碳效應關注不足。這使得在系統轉型期，對整體碳鎖定機制與臨界轉捩點進行動力學分析顯得尤為關鍵。

在前文所述非線性動力學模型基礎上，令控制參數向量：

$$\mu = (\alpha, \beta, \gamma)$$

包含了系統中與土地資源吾賦、政策約束、技術進步、市場預期以及碳減排策略相關的一系列參數。這裡， α 可代表土地開發與房地產市場的內生增速與容量上限(如耕地面積上下限、城鎮建設用地增量控制、房地產開發時序與強度)； β 體現要素間非線性交互強度(例如碳稅、碳排放權交易制度對房地產與土地利用主體行為的約束)； γ 則表示土地利用和房地產開發對碳排放路徑的貢獻率 and 對清潔技術、生態修復措施的敏感程度。

當系統參數 μ 發生變化時，Jacobian 矩陣 $J(\mu)$ 的特徵值譜也隨之改變。特徵方程為：

$$\det(J(\mu) - \lambda I) = 0$$

在臨界參數 μ^* 處，特徵值結構發生改變，引發系統分岔。根據特徵值實部與分岔類型的不同，可概括出三類典型的低碳轉型模式：

1. 漸進式轉型 (Hopf 分岔)：

當參數變化導致某個主導特徵值在 $\mu = \mu^*$ 處滿足

$$\operatorname{Re}(\lambda_1(\mu^*)) = 0, \operatorname{Re}(\lambda_i(\mu^*)) < 0, i = 2, 3,$$

且未出現多重特徵值融合，系統會經歷 Hopf 分出。這意味著系統從穩定平衡態轉向緩慢振盪的動力學行為。從理論角度看，這種漸進式轉型對應於在長週期內通過優化土地利用效率、調整空間結構、推進低碳基礎設施建設，逐步降低城市擴張對碳排放的拉動作用。這種演化特徵體現了系統的自組織調節能力：調控強度溫和遞增、市場主體行為適應期較長、碳減排路徑呈現出平穩過渡的特徵。

2. 突變式轉型 (Fold 分岔)：

當系統出現折疊分岔時，滿足

$$\det(J(\mu^*)) = 0, \operatorname{tr}(J(\mu^*)) < 0,$$

即多個特徵值在臨界點處重合，從而引發系統狀態從一個吸引子突然躍遷至另一個截然不同的吸引子。這對應於在政策或市場層面引入強力干預手段（如突然大幅提高碳排放成本、快速削減建設用地指標、強制性推廣高標準低碳技術）。在這種情景下，城市系統的土地利用模式與房地產投資邏輯將經歷快速重構，類似於在短期內通過碳交易、嚴格用地總量管控及激進的生態修復工程迫使系統「跳變」到低碳吸引子。在實踐中，這類突變式轉型雖能快速降低碳排放，但也可能引發市場震盪、產業鏈波動與社會適應困難。因此，在全域土地綜合整治推進中，如若政策制定者不事先考慮政策強度與市場承受力的配比關係，可能會造成低碳轉型的劇烈波動。

3. 混合式轉型 (多重分岔交織)：

當

$$P(\mu, \lambda) = \lambda^3 + a(\mu)\lambda^2 + b(\mu)\lambda + c(\mu) = 0$$

的係數 $a(\mu), b(\mu), c(\mu)$ 對參數 μ 的敏感性較高時，可能出現多重分岔的情形。此類情況下，系統會表現出複雜的非線性特徵與多穩定態共存狀態。對於全域土地整治而言，這表明在特定區域（如都市圈、城市群內部的功能區）中，不同類型的干預措施（工程措施、土地要素配置、產業結構優化、農業與林草地管理方式改變）疊加作用，使得系統可在多條路徑之間躍遷。政策決策者可利用這種非線性特徵，在不同階段引入差異化的調控策略，使系統擇優走向更加高效與低碳的土地利用模式。

為了進一步刻畫這些轉型行為並為決策提供早期預警信號，可引入 Lyapunov 函數加以分析。設

$$V(S) = \int \left[\frac{L^2}{2K_1} + \frac{R^2}{2K_2} + \frac{C^2}{2} \right] d\Omega,$$

描述系統狀態變數在相空間中可比較的「勢能」水準。時間導數為

$$\frac{dV}{dt} = \int \left[\frac{\alpha_1 L^2}{K_1} - \frac{\beta_1 L^2 R}{K_1} + \frac{\alpha_2 R^2}{K_2} - \frac{\beta_2 R^2 C}{K_2} + \gamma_1 L(-\delta C) + \gamma_2 R(-\delta C) \right] d\Omega$$

當系統接近臨界點時，"勢能函數"在參數擾動下可能出現平緩區域，特徵為關鍵慢變數的恢復率 λ_c 降低（Scheffer et al., 2009），為系統即將發生躍遷提供早期預警。這對於中國實踐具有重要意義：通過對土地整治專案的全生命週期碳核算、對土地利用變化與碳排放的動態監測，以及對碳定價、土地利用效率指標的時序分析，政策制定者可在變化還處於微弱信號階段時就捕捉到潛在的臨界轉折，從而提前干預。

綜上，本節分析為理解土地開發系統的低碳轉型提供了理論框架。區別於傳統研究僅關注局部變化與短期碳排放的侷限方法，本研究通過非線性動力學與分岔分析，拓展了從規劃準備到停滯期全生命週期、多因數耦合下的低碳演化機制認知。理論啟示包括：

- (1) 在「漸進式轉型」情境下，系統可通過溫和的調控與技術進步逐步引導主體行為改變，減小劇烈波動風險。
- (2) 在「突變式轉型」情境下，需謹慎評估強力干預的條件與時機，防止在追求快速減排的同時引發過高的系統成本。
- (3) 在「混合式轉型」情境下，系統需要靈活適應多重約束，通過差異化的演化路徑，實現長期穩定的結構優化，從而在多重穩定態中選擇最優的低碳發展路徑。

從理論應用角度看，這些系統動力學洞察可為空間規劃、碳排放管理以及市場調控提供新的分析框架，有助於理解系統從高碳鎖定向低碳轉型的演化機制。

未來研究可進一步利用大數據與空間信息技術，定量識別分岔點、監測時空異質性與隨機擾動效應，從而豐富複雜系統理論在城市低碳轉型研究中的應用。

(四) 模式參數化與資料來源之可得性

本研究屬理論建模，模型參數承載明確之經濟與制度含義： α_i 、 K_i 對應用地與不動產開發之內生增速與容量上限， β_i 表徵維度間之非線性耦合， γ_1 、 γ_2 為土地與房地產對碳排放之貢獻率， δ 為碳衰減率（內生於碳定價、清潔能源部署與綠建築標準等可調制度）。茲以臺灣現行公開資料環境為例，將建立模式（參數賦值）與驗證模式（機制與分岔之檢驗）所需資料依可得性分為三類，並對難以取得者提出補救，彙整於表 2-1。

可直接取得者：狀態變數 L 、 R 與主要流量參數可與臺灣官方資料對應——土地開發強度與用地結構取自內政部「國土利用現況調查」，不動產開發活躍度取自「不動產成交案件實際資訊」（實價登錄）；碳排放 C 與貢獻率 γ_i 取自環境部氣候變遷署「國家溫室氣體排放清冊報告」（含土地利用變化部門）及內政部建築物 CO_2 排放推估研究；碳衰減率 δ 中之政策分量，可由環境部碳費費率（一般費率每公噸 300 元）與臺灣碳權交易所國內減量額度成交資訊直接錨定。

難以取得者及補救：（1）宗地級全生命週期碳核算——現行清冊止於部門與年度尺度，缺地塊級資料，補以遙感反演活動水準結合建築碳足跡因子自下而上估算，並以清冊總量配平；（2）耦合強度 β_i 與開發主體預期——屬商業敏感、無直接觀測，補以實價登錄之土地溢價、不動產景氣指標等代理變數，並以貝氏校準反演；（3）隨機擾動強度 σ_i ——稀有事件樣本不足，補以低、中、高情境涵蓋不確定帶。整體而言，對難以精確標定之參數不追求單點估計，而以敏感性分析輸出穩健之結論區間，使分岔結構與預警指標之定性結論不因個別資料缺口而失效。

表 1 建立與驗證模式所需資料之來源、可得性與補救（以臺灣公開資料環境為例）¹

資料類別	對應參數	臺灣主要來源	可得性	無法取得時之補救
土地開發強度與用地結構	L 、 α_1 、 K_1	內政部國土利用現況調查	易	—（官方序列直接取用）
房地產開發活躍度	R 、 α_2 、 K_2	不動產成交案件實際資訊（實價登錄）、不動產景氣指標	易	以景氣指標補總量序列
碳排放與貢獻率	C 、 γ_1 、 γ_2	環境部 國家溫室氣體排放清冊、建築物 CO ₂ 排放推估	中	遙感×建築碳足跡因子估算，清冊總量配平
碳定價／碳衰減率	δ	環境部碳費費率、臺灣碳權交易所成交資訊	中	政策分量直接鉗定，其餘貝氏校準
維度間耦合強度	β_1 、 β_2	（無直接觀測值）	難	土地溢價等代理變數＋貝氏反演
宗地級全生命週期碳	γ_i 、 δ （微觀）	（現行清冊多缺失）	難	遙感反演＋生命週期評價因子，清冊總量約束
結構性衝擊頻率	σ_i	政策實驗與極端氣候歷史樣本	難	低／中／高情境＋敏感性區間

資料來源：作者自行整理自內政部國土測繪中心「國土利用現況調查」、內政部「不動產成交案件實際資訊」（實價登錄）、環境部氣候變遷署「中華民國國家溫室氣體排放清冊報告」、環境部公告碳費費率及臺灣碳權交易所公開成交資訊；「可得性」與「無法取得時之補救」二欄為作者研判。

¹ 注：本研究為理論建模，文中未呈現實證數值；「可得性」係就臺灣現行公開資料環境之一般情形而言，旨在為後續實證化提供資料準備之路線圖。

(五) 模式驗證

依系統動力學公認之模式信心建立程序 (Forrester & Senge, 1980; Barlas, 1996; Sterman, 2000)，模式驗證旨在逐步累積信心而非與單一資料逐點吻合；對以解釋因果機制為目的之理論模式，結構效度應優先於行為之逐點擬合。本節據此補充本文已完成之解析驗證，並界定後續以實證資料進行行為重現驗證之路線，彙整於表 2-2。

結構、參數與量綱：狀態變數 L 、 R 、 C 對應人地耦合系統之土地、資本與環境三要素 (Liu et al., 2007)；邏輯斯蒂增長、 $-\beta_1 L R$ 與 $-\beta_2 R C$ 耦合、以及 $\gamma_1 L + \gamma_2 R - \delta C$ 之排放生成，皆具明確之機制與政策槓桿，無純為擬合而設之參數 (結構驗證)；各參數界定其現實對應與量綱，並逐項核驗各方程兩側量綱齊一 (參數驗證與量綱一致性)。

極端條件、行為重現與靈敏度：令 $\delta \rightarrow \infty$ 則 $C \rightarrow 0$ (趨零碳吸引子)、 $K_i \rightarrow 0$ 則開發活動收縮、 $\beta_i \rightarrow 0$ 則系統退化為獨立邏輯斯蒂增長而喪失分岔，三者皆無發散、負值或守恆違反 (極端條件檢驗)；分岔分析已定性重現高碳鎖定、漸進式達峰 (Hopf) 與低碳躍遷 (Fold) 三類模式 (行為重現)；就 δ 、 β_i 、 γ_i 之特徵值與分岔型別變化加以考察，確認結論對關鍵參數具合理靈敏度而非過度敏感 (靈敏度分析)。逐點實證擬合則界定為後續以臺灣清冊與實價登錄資料標定之工作。

表 2 模式驗證項目、檢驗方法與本文落實情形

驗證項目	檢驗方法	本文落實情形
結構驗證	方程結構是否符合真實因果機制	已完成 (解析)：三維狀態與耦合／排放各項皆有機制及政策槓桿對應，無湊配參數
參數驗證	參數是否具現實對應與合理量級	已完成 (解析)：界定各參數之現實對應與量綱；量化標定列為後續實證
量綱一致性	各方程兩側量綱是否齊一	已完成 (解析)： dL/dt 與 dC/dt 各項量綱自治
極端條件檢驗	參數趨極限時行為是否合理	已完成 (解析)： $\delta \rightarrow \infty$ 、 $K_i \rightarrow 0$ 、 $\beta_i \rightarrow 0$ 之行為皆合理，無發散／負值

行為重現檢驗	能否定性重現典型動態模式	已完成（解析）：重現高碳鎖定、Hopf 達峰、Fold 躍遷；逐點擬合待實證
靈敏度分析	對關鍵參數之穩健性	已完成（解析）： δ 、 β_i 、 γ_i 之特徵值與分岔型別靈敏度

資料來源：依 Forrester & Senge (1980)、Barlas (1996) 與 Sterman (2000) 之驗證清單整理。

三、土地開發系統的低碳轉型路徑分析

前文的理論構建與穩定性分析為理解土地開發系統向低碳模式演進的複雜機制提供了基礎。本節在此框架上，從系統演化特徵出發，對可能呈現的低碳轉型路徑進行解析，並探討如何在不確定條件下通過預警信號識別和穩健性檢驗來確保轉型的穩定性。這些理論分析對理解城市系統的低碳轉型具有重要意義。

（一）轉型路徑的識別與分類

基於 Hamilton-Jacobi 方程：

$$\frac{\partial V}{\partial t} + H\left(S, \frac{\partial V}{\partial S}, t\right) = 0$$

其中

$$H = \sum_i p_i f_i(S) + \frac{1}{2} \sum_i \sigma_i^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S_i^2}$$

通過數值求解和特徵值分析，可以識別出三類典型的轉型路徑。這些路徑分別對應不同的系統干預強度、市場回應速度和外生衝擊類型，反映了系統演化的基本特徵。

1. 漸進式轉型路徑：

此類路徑在參數 μ 緩慢變化條件下出現，可表示為：

$$\frac{dS}{dt} = \varepsilon f(S, \mu(\varepsilon t)), \varepsilon \rightarrow 0$$

系統狀態沿著一個準穩態流形演化：

$$M(\varepsilon) = \{S: f(S, \mu(t)) = 0\}$$

這類路徑反映系統調節（如區域差異化管理、溫和的價格機制調整）對系統的漸進式影響。在空間資源配置與碳排放約束逐步優化的過程中，市場主體對新機制的適應具有一定滯後期。這類漸進式轉型路徑有助於減少系統震盪，為要素調整和技術升級創造緩衝空間，體現了系統演化的自組織特徵。

2. 躍遷式轉型路徑：

當系統跨越某個分岔閾值時，動力學表現為快速跳躍：

$$\|S(t) - S^*\| \sim \exp(\lambda t)$$

其中 λ 為不穩定模特徵值。這類突變轉型常在強力政策干預與短期嚴控措施實施的情境下出現。例如，當國家突然嚴格限制建設用地審批、快速提升碳排放成本，或在關鍵區域迅速實施強制性的產業轉型政策時，系統從原有的高碳發展吸引子躍遷至低碳吸引子。這種路徑儘管可能快速降低碳排放，但亦伴有顯著的社會成本與風險，如房地產市場大幅度震盪、土地資產價格快速調整，以及產業鏈的急速洗牌。因此，這類轉型策略需謹慎使用，多在局部試點、短期政策實驗中出現，以避免大範圍的不確定性擴散。

3. 混合式轉型路徑：

在現實中，土地開發系統很少呈現純淨的漸進或突變過程，而是表現出多重影響因素減加下的複雜演化特徵。此時系統方程可表示為：

$$\frac{dS}{dt} = f(S) + g(S)\xi(t)$$

其中 $\xi(t)$ 為隨機擾動，反映來自全球經濟環境變化、極端氣候事件、政策調整嘗試等外生因素的影響。這類路徑在長期演進中既有漸進式優化的主旋律，又存在局部時空尺度上的突變躍遷。系統在不同區域表現出的發展差異、經濟結構轉型需求與氣候政策變化即是典型場景。這種混合路徑體現了複雜系統的本質特徵：非線性、不確定性與多重穩態的共存。從理論視角看，混合式轉型路徑揭示了系統演化的豐富動力學特徵。首先，系統在不同時空尺度上可能呈現出不同的演化模式，較小尺度上的局部突變可能與較大尺度上的漸進演化共存。其次，多重影響因素的耦合作用使得系統的演化軌跡難以準確預測，這要求我們在分析框架中充分考慮不確定性的作用。再者，外生衝擊與內生演化的交互作用可能導致系統在多個穩態之間跳轉，形成複雜的動態格局。這種複雜性對系統調控提出了更高要求。調控機制需要具備足夠的靈活性和適應性，以應對不同層面的系統響應。同時，需要建立多層次的監測與反饋機制，及時捕捉系統在不同尺度上的演化特徵。此外，調控策略的制定還需要考慮時空異質性，針對不同區域、不同發展階段的系統特徵採取差異化的調控方案。

（二）關鍵轉捩點的預警機制

在低碳轉型過程中，能否及時捕捉系統接近臨界轉捩點的早期預警信號，直接影響政策干預的有效性和及時性。為此，可引入一組綜合指標：

1. 恢復率指標：

$$\lambda(t) = - \left[\frac{\partial^2 V}{\partial S^2} \right]^{-1} \frac{\partial V}{\partial S}$$

當系統臨近分岔點時，關鍵慢變數的恢復率降低（Scheffer et al., 2009），這意味著在受到微小擾動後，系統回到原有平衡的能力減弱。

2. 波動性指標：

$$\sigma^2(t) = \langle (S(t) - \langle S \rangle)^2 \rangle,$$

狀態變數方差增大體現了在接近轉捩點時系統敏感性提升，對外部衝擊的回應更為劇烈。

3. 自相關性指標：

$$AC(\tau) = \frac{\langle S(t)S(t + \tau) \rangle}{\langle S^2 \rangle},$$

自相關性隨臨界點臨近而上升，說明系統對過去狀態的記憶效應增強，難以恢復至原有態勢。這種統計特徵為識別系統的臨界轉型提供了重要線索。在複雜系統理論中，自相關性的增強往往預示著系統彈性的減弱和潛在的相變風險。從動態監測的角度看，這些預警指標可用於分析城市系統的多個關鍵維度。首先，在土地利用方面，可通過持續追蹤開發強度、土地利用結構等指標的時間序列特徵，識別異常波動模式。當這些指標表現出顯著的自相關性增強時，往往意味著系統正在接近臨界轉型點。其次，在房地產市場層面，價格、交易量等指標的自相關性分析可揭示市場穩定性的潛在變化。高度的自相關性可能預示著市場即將發生結構性調整。再者，在碳排放方面，排放強度和能源消費模式的自相關性變化可反映系統向低碳轉型的進程和潛在風險。這種預警機制的理論價值在於：一方面，它提供了識別系統臨界轉型的定量工具，使我們能夠在系統發生不可逆轉變之前捕捉到預警信號；另一方面，通過分析不同區域和部門的自相關性特徵，可以更好地理解系統的空間異質性和部門差異性。例如，不同功能區域可能表現出不同的自相關性模式，這種差異性的認識有助於制定更有針對性的調控策略。在實踐應用層面，這種預警機制可以支持更精準的系統調控。通過建立多層次的監測網絡，及時追蹤各類指標的動態變化，系統管理者可以在早期階段發現潛在風險，並採取相應的預防性措施。這種基於預警信號的調控方式，不僅能夠提高系統管理的前瞻性，也有助於實現更加穩健和可持續的系統演化。

(三) 轉型路徑的穩健性分析與結論推導

在高度不確定的外部環境下，即使有政策預案與市場預期管理，系統可能仍面臨隨機衝擊或路徑依賴問題。為此，引入概率密度演化方程：

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\nabla \cdot [f(S)P] + D\nabla^2 P$$

其中 $P(S, t)$ 描述系統在狀態 S 處的概率密度。對真實場景而言，可將不同政策方案、國際碳市場變動、國內經濟週期波動的影響通過參數化方式納入，以評估在多種情景下轉型路徑的分佈形態。通過分析穩態概率分佈與相應的 Lyapunov 勢能函數 $V(S)$ ，一條穩健的低碳轉型路徑應滿足：

$$\int P(S, t)V(S)dS \leq V_0,$$

即在擾動與不確定條件下，系統總體的「勢能水準」仍維持在預定閾值以內。這體現了系統的適應性與穩健性：即使遇到外部衝擊（如能源價格波動或產業結構變化），系統仍能在較短時間內恢復平衡，回歸低碳發展軌道。

綜合上述分析表明，系統向低碳模式的穩定轉型需要建立在深入理解其動力學特徵的基礎之上。首要的是認識到系統演化的非線性本質，避免採用過於簡化的線性分析框架。通過對漸進式、躍遷式與混合式三類典型路徑的系統性研究，我們可以更好地把握系統在不同演化階段的特徵與規律。這種理論框架不僅強調了預警機制在識別臨界轉捩點中的重要作用，也突出了在高度不確定環境下保持系統穩健性的必要性。從理論到實踐的轉化過程中，這一分析框架特別強調了系統韌性的重要性。通過在轉型早期準確識別關鍵演化路徑，並建立有效的不確定性管理機制，可以幫助系統在保持穩定的同時，實現從高碳發展模式向低碳可持續發展模式的平穩過渡。這種基於系統動力學的分析方法，為理解和引導城市系統的低碳轉型提供了堅實的理論基礎。

四、基於系統演化特徵的調控機制設計

在前文的理論分析基礎上，本節嘗試將複雜系統動力學研究成果轉化為可操作的調控框架。通過將回饋控制、最優控制與協同治理機制納入統一的理論體系，我們從理論層面完善了土地開發系統的調控方法，並為理解系統向低碳模式轉型提供了分析工具。所設計的調控機制體現了系統科學與經濟學的雙重思維，既關注資源配置效率與系統整體效用的最大化，又考慮了系統演化的漸進性、市場主體的適應性以及多要素協同的複雜特徵。

（一）多層次調控框架的構建

基於前文的分析，可以嘗試建立一個具有自我調整特徵的多層次調控框架，以應對土地開發系統的非線性演化與不確定性衝擊。設定期望軌跡 $S^*(t)$ 為政策目標狀態（如符合規劃紅線約束、滿足既定碳強度下降指標、保持房地產市場適度穩定），構造綜合性回饋控制律：

$$u(t) = K(S(t) - S^*(t)) + \int_0^t G(t - \tau)(S(\tau) - S^*(\tau))d\tau$$

其中， K 為回饋增益矩陣，決定調控力度的靈敏度； $G(t)$ 為積分核函數，體現調控對歷史偏差的累積考慮。在經濟解釋上，比例控制項 $K(S(t) - S^*(t))$ 對應為即時政策反應，如通過適度調增碳稅或加強土地出讓指標管控以快速糾偏。當土地開發強度或房地產市場活躍度偏離設定軌道時，決策者可通過提高建設用地出讓門檻、縮減低效用地供應或提升碳排放費用快速削弱偏差。積分控制項則體現了中長期政策信號（如國土空間規劃和碳目標考核）對市場的漸進性影響。當系統在較長時間內偏離理想狀態，累積的偏差信號將迫使決策者在規劃週期內強化空間約束、提高低碳技術補貼或長期鼓勵綠色建築和基礎設施投資。這種雙重調控結構（短期調節與長期約束相結合）有助於既保證當期均衡不偏離，又在長期維度上實現資源配置優化與碳約束要求。

(二) 差異化調控策略與階段化政策工具

根據系統所處演化階段的不同，可靈活運用差異化調控策略：

1. 遠離臨界點區域：柔性調控

在系統尚處於遠離分岔點的區域，宏觀格局相對穩定。此時可採用柔性調控策略：

$$u_1(t) = -k_1 \nabla V(S)$$

其中 $V(S)$ 為 Lyapunov 勢函數或規劃目標函數（如碳排放—經濟代價的權衡指標）， $\nabla V(S)$ 為其梯度。經濟學含義在於沿著降低社會總成本的方向逐步移動，如通過適度調整土地出讓節奏、鼓勵綠色建材使用或提供適度的低碳技術補貼，以穩定市場預期並持續降低整體碳強度。

2. 接近臨界點區域：預防性強化調控

當預警指標（如恢復率下降、自相關性增強）顯示系統即將接近分岔點時，需實施更為嚴謹的調控：

$$u_2(t) = -k_2(S - S^*) - k_3 \text{sign}(\lambda_c),$$

λ_c 為關鍵慢變數的恢復率。當 λ_c 降低至臨界值附近時，通過強化對建設用地總量的即時限制、嚴格執行碳配額管理、分區域設定土地利用強度上限等手段，將系統穩固在安全區間內。此類調控措施在經濟層面相當於提高碳排放的邊際成本，從而迫使市場主體（如房地產開發商和產業投資者）迅速調整行為，避免進入高碳鎖定狀態。

3. 跨越臨界點區域：精準聚焦調控

當系統已發生躍遷或即將快速躍遷時，需快速實施精準治理：

$$u_3(t) = u^*(t) + K(t)\delta S(t)$$

其中 $u^*(t)$ 為名義最優軌跡控制（類似理想化政策方案）， $K(t)$ 為時變增益矩陣， $\delta S(t)$ 為實際狀態與名義軌跡的偏差。在此情景下，決策者可對重點區域實施專項整治，如對過度依賴高排放產業的區域推出土地功能再配置方案，對房地產市場過熱地區嚴控新建專案或對高碳排放建築進行改造升級，從而在最短時間內將系統拉回可控軌道。

（三）協同治理與最優決策機制

為實現多層次調控的有效整合，可構建一個綜合目標泛函：

$$L(u, S) = \int [w_1 \|S - S^*\|^2 + w_2 \|u\|^2 + w_3 C(S)] dt$$

其中， w_1, w_2, w_3 為權重係數， $C(S)$ 為碳排放代價函數。通過最優控制理論求解此泛函的最小值，可以在碳減排目標（ $C(S)$ 代表社會環境效益需求）與政策實施成本（ $\|u\|^2$ 體現調控強度與代價）以及經濟偏差代價（ $\|S - S^*\|^2$ 代表經濟結構及空間資源配置偏離理想狀態的損失）之間求得平衡。權重係數 w_1, w_2, w_3 的設定相當於政策制定者在社會福利函數中賦予不同目標的相對重要性。例如，在系統發展初期，可能更注重基礎要素的擴張與效率提升，政策更注重經濟增長與住房可及性， w_1 和 w_2 相對較小， w_3 可能也不高。隨著系統向更高級階段演進，伴隨技術進步與環境約束增強， w_3 的權重逐步提高，從而引導市場逐步轉向低碳路徑。在空間差異化政策設計上，不同區域可根據自身資源宗賦、產業結構及環境容量，選擇相異的權重配置，以實現分類施策和因地制宜。

(四) 碳交易平臺情境模擬

本節以臺灣碳定價制度為背景，進行碳交易平臺之情境模擬。臺灣自 2025 年依《氣候變遷因應法》開徵碳費（一般費率每公噸 300 元，由環境部徵收），並由 2023 年成立之臺灣碳權交易所辦理國內溫室氣體減量額度之交易。本文將此價格訊號映射至模型：碳費與減量額度價格越高、交易越活絡，碳衰減率 δ 越大，並誘致清潔技術而使貢獻率 γ 下降。

據此設定四個遞進情境（見圖 1 與表 3）：S0 無碳定價基準；S1 碳費開徵（一般費率， $\delta=0.40$ ）；S2 費率調升並碳權交易活絡（ $\delta=0.60$ ）；S3 強化型碳定價（費率趨近國際水準、擴大徵收對象並朝總量管制與額度交易連結， $\delta=0.85$ ）。所用參數為無量綱示例值，僅反映政策力度遞增之相對關係，並非按新臺幣計價校準；模擬基於確定性良態混合化（略去擴散與隨機項）。

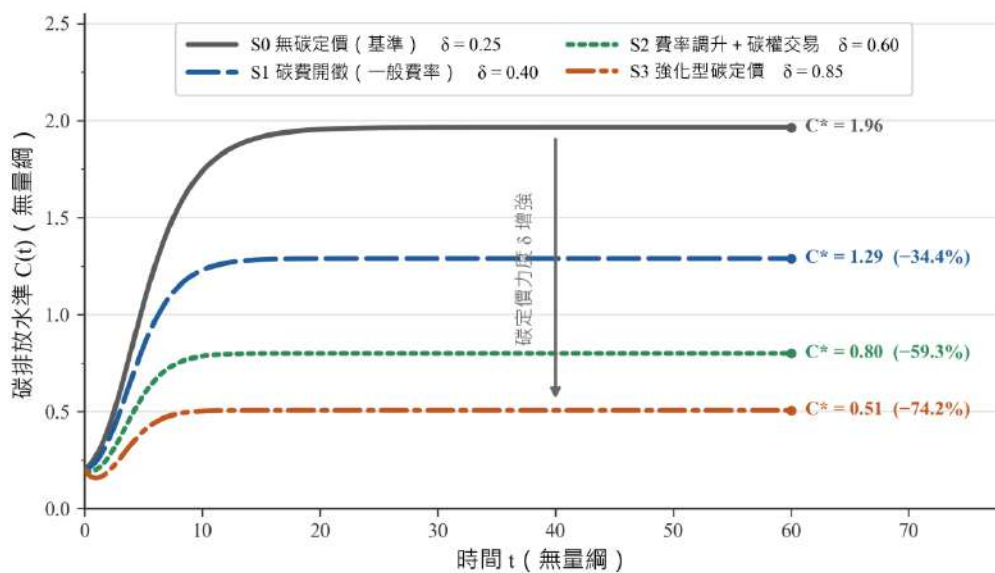


圖 1 不同碳交易平臺情境下碳排放水準 $C(t)$ 之演化軌跡

資料來源：作者模擬計算繪製。本圖非實證資料，為本文三維動態模型於四種碳定價情境（ $\delta=0.25$ 、 0.40 、 0.60 、 0.85 ）下之數值積分結果，參數設定見表 3。

表 3 不同碳交易平臺情境之數值模擬結果²

情境	δ	穩態 C^*	較基準降幅	恢復率 $ \text{Re } \lambda_{\max} $	對應臺灣政策
S0 無碳定價（基準）	0.25	1.964	—	0.324	碳費開徵前
S1 碳費開徵（一般費率）	0.40	1.289	-34.4%	0.430	2025 年碳費每公噸 300 元、碳交所國內額度起步
S2 費率調升＋碳權交易	0.60	0.800	-59.3%	0.497	費率調升、減量額度交易擴大
S3 強化型碳定價	0.85	0.506	-74.2%	0.527	趨近國際費率、擴大對象、朝總量管制連結

資料來源：作者整理

模擬結果顯示三點。其一，碳交易平臺越成熟，穩態碳水準 C^* 相對基準單調下降，依序為 -34.4%、-59.3% 與 -74.2%（由 1.964 降至 1.289、0.800、0.506）。其二，系統恢復率 $|\text{Re } \lambda_{\max}|$ 由 0.324 升至 0.527，韌性增強且遠離臨界轉折，與前文之早期預警框架相互呼應。其三，碳約束緩解了 $-\beta_2 R C$ 對房地產之抑制，使 R^* 由 0.663 穩中有升至 0.884，顯示低碳轉型與不動產市場穩定可相容。就臺灣而言，此結果支持以碳費與碳權交易作為價格工具、循漸進式（而非躍遷式）路徑推進轉型，並提示適度調升費率、擴大徵收對象與深化臺灣碳權交易所之額度交易，有助於將系統穩固於低碳吸引子。

² δ 為碳定價力度之無量綱代理，數值為示例性而非按新臺幣校準；恢復率 $|\text{Re } \lambda_{\max}|$ 為平衡點 Jacobian 主特徵值實部之絕對值，越大代表韌性越強、越遠離臨界轉折。模擬可由隨附之 Jupyter 筆記本（碳交易平臺情境模擬.ipynb）重現

（五）政策實施的制度保障與協同機制

要確保上述調控機制在現實中有效運行，需從制度建設與治理結構優化出發，構建多主體協同體系和監測預警機制。

1. 動態監測與資料支撐

建立覆蓋全國範圍的用地、房地產和碳排放資料庫，即時監測關鍵狀態變數（如建設用地供應量、土地價格、房地產投資增速、單位建築面積碳排放等），並通過資料分析與模型擬合動態更新調控參數。遙感監測、GIS 技術和大資料分析可增強對土地利用變化和碳排放分佈格局的精準掌握。

2. 激勵與約束相結合的政策工具

將碳排放績效與土地出讓金、建設指標以及金融扶持政策掛鉤。對於在規劃要求內高效利用土地、採用低碳技術的企業給予稅收優惠、碳配額補貼；對超標排放或粗放利用土地的開發行為實施額外成本徵收與限制。這種經濟槓桿設計激勵市場主體主動選擇低碳化路。

3. 多部門、多層級的縱橫向協調機制

在縱向上，中央政府設定宏觀碳約束指標和國土空間管控紅線，地方政府細化實施方案；在橫向上，不同職能部門（自然資源、住建、生態環境、財政與金融監管機構）需加強資訊共用和政策協同，通過聯動決策在土地資源配置、房地產市場監管和碳減排激勵上實現互補。

綜合而言，上述調控機制設計在經濟學內涵上突出碳排放的外部成本內部化思路，通過最優控制與分岔分析將政策干預引入系統動力學框架中。當政策參數（如碳稅率、用地供應策略、技術補貼力度）經過精確標定後，不僅可引導社會資源配置朝向低碳和高效率的發展軌道，也有利於降低系統在臨界轉捩點附近的風險。同時，通過建立長期激勵—約束制度安排與動態監測預警機制，可在多維時空尺度和不確定條件下維持調控策略的穩健性與靈活性，從而為中國從傳統高碳擴張向低碳高品質發展模式的轉型提供堅實支撐。

五、結論與展望

本研究基於複雜系統理論的分析範式，將土地開發活動視為由土地利用、房地產市場與碳排放等多維要素共同耦合而成的非線性動態系統，構建了能夠刻畫低碳轉型特徵的多維動力學模型與調控機制設計框架。通過數理推導與參數敏感性分析，本研究深入揭示了土地開發系統的內在演化機理與潛在轉型路徑，豐富了城市系統低碳轉型的理論研究。

（一）主要結論與貢獻

第一，研究發現土地開發系統的低碳轉型呈現出顯著的非線性與分岔特徵。模型表明，當系統參數跨越臨界閾值時，土地開發、房地產活躍度與碳排放間的耦合關係可能發生突變式改變，進而導致系統由高碳鎖定態向低碳吸引態的躍遷。這意味著轉型路徑並非線性漸進，而是隨系統參數、資源稟賦與市場預期變化而表現出多種可能的演化軌跡。理解和預判這一分岔特徵對於系統調控與風險防範具有重要理論價值。

第二，研究進一步識別出土地開發系統轉型路徑的典型類型：漸進式、躍遷式與混合式。這種路徑分類揭示了系統演化的基本特徵：漸進式路徑體現了系統的自組織演化與市場的漸進適應過程；躍遷式路徑展現了在強烈外部干預或突發事件下系統的快速重構特徵；混合式路徑則反映了系統在長期演化與複雜外部擾動下的適應性與不確定性。這一分類框架為理解複雜系統的演化規律提供了新的理論視角。

第三，本研究從系統調控角度提出了多層次、可動態調整的調控機制設計方案。該方案將即時回饋控制與歷史積分控制有機結合，不僅可應對短期系統波動，也能在長期維度上引導系統向低碳穩態演化。在此基礎上，引入早期預警機制、恢復率指標與協同治理框架，為系統調控提供了理論工具，以在臨界轉型點來臨前實現有效干預。這套理論框架具有較強的普適性，可為複雜系統的動態調控提供方法論指導。

(二) 研究侷限與未來展望

基於上述研究發現與理論侷限，未來的研究方向可從多個維度深化和拓展。在理論層面，需要進一步完善空間異質性與多尺度效應的分析框架。這包括引入更精細的空間結構描述，探索不同類型系統在資源稟賦、發展階段與技術水平差異下的演化特徵，以及研究跨尺度相互作用對系統整體轉型的影響機制。這種多尺度分析框架不僅有助於理解系統的空間異質性，也為揭示複雜系統的演化規律提供新的視角。

在方法論層面，結合大數據與人工智慧等新興技術工具，可以顯著提升對系統動態特徵的把握能力。通過整合多源數據，包括高解析度遙感觀測、碳排放監測以及市場交易記錄等，能夠建立更精確的系統狀態識別機制。這種數據驅動的方法不僅提高了預警信號提取的準確性，也為動態調控策略的優化提供了堅實的實證基礎。特別是在複雜系統的臨界轉型研究中，大數據分析可以幫助識別微弱的系統變化信號，為預測和干預提供重要支持。

在系統調控理論方面，需要深入研究多種調控手段的協同效應與耦合機制。這包括探討市場化工具（如價格機制）、技術創新路徑與制度安排的互動關係，研究不同調控手段在系統轉型過程中的動態效應，以及分析各類干預措施的時空傳導特徵。通過建立綜合性的理論框架，可以更好地理解系統調控的複雜性，並為設計更具韌性的干預策略提供指導。

展望未來，隨著理論研究的深化和分析工具的完善，土地開發系統低碳轉型的研究將進一步拓展。通過整合複雜系統科學、資訊技術與可持續發展理論，這一研究領域有望在理論創新和實踐應用兩個層面取得突破。特別是在應對全球氣候變化的背景下，對城市系統低碳轉型機制的深入理解，將為建構更具韌性和可持續性的發展模式提供重要的理論支撐。這項研究不僅豐富了複雜系統理論在城市發展領域的應用，也為理解和引導城市系統向低碳模式轉型提供了新的分析框架。隨著理論研究的不斷深化、方法工具的持續創新，以及實證案例的積累，這一研究框架將為構建韌性、低碳、可持續的城市發展模式提供更加系統和深入的科學支撐。

謝誌

本文係 2026 年度區域制度研究決策諮詢課題「基於遙感數據與深度學習的山區綠色發展潛力識別與空間優化研究」(QYZDYJZX202618) 及 2026 年度人口與發展研究課題「新質生產力驅動瀘州人口素質與產業升級協同機制研究」(RK202606) 之階段性研究成果，謹此感謝上述兩項計畫之經費補助。作者亦感謝匿名審查人惠賜寶貴修改意見，使本文論證更臻完備。

參考文獻

- Barlas, Y. (1996). Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. *System Dynamics Review*, 12(3), 183-210.
- Barthelemy, M. (2019). The statistical physics of cities. *Nature Reviews Physics*, 1(6), 406-415.
- Batty, M. (2013). *The new science of cities*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Batty, M. (2017). Cities in disequilibrium: Non-equilibrium and emergence in city systems. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 44(4), 592-599.
- Bettencourt, L. M. (2013). The origins of scaling in cities. *Science*, 340(6139), 1438-1441.
- Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., ... & Caldeira, K. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, 360(6396), eaas9793.
- Forrester, J. W., & Senge, P. M. (1980). Tests for building confidence in system dynamics models. In A. A. Legasto, J. W. Forrester, & J. M. Lyneis (Eds.), *System dynamics (TIMS Studies in the Management Sciences, Vol. 14, pp. 209-228)*. North-Holland.
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756-760.
- Gudipudi, R., Fluschnik, T., Ros, A. G. C., Walther, C., & Kropp, J. P. (2016). City density and CO2 efficiency. *Energy Policy*, 91, 352-361.

- Holling, C. S. (1973). Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1-23.
- Kennedy, C. A., Stewart, I., Facchini, A., Cersosimo, I., Mele, R., Chen, B., ... & Sahin, A. D. (2015). Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5985-5990.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., ... & Taylor, W. W. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317(5844), 1513-1516.
- May, R. M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*, 261(5560), 459-467.
- Pu, W., Zhang, A., Zhang, Z., Qin, S., & Xia, Q. (2023). Can urban land market reform mitigate industrial emissions? Environmental evidence from 257 prefecture-level cities in China. *Environmental Research*, 236, 116707.
- Qiao, R., Wu, Z., Jiang, Q., Liu, X., Gao, S., Xia, L., & Yang, T. (2024). The nonlinear influence of land conveyance on urban carbon emissions: An interpretable ensemble learning-based approach. *Land Use Policy*, 140, 107117.
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W. A., Brovkin, V., Carpenter, S. R., Dakos, V., ... & Sugihara, G. (2009). Early-warning signals for critical transitions. *Nature*, 461(7260), 53-59.
- Scheffer, M., Carpenter, S. R., Dakos, V., & van Nes, E. H. (2015). Generic indicators of ecological resilience: Inferring the chance of a critical transition. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46, 145-167.
- Seto, K. C., Davis, S. J., Mitchell, R. B., Stokes, E. C., Unruh, G., & Ürge-Vorsatz, D. (2016). Carbon lock-in: Types, causes, and policy implications. *Annual Review of Environment and Resources*, 41, 425-452.
- Sterman, J. D. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. Irwin/McGraw-Hill.
- Tang, M., Rong, Y., Zheng, L., Luo, Y., Li, K., & Fan, X. (2024). Urban land use optimization prediction considering carbon neutral development goals: A case study of Taihu Bay Core area in China. *Carbon Balance and Management*, 19(1), 39.
- Thom, R. (1977). *Structural stability and morphogenesis: An outline of a general theory of models*. Reading, MA: Addison-Wesley.

- Turing, A. M. (1952). The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 237(641), 37-72.
- Wilson, A. G. (2014). Complex spatial systems: The modelling foundations of urban and regional analysis. Routledge.
- Wu, J., Xiang, W. N., & Zhao, J. (2014). Urban ecology in China: Historical developments and future directions. *Landscape and Urban Planning*, 125, 222-233.
- Zhang, N., Yu, K., & Chen, Z. (2017). How does urbanization affect carbon dioxide emissions? A cross-country panel data analysis. *Energy Policy*, 107, 678-687.

From Carbon Lock-in to a Low-Carbon Attractor: Critical Transitions in Land Development Systems

Cong Xu & Tso-yu Calvin Lin***

Abstract

This study develops a novel theoretical framework for analyzing the low-carbon transformation of land development systems, grounded in complex systems theory and multidimensional coupling analysis. By constructing dynamic models of land use, real estate development, and carbon emissions, the study makes several key theoretical contributions. First, a comprehensive mathematical model is proposed that captures the nonlinear interactions and coupling mechanisms between the system components, extending beyond traditional linear or static approaches. Second, through rigorous bifurcation analysis and stability theory, three distinct transformation pathways—progressive, transitional, and hybrid—are identified and described, shedding light on the intrinsic patterns of system evolution. Third, based on critical transformation theory, the study introduces innovative early warning and robustness indicators, providing new tools for detecting and analyzing critical points in the system. A significant theoretical breakthrough is the development of a multi-level control framework that integrates real-time feedback with historical cumulative effects, allowing for a more precise understanding of system dynamics across temporal and spatial scales. Additionally, by incorporating stochastic processes and spatial heterogeneity into the analysis, this research advances the methodological frontier. These theoretical innovations offer new insights into the low-carbon transformation of complex urban systems. Future research directions include strengthening the mathematical foundation of the model, exploring multi-scale coupling effects, and examining the generalizability of the identified transformation pathways across different system contexts. This work represents a significant step in applying complex systems theory to urban sustainability transitions.

* Associate Professor, Qingdao Huanghai University. Email: cong.xu@alumni.aalto.fi

** Professor, Department of Land Economics, National Chengchi University. Email: tsoyulin@nccu.edu.tw

and provides a solid theoretical foundation for analyzing the evolution of land development systems.

Keywords: land development; low-carbon transition; complex systems; bifurcation analysis; regulatory mechanisms