

基於 FLUS 模型的湖北省“三生空間” 多情景模擬及生態環境效應分析

MULTI-SCENARIO SIMULATION AND ECOLOGICAL ENVIRONMENTAL EFFECT ANALYSIS OF
“PRODUCTION-LIVING-ECOLOGICAL SPACES” IN HUBEI PROVINCE BASED ON FLUS MODEL

河南農業大學
資源與環境學院
碩士生

方海潤
Hai-Run Fang

河南農業大學
資源與環境學院
教授

李玲
Ling Li

河南農業大學
資源與環境學院
講師

胡亞瑾*
Ya-Jin Hu

河南農業大學
資源與環境學院
講師

劉思源
Si-Yuan Liu

河南農業大學
資源與環境學院
碩士生

魏江林
Jing-Lin Wei

河南農業大學
資源與環境學院
副教授

蔡恩香
En-Xiang Cai

摘要

本研究基於湖北省 2000~2020 年三期 1 km 分辨率土地利用數據，運用土地利用轉移矩陣和生態環境效應評估的方法，系統分析區域“三生空間”格局演變特徵及其生態環境效應。在此基礎上，基於 2020 年數據，運用 FLUS 模型開展多情景模擬推演，系統解析自然發展、生產優先與生態優先情景三類發展路徑下 2030~2050 年土地利用格局演變。通過構建生態質量評估指標體系，測算各情景生態系統服務價值變化規律，並重點解析不同用地類型轉換對區域生態質量改善的貢獻強度。

結果顯示：①2000~2020 年，湖北省農業生產用地持續縮減，而工礦生產用地則呈現上升趨勢，且 2010 年後的十年內工礦生產用地規模顯著擴張，同時生活空間也在不斷擴大，生態空間面積的變化呈 V 型曲線，表現為先縮減後恢復的過程。②2000~2020 年，湖北省生態環境質量指數由 0.555 上升到 0.559，屬於較高水準。③在 2030~2050 年期間，“三生空間”的總體空間格局保持相對穩定。對比分析表明，自然發展情景與生態優先情景呈現相似的發展態勢，但後者通過強化生態保護措施，使得生態用地規模較自然發展情景明顯擴大，體現了更強的環境保護導向。④在自然發展、生產優先和生態優先三種情景之中生態優先情景下的生態環境質量指數最高，生產優先情景指數最低。

關鍵詞：湖北省、三生空間、FLUS 模型、多情景模擬、生態環境效益、土地利用類型變化。

* 通訊作者，河南農業大學講師

450046 中國河南省鄭州市鄭東新區平安大道 218 號 · huyajinxn@163.com

MULTI-SCENARIO SIMULATION AND ECOLOGICAL ENVIRONMENTAL EFFECT ANALYSIS OF "PRODUCTION-LIVING-ECOLOGICAL SPACES" IN HUBEI PROVINCE BASED ON FLUS MODEL

Hai-Run Fang

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

Ya-Jin Hu*

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

Jing-Lin Wei

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

Ling Li

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

Si-Yuan Liu

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

En-Xiang Cai

College of Resources and Environment, Henan Agricultural University

ABSTRACT

This research employs three-period (2000 ~ 2020) land use datasets at 1km spatial resolution in Hubei Province, combining Land use transition matrix and ecological-environmental impact evaluation frameworks to comprehensively investigate the spatiotemporal evolution of "production-living-ecological spaces" (PLES) and associated environmental consequences. Leveraging 2020 as the reference year, the FLUS model is applied to simulate multiple scenario projections, critically assessing the dynamics of land use configurations under three strategic pathways—natural progression, production-oriented development, and ecological conservation—from 2030 to 2050. A composite ecological performance metric system is developed to measure variation trends in ecosystem service values across scenarios, particularly evaluating the differential impacts of land use transitions on enhancing regional ecological integrity.

The key findings indicate: ① During 2000 ~ 2020, agricultural production land in Hubei Province continued to decrease, while industrial and mining production land showed an increasing trend, with significant expansion particularly during 2010-2020. Living space also expanded continuously, while ecological space exhibited a V-shaped change curve - decreasing first and then recovering. ② Hubei Province's ecological-environmental quality index exhibited an upward trajectory during the 2000 ~ 2020 period, rising from 0.555 to 0.559, with a cumulative growth rate of 0.77% over the two-decade span, maintaining a relatively high level. ③ During 2030 ~ 2050, the overall spatial pattern of PLES remained relatively stable. Comparative analysis revealed similar development trends between the natural evolution and ecological priority scenarios, but the latter demonstrated stronger environmental protection orientation with significantly larger ecological land area compared to the natural development scenario. ④ A comparative analysis of the three policy pathways—natural progression, production-oriented development, and ecological conservation—

reveals that the ecological conservation strategy yielded the maximum eco-environmental quality index, whereas the production-oriented approach resulted in the minimum valuation.

Keywords: Hubei province, Production-Living-Ecological Spaces (PLES), FLUS model, Multi-scenario simulation, Ecological-environmental benefit, Land use type change.

一、引言

2012 年，黨的十八大報告首次提出“三生空間”(production-living-ecological space, PLES) 的概念^[1,2]，並對此做出系統的規劃部署^[3,4]；在後來的十九大報告中再次強調該概念，並著重提出通過科學劃定“三條紅線”^[5]來統籌三生空間協調發展，實現生態環境可持續發展目標。

“三生空間”作為生產、生活和生態空間的集合概念，共同構成人類社會經濟活動的功能載體^[6]。自 20 世紀 80 年代經濟體制改革以來，我國城鎮化進程加速推進，建設用地快速蔓延對農業及生態空間產生持續性侵佔^[7-10]，導致三類空間的功能衝突日趨顯著。這種空間競爭格局不僅加劇了區域發展失衡，更衍生出耕地減少、生態退化等環境問題。在此背景下，深入探究三生空間演變規律及其生態環境效應，已成為優化國土空間治理體系和推進生態文明建設的重要研究課題^[11]。

當前學界關於“三生空間”的研究體系主要涵蓋以下理論：概念內涵與理論基礎構建^[12]、分類體系與空間識別技術^[13,14]、功能效應評估^[15]、土地利用轉型和生態環境效應^[16]、時空分異規律^[17]、空間優化路徑^[18]，以及多尺度格局演變驅動機制探究。現有模擬方法主要包括 PLUS 模型^[4]、Markov 鏈^[19]、CLUE-S 模型^[20]和 FLUS 模型^[21,22]等技術路徑，其中 FLUS 模型憑藉其多斑塊時空演化模擬能力^[23]及相較於 PLUS 模型的參數精簡優勢，在大尺度土地利用趨勢預測中展現出更高應用效能。在生態環境效應研究領域，基於生態環境質量指數的分析佔據主導地位^[24-30]。典型如丁慧敏團隊^[31]運用土地利用轉移矩陣結合生態環境質量指數，系統揭示了 2000 ~ 2020 年昌甯縣土地利用功能轉型的生態環境響應機制。現有成果多聚焦於歷史階段的三生空間-生態環境關聯研究，因此面向未來的空間演變預測及其環境效應評估亟待深化^[32]。

湖北省作為中部地區崛起的重要戰略支點，具有九省通衢的區位優勢，連接長三角、成渝、粵港澳和京津冀四大經濟區，是京廣軸與長江經濟帶的交匯點，因此關於湖北省的土地利用類型變化研究，對其發展規劃具有基礎支撐作用。文獻分析表明，當前針對湖北省“三生空間”演變與生態環境響應機制的研究尚存不足。既有成果多聚焦於歷史時期空間格局的時空分異特徵^[33]，而關於多情景演變預測及其環境效應的系統性研究仍有待深化。FLUS 模型作為空間規劃領域的核心分析工具，憑藉其多尺度空間模擬能力，通過

構建多尺度土地利用演變模型與生態效應評估體系的耦合框架，能夠實現區域空間格局演變趨勢的動態預測，為城市可持續發展和生態保護策略制定提供科學依據。

基於 Landsat 系列遙感影像編譯數據 (2000 ~ 2020 年)，系統解析湖北省生產、生活、生態空間的時空分異特徵及其生態環境效應，基於 2020 年基準數據，運用 FLUS 模型對湖北省自然發展、生產優先與生態優先三種情景下 2030 ~ 2040 ~ 2050 年的土地利用格局進行模擬預測，通過測算生態環境質量指數和生態貢獻率^[34]，揭示三生空間演變對區域生態環境的潛在影響，為湖北省國土空間優化佈局及生態治理提供科學支撐。

二、研究區域和數據來源

2.1 研究區域概況

湖北省位於中國中部、長江中游，地理座標介於東經 108°21' ~ 116°07'、北緯 29°01' ~ 33°6' 之間，國土面積 18.59 萬平方公里^[35]，下轄 12 個地級市、3 個省直管市、1 個自治州和 1 個林區 (神農架林區，如圖 1)。地形特徵：三面環山 (西、北、東為山地)，中間低平，形成向南敞開的盆地；地貌以平原、湖區、丘陵崗地和山地為主^[35]。

湖北省三生空間呈現明顯的地域分異和垂直梯度差異，生產空間和生活空間擴張明顯，生態空間明顯萎縮。生產空間集中於漢江平原和鄂北崗地以農業生產用地和工礦生產用地為主^[36]。生活空間：集中於武漢、襄陽和宜昌等城市中心及交通幹線周邊低海拔區域 (海拔 100 米以下) 占比高，呈現“圈層遞減”的擴張趨勢。生態空間：鄂西山區 (如神農架、三峽庫區) 和長江沿線濕地為生態核心區。通過系統評估湖北省“三生空間”演變與生態環境質量的關係，可系統揭示空間重構對區域生態系統的調控機制，這對完善湖北省

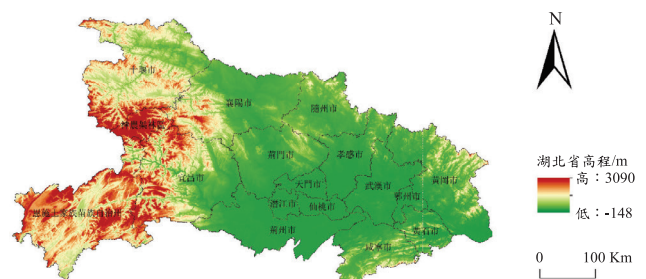


圖 1 湖北省行政區高程圖

表 1 數據來源

數據類型	數據名稱	數據來源
土地利用數據	2000 年、2010 年和 2020 年	中國科學院環境數據中心 (www.resdc.cn)
社會因素 驅動因數	GDP	中國科學院環境數據中心 (www.resdc.cn) OpenStreetMap 數據網 (download.geofabrik.de)
	人口密度	
	距離公路	
	距離鐵路	
	距離河流	
自然因素 驅動因數	DEM	地理空間數據雲 (www.gscloud.Cn)
	坡度	
	坡向	
	土壤肥力	
	年均氣溫	
	年均降水量	

表 2 “三生空間”土地利用分類和環境質量指數

一級分類	二級分類	土地分類	環境質量指數
生產空間	農業生產用地	水田、旱地	0.28
	工礦生產用地	其它建設用地	0.16
生態空間	林地生態用地	疏林地、有林地、灌木林地、其他林地	0.78
	草地生態用地	低覆蓋度草地、中覆蓋度草地、高覆蓋度草地	0.65
	水域生態用地	湖泊、河渠、海塗、灘地、水庫、坑塘	0.52
	其他生態用地	裸岩石質地、裸土地、沙地、鹽鹼地、沼澤地、	0.09
生活空間	城鎮生活用地	城鎮用地	0.21
	農村生活用地	農村居民點用地	0.21

國土空間優化佈局及生態治理具有關鍵指導價值。

2.2 主要數據來源及處理

在進行湖北省土地利用模擬預測前，需要系統解析研究區自然與人文要素特徵對用地類型演變的驅動機制。結合區域特徵與數據基礎，綜合既有董昕彤等^[32]和李阜鵬等^[37]研究成果，構建包含自然與社會經濟因素的 12 項驅動因數體系，具體指標構成詳見表 1，數據空間分辨率為 1 km。基於研究目標對湖北省用地數據進行用地類型重分類，建立 3 個一級類別與 8 個二級類別的分類體系，如表 2。

2.3 研究方法

2.3.1 生態環境效應模型

(1) 生態環境質量指數

在評估區域生態狀況時，可基於不同土地類型的

生態環境質量指數值及其空間占比構建量化模型，從而系統分析研究區域的環境質量水準^[38]。

$$EV_i = \sum_{i=1}^p \frac{AT_i}{A_T} M_i \dots\dots\dots(1)$$

式中：各參數定義如下：EV_i 代表第 i 類用地的生態環境質量指數；AT_i 表示第 T 個生態單元內 i 類用地的分佈面積；AT_T 為對應生態單元的總面積；M_i 表示 i 類用地的生態環境指數；p 為研究區域用地類型的總數。

本研究綜合運用專家打分法與層次分析法，在楊述河等學者^[39]提出的環境質量指數體系基礎上，通過公式 (1) 對湖北省 2020 年度土地利用數據進行面積加權處理，最終構建了用地類型與環境質量指數的對應關係表 (2)。其中，公式 (1) 的核心計算邏輯體現為各類用地面積占比與相應環境質量指數的加權求和過程。

(2) 生態貢獻度

評估不同土地利用類型之間的轉化對生態環境質量影響；通過定量分析，揭示各類用地在維持生態平衡中的相對重要性，為土地規劃、生態保護和政策制定提供科學依據。公式如下：

$$LEI = \frac{(LE_{t+1} - LE_t) \times LA}{TA} \dots\dots\dots(2)$$

式中： LEI 表示生態貢獻度，負值指示研究區生態環境質量呈現退化趨勢，正值則反映其質量提升； LE_t 與 LE_{t+1} 分別對應某土地利用類型在 t 時期和 $t+1$ 時期的生態環境質量指數， LA 為該類型用地在此期間的面積變化量， TA 為研究區全域總面積；其計算邏輯體現為不同時期生態指數差異與面積變化的綜合作用結果。

2.3.2 GeoSOS-FLUS 模型

FLUS 模型是一種整合自然與人文要素影響的土地利用動態模型，可預測多情景下的未來土地利用演變趨勢。其核心流程包括：基於歷史土地利用數據，結合氣候（如氣溫、降水）、地形特徵、土壤屬性、交通基礎設施、區域發展條件及政策干預等多種驅動因素，通過人工神經網路 (ANN) 演算法，量化評估各類用地類型的空間分佈適宜概率。通過從初始土地利用分佈數據中隨機採樣的方法，有效降低模型預測過程中可能產生的誤差累積問題。在模擬土地利用動態演變時，FLUS 模型創新性地引入了基於輪盤賭選擇的改進型慣性競爭機制，這種機制能夠有效應對自然因素與人類活動交互作用下各類土地類型相互轉化過程中的不確定性問題，顯著提升了模型在複雜環境下的模擬精度，最終生成與實際土地利用格局高度吻合的預測結果^[40,41]。

FLUS 模型主要包含兩個模組：基於神經網路適應性概率計算模組 (ANN)，以及融合動態自我調整慣性競爭機制的元胞自動機模組 (CA)^[42-45]。

(1) 基於神經網路的適宜性概率計算模組

神經網路演算法 (ANN) 由輸入層、隱含層、輸出層組成，計算公式為：

$$Sp(p, k, t) = \frac{\sum_j W_{j,k} \times \text{sigmoid} [net_j(p, t)]}{1 + e^{-net_j(p, t)}} \dots\dots\dots(3)$$

式中： $sp(p, k, t)$ 表示柵格單元 p 在 t 時刻對 k 類用地的空間適宜性概率； $W_{j,k}$ 為神經網路隱含層節點 j 與輸出層類別 k 間的連接權重參數； sigmoid 函數用於隱含

層至輸出層的非線性啟動轉換； $net_j(p, t)$ 表示 t 時刻柵格 p 對隱含層節點 j 的輸入信號量；需特別說明，各類用地類型適應性概率輸出值總和恒定為 1，即：

$$\sum_k sq(p, k, t) = 1 \dots\dots\dots(4)$$

(2) 基於自我調整慣性機制的元胞自動機模組

在 FLUS 模型中各種土地類型間的轉換概率由多種因素共同來決定，除前文所述的 (ANN) 輸出概率外，還要綜合考量轉換成本、鄰域密度、慣性係數及土地利用競爭關係。其中，自我調整慣性係數為核心參數，通過動態調節各用地類型的轉化阻力實現數量平衡。該係數基於當前土地利用量與規劃目標的差值進行自我調整反覆運算，逐步縮小模擬結果與預期目標之間的差距。其數學運算式為^[46]

$$Intertia_k^{t-1} \begin{cases} Intertia_k^{t-1} (|G_k^{t-1}| \leq |G_k^{t-2}|) \\ Intertia_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-2}}{G_k^{t-1}} (0 > G_k^{t-2} > G_k^{t-1}) \\ Intertia_k^{t-1} \times \frac{G_k^{t-1}}{G_k^{t-1}} (G_k^{t-1} > G_k^{t-2} > 0) \end{cases} \dots\dots\dots(5)$$

式中： $Intertia_k^{t-1}$ 定義為土地利用類型 k 在 $t-1$ 時刻的演化慣性參數，用於量化其歷史變化趨勢的持續性強度； G_k^{t-1} 和 G_k^{t-2} 則分別表示，該類型在 $t-1$ 和 $t-2$ 時刻的實際規模差值，反映相鄰時段內的用地數量動態變化。

基於柵格單元的綜合概率計算結果，通過元胞自動機 (CA) 模型的反覆運算模擬機制，實現不同用地類型的空間配置；其中特定時間節點 t 下，柵格單元 p 轉換為 k 類用地的概率可表述為以下數學關係式：

$$TProb_{p,k}^t = sp(p, k, t) \times \Omega_{p,t}^t \times Intertia_k^t \times (1 - sc_{c \rightarrow k}) \dots\dots\dots(6)$$

式中： $sp(p, k, t)$ 指代人工神經網路輸出的用地適應性概率值； $Intertia_k^t$ 標記第 k 類用地於 t 時刻的自我調整慣性參數； $sc_{c \rightarrow k}$ 表示土地利用類型 c 轉為類型 k 的成本， $1 - sc_{c \rightarrow k}$ 可映射該土地轉換行為的可行概率； $\Omega_{p,t}^t$ 代表鄰域作用，其公式為^[47]

$$\Omega_{p,t}^t = \frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)}{N \times N - 1} \times \omega_k \dots\dots\dots(7)$$

表 3 各情景轉換成本矩陣

2010 年		2020 年																							
		自然發展情景								生產優先情景								生態優先情景							
年		a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h
a		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
b		1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0
c		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1
d		1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0
e		1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0	0	1
f		1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
g		1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
h		1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0

表 4 領域權重參數

土地類型	農業生產用地	工礦生產用地	林地生態用地	草地生態用地	水域生態用地	其他生態用地	城鎮生活用地	農村生活用地
領域權重參數	0.5	1	0.5	0.8	0.6	0.3	0.9	0.9

式中： $\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = k)$ 表示基於 $N \times N$ 的摩爾領域範圍， $t-1$ 時刻 k 類用地柵格數量， ω_k 對應類型的領域效應權重係數。

本研究通過定義用地轉換成本矩陣，構建差異化管控情景下的土地利用演化約束體系，共設計三類情景。自然發展情景：基於 2010~2020 年歷史土地利用演變規律構建轉換規則，反映無干預狀態下的慣性發展趨勢；生產優先情景：強化生產空間擴展約束，明確農業生產用地（如耕地）禁止轉出至其他功能類型；生態優先情景：突出生態空間保護導向，嚴格限制生態用地（林地、水域等）的轉出行為。不同類型用地之間能轉化設為 1，不能轉化設為 0；具體用地類型轉換規則如表 3 所示。

表格中參數 a 至 h 分別表示農業生產用地、工礦生產用地、林地生態用地、草地生態用地、水域生態用地、其他生態用地、城鎮生活用地和農村生活用地，下同。

(3) 權重參數設置

領域權重係數的數值大小受不同地類擴張強度驅動形成，取值範圍為 0~1，研究發現，參數取值與用地類型空間拓展潛力呈正相關關係；通過解析湖北省國土空間規劃政策導向、亞熱帶季風氣候特徵與文獻^[48]；將領域權重參數設置如表 4。

(4) 模型模擬精度驗證

本研究通過總體精度與 Kappa 係數雙重驗證在土

地利用演變預測中的有效性。Kappa 係數作為空間一致性指標，其值高於 0.75 時表示模型具備高精度模擬能力，可有效反映真實土地利用格局的演化；公式如下：

$$S = \frac{(x_{ic} - x_{id})}{x_{id}} \times 100\% \dots\dots\dots(8)$$

式中：S 為用地類型的數量誤差精度， x_{ic} x_{id} 為用地類型 i 的預測模擬面積， x_{id} 為用地類型 i 的真實面積。

基於 2000 年土地利用數據，對 2010 年用地空間格局進行模擬預測，經精度檢驗顯示總體分類精度達 0.93，Kappa 係數為 0.90；進一步以 2010 年數據推演 2020 年土地利用分佈，精度提升至 0.94，Kappa 係數為 0.91。表明 FLUS 模型在湖北省域尺度具備高可靠性，可拓展應用於多時段（2030、2040、2050 年）土地利用演變模擬研究^[49]。

三、結果與分析

3.1 2000 ~ 2020 年“三生空間”面積變化及時空分析

湖北省 2000 ~ 2020 年國土空間結構演變分析如圖 2 所示，研究期內湖北省三類功能空間呈現顯著差異特徵；生產空間面積縮減 3662 km²，反映農業與工

礦用地的集約化利用趨勢；生活空間面積規模擴張 1002 km²，增幅 21.5%，與近年來城鎮化加速及居民居住需求增長密切關聯；生態空間面積總量由 111313 km² 增至 113973 km²，淨增 2660 km²，增幅 2.4%，凸顯了湖北省生態保護政策的實施成效。

2000~2020 年湖北省“三生空間”時空分異特徵如圖 3 所示，湖北省國土空間格局呈現顯著功能分異。生產空間主導性：農業與工礦用地全域覆蓋但空間集聚特徵明顯，集中分佈於地勢平緩的中東部平原，西部山區呈斑塊化零散佈局；工礦生產用地依附資源稟賦與產業基礎，主要沿武漢-襄陽-宜昌軸線呈點狀分佈。生態空間結構性：林地與草地集中于鄂西秦巴山區、鄂北桐柏山-大別山區及鄂東南幕阜山脈，形成生態屏障；水域與其他生態用地在長江幹流、漢江及大型湖泊（如洪湖、梁子湖）密集分佈，武漢都市圈周邊因濕地保護政策形成環城生態廊道。生活空間層級化：城鎮生活用地以武漢城市圈為核心呈高密度片狀擴

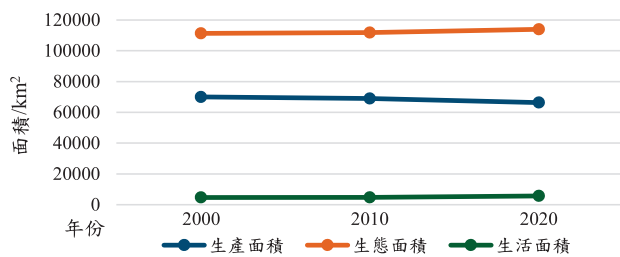


圖 2 2000 ~ 2020 年湖北省“三生空間”面積變化趨勢

展，次級城市（宜昌、襄陽等）形成區域增長；農村生活用地受地形限制，全域分散但呈現“平原連片、山地星點”的差異化形態，該格局深刻反映自然約束與人類活動強度的空間效應。

3.2 2000 ~ 2020 年生態環境質量時空演變

3.2.1 生態環境質量指數與空間分佈分析

利用 ArcGIS 自然斷點法，將湖北省生態環境質量指數 (EV) 劃分為五級：低質量區 (EV ≤ 0.16)；工礦生產用地主導，呈零星分佈；較低質量區 (0.16 < EV ≤ 0.21)：生活用地為主，集中分佈於城鎮建成區；中等質量區 (0.21 < EV ≤ 0.28) 以農業生產用地主導，全省大面積分布但面積逐漸縮減；較高質量區 (0.28 < EV ≤ 0.65) 分佈於河流湖泊分佈區域和山體緩衝帶，過渡性特徵顯著；高質量區 (EV > 0.65) 集中于鄂西大巴山-巫山、鄂北大別山及鄂東南幕阜山等林地主導區域，生態穩定性高且人類干擾較低。湖北省國土空間分異規律表現為地形約束效應：高值區多位於地形複雜、人類活動受限的山地，低值區集中于平原及工礦集聚帶；用地類型關聯：生態環境質量與用地功能顯著相關，生態用地占比越高則 EV 值越大。動態變化特徵 (2000~2020 年)：全省 EV 均值由 0.555 提升至 0.560，整體維持較高水準；除中等質量區外，其餘等級面積均呈增長態勢，反映生態保護與城鎮化擴張的博弈格局，土地利用空間分佈詳見圖 4。

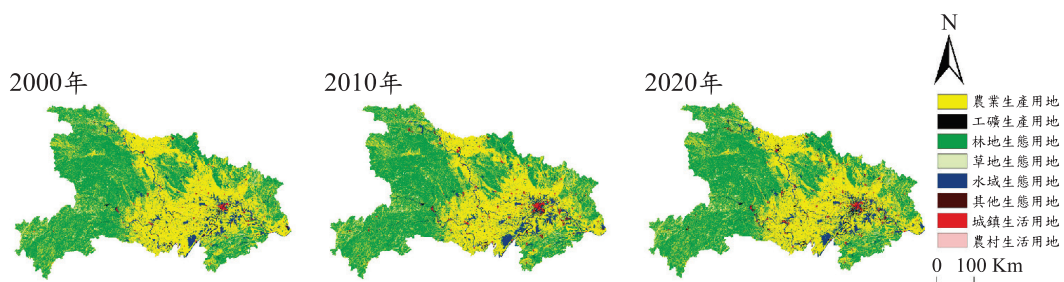


圖 3 2000 ~ 2020 年湖北省“三生空間”分佈

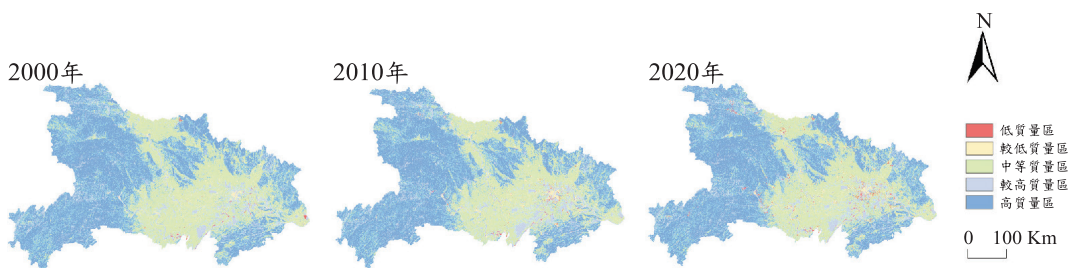


圖 4 2000 ~ 2020 年湖北省生態環境質量分佈

3.2.2 生態貢獻度分析

鑒於傳統生態環境質量指數 (EQI) 僅能表示單一時段生態狀況，難以揭示土地利用演變對環境的動態影響，本研究基於公式 (2) 構建用地轉換-生態回應模型，定量評估 2000 ~ 2020 年湖北省土地利用類型變遷對生態貢獻度的驅動效應。表 5 系統呈現研究期內主導性用地轉換類型、轉出面積、生態貢獻度增量及貢獻率，核心結論如下：2000~2020 年，湖北省生態環境質量改善的核心驅動因素在於土地利用類型的優化調整，具體體現為：農業生產用地向林地、水域生態用地的轉移分別對應 13529 km²與 3436 km²，三種用地空間調整對區域環境質量的正向調節達 84.40%；反觀之，湖北省生態退化的主要驅動機制表現為林地與水域生態用地調整為農業生產用地的過程，面積分別為 11147 km²和 2299 km²，以及林地轉化為草地生態用地，面積為 2752 km²，調整的貢獻率占比達 79.29%。

綜上所述，湖北省 2000 ~ 2020 年的生態環境質量處於較高水準，且農業生產用地轉化為生態用地的面積要大於生態用地轉化為農業生產用地的面積，其主要原因是國土利用規劃調整和三峽工程的建設，使得大量土地利用類型改變。並且在保護環境的基本國策下，推測湖北省未來生態環境質量或將呈現緩步提升態勢，但受限於自然承載力閾值與城鎮化壓力，增幅空間相對有限。為實現生態安全與可持續發展的長

效均衡，需通過以下路徑突破瓶頸；從三生空間協同優化上，基於生態約束，科學配置生產-生活-生態空間功能分區，強化生態用地剛性管控與生活用地集約利用；從用地結構動態調控上，建立用地轉換生態損益評估機制，嚴控生產空間侵佔生態敏感區，引導工礦用地低碳化轉型；生態修復效能提升上，重點推進長江沿岸、丹江口庫區等戰略區域生態修復工程，啟動存量用地生態價值。

3.3 2030 ~ 2050 年多情景下的“三生空間”預測及時空分佈分析

基於 FLUS 模型對湖北省 2030 至 2050 年三生空間的模擬結果如圖 5 所示，自然發展情景下土地利用結構呈現顯著重組特徵；農業生產用地由 2020 年的 63722 km² 縮減至 2050 年的 59952 km²，降幅 5.9%；工礦生產用地逆勢增長 1637 km²，反映產業升級對傳統農業的替代作用。城鄉居住需求驅動生活空間擴張，農村生活用地增加 1179 km²，城鎮生活用地擴展 743 km²；水域與林地生態空間分別微增 0.3%和 0.4%；草地減少 125 km²，降幅 1.8%，其他生態用地雖面積縮減僅 87 km²，但降幅高達 23.9%，表明生態用地開發壓力顯著。規模變化上，生產空間淨減 2133 km²，生活空間擴張 1922 km²，生態空間微增 211 km²。

生產優先情景下，農用地保護力度顯著加強，對

表 5 2000 ~ 2020 年湖北省“三生空間”主要土地利用變化及貢獻率

環境效應變化	土地利用變化	轉出面積/km ²	生態貢獻度	貢獻率%
環境質量改善	農業生產-林地生態	13529	0.03636	75.23
	農業生產-水域生態	3436	0.00443	9.17
	草地生態-林地生態	2829	0.00197	4.09
	水域生態-林地生態	956	0.00133	2.76
	農業生產-草地生態	637	0.00126	2.62
	農村生活-農業生產	2437	0.00091	1.90
	農村生活-林地生態	220	0.00067	1.39
	總計	24044	0.04693	97.16
環境質量惡化	林地生態-農業生產	11147	-0.02996	68.16
	水域生態-農業生產	2299	-0.00296	6.75
	林地生態-草地生態	2752	-0.00192	4.38
	林地生態-工礦生產	542	-0.00180	4.11
	林地生態-水域生態	910	-0.00127	2.89
	草地生態-農業生產	601	-0.00119	2.72
	農業生產-農村生活	2784	-0.00104	2.38
	農業生產-工礦生產	1617	-0.00104	2.37
	林地生態-農村生活	250	-0.00076	1.74
總計	22902	-0.04194	95.51	

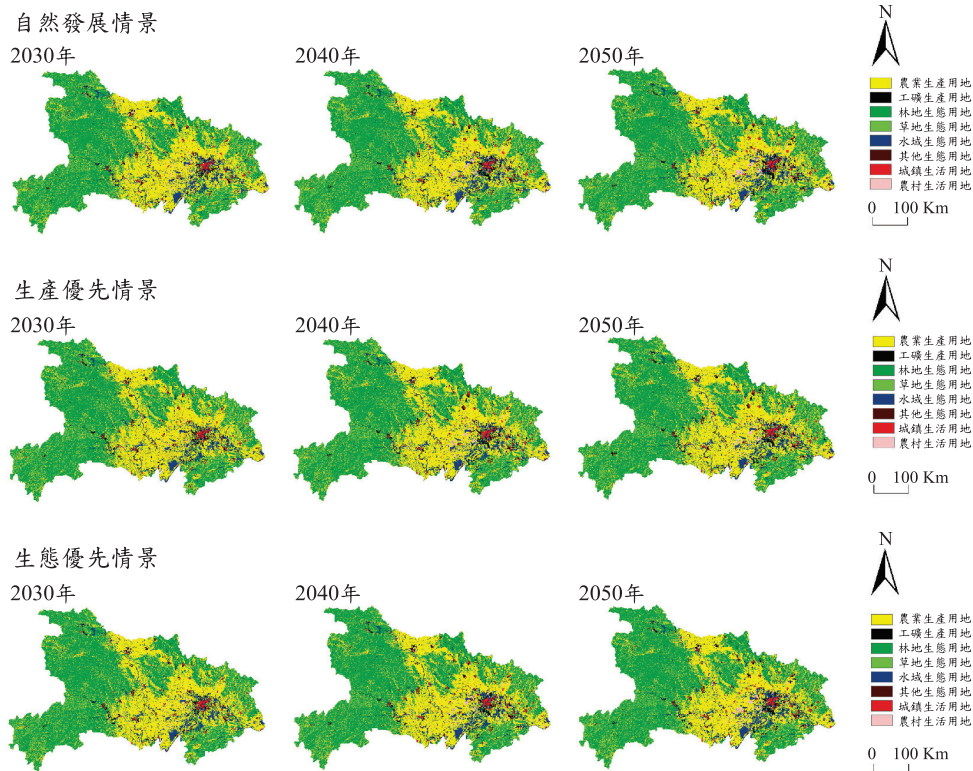


圖 5 2030 ~ 2050 年各情景下的湖北省“三生空間”分佈預測

比自然演變過程中耕地面積的自然縮減規律，這種制度性保護機制有效阻斷了農業生產空間的流失，但該情景下農業生產面積仍縮減了 704 km²，但與自然發展情景的預測值相比增加了 3066 km² 土地，大幅度緩解了下降的趨勢。工礦生產用地面積與自然發展情景基本不變，生活空間面積依然擴張，但相較於自然發展情景有所減少。生態空間中的林地、草地和水域生態空間面積則相較於自然發展情景減少較多，林地縮減量最大有 1878 km²，其次為草地 344 km²，水域也有 307 km²。基於“三生空間”角度分析，雖然農業生產用地持續萎縮，但在工礦用地的規模擴張 833 km² 下，生產空間面積總體實現增長。與此同時，生態空間規模縮減 2537 km²，生活空間則新增 1704 km²。“三生空間”的分佈狀況和自然發展情景下的分佈狀況基本相同。

生態優先情景下，生態用地受到保護，除了其他生態空間面積有所減少，剩餘 3 種生態用地的面積較 2020 年均有不同程度的增加，其中林地生態空間面積增加了 629 km²，草地生態空間增加了 291 km²，水域生態空間增加了 84 km²，總面積這 30 年間增加了 945 km²，較自然發展情景下多增加了 724 km²，生態環境質量有顯著的改善。反之，2050 年農業生產用地減少 4090 km²，較自然發展情景減少了 320 km²；工礦生產

用地面積增加了 1565 km²，但相較於自然發展情景減少了 72 km²；城鎮生活用地和農村生活用地面積仍呈上升趨勢，但較自然發展情景均有所減少。

總體而言，各功能用地分佈與 2020 年土地利用為基準高度相同，生產空間仍全域覆蓋但碎片化加劇；生態空間分佈鄂西秦巴山區、鄂北大別山區及鄂東南幕阜山地的生態用地；生活空間延續“武漢都市圈集聚+全域滲透”的擴散模式。

3.4 2030 ~ 2050 年各情景生態環境質量效應分析

3.4.1 生態環境質量指數分析

基於公式 (1) 的測算，2030~2050 年三種發展情景的生態環境質量指數呈現較明顯差異如圖 6。生產優先情景的指數處於最低位，對應分別為 0.557、0.554 和 0.551，呈現持續遞減趨勢；生態優先情景的指數穩定維持高位，整體圍繞 0.560 波動；自然發展情景的指數則長期穩定於 0.559 附近；數據表明，不同政策導向對生態質量的影響具有層級化特徵。

自然發展情景下的高質量區和高質量區空間分佈基本保持不變，面積略有增長，2050 年對比 2020 年擴張了 154 km²，高質量區為林地生態空間，較高質量

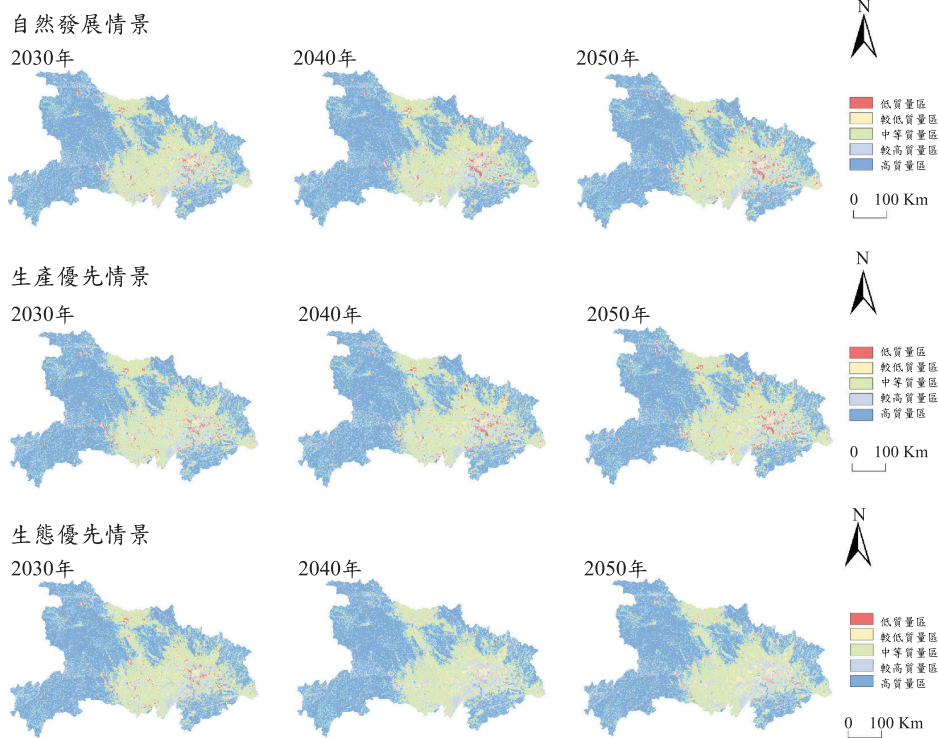


圖 6 2030 ~ 2050 年各情景下的湖北省生態環境質量分佈

區域為草地和水域；中等質量區域以耕地為主導，其中水田占主體地位；研究顯示，該類用地空間規模呈現持續收縮態勢，2020 ~ 2050 年間累計縮減 5.9%，主要分佈在湖北省中部東部，少數在西部呈零星狀分佈在高質量區域內；較低質量區以生活空間為主，呈片狀分佈為城鎮生活用地，零散狀分佈的為農村生活用地；低質量區域工礦生產用地和其他生態用地，30 年內增長了 1550 km²，增長率達到了 52%。

生產優先情景的生態質量評估在三類情景中處於末位；儘管低生態質量區域呈現持續擴展趨勢，但其空間擴張速率相較於自然發展情景更低，比自然情景少了 53 km²，其主要原因是因為生產優先情景主要保護農業生產用地，因此導致工礦生產用地有一定數量的減少，相較於自然發展情景，生產優先情景下低質量區的擴張規模呈現顯著縮減趨勢；低質量區仍維持擴張態勢，至 2050 年累計擴展 1704 km²，但該數值較自然發展情景明顯降低。中等質量區面積縮減幅度較自然發展情景擴大 3066 km²，而較高質量區與高質量區總量減少 2719 km²，表明生產活動對優質生態空間具有更強的侵蝕效應。

生態優先情景中，較高質量區與高質量區呈現持續擴張態勢，反映最優生態質量水準。低質量區及較低質量區雖保持增長趨勢，但 2050 年累計增長量 1506 km²，顯著低於自然發展與生產優先情景。中等質量區

面積縮減幅度為三種情景之最，其十年週期變化表現為：2030 年縮減 1288 km²、2040 年縮減 1653 km²、2050 年縮減 1149 km²。較高質量區至 2050 年達 19221 km²，增長率 1.9%，高質量區同期淨增長 497 km²且後續仍具持續增長潛力。

3.4.2 生態貢獻度分析

湖北省不同政策情景中驅動環境質量提升與退化的土地利用演變規律如表 6 所示；自然發展情景下，2020 ~ 2030 年及 2030 ~ 2040 年生產用地向生態用地轉化是生態改善的核心驅動力，其生態貢獻度分別為 0.00082 和 0.00132，對應貢獻率達 66.4%和 73.0%，其中農業生產用地轉為水域生態用地的正向作用最為顯著；至 2040 ~ 2050 年，農村生活用地向農業生產用地的轉化成為主要提升因素。與之相對，2020 ~ 2040 年農業生產用地向水域生態用地轉化引發環境質量下降，而 2040 ~ 2050 年農業生產用地向工礦用地轉化成為環境退化的主導因素，這 3 個時間段的生態貢獻度分別為 -0.00080、-0.00072 和 -0.00037，其貢獻率均在 44%左右。

在生產優先情景下，其生態環境質量最差，在 2020 ~ 2030 年和 2030 ~ 2040 年，其主要原因相同，其中首要因素為林地生態用地轉化為農業生產用地，

表 6 2020 ~ 2050 年各情景下湖北省“三生空間”主要土地利用變化及其貢獻度

效應	年份	自然發展情景				生產優先情景				生態優先情景			
		變化類型	面積 /km ²	貢獻度	貢獻率/%	變化類型	面積 /km ²	貢獻度	貢獻率/%	變化類型	面積 /km ²	貢獻度	貢獻率/%
	2020	a-e	638	0.00082	66.4	b-c	57	0.00019	25.1	a-e	646	0.00083	41.7
		h-a	410	0.00015	12.4	h-a	423	0.00015	21.0	a-d	146	0.00029	14.5
	~	b-a	132	0.00008	6.8	d-c	222	0.00015	20.5	d-c	107	0.00028	14.4
	2030	f-e	19	0.00004	3.5	b-a	132	0.00008	11.2	a-c	99	0.00026	13.3
	總計	1199	0.00109	89.1	總計	834	0.00057	77.8	總計	998	0.00166	83.9	
改善	2030	a-e	587	0.00075	41.4	b-c	89	0.00029	35.8	a-e	521	0.00067	43.1
		a-c	215	0.00057	31.6	h-a	380	0.00014	17.2	a-d	188	0.00037	24.0
	~	h-a	367	0.00013	7.5	h-c	43	0.00013	15.9	a-c	54	0.00014	9.3
	2040	b-a	125	0.00008	4.4	b-a	144	0.00009	11.2	h-a	326	0.00012	7.8
	總計	1294	0.00153	84.9	總計	656	0.00065	80.1	總計	1089	0.00130	84.2	
	2040	h-a	324	0.00012	34.8	b-c	98	0.00032	32.5	a-e	647	0.00083	38.0
		b-a	123	0.00007	22.6	e-c	194	0.00027	27.0	a-d	253	0.00050	22.9
	~	a-c	19	0.00005	14.5	h-c	72	0.00022	22.0	a-c	125	0.00033	15.3
	2050	d-c	15	0.00005	14.2	g-c	26	0.00008	7.9	h-a	371	0.00014	6.3
	總計	481	0.00029	86.1	總計	390	0.00089	89.4	總計	1396	0.00180	82.5	
	2020	e-a	622	-0.00080	44.2	c-a	732	-0.00196	66.0	e-a	631	-0.00081	48.9
		a-b	797	-0.00051	28.3	a-b	837	-0.00054	18.1	a-b	716	-0.00046	27.7
	~	a-h	822	-0.00030	17.0	a-h	770	-0.00029	9.7	a-h	709	-0.00026	16.0
	2030	a-g	318	-0.00012	6.6	a-g	292	-0.00011	3.6	a-g	223	-0.00008	5.0
	總計	2559	-0.00173	96.1	總計	2631	-0.00290	97.4	總計	2279	-0.00161	97.6	
惡化	2030	e-a	560	-0.00072	44.4	c-a	1165	-0.00313	75.8	a-b	584	-0.00037	35.5
		a-b	637	-0.00041	25.2	a-b	735	-0.00047	11.4	e-a	504	-0.00032	30.6
	~	a-h	735	-0.00027	17.0	a-h	940	-0.00035	8.5	a-h	595	-0.00022	21.1
	2040	a-g	273	-0.00010	6.3	a-g	336	-0.00012	3.0	a-g	234	-0.00008	8.3
	總計	2205	-0.00150	92.9	總計	3176	-0.00407	98.7	總計	1917	-0.00099	95.5	
	2040	a-b	586	-0.00037	44.0	c-b	461	-0.00153	44.7	e-a	590	-0.00076	46.0
		a-h	724	-0.00027	31.7	c-h	352	-0.00107	31.4	a-b	646	-0.00041	25.2
	~	a-g	362	-0.00013	15.8	c-g	159	-0.00048	14.2	a-h	832	-0.00031	18.9
	2050	d-a	26	-0.00005	6.0	c-a	102	-0.00027	7.9	a-g	326	-0.00012	7.4
	總計	1698	-0.00082	97.5	總計	1074	-0.00335	98.2	總計	2394	-0.00160	97.5	

轉化面積分別為 732 km² 和 1165 km²，其次為農業生產用地轉化為工礦生產用地，轉化面積也分別達到了 837 km² 和 735 km²，最後是農業生產用地轉化為生活用地，其貢獻率有 13.3% 和 11.5%。2040~2050 年，生態質量退化的核心驅動因素源於林地生態用地向工礦及居住用地的轉換。具體表現為林地資源通過土地用途變更，逐步轉化為工業生產與城鄉生活空間，這一過程顯著削弱了區域生態承载力，其貢獻率總和達到了 98.2%。相反地，湖北省生態質量提升的主要驅動機制體現為工礦用地向林地生態系統空間的過程，儘管轉化面積少，但對生態環境質量的改善程度高，這 3 個時間段轉化面積分別為 57 km²、89 km² 和 98 km²。

在生態優先情景下，湖北省環境質改善的主要原

因是農業生產用地轉化為生態用地；其貢獻率在這 3 個時間段總和分別為 69.5%、76.4% 和 76.2%。與之相反，2020~2030 年和 2040~2050 年湖北省環境質量惡化的首要因素為水域生態用地轉化為農業生產用地，次要因素是農業生產用地改變為工礦生產用地；2030~2040 年則與前兩個時間段完全相反，首要因素是農業生產用地轉化為工礦生產用地，次要因素是水域生態用地轉化為農業生產用地；這 3 個時間段中其貢獻率總和分別為 76.6%、66.1% 和 71.2%；其次農業生產用地轉化為生活用地也是環境質量惡化的原因之一，其貢獻率之和分別為 21.0%、29.4% 和 26.3%。

研究結果表明，湖北省三類發展情景的生態質量呈現梯度分異：生產優先情景的生態環境質量指數處

於末位，對應生態承載水平最低；生態優先情景的指數保持最優，反映最佳環境狀態；自然發展情景的生態質量居中，且質量提升速率超過退化速率。數據對比顯示，生態優先模式下的土地利用結構實現經濟發展與生態保護的協同優化，更符合國家可持續發展戰略要求；這印證了湖北省需強化生態空間管控，通過國土空間規劃優化實現生產-生活-生態用地的科學配置。

四、討論

湖北省 2020~2050 年“三生空間”類比研究顯示，生活空間與生態空間面積持續增長，生產空間則呈現收縮趨勢。從驅動因數貢獻度分析表明，距城市距離、GDP、坡度、土壤肥力、DEM 和年均降水量對三生空間演變具有顯著影響。其中，城鎮生活用地和其它生態用地主要受距城市距離和 GDP 驅動，農村生活用地受坡度影響，農業生產用地變化由土壤肥力主導，而林地、草地及水域生態用地增長與 DEM 和年均降水量密切相關。基於上述驅動機制，研究成果可為湖北省國土空間規劃的生態適應性調整提供理論支撐。

在新型城鎮化與工業化持續推進背景下，建設用地對耕地的持續性侵佔引發區域土地利用結構失衡，造成生態環境系統性破壞。針對這一人地關係矛盾，湖北省未來土地資源管理的核心任務在於科學調控建設用地增速、實施用地結構優化重組及生態質量修復工程。需要指出的是，國土空間規劃政策具有動態約束特徵，其在不同規劃週期的時序波動導致 FLUS 模型在模擬土地利用演變過程時可能產生偏差。

本研究進一步提出面向可持續管理的空間優化路徑，生態優先的發展模式最符合國家生態文明建設與可持續發展戰略要求。為實現湖北省生態安全與高質量發展的長效協同，應強化生態空間剛性管控，嚴格限制生態用地向生產、生活用地轉化；積極引導土地利用結構優化，支援農業生產用地向生態用地合理轉換，以提升區域生態質量；實施差異化空間治理，在鄂西山區、長江沿線等生態核心區加強保護，在武漢都市圈等城鎮化區域推動集約高效發展。

在本次研究過程中同樣存在著一些不足之處，在驅動因數的選擇方面上，只是綜合考慮了一些影響比較大的因素，還有地質、氣象、文化等方面的因素未能充分考慮，在未來研究過程中可以進一步完善。其次模型參數比如領域權重、成本矩陣的設置也是影響 FLUS 模型整體精度的重要方面，採樣方式，不同反

覆運算次數也能對模型預測結果產生影響，進而影響模型精度，因此設置合理科學地的更多樣化的模型參數，對預測發展非常重要。

五、結論

2000~2020 年間，隨城鎮化發展和居民居住水平提高，湖北省生產空間規模呈現收縮態勢，其空間占比持續下降；生活空間在 20 年內面積擴張顯著；生態空間面積同步增長。從空間分佈看，生產空間雖全域覆蓋但集中分佈於中、東部；生活空間以城市群為核心形成斑塊化擴張；生態空間在西部、北部及東南部山區形成連續分佈帶。

研究證實了 2000~2020 年湖北省生態環境質量總體維持在較高水平，生態環境質量指數由 0.555 升至 0.559，其空間分異特徵顯著，高質量區佔據最大空間份額，低質量區占比最小，中等質量區分佈範圍最廣且形成連片分佈格局。

2020~2050 年模擬顯示，“三生空間”基礎格局保持穩定；生產優先情景下生產空間顯著擴張，而生態優先與自然發展情景中生產空間均呈縮減趨勢，生活及生態空間同步增長，反映不同政策導向的空間重構效應。生態優先情景下湖北省生態環境質量最優，其指數值隨規劃期穩步提升，從 2030 年 0.5599 上升到 2050 年 0.5609。三類情景中，生產用地向生態用地轉化是生態質量提升的主要驅動力，而其他用地類型向生產用地轉化則導致生態環境質量衰減。

本研究的核心在於通過耦合 FLUS 模型與生態環境質量指數、生態貢獻度模型，相較於以往側重歷史分析的研究，在省域尺度上開展了面向 2030~2050 年的多情景土地利用動態預測與生態效應前瞻評估，研究成果不僅深化了對“三生空間”互動機制的科學認識，更為湖北省及類似區域在國土空間規劃中協調保護與發展、防範生態風險、制定科學管控策略，提供了關鍵的數據支撐與決策依據。

致謝

本研究承蒙河南省自然基金 (252300423246)；河南省社科聯調研項目 (SKL—2025—469)；河南农业大学创新基金项目 (SKJJ2024B09)；河南农业大学高层次人才专项支持项目 (30501358) 之經費補助，使本研究得以完成，謹致謝忱。

參考文獻

1. Fu J C, Zhang S L. Functional Assessment and Coordination Characteristics of Production, Living, Ecological Function—A Case Study of Henan Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), doi:10.3390/ijerph18158051, 2021.
2. 田超、程琳琳、邵盈鈔, 「京津冀地區城市三生空間碳代謝效率特徵及演進模式[J]」, 環境科學, 45 卷 3 期, 頁 1254-1264, 2024。
3. 張永蕾、樂喬林、熊昌盛等, 「基於多源空間數據的“三生空間”異質性評價與分區劃定[J]」, 農業工程學報, 37 卷 10 期, 頁 214-223, 2021。
4. 周滿意、王承武, 「基於 PLUS 模型的烏魯木齊市“三生”空間多情景模擬[J]」, 中國環境科學, 44 卷 7 期, 頁 4021-4030, 2024。
5. 馮雨柯、翟石豔、董昕彤等, 「中原城市群“三生空間”模擬及生態效應評估——基於未來土地利用模擬模型和共用社會經濟路徑情景[J]」, 生態學報, 43 卷 20 期, 頁 8292-8308, 2023。
6. Zhao F, Liu X, Zhao X, *et al.* Effects of Production-living-ecological Space Changes on the Ecosystem Service Value of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, doi:10.1007/s10661-023-11702-y, 2023.
7. Wang M, Qin K, Jia Y, *et al.* Land use Transition and Eco-environmental Effects in Karst Mountain Area Based on Production-living-ecological Space: A Case Study of Longlin Multinational Autonomous County, Southwest China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(13), doi:10.3390/ijerph19137587, 2022.
8. Li X, Fu J Y, Jiang D, *et al.* Land use Optimization in Ningbo City with a Coupled GA and PLUS Model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 375, doi:10.1016/j.jclepro.2022.134004, 2022.
9. 陳竹安、劉子強、張立亭等, 「南昌市 LUCC 多情景模擬和生境質量時空演變與預測[J]」, 農業機械學報, 54 卷 5 期, 頁 170-180, 2023。
10. 付建新, 「1980—2020 年汾河流域“三生空間”土地利用功能變化及其驅動力[J]」, 應用生態學報, 34 卷 7 期, 頁 1901-1911, 2023。
11. 孔冬豔、陳會廣、吳孔森, 「中國“三生空間”演變特徵、生態環境效應及其影響因素[J]」, 自然資源學報, 36 卷 5 期, 頁 1116-1135, 2021。
12. 段亞明、黃安、盧龍輝等, 「“生產-生活-生態”空間的概念與理論研究[J]」, 中國農業大學學報, 28 卷 4 期, 頁 170-182, 2023。
13. 劉岩、夏敏, 「基於土地利用和 POI 數據的鄉村“三生空間”劃定——以南京市溧水區為例[J]」, 農村經濟與科技, 34 卷 14 期, 頁 34-36, 78, 2023。
14. 萬江琴、費騰, 「基於街景圖像的“三生空間”識別方法研究[J]」, 地球資訊科學學報, 25 卷 4 期, 頁 838-851, 2023。
15. 孫滢悅、黃茹月、陳鵬等, 「“三生空間”分類及其功能評價——以吉林省為例[J]」, 江蘇農業科學, 48 卷 14 期, 頁 298-304, 309, 2020。
16. 劉金花、叢中笑、王治軍, 「基於三生空間轉型的生態環境效應多尺度研究——以黃河流域山東段為例[J]」, 中國環境科學, 43 卷 5 期, 頁 2519-2530, 2023。
17. 竇睿音、張文潔、陳晨, 「陝西省“三生空間”格局演變與驅動機制研究[J]」, 乾旱區地理, 46 卷 2 期, 頁 264-273, 2023。
18. 趙壽露、李石華、許新惠等, 「耦合 MOP-FLUS 模型的滇中城市群“三生空間”格局優化[J]」, 水土保持研究, 29 卷 4 期, 頁 322-328, 2022。
19. 李紅潤、劉慧芳、王瑾等, 「基於 Markov-FLUS-MCR 模型的晉中市“三生空間”優化[J]」, 農業工程學報, 38 卷 10 期, 頁 267-276, 2022。
20. 樊文傑、戴曉愛、謝一茹等, 「利用 CLUE-S 模型對四川省未來 10 年土地利用變化的預測與分析[J]」, 科學技術與工程, 22 卷 7 期, 頁 2641-2647, 2022。
21. 王旭、馬伯文、李丹等, 「基於 FLUS 模型的湖北省生態空間多情景模擬預測[J]」, 自然資源學報, 35 卷 1 期, 頁 230-242, 2020。
22. 林伊琳、趙俊三、陳國平等, 「基於 MCR-FLUS-Markov 模型的區域國土空間格局優化[J]」, 農業機械學報, 52 卷 4 期, 頁 159-170, 2021。
23. Chen Y, Wang J, Xiong N, *et al.* Impacts of Land Use Changes on Net Primary Productivity in Urban Agglomerations Under Multi-Scenarios Simulation[J]. *Remote Sensing*, 14(7), doi:10.3390/RS14071755, 2022.
24. 尹登玉、於昊辰、盧彥琦等, 「2000—2020 年黃河流域國土空間格局演變及生態回應[J]」, 農業工程學報, 39 卷 4 期, 頁 217-228, 2023。
25. 高星、劉澤偉、李晨曦等, 「基於“三生空間”的雄安新區土地利用功能轉型與生態環境效應研究[J]」, 生態學報, 40 卷 20 期, 頁 7113-7122, 2020。
26. 黃天能、張雲蘭, 「基於“三生空間”的土地利用功能

- 演變及生態環境回應——以桂西資源富集區為例[J]」, 生態學報, 41 卷 1 期, 頁 348-359, 2021。
27. 韓美、孔祥倫、李雲龍等, 「黃河三角洲“三生”用地轉型的生態環境效應及其空間分異機制[J]」, 地理科學, 41 卷 6 期, 頁 1009-1018, 2021。
28. 張夢圓、蔡麗華、李伊彤等, 「基於“三生空間”的農牧交錯區城市土地利用轉型及生態環境效應分析——以包頭市為例[J]」, 乾旱區地理, 46 卷 6 期, 頁 958-967, 2023。
29. 王亞楠、肖瀟、蒲金芳等, 「40 年來長江經濟帶“三生”空間時空演化特徵[J]」, 農業機械學報, 53 卷 11 期, 頁 215-225, 2022。
30. 黃晶、薛東前、董朝陽等, 「乾旱綠洲農業區土地利用轉型生態環境效應及分異機制——基於三生空間主導功能判別視角[J]」, 地理科學進展, 41 卷 11 期, 頁 2044-2060, 2022。
31. 丁慧敏、楊朝現、李鑫等, 「高原傳統農區土地利用功能演變及其生態環境效應[J]」, 水土保持研究, 29 卷 6 期, 頁 399-407, 2022。
32. 姜昕彤、翟石豔、王錚等, 「基於未來土地利用模擬模型的鄭州市“三生空間”模擬及生態環境效應分析[J]」, 生態學報, 43 卷 15 期, 頁 6225-6242, 2023。
33. 李明薇、鄧雨早、陳偉強等, 「河南省“三生空間”分類與時空格局分析[J]」, 中國農業資源與區劃, 39 卷 9 期, 頁 13-20, 2018。
34. 劉佳楠、姬廣興、高紅凱等, 「基於 PLUS 模型的河南省“三生空間”多情景模擬及生態環境效應分析[J/OL]」, 環境科學, 46 卷 2 期, 頁 990-1001, 2025。
35. 楊劍、丁玲玲、李新堯等, 「基於熵權 TOPSIS 的湖北省農業水土資源承載力時空動態研究[J]」, 土壤, 51 卷 6 期, 頁 1246-1252, 2019。
36. 崔家興、顧江、孫建偉等, 「湖北省三生空間格局演化特徵分析[J]」, 中國土地科學, 32 卷 8 期, 頁 67-73, 2018。
37. 李阜鵬、韓惠、楊樹文, 「甘肅省 2000—2020 年土地利用變化分析及基於 PLUS 的生態空間多情景模擬[J]」, 科學技術與工程, 23 卷 15 期, 頁 6316-6326, 2023。
38. 周浩、金平、夏衛生, 「省級國土空間“三生”功能評價及其分區研究——以河南省為例[J]」, 中國土地科學, 34 卷 8 期, 頁 10-17, 2020。
39. 楊述河、閻海利、郭麗英, 「北方農牧交錯帶土地利用變化及其生態環境效應——以陝北榆林市為例[J]」, 地理科學進展, 23 卷 6 期, 頁 49-55, 2004。
40. Xiaoping Liu, Xun Liang, Xia Li, *et al.* A Future Land use Simulation Model (FLUS) for Simulating Multiple Land use Scenarios by Coupling Human and Natural Effects[J]. *Landscape and Urban Planning*, 168, pp.94-116, 2017.
41. Xia Li, Xia Li, Guang Zhao Chen, *et al.* A New Global Land-Use and Land-Cover Change Product at a 1-km Resolution for 2010 to 2100 Based on Human-Environment Interactions [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(5), pp.1040-1059. DOI:10.1080/024694452.2017.1303357, 2017.
42. LI Xia, LI Dan, LIU Xiaoping, *et al.* Geographical Simulation and Optimization System (GeoSOS) and Its Application in the Analysis of Geographic National Conditions[J]. *Acta Geoda et icaet Cartographica Sinica*, 46(10), 2017.
43. 黎夏、李丹、劉小平等, 「地理模擬優化系統 GeoSOS 及前沿研究[J]」, 地球科學進展, 24 卷 8 期, 頁 899-907, 2009。
44. Li X, Ye h, AGO. Neural-network-based Cellular Automata for Simulating Multiple Land Use Changes Using GIS[J]. *Inter-national Journal of Geographical Information Science*, 16(4), pp.323-343, 2002.
45. Li X, Chen Y, Liu X, *et al.* Concepts, Methodologies, and Tools of an Integrated Geographical Simulation and Optimization System[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(4):633-655.
46. 胡豐、張豔、郭宇等, 「基於 PLUS 和 In-VEST 模型的渭河流域土地利用與生境質量時空變化及預測[J]」, 乾旱區地理, 45 卷 4 期, 頁 1125-1136, 2022。
47. 秦琦瑞、李雪梅、陳慶偉等, 「基於 FLUS 模型的天山山區未來土地利用變化預估[J]」, 乾旱區研究, 36 卷 5 期, 頁 1270-1279, 2019。
48. 王保盛、廖江福、祝薇等, 「基於歷史情景的 FLUS 模型鄰域權重設置——以閩三角城市群 2030 年土地利用模擬為例[J]」, 生態學報, 39 卷 12 期, 頁 4284-4298, 2019。
49. Lin W B, Sun Y M, Nijhuis Setal. Scenario-based Flood Risk Assessment for Urbanizing Deltas Using Future Land-use Simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a Case Study[J]. *Science of The Total Environment*, 739, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139899, 2020.

收稿日期：民國 114 年 10 月 31 日
修改日期：民國 114 年 12 月 25 日
接受日期：民國 115 年 01 月 18 日