

动态PSR框架下成都市土地可持续利用韧性评估与适应性路径优化

张子驰

西南民族大学管理学院, 四川 成都

收稿日期: 2026年3月6日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年4月23日

摘要

快速城镇化进程中, 超大城市土地利用面临资源约束趋紧、人地矛盾加剧等挑战, 开展土地可持续利用韧性评估是优化国土空间治理的重要基础。本文以成都市为研究区, 基于动态压力-状态-响应(PSR)框架构建评价体系, 采用熵值法、耦合协调度模型与障碍度模型, 分析2014~2024年成都市土地可持续利用韧性的时序演化、子系统耦合关系与核心制约因子。结果表明: 研究期内成都市土地可持续利用韧性综合指数呈“波动调整-短期回落-稳步修复”特征; 系统子系统耦合度长期处于高位, 耦合协调度偏低; 核心障碍存在阶段性转换, 2020年前以响应、压力层指标为核心制约, 2021年后状态层耕地资源禀赋与土地产出效率成为首要短板。研究提出的适应性优化路径, 可为超大城市土地可持续利用治理提供参考。

关键词

土地可持续利用, 韧性评估, PSR框架, 耦合协调度, 成都市

Resilience Assessment and Adaptive Path Optimization of Sustainable Land Use in Chengdu under the Dynamic PSR Framework

Zichi Zhang*

School of Management, Southwest Minzu University, Chengdu Sichuan

Received: March 6, 2026; accepted: April 14, 2026; published: April 23, 2026

Abstract

In the process of rapid urbanization, the land use of megacities faces challenges such as tightening resource constraints and intensified conflicts between people and land. Conducting a resilience assessment of sustainable land use is an important foundation for optimizing territorial spatial governance. This paper takes Chengdu as the research area, constructs an evaluation system based on the dynamic Pressure-State-Response (PSR) framework, and adopts the entropy method, coupling coordination degree model, and obstacle degree model to analyze the temporal evolution, subsystem coupling relationship, and core constraining factors of Chengdu's sustainable land use resilience from 2014 to 2024. The results show that during the study period, the comprehensive index of Chengdu's sustainable land use resilience exhibits characteristics of "fluctuation adjustment - short-term decline - steady recovery"; the coupling degree of system subsystems remains high in the long term, while the coupling coordination degree is relatively low; the core obstacles undergo phased transitions, with response and pressure layer indicators being the core constraints before 2020, and the state layer's arable land resource endowment and land output efficiency becoming the primary shortcomings after 2021. The adaptive optimization path proposed in this study can provide a reference for the governance of sustainable land use in megacities.

Keywords

Sustainable Land Use, Resilience Assessment, PSR Framework, Coupling Coordination Degree, Chengdu City

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

土地是支撑人类社会经济活动与生态系统运转的核心载体,其可持续利用是筑牢国土空间安全底线、推动区域可持续发展与生态环境保护的根本前提。国家新时期国土空间治理相关部署明确了构建国土空间开发保护新格局、推动绿色发展的核心要求,《全国国土空间规划纲要(2021~2035年)》进一步将土地可持续利用与系统韧性提升确立为国土空间治理现代化的核心目标,推动土地管理从传统以规模管控、效率提升为核心的静态模式,向兼顾系统抗扰动、自适应与可持续发展能力的韧性治理转型。

随着我国城镇化与工业化深度推进,土地利用这一典型社会-生态复合系统,正面临城镇空间扩张、生态系统退化、极端气候频发、产业结构转型等多重内外扰动,系统稳定性与可持续性面临严峻挑战。传统土地可持续利用评价多聚焦单一时点的效率效益测度,难以完整刻画系统应对扰动时的抵御、适应、恢复与转型能力,无法适配新时代国土空间风险防控与韧性治理的现实需求。韧性理论为破解这一局限提供了全新理论视角,传统静态 PSR 模型多聚焦单一年份的单时点状态评价,无法刻画压力-状态-响应子系统间的时序演化规律与循环反馈机制,难以适配土地利用系统动态性、非线性的本质特征。本研究采用的动态 PSR 框架,核心是在经典 PSR 模型基础上,引入长时序维度与子系统耦合协调分析,其“动态”内涵体现在两个维度:一是时间维度的动态性,基于 2014~2024 年连续 10 年的面板数据开展逐年时序评价,完整刻画韧性水平的动态演化规律;二是系统反馈的动态性,通过耦合协调度模型,还原土地利用系统“压力扰动-状态变化-调控响应-反向优化”的闭环循环逻辑,刻画子系统间的动态耦

合与协同演化关系，更适配土地可持续利用韧性的动态评估需求。

当前国内外学者围绕土地利用系统评价与可持续利用治理已开展大量系统性研究，形成了丰富的研究成果。国内研究方面，诸多学者以 PSR 模型框架为核心，结合熵权法、GIS 空间分析等定量方法，开展了多尺度的土地生态安全评价、全域土地综合整治潜力测算等实证研究，为土地系统的定量评价提供了成熟的方法范式[1]-[3]；在土地可持续利用分析领域，相关研究从多尺度、多视角构建土地资源可持续利用评价体系，探究土地利用变化的时空特征与驱动机制，并基于土地系统科学视角探讨了土地利用转型的调控路径与优化策略[4][5]；同时，随着韧性理论与国土空间治理研究的深度融合，国内学者逐步构建多维度的国土空间韧性评价体系[6]-[9]，开展区域土地系统韧性的时空演化分析[8][9]、适应性分区与优化策略研究[10][11]。国外研究则重点聚焦土地利用变化驱动机制解析、土地可持续利用评价方法创新与适应性管理，一方面运用 PLUS 模型、多源数据融合等方法开展土地利用动态模拟、驱动因素识别与灾害风险下的土地利用优化研究，另一方面围绕生态脆弱区土地利用与生计动态耦合关系、农村土地可持续利用系统评价等方向展开深入探讨，在土地利用动态模拟、系统评价的技术方法创新上形成了诸多成熟成果[12]-[16]。总体而言，现有研究已构建起土地可持续利用研究的基本理论框架与方法体系，为本文的研究开展奠定了坚实的基础，但仍存在明显的研究缺口：现有 PSR 框架的应用多以静态单时点评价为主，对压力-状态-响应子系统间的动态耦合、循环反馈与非线性演化机制的刻画不足，动态 PSR 框架在土地可持续利用韧性评估中的应用深度与广度仍有待拓展；同时，现有土地利用韧性研究多聚焦于生态脆弱区、资源型城市等典型区域，针对成都平原这一西南快速城镇化平原密集区的土地可持续利用韧性专项研究较为匮乏，且现有研究提出的优化路径多为宏观普适性建议，缺乏基于动态评估结果、适配区域发展特征的精准化适应性路径设计，难以满足成渝地区双城经济圈建设背景下区域国土空间韧性治理的现实需求。

基于此，本文以成都市为研究区，以动态 PSR 框架为核心分析范式，构建土地可持续利用韧性评估指标体系与测算模型，长时序刻画研究区土地可持续利用韧性的时序演变规律与空间分异特征，厘清压力-状态-响应子系统的动态耦合协调关系，识别制约韧性提升的核心障碍因子，最终提出适配区域发展特征的差异化适应性优化路径。本研究通过拓展动态 PSR 框架在土地利用韧性研究中的应用场景，完善平原城镇化密集区土地可持续利用韧性评估的理论与方法体系，精准识别成都平原土地利用系统的韧性短板，为区域国土空间规划优化、土地利用管控政策制定提供科学量化依据，为成渝地区双城经济圈国土空间韧性治理提供实践支撑，也可为我国同类平原城镇化区域的土地可持续利用与韧性提升提供参考借鉴。

2. 研究区概括及数据来源

2.1. 研究区概况

成都市位于四川盆地西部成都平原腹地地带，地理坐标介于 102°54'E~104°53'E、30°05'N~31°26'N 之间，是成渝地区双城经济圈核心城市与国家级中心城市，截至 2025 年最新行政区划口径，全域辖 12 个市辖区、5 个县级市、3 个县，土地总面积 14335 km²；区域地势西北高、东南低，地貌涵盖平原、丘陵、山地三大类型，其中平原占比 40.1%，为成都平原核心承载区，属亚热带季风性湿润气候，年平均降水量 900~1300 mm，汛期降雨集中，洪涝、地质灾害等自然扰动风险突出，市域水系分属岷江、沱江两大长江上游支流流域，是长江上游重要生态屏障，截至 2024 年末全域森林覆盖率达 41.5%，自然本底与土地利用条件的空间分异特征显著；作为西南地区人口与经济集聚的核心枢纽，成都市城镇化与经济发展进程持续加快，据《2024 年成都市国民经济和社会发展统计公报》显示，2024 年末全域常住人口 2140.3 万人，常住人口城镇化率达 80.82%，全年实现地区生产总值 23166.5 亿元，三次产业结构优化为 2.6:30.1:67.3，

人口持续集聚与产业深度转型对土地开发利用形成了持续的人为扰动；基于 2024 年度国土变更调查数据，区域土地利用呈现“生态用地为基底、建设用地为核心、耕地为重要支撑”的总体格局，林地、耕地、城镇村及工矿用地分别占全域总面积的 35.2%、24.5%、18.9%，受快速城镇化进程影响，当前区域城镇建设用地持续扩张、耕地保护刚性压力加剧，土地利用同时面临城镇发展、粮食安全、生态保育的三重硬性管控要求，系统稳定性与可持续性面临多重内外扰动，是开展土地可持续利用韧性评估与适应性路径优化研究的典型区域。

2.2. 数据来源

本文研究时段为 2014~2024 年¹，评价指标体系所涉及的全部数据均来源于官方公开发布的权威数据源，确保数据口径统一、时序连续、真实可靠。其中，人口密度、常住人口城镇化率、单位耕地面积化肥施用量、地均 GDP、人均粮食产量、耕地有效灌溉率、第三产业产值占比、城乡社区支出占比等社会经济与农业生产类指标数据，主要来自 2015~2025 年《成都统计年鉴》《四川统计年鉴》及成都市 2014~2024 年国民经济和社会发展统计公报；耕地面积占比、建设用地年增长率等土地利用类核心数据，取自成都市规划和自然资源局、四川省自然资源厅发布的 2014~2024 年度国土变更调查成果；建成区绿化覆盖率、城镇污水处理率、工业固体废物综合利用率等生态环境类指标数据，来源于成都市 2014~2024 年生态环境状况公报、成都市水资源公报及四川省林业和草原局年度公开数据；农作物播种面积农药使用量相关数据来自四川省应急管理厅年度灾害统计公报与对应年度统计年鉴；针对个别年份的少量缺失数据，本文采用线性插值法进行补充处理，最终形成完整的连续面板数据集，为后续基于动态 PSR 框架的成都市土地可持续利用韧性评估提供坚实的数据支撑。

3. 研究方法

3.1. 评价指标体系建立

PSR (压力 - 状态 - 响应) 框架由 OECD 与 UNEP 联合提出，核心是解构人类活动与生态系统间“扰动压力 - 系统状态 - 调控响应”的线性作用逻辑，广泛应用于生态环境与土地利用评价领域[17]。但传统静态 PSR 模型仅能实现单一时点的状态评价，无法刻画压力 - 状态 - 响应子系统间的动态耦合、循环反馈与时序演化规律，难以适配土地利用系统动态性、非线性、复杂性的本质特征，也无法完整刻画土地可持续利用韧性的动态演化过程。

本研究采用的动态 PSR 框架，在经典 PSR 框架的基础上，构建“压力扰动→系统状态变化→调控响应实施→状态反馈调整→压力优化管控”的长时序动态闭环分析逻辑，其“动态”特征与本研究设计高度契合：一是实现了时序维度的动态评价，区别于传统静态 PSR 的单时点评价，本研究以 2014~2024 年为研究时段，开展逐年的连续评价，可完整呈现土地利用系统在 10 年间的动态演化过程，精准捕捉政策调整、统计口径变化等事件对系统的冲击影响；二是还原了系统间的动态反馈机制，通过耦合协调度模型，量化分析压力、状态、响应三个子系统间的相互作用强度与协同演化关系，打破了传统静态 PSR 仅能刻画线性作用逻辑的局限，完整还原了三个子系统间的非线性循环反馈过程，与土地可持续利用韧性的核心内涵高度适配[18]。基于上述核心逻辑与循环反馈机制，结合成都市作为成渝地区双城经济圈核心城市、国家级中心城市，在快速城镇化进程中土地利用系统面临的人为扰动强烈、自然风险凸显、城镇发展与耕地保护、生态保育多重功能冲突加剧的区域特征，本研究从压力、状态、响应三个准则层出发，筛选可长时序连续获取、能够精准刻画系统扰动强度、资源生态经济本底状态与政府社会调控响应能力的核心指标，构建适配研究区发展实际的成都市土地可持续利用韧性评价指标体系。指标体系见表 1。

¹注：因行政区划划分，2014~2015 年全域数据不包含简阳市。

3.2. 指标标准化的处理

由于评价体系内各指标的量纲、数量级存在显著差异，且分为正向、负向两种属性，为消除量纲影响、保证数据可比性，采用极差标准化法对原始数据进行无量纲化处理，处理公式如下：

正向指标：

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (3-2-1)$$

负向指标：

$$X'_{ij} = \frac{\max(X_j) - X_{ij}}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (3-2-2)$$

式中， X'_{ij} 为第*i*年第*j*项指标的标准化值， X_{ij} 为第*i*年第*j*项指标的原始值， $\max(X_j)$ 、 $\min(X_j)$ 分别为第*j*项指标在研究时段内的最大值与最小值。

3.3. 基于熵值法的客观确权

本文采用熵值法确定各评价指标的权重，该方法可根据指标数据的离散程度客观反映其对评价目标的贡献度，有效避免人为主观赋值带来的偏差，适配多指标综合评价的客观确权需求，计算步骤如下：

1) 计算第*i*年第*j*项指标的样本比重：

$$Y_{ij} = \frac{X''_{ij}}{\sum_{i=1}^n X''_{ij}} \quad (3-3-1)$$

2) 计算第*j*项指标的信息熵值：

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln(Y_{ij}) \quad (3-3-2)$$

3) 计算第*j*项指标的效用差异系数：

$$g_j = 1 - e_j \quad (3-3-3)$$

4) 计算第*j*项指标的最终权重：

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (3-3-4)$$

Table 1. Evaluation system for sustainable land use

表 1. 土地可持续利用评价体系

层	准则层	指标层	说明	属性	权重	
土地可持续利用评价	压力层	人口密度 X_1	年末常住人口/全域土地总面积(人/km ²)	人口集聚对土地系统的承载压力	负向	0.0367
		常住人口城镇化率 X_2	年末城镇常住人口/全域年末常住人口(%)	城镇化扩张对土地利用的扰动压力	负向	0.0451
		单位耕地面积化肥施用量 X_3	农用化肥施用折纯量/年末耕地总面积(t/km ²)	农业生产对土地的面源污染压力	负向	0.1022

续表

	建设用地年增长率 X ₄	(当年建设用地面积 - 上年建设用地面积)/上年建设用地面积(%)	土地开发扩张的扰动压力	负向	0.0648
	单位农作物播种面积农药使用量 X ₅	年度农药施用折纯量/农作物总播种面积(t/hm ²)	农业生产中农药投入对地生态系统的面源污染压力	负向	0.1332
	耕地面积占比 X ₆	年末耕地总面积/全域土地总面积(%)	土地资源的核心承载状态与粮食安全保障能力	正向	0.1405
	建成区绿化覆盖率 X ₇	年度建成区绿化覆盖面积/建成区总面积(%)	建成区的生态维护水平、植被覆盖状况与抗扰动能力	正向	0.0411
状态层	地均 GDP X ₈	年度地区生产总值/全域土地总面积(万元/km ²)	土地利用的经济产出效率与发展状态	正向	0.0427
	人均粮食产量 X ₉	年度粮食总产量/全域年末常住人口(kg/人)	土地生产系统的供给能力与承载韧性	正向	0.1537
	耕地有效灌溉率 X ₁₀	耕地有效灌溉面积/年末耕地总面积(%)	耕地系统的抗灾能力与生产稳定性	正向	0.0243
	城乡社区支出占比 X ₁₁	城乡社区事务财政支出/一般公共预算总支出(%)	政府应对城镇化扩张压力的核心响应措施	正向	0.0442
	城镇污水处理率 X ₁₂	年度城镇污水处理量/污水产生总量(%)	区域污染治理的响应能力	正向	0.0375
响应层	工业固体废物综合利用效率 X ₁₃	年度工业固废综合利用量/工业固废产生总量(%)	资源循环利用的响应水平	正向	0.0603
	第三产业产值占比 X ₁₄	年度第三产业产值/地区生产总值(%)	产业结构优化、降低土地开发压力的转型响应	正向	0.0737

3.4. 土地可持续利用综合评价指数计算

采用线性加权综合法, 测算成都市土地可持续利用韧性综合水平, 以及压力、状态、响应三个子系统的单独得分, 清晰刻画韧性水平的时序演化特征, 计算公式如下:

$$S_i = \sum_{j=1}^m w_j \times X_{ij}'' \quad (3-4-1)$$

$$S_{ik} = \sum_{j=1}^{m_k} w_j \times X_{ij}' \quad (3-4-2)$$

式中, S_i 为第 i 年的土地可持续利用韧性综合得分, 得分区间为[0,1], 得分越高代表韧性水平越强; S_{ik} 为第 i 年第 k 个子系统的得分 ($k=1,2,3$, 分别对应压力、状态、响应子系统); m_k 为对应子系统的指标数量。

3.5. 土地可持续利用系统协调度计算

现动态 PSR 框架的核心内涵, 刻画压力 - 状态 - 响应三个子系统间的动态耦合、循环反馈与协同演化关系, 采用耦合协调度模型测算研究时段内三个子系统的耦合协调水平, 弥补传统静态评价的不足, 计算公式如下:

1) 耦合度模型

$$C = 3 \times \sqrt[3]{\frac{S_{i1} \times S_{i2} \times S_{i3}}{(S_{i1} + S_{i2} + S_{i3})^3}} \quad (3-5-1)$$

式中, C 为子系统耦合度, 取值范围为 $[0,1]$, C 越接近 1, 代表三个子系统间的相互作用、相互影响程度越强, 动态关联度越高。

2) 耦合协调度模型

$$T = \alpha S_{i1} + \beta S_{i2} + \gamma S_{i3} \quad (3-5-2)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (3-5-3)$$

式中, T 为三个子系统的综合发展指数; α 、 β 、 γ 为子系统的贡献系数, 基于动态 PSR 框架的逻辑关系, 三个子系统对土地可持续利用韧性同等重要, 故取 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$; D 为耦合协调度, 取值范围为 $[0,1]$, D 越接近 1, 代表三个子系统的协同发展水平越高、动态适配性越强, 可据此划分协调发展等级, 分析其时序演化规律。

3.6. 障碍度因子诊断

为精准识别制约土地可持续利用韧性提升的核心因子, 为后续适应性路径优化提供靶向依据, 引入障碍度模型, 分别测算指标层与准则层的障碍度, 计算公式如下

$$F_{ij} = w_j \times (1 - X_{ij}^n) \quad (3-6-1)$$

式中, F_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的因子贡献度; P_{ij} 为第 i 年第 j 项指标的障碍度, 数值越大代表该指标对韧性提升的制约作用越强; P_{ik} 为第 i 年第 k 个准则层的综合障碍度, 可据此判断不同时段制约韧性提升的核心矛盾子系统与关键短板指标。

4. 结果与分析

4.1. 综合水平时序演化分析

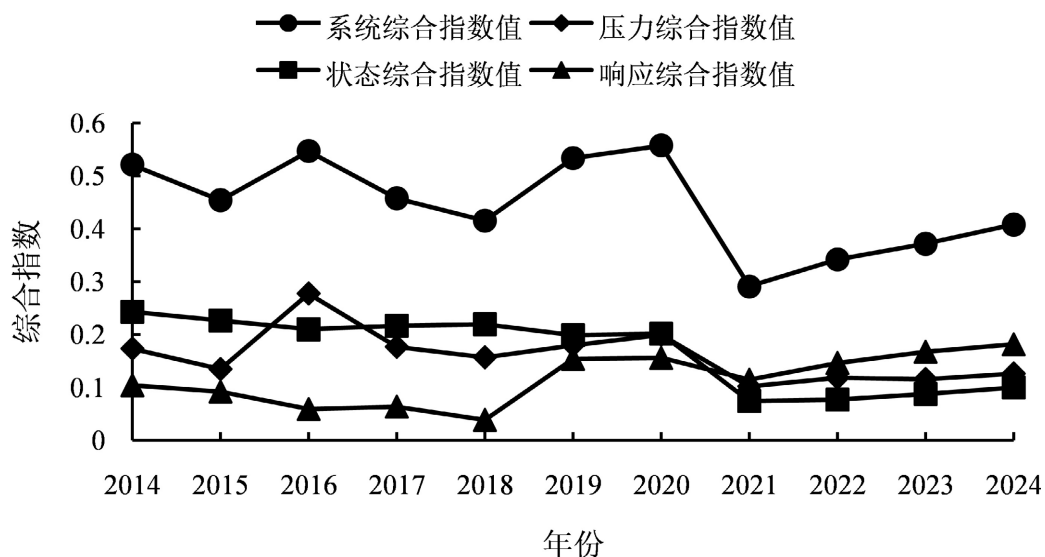


Figure 1. Evaluation results of sustainable land use in Chengdu from 2014 to 2024

图 1. 2014~2024 年成都市土地可持续利用评价结果

本研究基于熵值法确权权重(表 1),通过线性加权综合法测算 2014~2024 年成都市土地可持续利用韧性综合得分(得分区间[0,1],分值越高韧性越强),其整体呈现“波动上升-短期回落-稳步修复”的三阶段演化特征,研究期内综合得分介于 0.2912~0.5575 之间,波动趋势与成都市行政区划调整、统计口径更新、核心政策落地高度契合,见图 1。

2014~2020 年为波动上升期,综合得分从 0.5213 波动升至研究期峰值 0.5575。核心驱动因素为 2016 年简阳市划归成都,全域土地承载空间拓展,叠加建设用地管控、化肥农药减量等政策落地,土地利用压力得到控制,本底状态持续优化;2020~2021 年为短期回落期,综合得分从 0.5575 降至研究期谷值 0.2912。该变化并非土地利用能力实质性下降,核心源于第三次全国国土调查成果发布,耕地面积统计口径调整导致总量系统性核减,直接拉低耕地面积占比等核心状态指标得分;2021~2024 年为稳步回升期,综合得分从 0.2912 持续回升至 0.4081,年均回升幅度 0.0390。成都市严格落实耕地保护全链条属地管理责任制度、国土空间刚性管控政策,耕地本底逐步修复,并且叠加成渝地区双城经济圈建设,产业转型与生态治理持续推进,响应端治理能力显著增强,推动韧性水平稳步修复。

4.2. 分类指标对比

基于 PSR 框架,本研究从压力、状态、响应三个维度对比子系统演化特征,衡量各维度对土地可持续利用韧性的驱动与制约作用。

4.2.1. 压力指标

压力层得分越高,代表土地系统承受的外部扰动压力越小,研究期内得分介于 0.1022~0.2776 之间。2014~2016 年得分从 0.1736 升至研究期峰值 0.2776,简阳市划归后全域土地承载空间扩容,人口密度、单位耕地化肥施用量等压力指标相对水平显著下降。2016~2021 年得分从 0.2776 降至谷值 0.1022,核心受常住人口持续净流入、城镇化扩张加剧承载压力,以及三调耕地核减后农业面源污染相对强度提升影响。2021~2024 年得分小幅回升至 0.1265,建设用地的“双管控”政策落地,使其年增长率从 2.4765%降至 1.0145%,且化肥农药减量增效推进,土地扰动压力持续缓解。

4.2.2. 状态指标

状态层是土地可持续利用韧性的核心基础,得分越高代表土地本底状态越优,研究期内得分介于 0.0742~0.2433 之间,是综合韧性水平演化的核心主导维度。2014~2020 年为高位平稳期,得分稳定在 0.1991~0.2433 区间,得益于耕地总量稳定、建成区绿化覆盖率从 35.86%升至 43.90%、地均 GDP 从 7015.4098 万元/km² 升至 12359.0343 万元/km²,土地生态与经济产出能力同步提升。2020~2021 年得分从 0.2020 降至谷值 0.0742,受三调耕地认定标准收紧、耕地面积统计总量核减影响,直接拉低耕地面积占比等关联指标得分。2021~2024 年得分回升至 0.0997,源于永久基本农田红线管控、高标准农田建设推进,叠加城市生态建设持续落地,土地本底状态稳步修复。

4.2.3. 响应指标

响应层得分越高,代表政府治理措施的适配性与有效性越强,研究期内得分介于 0.0386~0.1819 之间。2014~2018 年得分从 0.1044 降至谷值 0.0386,受城乡社区财政支出占比持续下降、工业固废综合利用率阶段性波动影响,政府响应力度有所减弱。2018~2024 得分从 0.0386 升至研究期峰值 0.1819,年均提升幅度 0.0239,城镇污水处理率从 94.0916%升至 97.0625%,工业固废综合利用率从 73.8030%升至 96.4825%,污染治理能力显著提升;第三产业产值占比从 54.1231%升至 68.9806%,产业转型缓解土地开发压力;国土空间治理财政投入回升,政府响应适配性持续增强。

4.3. 耦合协调分析

2014~2024年成都市土地可持续利用系统的耦合协调度与综合发展指数整体呈现出协同演化态势，二者相关性较强，进一步证实了系统内部子系统间的有序协同对提升土地可持续利用韧性水平的重要性。研究期内，耦合协调度由2014年的0.3802波动变化至2024年的0.3576，综合发展指数由0.1738调整至0.1360，整体波动与成都市行政区划调整、国土调查统计口径更新及生态环境保护政策落地高度契合，见图2。具体而言，2014~2018年，耦合协调度在0.3187~0.3893区间波动，综合发展指数在0.1384~0.1824区间小幅调整，系统整体呈现“高关联、低协同”的特征，响应子系统的治理投入不足制约了协同水平；2019~2021年，随着污染治理、产业转型等政策落地，耦合协调度升值0.40，达到0.4005~0.4118的高位，综合发展指数同步提升至0.1779~0.1858，子系统间的适配性与协同性达到研究期内最佳，后续受第三次全国国土调查耕地口径调整影响，状态子系统得分大幅回落，耦合协调度降至0.2947，综合发展指数降至0.0971，系统协同水平出现短期回落；2021~2024年，随着耕地保护与生态修复政策持续推进，耦合协调度稳步回升至0.3576，综合发展指数修复至0.1360，系统协同发展进入持续修复通道，表明压力、状态、响应子系统间的动态反馈机制逐步成熟，但整体协同水平仍有较大提升空间。

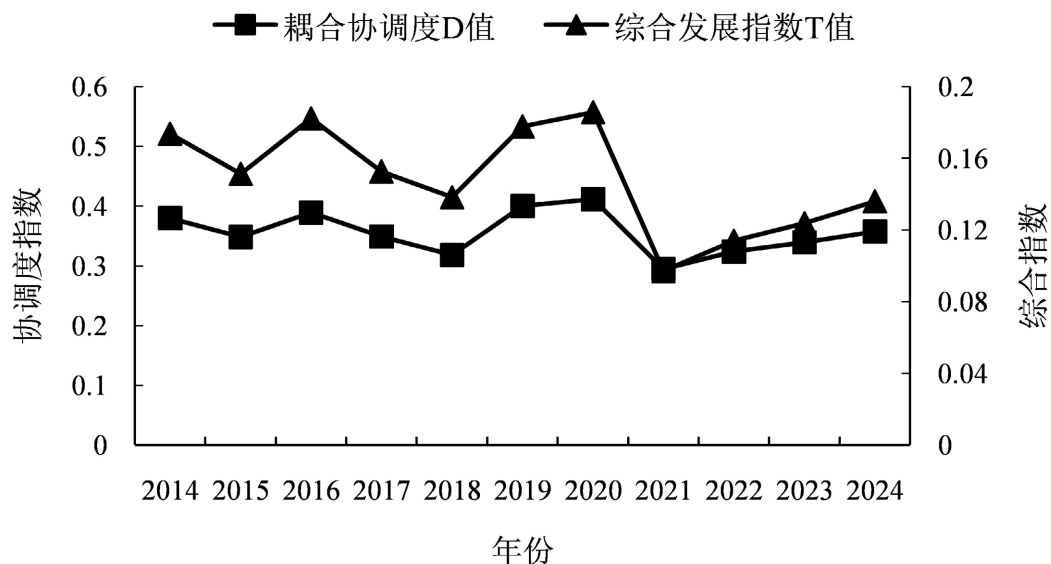


Figure 2. Coordination degree of sustainable land use system in Chengdu from 2014 to 2024
图2. 2014~2024年成都市土地可持续利用系统协调度

4.4. 障碍因子判断

基于前文熵值法测算的子系统综合得分，引入障碍度模型，分别测算准则层与指标层的障碍度，识别2014~2024年制约成都市土地可持续利用韧性提升的核心障碍因子，为后续优化路径构建提供靶向依据。

4.4.1. 准则层障碍因子分析

基于障碍度模型测算得到2014~2024年成都市土地可持续利用系统压力、状态、响应准则层的障碍度，结果显示，研究期内准则层障碍度的主次关系呈现显著的阶段性转换特征，见图3。2014~2020年，响应层为系统韧性提升的第一核心障碍，障碍度介于34.29%~38.35%，2016年达研究期峰值38.35%；压力层为第二障碍，障碍度稳定在32.37%~33.99%区间；状态层障碍度最低，介于30.19%~32.67%，制约作用最弱。2021~2024年，准则层障碍主次关系发生反转，状态层反超为第一核心障碍，障碍度从2020

年的 32.67% 升至 2021 年的 34.18%，2024 年达 34.73%，始终保持研究期内最高水平；压力层障碍度稳定在 33.14%~33.70%，为第二障碍；响应层障碍度持续下降，从 2020 年的 34.56% 降至 2024 年的 31.56%，成为制约作用最弱的准则层。

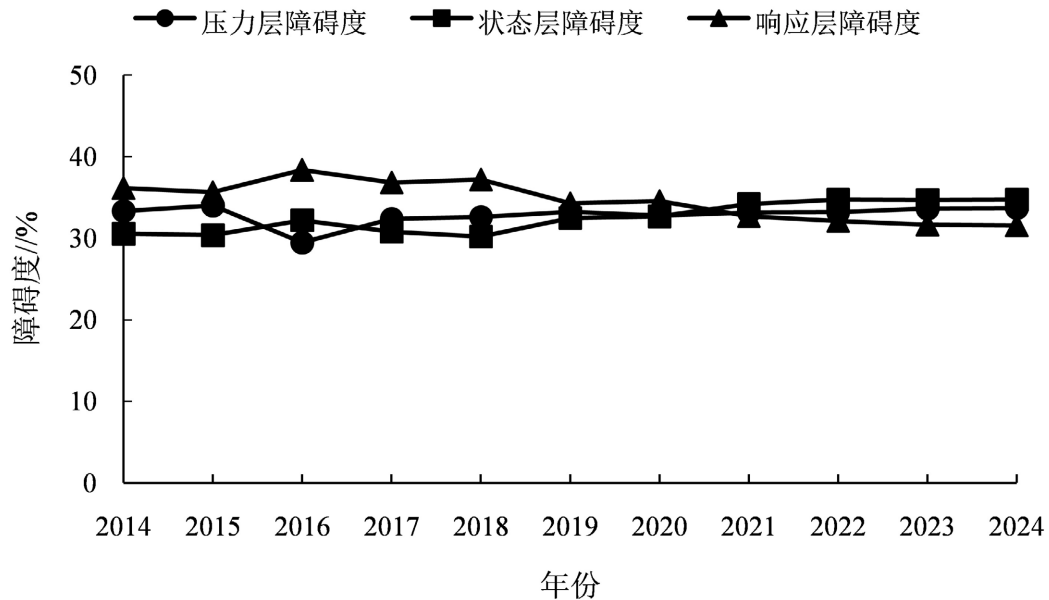


Figure 3. Obstacle degree of criteria-level indicators from 2014 to 2024

图 3. 2014~2024 年准则层指标障碍度

4.4.2. 指标层障碍因子分析

为进一步精准识别制约成都市土地可持续利用韧性提升的核心影响因素，按照障碍度大小对各评价指标进行排序，选取研究时段内各年度排名前五的障碍因子展开分析，见表 2。

Table 2. Main obstacle factors and obstacle degree of sustainable land use indicators in chengdu from 2014 to 2024

表 2. 2014~2024 年成都市土地可持续利用指标层主要障碍因子及障碍度

年份	障碍因子(障碍度//%)				
	位次 1	位次 2	位次 3	位次 4	位次 5
2014	X ₅ (12.315)	X ₃ (11.872)	X ₉ (10.946)	X ₆ (10.623)	X ₁₄ (9.758)
2015	X ₅ (12.428)	X ₃ (11.935)	X ₉ (10.871)	X ₆ (10.589)	X ₁₄ (9.642)
2016	X ₅ (12.106)	X ₃ (11.684)	X ₁₄ (10.217)	X ₉ (10.153)	X ₆ (9.986)
2017	X ₅ (12.273)	X ₃ (11.801)	X ₉ (10.792)	X ₆ (10.514)	X ₁₄ (9.813)
2018	X ₅ (12.347)	X ₃ (11.869)	X ₉ (10.685)	X ₆ (10.472)	X ₁₄ (9.697)
2019	X ₅ (12.083)	X ₃ (11.652)	X ₆ (11.234)	X ₉ (11.017)	X ₄ (9.876)
2020	X ₅ (11.946)	X ₃ (11.528)	X ₆ (11.587)	X ₉ (11.324)	X ₂ (9.741)
2021	X ₆ (18.246)	X ₉ (17.632)	X ₈ (14.895)	X ₃ (11.374)	X ₁ (10.268)
2022	X ₆ (18.123)	X ₉ (17.519)	X ₈ (14.762)	X ₃ (11.298)	X ₁ (10.194)
2023	X ₆ (17.957)	X ₉ (17.346)	X ₈ (14.628)	X ₃ (11.185)	X ₁ (10.083)
2024	X ₆ (17.842)	X ₉ (17.213)	X ₈ (14.519)	X ₃ (11.092)	X ₁ (10.083)

由上表可知, 研究期内制约成都市土地可持续利用的核心障碍因子呈现显著的阶段性结构转换特征, 与准则层障碍度演化规律相契合。2014~2020年, 系统核心障碍以压力层指标为主, 单位农作物播种面积农药使用量(X_5)、单位耕地面积化肥施用量(X_3)始终稳居障碍度前2位, 二者障碍度均保持在11%以上, 是该阶段最核心的制约因子; 人均粮食产量(X_9)、耕地面积占比(X_6)、第三产业产值占比(X_{14})交替进入前5位, 反映出农业面源污染压力是该阶段土地可持续利用的首要短板。2021~2024年, 核心障碍发生结构性反转, 状态层指标成为首要制约因素, 耕地面积占比(X_6)、人均粮食产量(X_9)、地均GDP(X_8)为障碍度前3位, 其中耕地面积占比(X_6)障碍度从2020年的11.587%跃升至2021年的18.246%, 为第一核心障碍; 压力层仅单位耕地面积化肥施用量(X_3)仍位列前5, 响应层指标全部退出前5位, 该变化与第三次全国国土调查耕地统计口径调整高度相关, 耕地资源总量核减直接导致土地利用状态类指标的制约作用大幅增强。研究期内系统核心障碍从农业面源污染压力类指标, 逐步转向耕地资源禀赋与土地产出效率类状态指标, 未来韧性提升需靶向破解耕地保护核心短板, 同时持续强化农业面源污染常态化管控。

5. 结论与讨论

本研究识别的障碍因子阶段性特征, 与成都市同期政策高度关联, 2014~2020年《成都市农业面源污染防治综合防治方案》等政策推动响应子系统成效显著, 但对耕地本底保护关注不足, 叠加《成都市国土空间总体规划(2021~2035年)》落地期城市扩张、三调耕地口径调整, 2021年后状态层成为首要障碍; 单领域碎片化政策也导致系统长期呈现“高耦合、低发展”特征。基于上述研究结论, 结合成都市公园城市示范区、成渝双城经济圈建设发展定位, 针对性提出土地可持续利用韧性提升的适应性优化路径: 一是聚焦核心短板强化状态层本底建设, 严格落实耕地保护制度, 严守耕地红线, 推进高标准农田建设与耕地质量提升, 优化产业用地配置与准入标准, 提升土地经济产出效率, 破解耕地资源禀赋与产出效率的核心制约; 二是常态化管控压力层系统扰动, 推进化肥农药减量增效与农业面源污染源头治理, 落实建设用地总量与强度双控, 盘活城镇存量低效用地, 从源头降低土地系统承载压力与扰动风险; 三是构建多维度协同的响应升级体系, 优化环保财政支出精准度与使用效率, 持续推进产业结构优化升级, 建立跨区域国土空间协同治理与生态补偿机制, 全面提升土地可持续利用韧性。

本研究基于动态PSR框架构建成都市土地可持续利用韧性评价体系, 运用熵值法、耦合协调度模型与障碍度模型, 分析2014~2024年研究区土地可持续利用韧性的时序演化、子系统耦合关系及核心障碍因子。结果表明, 研究期内成都市土地可持续利用韧性综合指数呈“波动调整-短期回落-稳步修复”特征, 响应子系统治理成效持续显现, 状态子系统受第三次全国国土调查耕地口径调整出现回落, 压力子系统受人口集聚、农业面源污染等因素存在持续约束; 系统压力-状态-响应子系统耦合度长期处于0.7331~0.9382的高位区间, 耦合协调度介于0.2947~0.4118之间, 核心障碍存在阶段性转换, 2020年前以响应层、农业面源污染类压力层指标为核心制约, 2021年后状态层成为首要障碍, 耕地资源禀赋与土地产出效率为核心短板。本研究基于动态PSR框架, 开展了成都市土地可持续利用韧性的长时序动态评价, 弥补了传统静态PSR单时点评价难以刻画系统时序演化、子系统循环反馈关系的不足, 相关结论与国内同类超大城市研究成果具有一致性, 可为成渝地区超大城市土地可持续利用研究提供区域案例参考, 也为成都市国土空间治理政策优化提供了量化支撑; 受数据可获得性限制, 本研究仅聚焦市域尺度时序演化, 未涉及区县尺度空间分异特征, 未来可进一步细化研究尺度、完善多维度评价体系。

基金项目

受西南民族大学2025年研究生创新型科研项目资助。

参考文献

- [1] 李菲, 李媛. 基于 PSR 模型的太原市土地生态安全评价及障碍因子分析[J]. 国土与自然资源研究, 2023(1): 51-56.
- [2] 陈知椿, 彭玉玲, 梁嘉毅. 基于 PSR 模型的湖北省土地生态安全评价及预测[J]. 湖北农业科学, 2024, 63(11): 35-42.
- [3] 王颖佳, 杨木壮, 宫清华, 等. 基于 PSR 模型的全域土地综合整治潜力评价——以广东省潮安区为例[J]. 现代农业研究, 2025, 31(1): 87-90.
- [4] 孙雁, 刘友兆. 基于细碎化的土地资源可持续利用评价——以江西分宜县为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(5): 802-810.
- [5] 龙花楼, 陈坤秋. 基于土地系统科学的土地利用转型与城乡融合发展[J]. 地理学报, 2021, 76(2): 295-309.
- [6] 程宪波, 刘琼, 陶宇, 等. 1995-2015 年中国乡村土地利用功能转型特征与耦合协调演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(1): 194-206.
- [7] 王少剑, 崔子恬, 林靖杰, 等. 珠三角地区城镇化与生态韧性的耦合协调研究[J]. 地理学报, 2021, 76(4): 973-991.
- [8] 杨庆媛, 张浩哲, 唐强. 基于适应性循环模型的重庆市国土空间生态修复分区[J]. 地理学报, 2022, 77(10): 2583-2598.
- [9] 吴铠凯, 池彬, 詹斐晴, 等. 传统村落流域适应性空间分布及其影响因素——以汀江流域为例[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2024, 36(4): 421-432.
- [10] 刘洋豪, 谢保鹏, 陈英, 等. 基于 PSR-TOPSIS 模型的陇中陇东黄土高原土地生态安全评价及障碍因子诊断[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 130-140.
- [11] 黄祁琦, 杨庆媛. 基于 PSR 模型的重庆市土地可持续利用评价及障碍因子诊断[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(24): 254-260.
- [12] Liang, X., Guan, Q., Clarke, K.C., Liu, S., Wang, B. and Yao, Y. (2021) Understanding the Drivers of Sustainable Land Expansion Using a Patch-Generating Land Use Simulation (PLUS) Model: A Case Study in Wuhan, China. *Computers, Environment and Urban Systems*, **85**, Article ID: 101569. <https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2020.101569>
- [13] Lucock, X., Woodford, K. and Li, X. (2022) Sustainable Land Use and Livelihood Dynamics in Henan County on the Qinghai-Xizang Plateau—A Transdisciplinary Systems Perspective. *Sustainability*, **14**, Article 7785. <https://doi.org/10.3390/su14137785>
- [14] Li, X. and Lei, L. (2023) Evaluating Rural Sustainable Land Use from a System Perspective Based on the Ecosystem Service Value. *Regional Sustainability*, **4**, 96-114. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2023.03.002>
- [15] von Döhren, P. and Haase, D. (2023) Ecosystem Services for Planning Post-Mining Landscapes Using the DPSIR Framework. *Land*, **12**, Article 1077. <https://doi.org/10.3390/land12051077>
- [16] Ouma, Y.O., Nkwae, B., Odirile, P., Moalafhi, D.B., Anderson, G., Parida, B., et al. (2024) Land-Use Change Prediction in Dam Catchment Using Logistic Regression-Ca, ANN-CA and Random Forest Regression and Implications for Sustainable Land-Water Nexus. *Sustainability*, **16**, Article 1699. <https://doi.org/10.3390/su16041699>
- [17] 陕永杰, 魏绍康, 苗圆, 等. 基于 PSR-TOPSIS 模型的“晋陕豫黄河金三角”地区土地生态安全评价[J]. 生态经济, 2022, 38(7): 205-211.
- [18] 罗雅红, 龚建周, 姚昆. 成都平原经济区土地可持续利用水平变化及驱动因素分析[J]. 生态科学, 2019, 38(6): 8-14.