

干旱区绿洲城市生态韧性对生态效率的弹性响应研究

王同浩 吴文婕* 祝庆 林沛轩 王志强 沈岩 苏志尚
新疆农业大学 公共管理学院/法学院

DOI:10.32629/eep.v9i4.3170

[摘要] 探讨干旱区绿洲城市生态韧性对生态效率的响应机制,以揭示复杂社会-经济-生态系统的协同机理。以干旱区绿洲城市为例,采用超效率EBM-DEA模型、空间杜宾模型及弹性响应模型,系统分析其生态韧性、生态效率时空特征及弹性响应。主要结论:(1)生态效率呈“波动上升-调整-加速增长”三阶段特征,空间上形成“北高南低”格局。(2)生态效率存在显著空间依赖性,经济效率空间溢出效应最强。(3)生态韧性水平呈“波动上升-平稳调整-加速增长”趋势,空间呈“北高南低、中心-边缘递减”分异格局。(4)生态韧性对生态效率的整体弹性系数为0.82($p<0.01$),北疆城市群通过技术溢出呈正向响应,南疆受生态脆弱性制约呈负向响应。结果验证了“生态效率-生态韧性”协同演进的非线性特征,可为绿洲城市生态规划提供借鉴。

[关键词] 干旱区绿洲; 生态韧性; 生态效率; 弹性响应

中图分类号: S342.1 文献标识码: A

Study on the Elastic Response of Ecological Resilience to Ecological Efficiency in Oasis Cities in Arid Regions

Tonghao Wang Wenjie Wu* Qing Zhu Peixuan Lin Zhiqiang Wang Yan Shen Zhishang Su
School of Public Administration/Law, Xinjiang Agricultural University

[Abstract] This study explores the response mechanism of oasis urban ecological resilience to ecological efficiency, aiming to reveal the synergistic dynamics of complex socio-economic-ecological systems. Taking oasis cities in arid regions as a case, the super-efficiency EBM-DEA model, spatial Durbin model, and resilience response model were employed to systematically analyze their ecological resilience, spatiotemporal characteristics of ecological efficiency, and resilience responses. Key findings: (1) Ecological efficiency exhibits a three-stage pattern of "fluctuating rise-adjustment-accelerated growth," forming a "north-high-south-low" spatial distribution. (2) Ecological efficiency demonstrates significant spatial dependence, with economic efficiency showing the strongest spatial spillover effect. (3) Ecological resilience follows a trend of "fluctuating rise-stable adjustment-accelerated growth," presenting a spatial differentiation pattern of "north-high-south-low, central-edge decline." (4) The overall elasticity coefficient of ecological resilience to ecological efficiency is 0.82 ($p<0.01$), with the northern Xinjiang urban cluster showing a positive response through technological spillover, while southern Xinjiang exhibits a negative response constrained by ecological vulnerability. The results validate the nonlinear characteristics of the "ecological efficiency-ecological resilience" synergistic evolution, offering insights for ecological planning in oasis cities.

[Key word] oasis in arid regions; ecological resilience; ecological efficiency; resilient response

生态效率强调经济活动中减少资源消耗与环境影响,实现资源高效利用;生态韧性关注生态系统应对干扰的能力,保障其稳定性与持续性。两者互为支撑、协同演进:生态效率提升通过优化投入产出结构,为生态韧性建设提供物质与技术保障^[1];生态韧性增强则提升系统抗风险与自我修复能力,筑牢生态效率持续改善的基础^[2],共同推动区域生态系统健康发展^[3]。探

讨生态韧性对生态效率的响应机制,揭示其对生态系统服务功能的中介作用,可为生态效率评价体系提供创新理论视角^[4]。近年来,新疆维吾尔自治区通过开展多项重大生态工程,率先启动实施塔里木河流域胡杨林生态系统修复工程,有效改善荒漠化、沙化等区域生态问题^[5];同时积极加快经济社会发展全面绿色低碳转型,着力建立与新发展格局相适应的生态环境保护制度

体系,开展全域生态效率与生态韧性的协同响应研究,对稳定区域生态格局、实现资源开发与生态保护协同发展具有重要现实意义。

国外学者Stefan Schaltegger和Andreas Sturm首次提出生态效率的概念,并应用到企业生产、城市规划和区域发展等领域^{[6][7]}。德国弗劳恩霍夫研究所(LCA)融合生命周期评估与环境影响评价方法,测量城市生态效率,为提升生态效率提供依据与方向^[8]。生态韧性领域,Holling首次提出生态韧性的概念,指出生态系统具有多个稳定状态和阈值^[9]。Walker将生态韧性扩展为生态系统的抵抗力、恢复力和适应性三个方面^[10]。此外,国外学者强调生态系统稳定性和恢复力是生态韧性的重要特征,重点关注生态系统的适应性和创新性^[11]。韧性理论与思维广泛应用于城市韧性评估及城市规划的实践^[12]。

国内学者普遍认为,生态效率核心是实现经济增长与生态保护的双赢^[13],目前已形成比值法、指标法、模型法等多元评价方法,围绕指标体系构建、影响因素识别与提升策略对生态效率进行了大量实证研究^{[14][15]}。国内学者也提出适合我国国情的生态韧性理论框架,指出生态韧性具有阈值性、多稳态性和适应性等特征^[1],为生态韧性研究提供理论支持。相关学者采用能值生态足迹模型、景观格局法、TOPSIS方法、地理回归模型等方法,综合评价城市群、都市圈、矿区、自然保护区等区域的生态韧性水平及其影响因素^[16];或引入复杂适应系统(CAS)理论,从不同城市类型的视角探索城市社会、经济、生态韧性建设的组态路径^[2]。

但现有研究仍存在明显不足:多数研究将生态效率与生态韧性割裂分析^[17],部分学者则利用耦合协调度模型分析二者间的协调发展关系,并通过障碍度模型识别阻碍二者协调发展的障碍因子^[18],综合生态效率与生态韧性两者动态响应关系及互动机理的实证研究较少。新疆地处西北干旱地区,具有“资源丰富、能源富集、生态脆弱、发展不均衡”等特征,本研究以新疆14地州(市)为研究单元,采用超效率EBM-DEA模型、空间杜宾模型与弹性响应模型,系统分析生态效率投入产出动态变化与空间溢出效应,综合评价绿洲城镇系统生态韧性水平,识别内在影响机理并揭示生态系统对生态效率的弹性响应规律特征,旨在为增强干旱区绿洲城市社会-经济-生态综合系统韧性,优化区域生态效率与生态安全格局提供参考依据。

1 研究区及数据来源

1.1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北部,欧亚大陆腹地,现辖14地州(市)。“三山夹两盆”的复杂地貌,地广人稀的社会形态,造就了“绿洲为核、荒漠环绕”的生态格局。2023年,地区生产总值(GDP)达17741.34亿元,三产比重为14.3%、40.3%、45.4%,城镇化率59.2%,并呈不断增长趋势。近年来,全疆依托资源和区位优势,推动产业融合发展,加快构建以“八大产业集群”为重心的现代产业体系,同时也面临着更为严峻的生态环境治理压力与挑战。南疆地区由于长期过度放牧、土地盐碱化等生态治

理困境,生态退化现象相对严重;北疆城镇及产业集聚区域大气污染问题依然严峻,重化工产业和煤炭依赖的能源结构对区域生态保护面临长期挑战与压力。

1.2 数据来源与处理

数据主要来源于2013-2022年《新疆统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《新疆水资源公报》,新疆各地州(市)政府发布的《国民经济与社会发展统计公报》以及自治区《环境统计公报》等相关数据。以新疆14个地州(市)为基本研究单元,对原始数据进行标准化处理,消除量纲差异,确保分析结果的科学性与可比性。

2 研究方法

2.1 超效率EBM-DEA模型与指标体系法

表1 城市生态效率投入产出评价指标体系

系统	维度	子维度	具体指标	反应内容	单位	属性
生态效率	投入	经济	固定资产投资增长率	资本投入	%	+
			R&D 经费支出占财政支出比	科技投入	%	+
			能源消费总量(综合煤、电)	能源投入	吨	-
			万元GDP 水耗	资源投入	亿立方米	-
		社会	地区人均公共教育支出	教育资金投入	%	+
			年末单位从业人员数	劳动力投入	万人	+
		生态	建设用地开发强度	土地资源投入	%	+
			环保投入占GDP比重	生态资金投入	%	+
			生态用水量	水资源投入	亿立方米	-
	产出	期望产出	地区生产总值	经济	亿元	+
			森林覆盖率	社会	%	+
			空气质量优良天数比例	生态	%	+
		非期望产出	工业二氧化碳排放量	环境压力	吨	-
			工业废水排放量		万吨	-
			工业颗粒物(PM2.5、PM10等)排放量		吨	-

采用超效率EBM-DEA模型测算生态效率,该模型克服传统DEA模型无法处理投入产出松弛性、难以区分有效决策单元的缺陷,可同时纳入非期望产出^[19]。线性规划方程组如下:

$$\rho^* = \min \frac{\theta - \varepsilon_x \sum_{i=1}^m \frac{w_i^- s_i^-}{x_{ik}}}{\varphi + \varepsilon_y \sum_{r=1}^s \frac{w_r^+ s_r^+}{y_{rk}} + \varepsilon \sum_{p=1}^q \frac{w_p^{b-} s_p^{b-}}{b_{pk}}},$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq j_0}^k x_{ij} \lambda_j + s_i^- = \theta x_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ \sum_{j=1, j \neq j_0}^k y_{ij} \lambda_j - s_r^+ = \varphi y_{rk}, \quad r = 1, 2, \dots, n \\ \sum_{j=1, j \neq j_0}^k b_{pj} \lambda_j + s_p^{b-} = \phi b_{pk}, \quad p = 1, 2, \dots, q \\ \lambda_j \geq 0, \quad s_i^- \geq 0, \quad s_r^+ \geq 0, \quad s_p^{b-} \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

基于投入-产出逻辑构建城市生态效率评价指标体系(表1)：投入维度涵盖经济、社会、生态三类要素,包括资本、科技、能源、水资源、劳动力、土地及生态治理投入；产出维度分为期望产出(经济增长、生态改善)与非期望产出(工业污染排放)。

此外,参考相关文献^[20]并咨询专家建议,基于“抵抗力-适应力-恢复力(3S)”框架构建城市生态韧性评价指标体系,并采用熵值法确定指标权重系数(表2)。

表2 城市生态韧性3S评价指标体系

系统	维度		具体指标	表征	单位	属性	
生态 初性	抵抗力	经济 社会	人均 GDP	经济基础	元	+	
			第三产业增加值占 GDP 的 比重	产业结构	%	+	
			GDP 增长率	经济增长率	%	+	
			人口自然增长率	人口抵抗力	%	-	
		生态 资源	城市绿地面积	资源禀赋	公顷	+	
			万元 GDP 工业废水排放量	环境承载力	吨/万元	-	
		适应力	社会 资源	科研与技术服务人员数	技术调适	万人	+
				每万人卫生机构床位数	公共服务承载力	张	+
	公共管理和社会组织从业 人员占比			社会参与能力	%	+	
	污染 治理		一般工业固体废物综合利 用率	环境治理能力	%	+	
			生活垃圾无害化处理率		%	+	
			污水处理率		%	+	
	恢复力		经济 社会	人均可支配收入	经济潜力	元	+
				综合城镇化率	社会转型	%	+
			环境 工程	人均公园绿地面积	社会干预及环境 修复能力	平方米/人	+
		水域及水利设施用地面积		%		+	
		年降水量		mm		+	
		信息传输、软件和信息技 术服务业固定资产投资		万元		+	

2.2杜宾模型

采用空间杜宾模型(SDM)分析生态效率的空间溢出效应,模型通过引入空间滞后项,同时捕捉生态效率的空间依赖性与异质性,揭示本地生态效率变化对邻近城市的辐射影响及驱动因素的空间作用机制^[21]。

$$Y = \rho WY + X\beta + \epsilon \quad (2)$$

公式(2)中：Y为生态效率值；ρ为空间自回归系数,反映空间溢出强度；W为基于地理距离构建并标准化的空间权重矩阵；X为经济、社会、生态等解释变量；β为变量系数；ε为随机误差项。

基于经纬度坐标建立空间矩阵^[22],以乌鲁木齐为中心结合城市间空间坐标公式计算距离构建空间权重矩阵,为避免空间自回归矩阵奇异性,对空间矩阵进行标准化处理,准确描述分析单元之间的空间关系,为后续估计提供基础。采用Moran’s I 指数检验生态效率的空间自相关性,验证空间溢出效应的存在性。

2.3弹性响应模型

弹性响应模型源于统计分析方法,通过方差分析确定变量间最佳拟合比例,揭示其相互作用强度^[22]。本研究中,该模型用于量化生态韧性对生态效率的动态响应关系。通过计算弹性系数(E),衡量生态效率(因变量)相对于生态韧性指标(自变量)的相对变化率,通过两个变量的弹性关系产生方差比值表征两者之间响应关系：

$$E = \frac{Y_i - Y_{i-1}}{Y_{i-1}} / \frac{X_i - X_{i-1}}{X_{i-1}} \quad (3)$$

公式(3)中,Y为生态效率,X为生态韧性水平,i为时间序列索引。弹性系数E>0表示二者呈正向响应,E值越大响应强度越高。采用最小二乘法估计整体响应关系,并通过交叉验证检验模型稳健性。

3 结果分析

3.1新疆14地州(市)生态效率时序演变特征

3.1.1整体水平分析

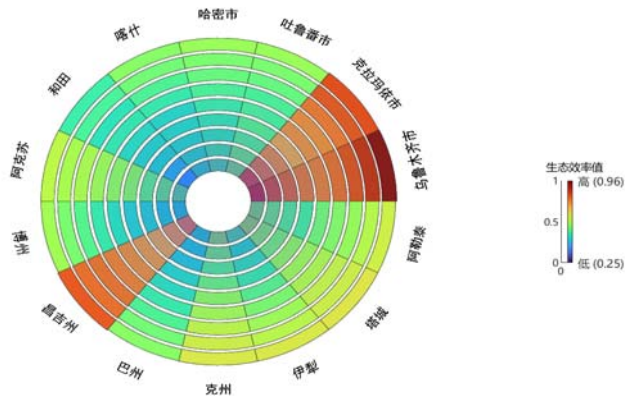


图1 新疆14地州(市)生态效率年际演进特征(外围向圆心依次为2013-2022年)

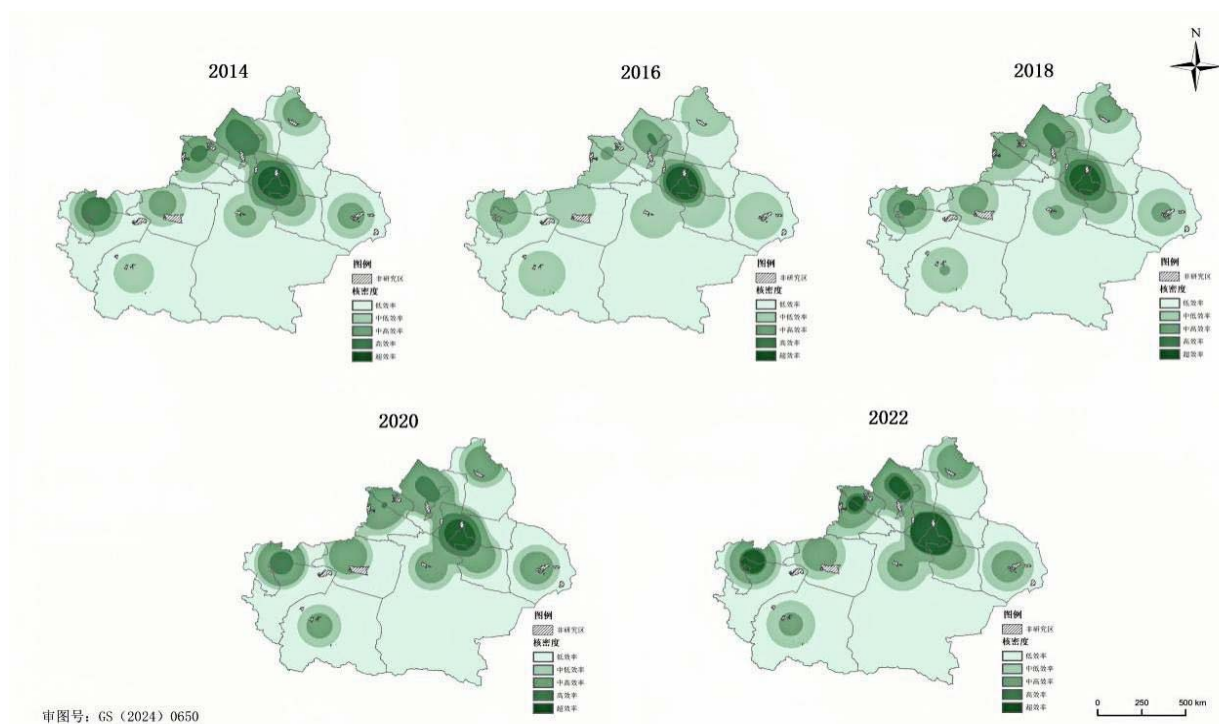


图3 新疆14地州(市)生态效率空间差异格局(2014-2022)

(注: 基于自然间断法,生态效率分五阶段: 0.24-0.32 为低效率区; 0.32-0.41 为中低效率区; 0.41-0.57 为中高效率区; 0.57-0.68 为高效率区; 0.68-0.81 为超效率区。)

根据公式(1)测算, 研究区生态效率整体偏低, 呈“上升-下降-上升”波动趋势, 年均增长率2.7%(图1)。各地州(市)间发展态势呈非均衡性。乌鲁木齐市、昌吉州生态效率水平较高且增长态势显著, 和田、喀什等地区生态效率较低且增长迟缓。各城市在资源禀赋、产业结构、政策执行力度以及技术创新能力等方面基础条件不同, 生态治理前期投入及其边际效应在区域中心城市(首府)更易形成资金、技术、政策集聚优势。

3.1.2 时空分异格局

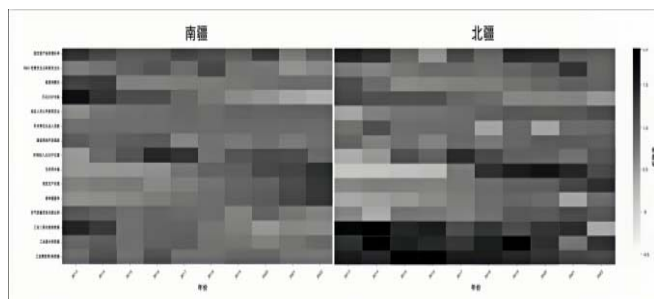


图2 全要素“投入-产出”松弛热图(2014-2022)

南北疆生态效率呈现显著效率分异(如图2), 北疆以乌鲁木齐为核心, 能源消费总量与R&D经费松弛度低, 单位GDP能耗较南疆低32%, 非期望产出松弛值仅为南疆的45%。南疆喀什、和田等地呈“高投入-低产出”特征, 万元GDP水耗较北疆高1.8倍, 农业用水效率仅0.58, 反映粗放农业的资源错配, 建设用地开发强度松弛值0.47暴露城镇化与生态矛盾。过渡地带如哈密地区, 光伏

装机占比18%使碳排放松弛值较传统能源城市低28%, 但清洁能源消纳潜力受限。北疆地区产业、人口、城镇集聚, 需突破技术创新边际效应, 强化绿色技术迭代; 南疆亟待破解水资源刚性约束与产业结构单一性, 推动“特色农业+”融合; 全域需依托东西能源走廊优势, 以清洁替代、集约转型驱动可持续发展, 实现干旱区生态-经济协同升级。

2013-2022年间, 全疆生态效率呈显著五级空间分异(图3), 形成以乌鲁木齐为核心的超效率区, 其R&D投入强度、高新技术产业占比领先全疆, 但受边际递减效应制约, 需突破产业瓶颈; 昌吉、克拉玛依为代表的高效率区, 以清洁能源替代与循环经济驱动次级增长, 但产业同构化较高, 抑制协同效能; 中高效率区集中于伊犁州与阿克苏地区, 生态农业转型成效显著, 但水资源利用效率低于北疆均值; 中低效率区分布于喀什、和田等地区, 受刚性生态约束与产业结构单一性双重制约, 且政策驱动影响较大; 低效率区呈现高度破碎化, 主因塔里木盆地边缘油气产业依赖与生态修复成效滞后。空间交互分析揭示, 超效率区技术扩散存在距离衰减效应, 即超效率区的辐射能力随地理距离增加而逐步减弱, 其对较远区域的空间溢出和带动作用显著低于邻近地区。

3.2 新疆14地州(市)生态效率空间溢出

Moran's I检验显示(表3): 经济效率具有较强空间自相关性, 社会与生态效率溢出效应次之。空间杜宾模型拟合优度 $R^2=0.71$, 对数似然值、AIC、BIC等指标均表明模型整体解释力较强。

表3 城市间生态效率Moran's I检测结果

指标	经济效率	生态效率	社会效率
Moran's I 检验	1.315	0.151	0.604

通过模型估计结果表明(表4)生态效率的空间溢出效应,即本地生态效率提升可通过空间交互作用对邻近城市产生辐射影响。

3.2.1投入层分析

不显著变量:固定资产投资增长率、R&D经费支出占比、能源消费总量及年末从业人员数均未通过显著性检验,表明短期投资扩张、科研投入、能源消耗与劳动力规模对本地及邻近区域的生态效率无显著影响。

较为显著变量:万元GDP水耗与建设用地开发强度的系数分别为-0.05和-0.06,虽未达严格显著性水平,但显示水资源集约利用和土地开发管控对抑制生态效率下降具有潜在作用。

非常显著变量:环保投入占GDP比重与生态用水量显著正向影响生态效率,表明加大环保财政投入与优化水资源配置可有效提升本地生态效率,但其空间溢出效应较弱,反映跨区域环保政策协同不足。

3.2.2期望产出层分析

不显著变量:水质达标率的系数分别为0.04和0.07,表明水质达标与空气质量改善对生态效率的直接影响较大。

非常显著变量:GDP增长率的直接效应高达0.27,是驱动本地生态效率提升的核心因素,但其空间溢出效应微弱,区域间绿色技术扩散与经济联动机制尚未形成。

3.2.3非期望产出层分析

不显著变量:工业废水排放量的系数为-0.03,未通过显著性检验,废水处理技术普及一定程度上削弱了负面影响。

非常显著变量:工业二氧化硫排放量直接效应为-0.34,表明本地减排政策显著抑制生态效率损失;但其间接效应为-0.05,提示污染治理可能产生“污染避难所”效应,需警惕跨区域环境风险。工业颗粒物排放量的治理成效显著,总效应为负,其作用路径涉及技术提升、产业转型、环境治理、清洁能源普及化等。

综上,经济活动的生态效应呈现非对称性,GDP的直接效应显著高于间接效应,占比87%,反映区域经济增长高度依赖本地资源开发与产业升级,本地驱动作用远大于区域溢出;污染治理存在地理邻近性约束,工业二氧化硫排放的负向溢出效应集中体现在乌鲁木齐-昌吉-吐鲁番城市带,对北疆伊犁、阿勒泰等生态保护区所在地影响微弱;生态政策关注本地治理,缺乏跨区域协调机制;隐性社会因素如人均储蓄和空气质量虽未达到显著水平,但其正向系数提示存在潜在影响路径:通过绿色消费或生态修复能力间接促进效率优化。整体来看,跨区域绿色技术共享与生态协同治理机制仍亟待完善。

3.3新疆14地州(市)生态韧性水平分析

表4 新疆14地州(市)生态效率空间溢出评价

投入-产出维度	变量	系数 β	标准误差	ρ 值	直接效应	间接效应	总效应
投入层	FAIGR	0.02	0.03	0.548	0.01	0.01	0.02
	RDEFER	0.04	0.06	0.423	0.03	0.01	0.02
	TEC	-0.01	0.02	0.732	-0.010	0	-0.01
	WCTWGDP	-0.05	0.04	0.211	-0.04	-0.01	-0.05
	PCPEE	0.08	0.07	0.128	0.06	0.02	0.08
	YENEU	0.03	0.04	0.369	0.02	0.01	0.03
	CLDI	-0.06	0.05	0.104	-0.05	-0.01	-0.06
	EPIGR	0.18	0.05	0.015	0.15	0.02	0.17
期望产出层	EWU	0.09	0.08	0.089	0.07	0.02	0.09
	GDP	0.31	0.08	0.002	0.27	0.04	0.31
	WQCR	0.04	0.05	0.711	0.05	0.10	0.21
非期望产出层	PGAQD	0.07	0.06	0.182	0.05	0.02	0.07
	ISE	-0.39	0.09	0.001	-0.34	-0.05	-0.39
	IWD	-0.03	0.04	0.452	-0.02	-0.01	-0.03
	IPME	0.22	0.06	0.01	-0.03	-0.01	-0.04

3.3.1生态韧性时序变化

研究区生态韧性的整体水平呈增长趋势(图4),2013—2022年核密度曲线整体右移且宽度保持稳定,峰值波动明显,表明生态韧性水平稳步提升但城市间差距未显著缩小。长期来看,核密度曲线波峰集中于左半部分,生态韧性核密度值普遍偏低,介于0.1-0.3之间,存在右拖尾特征,拖尾部分核密度值较高,存在一定的高水平收敛现象,形状随时间变化基本稳定,呈现“少数高水平城市领先、多数城市相对落后”的不均衡格局,且这一态势具有较强的稳定性。

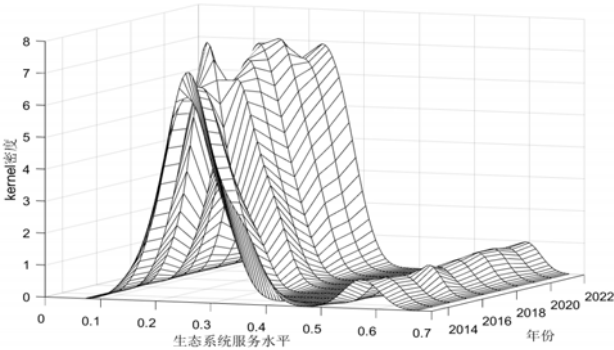


图4 新疆各地州生态韧性核密度(2013-2022)

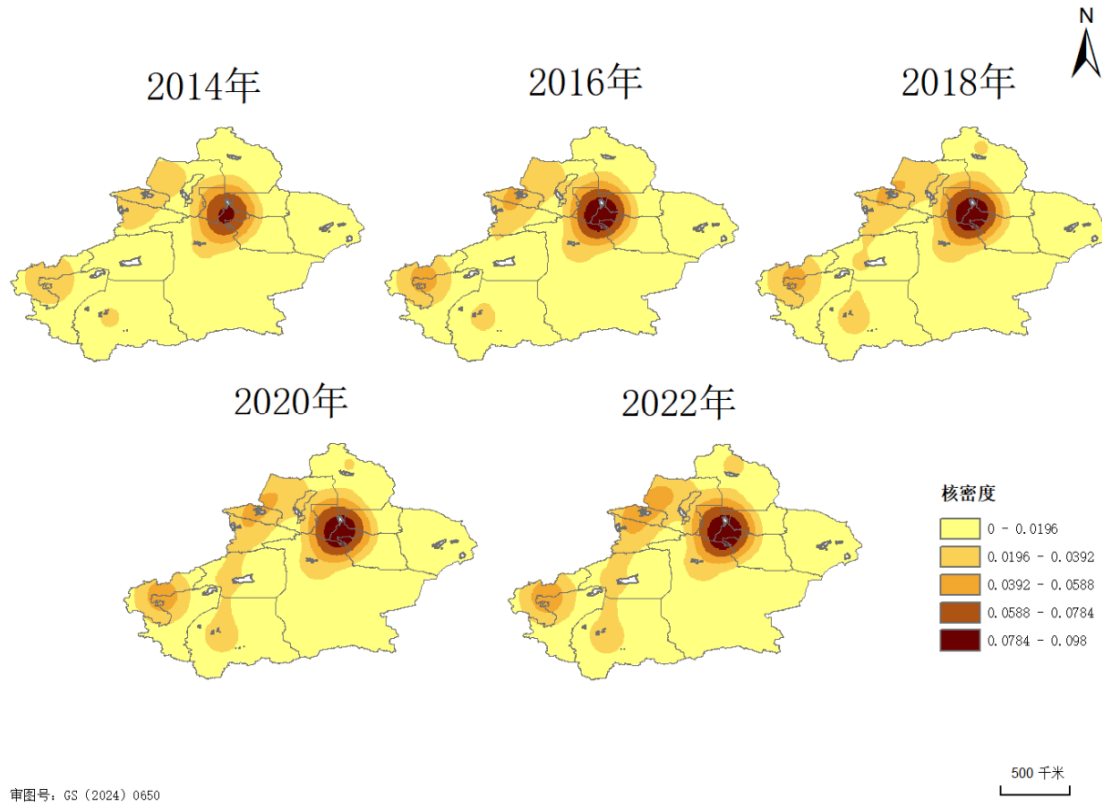


图 5 新疆 14 地州(市)生态韧性核密度分布(2013-2022)

3.3.2生态韧性空间差异

生态韧性空间呈现“北高南低、核心引领”的总体格局(图 5)。研究区生态韧性受自然环境影响较大,高值区主要分布于天山北坡经济带与伊犁河谷等传统绿洲区域,低值区则集中在塔克拉玛干沙漠,2018年后高密度核心区出现向塔里木盆地延伸的趋势,南北疆联系呈逐渐增强趋势。哈密市受区域生态系统脆弱性与传统重工业密集布局的双重制约,加之地理区位远离乌鲁木齐,难以形成有效联动,生态韧性集聚水平较低。南北疆分异显著,北疆核密度显著高于南疆,逐渐进入以城市群为主导的多城市协同发展阶段;南疆地区分布相对零散且发展水平普遍较低。

表5 模型拟合与检验结果

检验指标	统计量	显著性(p 值)
调整后 R ²	0.73	-
模型 F 值	28.5	<0.001
残差正态性检验	0.20	>0.05
异方差检验	0.18	>0.05
训练集 RMSE	0.07	-
测试集 RMSE	0.09	-

3.4新疆14地州(市)生态韧性对生态效率的弹性响应

3.4.1模型拟合与整体响应特征

基于动态面板数据的回归结果显示(表5),生态韧性对生态效率存在显著正向驱动效应,弹性系数为0.82($p<0.01$),即生态效率每提升1%,生态韧性同步增长0.82%(调整后 $R^2=0.73$)。模型 F 值为28.5($p<0.001$),表明整体解释力较强;残差通过正态性($p>0.05$)与异方差检验($p>0.05$),RMSE值(训练集0.07、测试集0.09)显示预测精度较高。

3.4.2区域异质性特征分析

根据模型计算结果,采取自然断裂法划分14地州(市)划分为三类响应区(表6)。

低响应区($E<0.6$),即生态效率对生态韧性变化的敏感度较弱。克拉玛依市工业废水排放量长期居高不下,污染治理滞后抑制了生态效率对韧性的响应能力。和田地区则过度依赖单一驱动力(城市绿地面积),缺乏经济转型与环境政策的协同,成为全疆响应能力最低的区域。

中响应区($0.6\leq E<0.8$)即生态效率与韧性变化呈现动态平衡,涉及大多地州(市)。乌鲁木齐以第三产业转型与科研投入为核心驱动,喀什依靠城镇化推进与城市绿地建设,二者弹性系数持续增长,反映经济-生态协同政策具有有效性。伊犁州与阿克苏地区则分别依赖污水处理率提升与收入增长,但阿克苏地区因社会治理不均衡导致系数偏低,需提升政策精准性。吐鲁番市受GDP增长与绿地面积冲突导致系数波动;哈密市则依托第三产

业占比缓步上升，凸显产业结构优化的潜力。巴州与克州为城镇化率与经济-科研双驱动支撑较高弹性响应水平。

高响应区 ($E \geq 0.8$) 即生态效率对韧性变化的敏感度最强且稳定性突出。阿勒泰、塔城依托丰沛的年降水量与全覆盖的污水处理设施，自然生态系统稳定性强。博州与昌吉州以人口自然增长率为核心驱动力，适度的人口调控与资源分配维持高弹性，四地州弹性响应系数稳定，验证了自然禀赋与人口政策的可持续性。

表6 新疆14地州生态效率弹性响应系数阈值表(2013–2022)

地州	弹性系数阈值	关键驱动力指标
乌鲁木齐市	0.71 ± 0.18	第三产业增加值占比 科研人员增长率
克拉玛依市	0.53 ± 0.11	工业废水排放
喀什地区	0.77 ± 0.14	城镇化率 城市绿地面积
伊犁直属县市	0.65 ± 0.19	污水处理率
阿克苏地区	0.59 ± 0.21	人均可支配收入 公共管理和社会组织从业人员占比
和田地区	0.43 ± 0.17	城市绿地面积
吐鲁番市	0.71 ± 0.23	城市绿地面积 GDP 增长率
阿勒泰地区	0.85 ± 0.16	年降水量
塔城地区	0.85 ± 0.16	污水处理率
博尔塔拉蒙古自治州	0.85 ± 0.16	人口自然增长率
昌吉回族自治州	0.85 ± 0.16	人口自然增长率
巴音郭楞蒙古自治州	0.74 ± 0.22	城镇化率
克孜勒苏柯尔克孜自治州	0.74 ± 0.22	人均可支配收入 科研人员数
哈密市	0.66 ± 0.19	第三产业占比

4 结论与讨论

4.1 主要结论

通过新疆14地州(市)2013—2022年生态效率与生态韧性的动态分析，得出以下结论：(1)生态效率呈现“波动上升—调整—加速增长”三阶段演化特征，空间格局由北疆单核高值区向南疆扩散，形成“北高南低”梯度分布。(2)生态效率存在显著空间依赖性，其中经济效率空间溢出效应最强，社会与生态效率溢出效应次之。(3)生态韧性水平呈“波动上升—平稳调整—加速增长”

趋势，北疆形成“乌鲁木齐—昌吉—克拉玛依”韧性集聚带，南疆呈现低值破碎化特征。(4)生态效率对生态韧性的整体弹性系数为0.82 ($p < 0.01$)，即生态韧性高度响应生态效率，北疆城市群呈正向响应，南疆受生态脆弱性制约呈负向响应。

4.2 讨论

本研究结合空间溢出效应与动态弹性分析，构建了“空间—时间”解析框架，在研究方法上具有一定创新价值。本研究揭示了干旱区城市“效率—韧性”响应的非线性特征，验证了生态韧性理论在绿洲生态系统的适用性。对14个绿洲城市生态效率与生态韧性的实时客观评价与空间溢出效应分析为打造体现新疆特色和优势的现代化绿色化“八大产业集群”体系提供实证依据和更精准举措支持。例如：乌鲁木齐都市圈的技术扩散正外部性，印证了“创新驱动绿色发展”^[23]路径的有效性；南疆的负向响应结构亦符合“生态阈值理论”^[24]，主要受限于水土资源约束与产业结构单一性的发展瓶颈。基于此，北疆需强化天山北坡城市群科技产业共建共享，扩大正向溢出效应；南疆需立足生态承载力，探索资源约束下的绿色转型路径，实现区域生态与经济协同发展。

[基金项目]

国家自然科学基金：能源富集—生态脆弱区“水—能—碳”耦合规律与协同管理研究——基于区域与产业视角(72164035)；国家级大学生创新训练项目：双碳背景下干旱区绿洲城市生态系统评估——以乌鲁木齐市为例(202410758006)。

[参考文献]

[1]李雪铭,刘凯强,田深圳,等.基于DPSIR模型的城市人居环境韧性评价——以长三角城市群为例[J].人文地理,2022,37(1): 54–62.

[2]陈明华,岳海璐,郝云飞,等.黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J].数量经济技术经济研究,2021,38(9): 25–44.

[3]陶洁怡,董平,陆玉麒.长三角地区生态韧性时空变化及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2022(09):105–117.

[4]孟宪红.立足西北脆弱生态环境坚持绿色复苏气候治理[J].中国科学基金,2024,38(03):553–554.

[5]评论员.以改革之力守护生态之美[N].新疆日报(汉),2024–08–29(001).

[6]Meerow C, Newell P J, Edwards P J. Resilience thinking in urban planning and management: an overview of key concepts and applications[J].Landscape and Urban Plannin g,2016,142:36–45.

[7]World Business Council for Sustainable Development. Measuring eco-efficiency: A guide to reporting company performance[R].Geneva:WBCSD,2000.

[8]Bianchi M ,Valle D I ,Tapia C .Measuring eco-efficiency in European regions: Evidence from a territorial perspective[J].Journal of Cleaner Production,2020,276.

[9]Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4:1-23.

[10]Walker B, Holling C S, Carpenter S R, et al. Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems[J]. Ecology and Society,2004,9(2):5.

[11]Gomez-Baggethun E, De Groot R. Urban green spaces as drivers of ecological resilience[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2013,12(3):209-220.

[12]Cutter SL, Kevin DA, Christopher TE. The geographies of community disaster resilience[J].Global Environmental Change,2014,24(11):65-77.

[13]诸大建,朱远.生态效率与循环经济[J].复旦学报(社会科学版),2006(2):60-66.

[14]王少君,张文忠,陈明星.黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J].地理科学进展,2024,43(3):568-580.

[15]闫涛,张晓平,赵艳艳.基于超效率SBM模型的中国城市生态效率时空演变及影响因素[J].中国科学院大学学报,2021,38(04):486-493.

[16]吕永龙,王一超,苑晶晶,等.生态系统韧性研究:进展与展望[J].生态学报,2018,38(22):7851-7859.

[17]牛建广,辛伯雄,王明琪.城市生态效率与生态韧性的协

调发展评价与障碍因子识别[J].统计与决策,2024,40(04):79-84.

[18]周霞,王佳.中国省域经济韧性与生态效率测度及其协同演化分析[J].干旱区地理,2024,47(02):319-331.

[19]夏楚瑜,董照樱子,陈彬.城市生态韧性时空变化及情景模拟研究——以杭州市为例[J].生态学报,2022,42(01):116-126.

[20]李亚赓,杨亮洁,李雪婷.基于“抵抗力-适应力-恢复力”模型的河西走廊城市生态韧性评价[J/OL].生态学杂志,1-16[2025-04-17].

[21]孙霞,张建军.社会—生态韧性研究综述及其在城市治理中的应用[J].城市发展研究,2024,31(2):89-97.

[22]崔胜辉,李方一,黄静,等.生态系统韧性研究进展:概念、特征与分析方法[J].生态学报,2015,35(20):6623-6633.

[23]龚金玉,马致远,胡琛,等.综合生态系统管理的生态阈值理论研究进展[J].生态学报,2024,44(22):10499-10511.

[24]杨阳,曾刚,葛世帅,等.国内外绿色创新研究进展与展望[J].经济地理,2022,42(03):10-21.

作者简介:

王同浩(2004--),男,山东东阿人,新疆农业大学公共管理学院(法学院)本科生。

*通讯作者:

吴文婕(1994--),女,新疆乌鲁木齐人,新疆农业大学公共管理学院(法学院)副教授,博士,硕士生导师,从事城乡管理与区域协调发展领域研究。