

成都都市圈土地利用结构与效率交互影响研究¹

程珍妮^{1,2}, 蒋贵国^{1,2}, 王涛^{1,2}, 董威威^{1,2}, 钟孟君^{1,2}

(1.四川师范大学地理与资源科学学院, 四川成都 610066; 2.四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 四川成都 610066)

【摘要】: 基于信息熵法、非期望产出模型及 Malmquist 指数等方法将成都都市圈 35 个县(市、区)2005、2010、2015、2019 年的土地利用结构与土地利用效率数值化, 最后利用空间面板计量模型揭示成都都市圈土地利用结构与效率之间的交互影响关系, 且根据两者关系来提高城市土地利用效率, 使成都都市圈土地利用更加科学。结果发现: ①成都都市圈土地利用结构信息熵总体呈现先上升后下降的趋势, 土地利用超效率则呈现先下降后上升的波动趋势; ②成都都市圈土地利用结构与效率存在显著的交互影响, 且土地利用结构对土地利用效率的影响更强; ③成都都市圈内各区域由于不同的发展方式与发展阶段, 其土地利用结构与效率及交互影响均存在差异。

【关键词】: 土地利用结构; 土地利用效率; 空间面板杜宾模型; 成都都市圈

【中图分类号】: F293.22 **【文献标志码】**: A **【文章编号】**: 1005-8141(2023)11-1439-10

0 引言

国土空间规划是我国国土空间资源开发与保护的整体谋划和顶层设计, 是优化空间格局、统筹资源配置的总体方案, 对实现区域协调发展和城乡融合发展具有重要意义[1]。位于国家构建“两横三纵”空间开发格局的主轴线上的成渝地区双城经济圈, 是促进东中西部协同互动发展的重要力量和辐射带动西部地区发展的重要地区, 是我国面向中亚、西亚、东南亚等国家和地区的开放前沿。作为全国经济高质量发展的新晋“增长极”, 成渝地区双城经济圈发展水平虽与粤港澳大湾区、长三角城市群、京津冀城市群有较大差距, 但其城市产业发展各具优势和梯度发展态势, 为各产业有序转移和承接、推动一体化发展、提升整体竞争力提供了方向指引[2]。中共中央、国务院印发的《成渝地区双城经济圈建设规划纲要》提出应把握要素流动和产业分工规律, 围绕重庆主城和成都培育现代化都市圈, 带动中心城市周边市地和区县加快发展。2023 年, 四川省发布的《成德眉资同城化发展暨成都都市圈建设成长期三年行动计划(2023—2025 年)》确定了同城化发展成长期的总体思路: 以成渝地区双城经济圈建设为总牵引, 认真落实《成都都市圈发展规划》持续深化成德眉资同城化发展, 全面推进国土空间布局优化、基础设施互联互通、创新协同产业协作、对外开放协同共进、公共服务便利共享、生态环境共保共治。全面优化成都都市圈土地利用结构、提升土地利用效率, 对其作为推动成渝地区双城经济圈建设的先手棋、服务成渝地区双城经济圈建设的支撑性工程具有重要作用。

随着对于土地需求的不断提高, 国内外学者在土地利用方面做了大量研究。在土地利用结构方面, Kgpk Weerakoon 运用基于 GIS 的景观格局研究城市土地利用结构变化, 并对科伦坡区土地利用结构变化模式进行识别[3]; 李小康研究了土地利用结构变化对碳排放变化的影响及机理, 得出建设用地变化是影响净碳排放量变化的主要原因[4]。同时, 学者们也关注土地效益的提高。在土地利用效率方面, Gianni 等对不同规模城市的土地利用效率进行空间计量分析, 强调了规划政策对土地利用效率的作

¹ 收稿日期: 2023-05-17; 修订日期: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 41371125); 四川省教育厅课题项目(编号: 16ZB0061)。

第一作者简介: 程珍妮(1998-), 女, 四川省巴中人, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与评价。

通讯作者简介: 蒋贵国(1971-), 男, 江苏省靖江人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为土地利用与评价。

用[5];朱从谋对长三角城市群建设用地时空关联性及利用效益进行研究,提出分区制定差异化调控策略以促进土地利用效率提升[6];匡兵探讨了土地利用结构变化与土地利用绩效的关联度,认为城镇村及工矿用地与土地利用效率关联性较为显著[7]。同时,近年来,随着国土空间规划的逐步开展,学者们也逐渐将视角移向都市圈中的空间作用效应,原女原等基于空间溢出效应视角研究发现高技术产业集聚能推动城市群协同创新[8]。

综上所述,学者们关于土地利用结构的合理性与时空演变特征进行了大量的研究,并将研究落实到土地利用结构的优化方面,从而对土地资源进行合理配置,以此寻求土地利用效率最大的土地利用方式。国内外学者多从某一类用地或是社会经济对土地利用效率的影响以及从经济学、生态环境等交叉学科视野展开研究,而对土地利用结构与效率二者的直接关系研究,尤其是土地利用效率对土地利用结构的影响研究上还需进一步增强。本研究选择我国西部重要经济中心成都都市圈,以其35个县(市、区)为研究单位,基于信息熵法、非期望产出模型及Malmquist指数等方法对其土地利用结构与土地利用效率及变化特征进行研究,在此基础上对二者的交互影响程度进行分析,并以空间计量模型为基础研究其空间效应,分析土地利用结构与效率之间的交互影响关系,实现两者的相互促进。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

成都都市圈位于 $29^{\circ}24' - 31^{\circ}41' E, 102^{\circ}51' - 105^{\circ}45' N$ 之间,地处成都平原经济区内圈,是以成都市为中心,由与成都市联系紧密的德阳市、眉山市、资阳市共同组成的都市圈,是成渝地区双城经济圈的重要组成部分(图1)。成都都市圈的GDP总量较大,且在研究的4个时间段内呈现快速上升趋势,2005—2019年间由3194.39亿元提高到了21506.5亿元(图2)。其中成都市、德阳市、眉山市、资阳市四市的生产总值差异明显,成都市占据了绝大部分比重,成都市的地区国民生产总值由2005年的2294.51亿元上升到了2019年的17012.5亿元,其占总体比重在2005—2019年间由71%提高到了79%,地区间的社会经济差异充分体现了成都市在成都都市圈中的中心地位。

成都都市圈拥有十分丰富的旅游资源,地形、气候、水文、土壤、资源等良好的自然条件,为成都都市圈的发展奠定了良好的基础。同时成都都市圈地处我国内陆腹地,位于亚欧航路中点,是中亚、南亚、东南亚等地区的重要交汇点,有着广阔的市场腹地。因而成都都市圈的土地利用结构的改善与其土地利用效率的提高对于成渝地区双城经济圈、四川省以及全国土地资源管理有着重要意义。

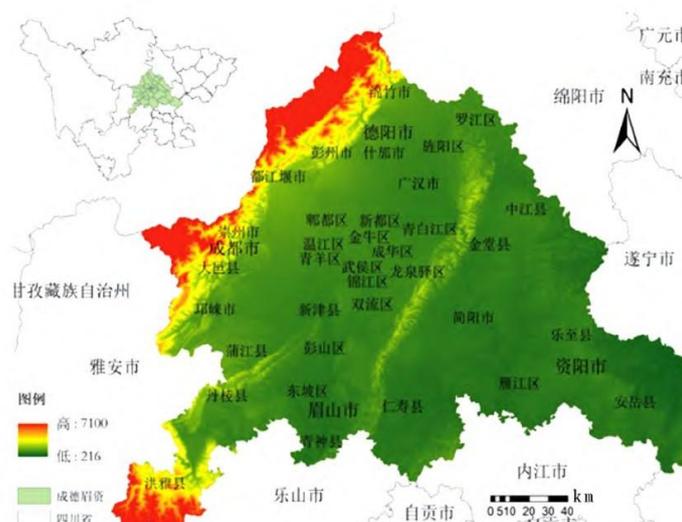


图1 成都都市圈概况

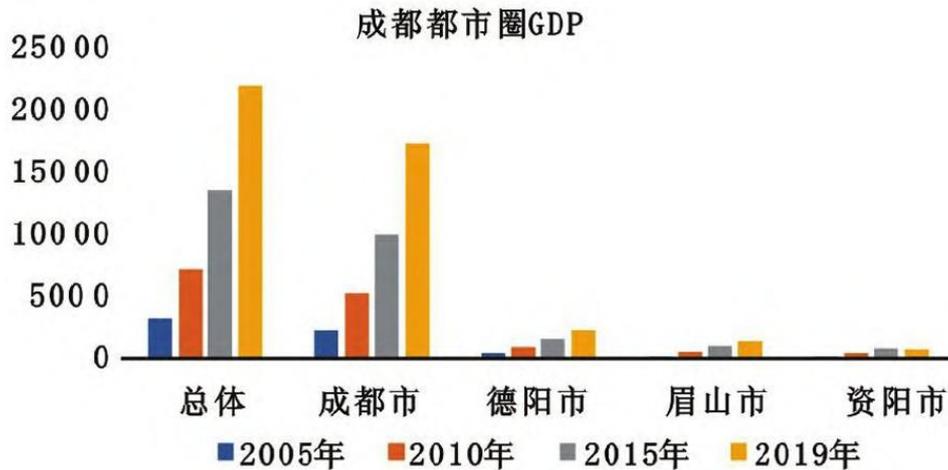


图2 成都都市圈地区生产总值

1.2 数据来源

本研究所用的土地利用类型数据即耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地以及未利用地六类一级用地与 DEM 栅格数据均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。土地利用效率分析所用的各类社会经济指标数据主要来源于 2006 年、2011 年、2016 年及 2020 年的《四川统计年鉴》《成都统计年鉴》《德阳统计年鉴》《眉山统计年鉴》《资阳统计年鉴》以及各地区的《国民经济和社会发展公报》《政府工作报告》。相关矢量数据来源于国家基础地理信息系统网站。

2 研究方法

2.1 土地利用结构研究

信息熵。在地理研究中，熵是一定区域内土地利用结构有序度的集中体现，信息熵反映土地利用结构的有序度，熵值越大，表明各类用地面积的差距越小，有序度越低，反之则越高。根据信息熵的定义[9,10]，其表达式为：

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \dots\dots\dots (1)$$

式中：n 为区域内的土地利用类型种类数量，其中 i=1,2, …, n; P_i 为区域内各类型土地利用面积与总面积之比。

泰尔指数。该指数以熵概念为基础，不仅能计算区域整体的差异，还能进一步分析整体差异中区域内和区域间的差异情况，并且可以比较不同区域对整体差异的贡献程度。计算公式为：

$$T = T_b + T_w = \sum_{k=1}^k y_k \ln \left(\frac{y_k}{n_k/n} \right) + \sum_{k=1}^k y_k \left(\sum_{i \in g_k} \frac{y_i}{y_k} \ln \frac{y_i/y_k}{1/n_k} \right) \dots\dots\dots (2)$$

式中: T_b 与 T_w 分别为区域间差距和区域内差距; n 为研究区个体数量, 其指标被分为 k 个区域则各区域分别为 $g_k(k=1,2, \dots, k)$, 第 k 区域 g_k 中的个体数目为 n_k , 则 n_k 总和为 n ; y_i 表示个体 i 指标总熵值的比例; y_k 表示第 k 区域指标占总熵值的比例。其中, $T_k = \sum_{i \in g_k} \frac{y_i}{y_k} \ln \frac{y_i/y_k}{1/n_k}, i \in g_k, T_k$ 为第 k 组的组内差距 ($k=1,2, \dots, k$)。

2.2 土地利用效率指标体系构建

本研究在对国内外相关研究进行系统梳理后, 借鉴相关成果[11,12,13,14,15], 并充分考虑成都都市圈的社会经济环境状况, 从投入、期望产出以及非期望产出 3 个部分构建土地利用效率测算指标体系(表 1)。投入指标由土地投入、劳动力投入以及资金投入构成。土地是社会经济发展的基础, 2020 年中华人民共和国自然资源部提出的《自然资源价格评估通则》对包括土地在内的自然资源进行价格估算, 表明各种土地利用类型属于国家重要资产, 具有重要的经济价值。因此本研究将土地要素作为评价土地利用效率的重要投入指标, 在综合考虑成都都市圈城市建设以及农业发展的基础上, 选取耕地、林地、草地以及城乡、工矿、居民用地作为土地投入指标; 资金投入在土地利用中可以直接影响社会经济效应产出, 选取固定资产投资作为成都都市圈土地利用效率测评的资金投入指标; 劳动力是将要素投入转化为各类产出的重要媒介之一, 劳动力投入则指区域土地利用过程中投入的劳动力数量, 选取成都都市圈全社会从业人口数作为劳动力投入指标。

本研究选取地区生产总值与地方财政收入作为期望产出的衡量指标。地区生产总值是经济规模的绝对量指标, 可以反映经济发展的规模和水平; 地方财政收入是当地政府行使其职能的重要保障, 也是衡量地区经济发展水平的重要指标。

对于非期望产出指标, 本研究参考以往文献中将废气、废水和固体废弃物作为非期望产出的做法[16], 同时在综合考虑数据可获得性的基础上, 选择碳排放量和年 $PM_{2.5}$ 总量作为非期望产出指标, 以表征经济发展过程中的环境负效应的影响。

表 1 土地利用效率指标体系

目标层	指标类型	指标层
土地利用效率	投入指标	耕地面积 (hm^2)
		林地面积 (hm^2)
		草地面积 (hm^2)
		建设用地面积 (hm^2) 固定资产投资(亿元) 劳动力(人)
	期望产出	地区生产总值(亿元) 地方财政收入(亿元)
	非期望产出	碳排放量(mt) 年 $PM_{2.5}$ 总量 ($\mu g/m^3$)

2.3 土地利用效率研究

非期望产出模型。非期望产出 SBM—Undesirable 超效率模型, 解决了传统模型的不足, 克服了使松弛变量问题, 并在土地利用效率测算中加入了非期望产出, 综合考虑了环境负效应的影响, 使研究更加科学合理[17]。根据模型原理, 非期望产出的 SBM—Undesirable 模型表达式如下:

$$\rho^* = \min \frac{1 - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_{-}^i / X_{i0}}{1 + \frac{1}{s_1 + s_2} \left(\sum_{r=1}^{s_1} s_g^r / y_g^{r0} + \sum_{r=1}^{s_2} s_b^r / y_b^{r0} \right)} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} x_0 = x\lambda + s_{-}; y_g^0 = Y_g\lambda + s_g; y_b^0 = Y_b\lambda + s_b \\ s_{-} \geq 0, s_g \geq 0, s_b \geq 0, \lambda \geq 0 \end{cases} \dots\dots\dots (5)$$

式中：s-、sg、sb 分别代表各类投入与产出指标的松弛变量；λ 为权重向量；ρ 为目标函数值，且当 ρ =1 时，即 s-=0、sg=0、sb=0 时决策单元有效，当 ρ <1 时，即 s-、sg、sb 三者中至少有 1 个不为零时，决策单元无效，效率有一定的提升空间 [18]。

Malmquist 指数。其原理为，当全要素生产率值大于 1 时表示其在某一时期到下一时期呈现正增长，小于 1 时则下降；其分解结果意为，变化比率大于 1 表示该变化比率对全要素生产率有促进作用，变化比率小于 1 则会导致生产率下降。该方法最早于 1953 年由 Malmquist.S 提出，是在面板数据上通过距离函数比值测算所确定的全要素生产效率 [19]。Fare 等将 t 时期的技术当作参考值，在 t+1 时期和 t 时期之间的马氏全要素生产效率变化指数可以表示为：

$$m_t(x_t, y_t, x_{t+1}, y_{t+1}) = \frac{D_t^t(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^c(x_t, y_t)}$$

$$m_{t+1}(x_t, y_t, x_{t+1}, y_{t+1}) = \frac{D_{t+1}^c(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^c(x_t, y_t)}$$

..... (6)

马氏全要素生产效率指数一般以技术变化与效率变化的几何平均解释，其表达式如下：

$$m(x_t, y_t, x_{t+1}, y_{t+1}) = \left[\frac{D_t^c(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^c(x_t, y_t)} \times \frac{D_{t+1}^c(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^c(x_t, y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{D_t^c(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_{t+1}^c(x_{t+1}, y_{t+1})} \times \frac{D_t^c(x_t, y_t)}{D_{t+1}^c(x_t, y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \times \frac{D_{t+1}^c(x_{t+1}, y_{t+1})}{D_t^c(x_t, y_t)}$$

..... (7)

2.4 交互影响研究

在空间计量模型中，考虑到被解释变量与解释变量的空间联系选择空间杜宾模型。从模型构建的角度，空间杜宾模型如下所示：

$$Y_{it} = \rho WY_{it} + X_{it}\beta + WX_{it}\theta + \varepsilon_{it} \dots\dots\dots (8)$$

式中：i 表示区域；t 表示时间； Y_{it} 表示被解释变量向量； X_{it} 表示解释变量向量；W 表示空间权重矩阵； WX_{it} 反映了邻居地区解释变量对本地被解释变量由于空间传导机制所产生的影响[20]； β 、 θ 表示待估参数； ε_{it} 表示随机误差项向量； ρ 表示空间自回归系数。

3 结果及分析

3.1 土地利用结构结果分析

为更直观地体现成都都市圈各县（市、区）的土地利用结构信息熵，本研究利用 ArcGIS 软件，将土地利用结构信息熵值数据与成都都市圈行政区划矢量图进行关联，得出 2005—2019 年成都都市圈各县（市、区）土地利用结构信息熵的变化特征，结果如图 3 所示。

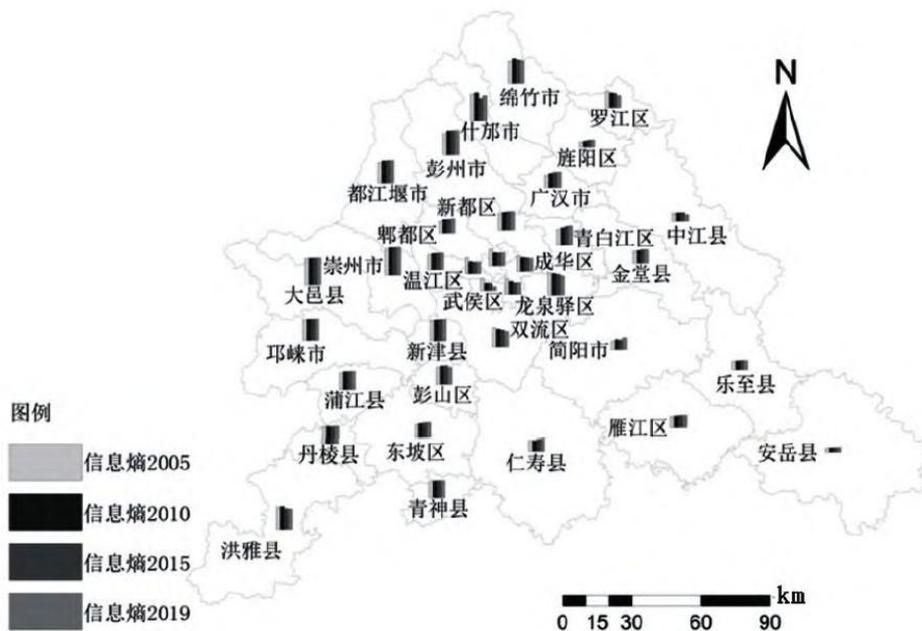


图 3 土地利用结构信息熵分布

由图 3 可知，2005—2019 年间成都都市圈土地利用结构信息熵值在空间变化特征上呈现由西部向东部递减态势。时序变化特征上具备明显的圈层结构，在成都都市主城区及其周边的龙泉驿区、双流区等县（市、区）信息熵值呈现逐年下降趋势，而周围城市土地利用结构信息熵呈现上升趋势，更外围地区土地利用结构信息熵则基本保持平稳或有小幅度上升。信息熵值呈现下降趋势，是土地利用有序程度增加的体现，说明成都都市圈以成都市为土地利用有序度较高区，由其向外有序度逐渐降低。进

一步分析成都都市圈内部土地利用信息熵的差异，成都都市圈土地利用结构信息熵泰尔指数其分解如表 2 所示。

由表 2 可知，成都市的土地利用结构信息熵在研究时段内逐步降低，而周围县（市、区）土地利用结构信息熵变动幅度较小，甚至有所下降。其他三组组内差异则呈现逐年下降的趋势，表明德阳、眉山、资阳等区域内各县（市、区）的土地利用结构信息熵差异不断缩小。上述变化充分体现了成都都市圈在发展过程中成都市的中心地位，区域间的差异贡献度在逐年下降，表明了成都都市圈 4 市间的土地利用结构信息熵差距在逐年缩小，其内部土地利用结构和谐发展。

表 2 泰尔指数及其分解结果

年份	泰尔指数								贡献度 (%)				
	总体	组内		组间	组内各区域分解				组内各区域贡献度				
		成都	德阳		眉山	资阳	组内	组间	成都	德阳	眉山	资阳	
2005	0.0606	0.0455	0.0150	0.0202	0.0171	0.0046	0.0036	75.18	24.82	33.31	28.25	7.66	5.96
2010	0.0676	0.0543	0.0133	0.0283	0.0183	0.0042	0.0035	80.30	19.70	41.85	27.06	6.23	5.17
2015	0.0654	0.0533	0.0122	0.0293	0.0165	0.0038	0.0037	81.39	18.61	44.78	25.19	5.77	5.65
2019	0.0713	0.0590	0.0123	0.0358	0.0163	0.0032	0.0036	82.72	17.28	50.26	22.92	4.55	4.99

3.2 土地利用效率结果分析

3.2.1 非期望超效率模型计算

根据表 1 进行成都都市圈土地利用超效率测算。为进一步掌握各区域土地利用效率的空间分布情况及演变规律，本研究运用 ArcGIS 软件构建成都都市圈土地利用效率数据库，通过对已有成果进行参考[21]，并结合研究区的实际土地利用效率情况，采用自然断点法，以 0.6、1、1.2 为划分标准，将 2005、2010、2015、2019 年四期的土地利用效率值划分为 4 个相对类型：低效率型、中效率型、有效型、高效率型，并对其进行可视化表达，其空间分布图如图 4 所示。

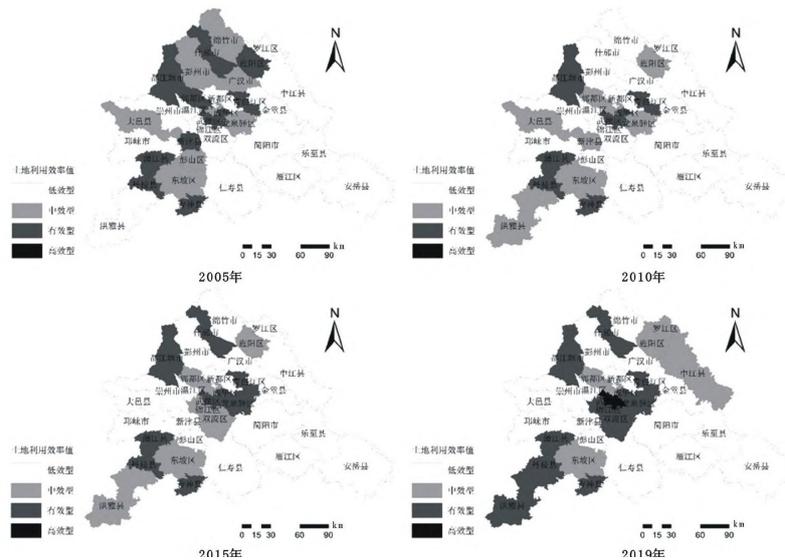


图 4 成都都市圈土地利用超效率空间分布

由图 4 可知，低效率型的县（市、区）数量较多，主要分布于研究区的东南部；中效率型分布较为零散，随年份不同，其分布

也有较大差别；有效型主要分布于成都都市圈中部以及西部地区；2019年出现的3个高效型均位于成都都市圈中心区域，即成都市主城区。从土地利用效率各类型空间分布的变化趋势来看，有效型与高效型呈现向成都都市圈中心区域收缩的态势。

3.2.2 土地利用全要素生产率测算

根据表1对研究区进行不包含非期望产出的土地利用全要素生产率测算，计算当期对上一期的生产率变化，得到成都都市圈2005—2010年、2010—2015年及2015—2019年3个时段的全要素生产率（MI）、纯技术效率变化（PEC）、规模效率变化（SEC）、技术进步指数（TC）、技术效率变化指数（EC）。成都都市圈土地利用全要素生产率指数测算结果如表3所示。

表3 Malmquist 效率指数及其分解结果

年份	全要素生产率	纯技术效率	规模效率技术进步技术效率		
2005—2010	0.972	0.934	0.959	1.084	0.897
2010—2015	1.466	0.901	1.116	1.459	1.005
2015—2019	1.294	1.069	1.010	1.197	1.081

由表3可知，成都都市圈全要素生产率在2005—2010年间呈现负成长，而纯技术效率变化、规模效率变化以及技术效率变化指数均是其负增长的根源。而2010—2015年及2015—2019年成都都市圈全要素生产率均大于1，其生产率呈现正增长，且在2015—2019年间增速有所放缓，表明成都都市圈发展方式转为高质量平稳发展，技术进步指数正是两个时段全要素生产率正增长的主要根源。在2010—2015年更是达到了1.459。技术进步指数表示在这一时期生产系统的生产技术的创新程度，成都都市圈的技术进步指数始终大于1，表明在研究时段内土地利用生产技术的创新始终是土地利用效率提升的关键。

3.3 交互影响结果分析

3.3.1 空间相关性分析

本研究采用基于空间邻接矩阵的全局Moran's I对土地利用结构信息熵与土地利用效率的空间相关性进行检验，结果如表4所示。土地利用结构信息熵的Moran's I在样本考察期内均显著为正，且均通过了1%的显著性水平检验，同时其土地利用结构信息熵空间相关性在逐渐增强；成都都市圈的土地利用效率全局Moran's I指数均为正，说明成都都市圈土地利用效率存在空间相关性。以上表明空间计量模型适用于本研究的分析。

表4 Moran's I 检验结果

年份	信息熵Moran's I值	P值	利用效率Moran's I值	P值
2005	0.321***	0.001	0.202**	0.011
2010	0.356**	0.000	0.247**	0.003
2015	0.398**	0.000	0.244***	0.003
2019	0.422**	0.000	0.326**	0.000

注：***、**、*分别表示在1%、5%和10%的水平下显著，表6—11同。

3.3.2 模型识别与检验

对于空间计量模型的辨别，根据相关文献[22]处理。由表5可知，本研究选择时间、空间双固定效应的空间杜宾模型。

表 5 最优模型选择检验结果

检验统计量	P值	检验统计量	P值
LM空间滞后检验	<0.001	LR空间滞后检验	0.0075
Robust LM空间滞后检验	0.026	LR空间误差检验	0.0027
LM空间误差检验	<0.001	LR检验(空间固定效应)	0.0274
Robust LM空间误差检验	0.02	LR检验(时间固定效应)	<0.001
Hausman检验	<0.001		

3.4 模型结果分析

3.4.1 面板模型计量初步分析

利用 Stata16.0 软件，代入时空邻接权重矩阵，对成都都市圈以及都市圈各区域 2005、2010、2015、2019 年四期土地利用结构信息熵 (x) 与土地利用效率 (y) 进行双固定效应的空间杜宾模型分析，结果如表 6 所示。

表 6 成都都市圈土地利用结构信息熵与土地利用效率交互影响

影响方向	变量	(1) Main	(2) Wx	(3) Spatis	(4) Variance
	x	-1.742*** (-7.20)	0.936* (2.02)		
x对y	rho			0.370*** (3.25)	
	sigma ² _e				0.014** (8.23)
	Y	-0.163** (-7.19)	0.009 (0.18)		
y对x	rho			0.566** (6.16)	
	sigma ² _				0.001** (8.06)
	Qheeryaion	140	140	140	140
	Number of region	35	35	35	35

由表 6 可知，成都都市圈土地利用结构信息熵与土地利用效率之间存在显著的交互影响关系。从土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响来看，成都都市圈土地利用结构信息熵的空间自回归系数的估计值为 0.370，表明研究区内相邻的县（市、区）其土地利用效率会产生相互影响，即存在正的空间相关性，本县（市、区）的土地利用效率会受到相邻县（市、区）的土地利用效率变化影响；系数估计值为-1.742，表明成都都市圈的土地利用效率会随着土地利用结构信息熵的提高而降低；从空间溢出的角度看，其空间溢出效应系数为 0.936，表明成都都市圈土地利用结构信息熵存在一定的空间扩散效应。

从土地利用效率对土地利用结构信息熵的影响来看，其估计系数为-0.163，即土地利用效率每提高 1%将会使土地利用结构信息熵下降 0.163%；空间自回归系数估计值为 0.566，表明成都都市圈各相邻县（市、区）的土地利用结构信息熵会相互影响；但其空间溢出效应系数为 0.009 且不显著，表明成都都市圈的土地利用效率不具有明显的空间扩散效应。对比成都都市圈土地利用结构信息熵与土地利用效率之间的相互影响情况，可以看出，土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响要强于土地利用效率对利用结构信息熵的影响，分别为-1.742 与-0.163，表明二者之间的交互影响以土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响为主。

分析成都都市圈各市计算结果（表 7—10）可知，成都都市圈各市土地利用结构信息熵与土地利用效率存在较为显著的交互影响。其中成都市的土地利用结构信息熵对土地利用效率的空间溢出效应系数为-0.738，表明成都市的土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响在空间上具有一定的收敛性，但并不显著。土地利用效率对土地利用结构信息熵的影响系数为-0.144，同时其空间溢出效益为正，具有不显著的空间扩散效应。成都市二者交互影响空间自回归系数均显著为正，表明成都市的各县（市、区）本地地区的土地利用结构信息熵上升或下降会造成邻居地区的土地利用结构信息熵上升或下降，土地利用效率同理。

表 7 成都市土地利用结构信息熵与土地利用效率交互影响

影响方向	变量	(1) Main	(2) Wx	(3) Spatial	(4) Variance
x对y	x1	-0.972*** (-3.11)	-0.738 (-1.22)		
	rho			0.296** (2.09)	
sigma ² ₋					0.013** (6.25)
y对x	y1	-0.144*** (-3.93)	0.002 (0.04)		
	rho			0.601** (5.38)	
sigma ² _s					0.002*** (6.05)
Observations	80		80	80	80
Number of region	20		20	20	20

德阳市的土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响系数与土地利用效率对土地利用结构信息熵的影响系数分别为-2.257与-0.248，同时，二者空间溢出效应系数分别为 0.336、0.105，空间自回归系数分别为 0.372、0.054，均拥有不显著的空间扩散效应与空间相关性，表明德阳市各县（市、区）与其邻近地区的土地利用结构之间、土地利用效率之间相互影响程度不高。

眉山市与资阳市的土地利用结构信息熵对土地利用效率影响系数分别为-3.415与-3.845，土地利用效率对土地利用结构信息熵的影响系数分别为-0.15与-0.126。但资阳市、眉山市的土地利用结构信息熵与土地利用效率空间溢出效应系数与空间自回归系数均为负值且不显著，呈现出一定的空间收敛效应以及不显著的空间负相关关系，表明眉山市、资阳市各县（市、区）间的关联性不强。

表 8 德阳市土地利用结构信息熵与土地利用效率交互影响

影响方向	变量	(1)	(2) Wx	(3) Spatial	(4) Variance
x对y	x2	-2.257*** (-5.45)	0.336 (0.31)		
	rho			0.372 (1.51)	
sigma ²					0.011** (3.37)
y对x	y2	-0.248*** (-5.39)	0.105 (0.96)		
	rho			0.054 (0.17)	
sigma ² _e					0.001** (3.46)
Obeervatiore	24		24	24	24
Number of region	6		6	6	6

表 9 眉山市土地利用结构信息熵与土地利用效率交互影响

影响方向	变量	(1) Main	(2) W _x	(3) Spatial	(4) Variance
x 对 y	x3	-3.415*** (-3.98)	-1.686 (-0.95)		
	rho			-0.105 (-0.42)	
sigma ² _					0.017*** (3.45)
y 对 x	y3	-0.115*** (-3.92)	-0.033 (-0.49)		
	rho			-0.204 (-0.87)	
sigma ² _e					0.001*** (3.44)
Oheerv	aiom	24	24	24	24
	Number of region	6	6	6	6

表 10 资阳市土地利用结构信息熵与土地利用效率交互影响

影响方向	变量	(1) Main	(2) W _x	(3) Satin	(4) Varian
x 对 y	x4	-3.845** (-3.28)	-1.861 (-0.93)		
	rho			-0.113 (-0.64)	
sigma ² _s					0.014*** (3.32)
y 对 x	y4	-0.126*** (-3.73)	-0.042 (-0.52)		
	rho			-0.311 (-0.76)	
sigma ² _e					0.006*** (3.47)
Oheervatom		12	12	12	12
	Number d region	3	3	3	3

3.4.2 空间效应分解结果分析

由于在空间计量模型中构建了空间权重矩阵，使得模型具有非线性结构，因此回归系数不再反映自变量对因变量的影响，空间滞后项系数已经不能准确地反映空间计量模型的空间溢出效应[23]。Le Sage 等指出，以求解偏微分的方式给出空间杜宾计量模型（SDM）的参数释义，可以更为有效的检验变量是否存在空间溢出效应[24]。成都都市圈偏微分估计结果如表 11 所示。

表 11 土地利用结构信息熵对土地利用效率影响分解结果

地区	(1) 直接效应	(2) 间接效应	(3) 总效应
成都都市圈	-1.720** (-7.62)	-0.359 (-0.64)	-2.079** (-2.66)
成都市	-1.063** (-3.77)	-1.518* (-1.80)	-2.580** (-3.40)
德阳市	-2.346* (-4.81)	-0.908 (-0.66)	-3.255* (-1.91)
眉山市	-3.409*** (-3.95)	-1.575 (-0.96)	-4.984* (-2.68)
资阳市	-3.804** (-3.71)	-1.583 (-1.02)	-5.387** (-2.16)

表 11 中直接效应表示成都都市圈及其各市土地利用结构信息熵对土地利用效率的直接影响，以及土地利用结构信息熵对邻近地区土地利用效率产生影响后反馈给当地土地利用效率的影响；间接效应表示邻近地区的土地利用结构信息熵对当地的土地利用效率产生的影响；总效应表示成都都市圈或各市所有区域土地利用结构信息熵对该区域土地利用效率的影响[25]。从成都都市圈及 4 市土地利用结构的信息熵对土地利用效率影响分解结果来看，成都都市圈土地利用结构信息熵对土地利用效率影响的直接效应为-1.720，成都市、德阳市、眉山市、资阳市分别为-1.063、-2.346、-3.409、-3.804，表明成都都市圈与其各市内各县（市、区）的土地利用结构信息熵和受该地土地利用结构信息熵影响的邻居地区土地利用效率的反馈作用，对该县（市、区）的土地利用效率有着显著的负向影响。即该县（市、区）的土地利用结构信息熵上升，在影响邻居地区土地利用效率后，在与其共同作用下将导致该县（市、区）的土地利用效率下降。

成都都市圈以及 4 个城市的土地利用结构信息熵对土地利用效率影响的间接效应分别为-0.359、-1.518、-0.908、-1.575、-1.583，其中除了成都市的间接效应在 10%的显著性水平下显著以外，其余地区均不显著。表明除成都市以外其余各地区内各县（市、区）土地利用效率受邻居地区的土地利用结构信息熵的负向影响，但并不显著。成都市内各县（市、区）的土地利用效率，会受到区域内其他县（市、区）土地利用结构信息熵较为显著的负向影响。虽然成都都市圈及各市的间接效应显著性不强，但其总效应均较为显著，即成都都市圈与各市各区域内的土地利用结构信息熵对该区域的土地利用效率有显著的负向影响。成都市相比其余地区，在间接效应上较为显著，表明成都市内各区域之间土地利用结构与效率存在较为明显的相互影响关系。从对成都市与其余地区总体的交互影响情况进行对比可以发现，成都市周围地区的土地利用结构变化对土地利用效率的影响强于成都市，但其各县（市、区）的土地利用结构与效率之间的关联性不强，同时成都市周围地区的间接效应与总效应均较成都市小，且显著性水平低，表明成都都市圈周围地区各区域间相互影响程度不高。因此，成都都市圈在成都市发挥其引领作用同时，周围地区应加强区域间的联系与交流，强化对成都市发展的支撑作用。

4 结论与政策建议

4.1 结论

本研究利用成都都市圈 4 市 35 个县（市、区）2005、2010、2015、2019 年的面板数据，在对土地利用结构信息熵和利用效率定量测度的基础上，以成都都市圈整体、各市之间及各市内部之间为研究单元，利用空间面板杜宾模型探讨了土地利用结构与利用效率的交互影响关系。主要结论如下：①成都都市圈土地利用结构信息熵经历了一个先升后降的变动趋势，组间差距贡献度结果表明各区域间的差异不断缩小。其土地利用效率总体呈上升趋势，中心区有效型与高效型土地利用效率逐渐增多，技术进步指数与环境负产出对土地利用效率影响十分显著。②成都都市圈土地利用结构信息熵（土地利用效率）存在空间相关性，其土地利用结构信息熵与土地利用效率存在显著的交互影响关系，且土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响要强于土地利

用效率对利用结构信息熵的影响；成都市及各地级市中发展水平越低的地区，土地利用结构信息熵对土地利用效率的影响越大。

③成都都市圈空间溢出效应以直接效应为主，是变化的内因，间接效应显著性水平不高，是变化的外因，表明成都都市圈的被解释变量受邻居地区的解释变量影响较小；成都都市圈土地利用结构信息熵与土地利用效率的交互影响以本地为主，成都市与周围地区交互影响情况差异明显。

4.2 对策建议

成都都市圈作为《四川省主体功能区规划》中的城镇化战略格局规划的重要核心，是四川省经济的核心区域和带动西部经济发展的重要增长极，同时也是成渝地区双城经济圈发展的动力源，有着十分重要的战略地位。依据成渝地区双城经济圈以及成都都市圈规划，成都都市圈要实现更高水平发展处理好内部梯度结构问题，优化都市圈内土地利用结构与提高土地利用效率是必不可少的一环。

首先，在土地利用结构方面，在四川省国土空间规划的指导下，成都市周围土地利用结构信息熵较高地区以及土地利用结构信息熵不降反增地区应以市场化为主、政府手段为辅的方式来促进土地资源的开发和整理，注重各地类面积的合理分配，减小都市圈内部土地利用结构差异。在都市圈土地利用结构有序发展的同时，成都市更应按照国土空间规划严格用地突出其圈层核心地位，并为周围地区带来相关受益。

其次，在土地利用效率方面，重视影响土地利用效率因素中的主导因素，即技术效率变化因素。建议形成以成都市为主体、德阳市为次主体、资阳市与眉山市为辅的技术创新区、资阳市与眉山两市应当通过加大对高素质人才的培养与引进，如采取引进高校、提高人才引进待遇等措施提高技术效率，进而提高两市以及成都都市圈整体土地利用效率。

最后，把握土地利用结构与土地利用效率两者之间的交互影响机制，利用成都都市圈以土地利用结构对土地利用效率的影响为主的特点，重点进行土地利用结构有序化。在各市进行内部土地利用结构优化的同时，应注意成都都市圈内部各市之间的相互影响，构建信息共享机制，通过学术、经济会议以及社会工程项目加强区域间的联系与交流。土地资源配置方面，加强与发展改革、工业和信息化、工商等部门的协调联动，共同推进土地利用结构优化，提高土地利用效率，构建城镇发展带。眉山市与资阳市两市应加强与周围地区尤其是与成都市的联系与交流，相互促进，强化对成都市的支撑作用，形成“一圈一轴、两翼三带”城镇格局，强化成渝地区双城经济圈的城镇支撑。

成都都市圈作为成渝地区双城经济圈的重要组成部分，应当抓住机遇，进行相关基础设施建设，减少都市圈内部要素流动路径差异性，争取削弱都市圈内市域甚至县域之间的要素流动壁垒，加强区域之间生产要素流动与先进技术学习，最大程度上发挥土地利用结构与土地利用效率的优化与提高地区间的溢出与扩散效应，从而形成成都市引领周围地区，周围地区支撑成都市，成都都市圈带动成渝地区双城经济圈共同进步的发展格局。

参考文献：

[1]张英男, 龙花楼, 马历, 等.城乡关系研究进展及其对乡村振兴的 启示[J]. 地理研究, 2019,38(3):578-594.

[2]魏阳, 段翔兮, 陈玉敏, 等.成渝地区双城经济圈产业转移与协同 布局研究——基于产业转移电力粘性系数分析[J].资源开发与 市场, 2023,39(2):129-138,147.

[3]Weerakoon K.Analysis of land use structure change using GIS based spatial matrices;Reference to Colombo District,Sri Lanka[J].International Journal of Physical and Social Sciences,2017,7(7):46- 59.

-
- [4]李小康, 王晓鸣, 华虹.土地利用结构变化对碳排放的影响关系及机理研究[J]. 生态经济, 2018,34(1):14-19.
- [5]Guastella G,Pareglio S,Sckokai P.A spatial econometric analysis of land use efficiency in large and small municipalities[J].Land Use Policy,2017,63:288-297.
- [6]朱从谋, 李武艳, 徐保根.长三角城市群城乡建设用地时空关联特征及其利用效益研究[J]. 中国土地科学, 2019,33(8):63-70.
- [7]匡兵, 周敏, 陈丹玲.岳阳市土地利用结构变化与土地利用绩效的关联度分析[J].地域研究与开发, 2017,36(1):137-142.
- [8]原源, 邢欣悦.高技术产业集聚对成渝城市群协同创新的影响——基于空间溢出效应视角[J]. 资源开发与市场, 2022,38(6):707-717.
- [9]刘敬财, 周宝同, 赵昆昆, 等.基于信息熵的土地利用结构变化影响因素分析——以重庆市丰都县为例[J].中国农学通报, 2011, 27(32):221-225.
- [10]陈彦光, 刘明华.城市土地利用结构的熵值定律[J]. 人文地理, 2001,(4):20-24.
- [11]杨清可, 段学军, 叶磊, 等.基于 SBM-Undesirable 模型的城市土地利用效率评价——以长三角地区 16 城市为例[J].资源科学, 2014,36(4):712-721.
- [12]杨奎, 文琦, 钟太洋.长江经济带城市土地利用效率评价[J]. 资源科学, 2018,40(10):2048 -2059.
- [13]任梅, 王小敏, 刘雷, 等.中国沿海城市群环境规制效率时空变化及影响因素分析[J]. 地理科学, 2019,39(7):1119-1128.
- [14]田艳曦.城市土地利用经济效率评价——基于 DEA 方法的实证研究[D]. 武汉: 华中师范大学硕士学位论文, 2009.
- [15]税丽.长江经济带城市土地利用效率时空差异及影响因素研究 [D]. 成都: 四川师范大学硕士学位论文, 2018.
- [16]刘勇.江苏省土地利用程度与区域生态效率关系研究[J]. 中国土地科学, 2010,24(4):19-24.
- [17]任国平, 刘黎明, 付永虎, 等.环境约束下大都市城郊土地利用结构评价——基于信息熵和非期望产出模型分析[J]. 长江流域资源与环境, 2016,25(6):913-924.
- [18]陈绍俭.中国工业环境效率的区域差异及其空间相关性分析——基于 SBM—Undesirable 模型和 Moran's I 统计量[J]. 兰州商学院学报, 2012,28(6):43-51.
- [19]Coelli,TimothyJ, 等.效率和生产率分析导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [20]方叶林, 苏雪晴, 黄震方, 等.城市韧性对旅游经济的空间溢出效益研究——以长三角城市群为例[J]. 地理科学进展, 2022,41(2):214-223.
- [21]张荣天, 焦华富.长江经济带城市土地利用效率格局演变及驱动机制研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015,24(3):387-394.

[22]李涛, 薛领, 李国平.产业集聚空间格局演变及其对经济高质量发展的影响——基于中国 278 个城市数据的实证分析[J]. 地理研究, 2022,41(4):1092-1106.

[23]Lesage J P,Pace R K.Introduction to Spatial Econometrics.CRC Press,Boca Raton,FL[M].Introduction to spatial econometrics.CRC Press,Boca Raton,FL,2009.

[24]程开明, 张亚飞, 陈龙.中国城镇化影响能源消耗的效应分解及机制探析[J]. 地理科学, 2016,36(11):1661-1669.

[25]吴义根, 冯开文, 李谷成.人口增长、结构调整与农业面源污染——基于空间面板 STIRPAT 模型的实证研究[J]. 农业技术经济, 2017,(3):75-87.