

DOI: 10.20103/j.stxb.202408191953

黄鑫,王宏卫,王灿,吴晋华,伊素燕.中国县域国土空间功能演化博弈过程及其影响因素.生态学报,2025,45(12):5811-5823.

Huang X, Wang H W, Wang C, Wu J H, Yi S Y. The evolutionary game process and influencing factors of territorial spatial functions at county level in China. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(12): 5811-5823.

中国县域国土空间功能演化博弈过程及其影响因素

黄鑫^{1,2}, 王宏卫^{1,2,*}, 王灿^{1,2}, 吴晋华^{1,2}, 伊素燕^{1,2}

1 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆大学绿洲生态自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046

摘要: 国土空间功能的类型多样性、空间分布不均衡性以及受人类需求影响的特性导致国土空间功能处于复杂的博弈状态, 探究国土空间功能演化博弈过程及其影响因素对实现国土空间高质量发展至关重要。以中国 2844 个县域单元为例, 基于多源地理空间数据定量评估 1980—2020 年国土空间功能演化博弈过程, 并运用基于最优参数的地理探测器模型识别国土空间功能演化博弈过程的影响因素。结果表明: (1) 研究期间中国县域国土空间功能主导博弈类型表现为正和博弈, 博弈强度呈倒 U 型变化, 2000—2010 年是博弈类型和博弈强度的转折时期。(2) 国土空间功能演化博弈过程以低强度正和博弈为主, 但演化博弈过程在胡焕庸线两侧表现出显著差异。(3) 影响胡焕庸线两侧国土空间功能演化博弈过程的主导因素较为一致, 但作用效果存在差异, 社会发展要素影响作用最为显著。

关键词: 国土空间功能; 演化博弈过程; 影响因素; 中国县域

The evolutionary game process and influencing factors of territorial spatial functions at county level in China

HUANG Xin^{1,2}, WANG Hongwei^{1,2,*}, WANG Can^{1,2}, WU Jinhua^{1,2}, YI Suyan^{1,2}

1 College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Abstract: A complex game situation among territorial spatial functions has emerged due to the various forms and unequal spatial distribution of these functions, as well as the characteristics influenced by human demands. To achieve the high-quality development of territorial space, it is important to understand the evolutionary game process and influencing factors of territorial spatial functions. A national assessment is necessary to address these issues, but there is a lack of such research due to the high data requirements. Given this, this research takes 2844 county units in China as an example and quantitatively evaluates the evolutionary game process of territorial spatial functions from 1980 to 2020 based on multi-source geospatial data. Then, an optimal parameters-based geographical detector (OPGD) model was applied to identify the influencing factors of the evolutionary game process of territorial spatial functions. The main findings include the following: (1) During the study period, the dominant game type of territorial spatial functions at county level in China was a positive-sum game, and the game intensity showed an inverted “U” change, with 2000—2010 being a turning period for the game type and the game intensity. (2) The evolutionary game process of territorial spatial functions was dominated by low-intensity positive-sum games. However, there were notable disparities between the two sides of the Hu Line in the evolutionary game process of territorial spatial functions. Specifically, the region east of the Hu Line had a high level of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42461036); 第三次新疆综合科学考察 (2021xjkk0902)

收稿日期: 2024-08-19; **网络出版日期:** 2025-04-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanghw@xju.edu.cn

限于数据的可获取性, 本研究尚未含中国港澳台统计数据。

urbanization, a high game intensity, and strong conflict over territorial spatial functions, manifested as a zero-sum game at the expense of agricultural space. The region west of the Hu Line had the widest distribution of game type and conflict type between territorial spatial functions, but the game intensity was low. And the region along the Hu Line was the most variable region of game type and game intensity, and the region with the highest degree of synergistic development of territorial spatial functions. (3) The evolutionary game process of territorial spatial functions at the county level in China was influenced by the integrated effects of natural environment, economic dynamics, and social development factors. On both sides of the Hu Line, the primary factors influencing the evolutionary game process of territorial spatial functions were largely the same. Nevertheless, their role varied, with social development factors having the biggest impact. These findings can provide effective information for achieving high-quality development of territorial space and regional sustainable development.

Key Words: territorial spatial function; evolutionary game process; influencing factor; China county

国土空间功能是在特定的地域空间范围内与人地关系交互作用下,以满足人类需求或增进人类福祉为目的,利用不同类型空间所直接或间接地为人类社会提供各类产品和服务的综合体^[1]。作为国土空间规划的核心内容,通过国土空间功能协同的空间治理已成为国土空间高效利用和发展、推进生态文明建设的先决条件^[2]。中共二十大报告提出“构建优势互补、高质量发展的区域经济布局和国土空间体系”的空间优化目标,以主体功能区为核心,依托国土空间规划,构建协调发展的“城镇空间、农业空间、生态空间”管控格局,是新时代国土空间治理所提出的创新空间管制办法^[3-4]。基于此,近年来国土空间功能研究已成为学术界聚焦的前沿课题和热点问题之一。

目前关于国土空间功能的研究主要围绕国土空间功能的识别、评价、功能分区与优化等方面开展。国土空间功能的识别方面,大致形成了三种方案,一是以土地多功能研究为基础,将国土空间主体功能划分为社会、经济、生态功能^[5-6];二是与“三生空间”相衔接,将其划分为生产、生活、生态功能^[7-9];三是遵循国土空间规划中的底线管控思维,以“三区空间”为切入点,将其划分为城镇、农业、生态功能^[10-12]。国土空间功能评价是在识别基础上的进一步延伸,目前常用的方法主要有两种,一是通过选取测量指标计算功能综合指数^[4,13],二是运用土地利用/覆盖数据、遥感数据、社会经济数据等计算功能值^[14-16],并辅以统计分析、空间分析等方法揭示国土空间功能演化特征^[17-18]。功能分区与优化方面,当前研究多依据空间聚类算法或空间叠加法,依据功能值的高低或类型情况划定不同分区调控方案,并据此提出差异化的优化方案^[19-22]。上述关于国土空间功能的理论与实证探索,取得了丰硕的研究成果,为架构国土空间功能研究的框架体系打下了坚实的基础。但在以下方面还有待强化:研究视角上,国土空间功能的呈现是国土空间系统构成要素动态博弈的结果,但现有研究缺乏对国土空间系统动态性和博弈性特征的量化分析。研究区域上,当前研究范围主要集中在省域、市域、流域或城市群等尺度,对于非重点开发县域空间的探究相对较少。然而,县域是我国基础的国土空间规划编制与研究单元,探讨其演变过程对国土空间治理具有最直接的指导性作用。

鉴于此,本文融合博弈论视角,以中国 2844 个县域单元为研究对象,在定量分析 1980—2020 年国土空间功能演化博弈过程的基础上,以最优参数地理探测器模型揭示胡焕庸线两侧国土空间功能演化博弈过程的关键要素,以期制定国土空间优化政策提供定量参考和决策依据。本文的边际贡献在于:提供基于博弈论视角探究国土空间功能交互关系的新思路,一方面采用计量方法分析国土空间功能的相互作用规律及其影响因素,另一方面基于长时序数据揭示中国县域国土空间功能演化博弈过程。

1 研究区域与数据来源

本文以中国 2844 个县域行政单位为研究对象(不含海域海岛),研究数据主要包括社会经济、土地利用和其他数据。社会经济数据来源于 1980—2020 年《中国统计年鉴》《中国城市年鉴》《中国县域统计年鉴》以

及各省市区国民经济和社会发展统计公报。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn>)。其中,多期土地利用数据均以各期 LandsatTM/ETM 遥感影像为主要数据源,通过人工目视解译生成,综合精度达到 90% 以上。夜间灯光数据、人口密度数据来源于地球资源数据云 (<http://gis5g.com>);高程数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn>);降雨量、气温等气象数据来源于中国气象局 (<https://data.cma.cn/>)。以上数据均进行了数据清洗及预处理,个别缺失或异常数据进行线性插值处理。

2 研究方法

2.1 国土空间功能博弈类型识别方法

2.1.1 博弈主体识别方法

本文基于国土空间功能内涵和特征的差异,以“三区空间”为切入点^[3,11],结合主体功能区划相关分类方式^[12,17]与目前已有研究^[23-25],构建土地利用分类系统和国土空间功能的衔接途径(表 1)。在此基础上,对 1980—2020 年国土空间功能的转移情况进行评估,博弈主体为转移比例最高的两类空间,博弈主体是动态变化的。

表 1 国土空间功能分类体系

Table 1 Classification system of territorial spatial functions

国土空间功能 Territorial spatial functions	土地利用分类 Land use classification	分类依据 Classification basis
城镇空间 Urban space	城乡、工矿、居民用地	以承载城镇经济、社会、政治、文化、生态等要素为主的功能空间。
生态空间 Ecological space	林地 草地 水域	以提供生态服务或生态产品为主的功能空间。
农业空间 Agricultural space	耕地	以农业生产为主体的功能空间。
其它空间 Other space	未利用地	未得到利用的功能空间。

2.1.2 博弈类型识别方法

博弈论将博弈类型定义为正和博弈和零和博弈^[26]。其中,正和博弈是指博弈主体之间存在合作关系,即博弈主体双方的利益均有所增加,或者至少一方的利益有所增加,同时另一方的利益没有受到损害。零和博弈是指博弈主体之间存在竞争关系,即博弈主体一方获利而另一方受损,获利一方的收益被受损一方的损失所抵消,博弈双方整体利益没有增加。结合以往研究^[25-27],国土空间功能博弈类型的识别方法如下:

$$GS = \frac{\sqrt[3]{S_1 \times S_2 \times S_3}}{\sqrt{\left(\frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}\right)^3}} \quad (1)$$

$$GT = GS_{t+1} - GS_t \quad (2)$$

式中,GS 代表博弈状态,GS 值越高,表明博弈状态越趋向于合作关系,GS 值越低,则表明博弈状态越趋向于竞争关系,GS 取值范围在 [0-1] 之间; S_1 、 S_2 、 S_3 分别代表国土空间功能所占的面积; t 代表研究时期;GT 代表博弈类型,当 $GT > 0$ 时,认为博弈类型为正和博弈,当 $GT < 0$ 时,则认为博弈类型为零和博弈。

2.2 国土空间功能博弈强度测度方法

2.2.1 转移强度测度方法

本文采用地学图谱模型揭示国土空间功能的转移状况^[18],在此基础上,测度国土空间功能的转移强度^[28-29],方法如下:

$$C_{ij} = 10 C_i + C_j \quad (3)$$

$$TI = \frac{\sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J SC_{ij} (i \neq j)}{n \times LA_d} 100\% \quad (4)$$

式中, C_{ij} 代表新生成的空间图谱; C_i 代表前一期的空间图谱; C_j 表示后一期的空间图谱; TI 代表国土空间功能的转移强度; SC_{ij} 为前一期第 i 种国土空间功能向后一期第 j 种国土空间功能转移的面积; n 为转移间隔时间; LA_d 为 d 区域的总面积; j 为参与博弈的国土空间功能的类型数量。

2.2.2 景观格局变化强度测度方法

本文使用 Fragstats 4.2 软件识别斑块密度、最大斑块指数、面积加权平均分维数、散布与并列指数、聚合度指数和聚集度 6 个景观格局指数^[30], 在此基础上, 测度景观格局变化强度:

$$L_p = \sqrt{\left(\frac{P_{t+n} - P_t}{n \times P_t} \right)} \quad (5)$$

$$LPCI = \frac{L_{p1} + L_{p2} + \dots + L_{pN}}{N} \quad (6)$$

式中, L_p 为某一个景观格局指数 P 的变化强度; t 为研究时期; n 为研究时期数量; $LPCI$ 为景观格局变化强度; N 为景观格局指数数量。

2.2.3 博弈强度测度方法

为揭示国土空间功能博弈强度, 本文同时考虑国土空间功能数量、位置和构成格局的变化, 采用转移强度和景观格局变化强度两个指标衡量博弈强度^[25], 测度模型为:

$$GI = \sqrt{\left\{ \frac{LPCI \times TI}{(LPCI + TI)^2} \right\}^{1/2}} \times (LPCI + TI) \quad (7)$$

式中, GI 为博弈强度; $LPCI$ 为景观格局变化强度; TI 为转移强度。

2.3 国土空间功能演化博弈过程分类方法

本文参照演化博弈论的内涵^[25]与目前已有研究^[26,31], 将演化博弈过程划分为低强度零和博弈、高强度零和博弈、高强度正和博弈、低强度正和博弈 4 种类型。其中, 低强度零和博弈是指博弈强度小于均值且博弈类型为零和博弈; 高强度零和博弈是指博弈强度大于均值且博弈类型为零和博弈; 高强度正和博弈是指博弈强度大于均值且博弈类型为正和博弈; 低强度正和博弈是指博弈强度小于均值且博弈类型为正和博弈。

2.4 国土空间功能演化博弈过程影响因素分析

2.4.1 指标选取

国土空间功能是土地资源和规划的核心要素, 国土空间功能演化博弈过程是人类发展活动与自然环境交互作用的塑造结果, 其影响因素具有多层次、复杂性特征。因此, 本文从人地关系理论出发, 衔接国土空间“双评价”技术指南中的推荐指标, 并结合已有空间演化解释机制研究, 从自然环境、经济动力、社会发展 3 方面选取影响因素。其中, (1) 自然环境: 自然环境决定了国土空间功能的适宜性和初始分布的可能性, 在整体上制约或助推着国土空间功能演变的方向和规模^[11]。研究选取高程等代表自然环境的要素, 探究自然环境对国土空间功能演化博弈过程的影响作用。(2) 经济动力: 地区的经济实力和经济基础是国土空间功能演变的基本动力和前提条件^[4], 研究选取夜间灯光指数等表征经济动力的指标, 探究经济发展对国土空间功能演化博弈过程的影响。(3) 社会发展: 地区的社会发展规模和发展水平是国土空间功能演变的重要推动力^[10], 研究选取区域土地面积等指标, 用于考虑社会发展对国土空间功能演化博弈过程的影响。

在进行影响因素分析之前先对自变量进行多重共线性分析, 共线性结果中 13 个指标的方差膨胀因子 (VIF) 均远小于临界值 10, 表明自变量不存在多重共线性, 可以作为独立变量进行研究 (表 2)。

表 2 国土空间功能演化博弈过程的影响因素指标体系

Table 2 Indicator system of influencing factors in the evolutionary game process of territorial spatial functions

维度 Dimension	影响因素 Influencing factors	计算方法 Calculation method	典型文献 Key references	VIF
自然环境 Natural environment	高程	DEM	[4, 10, 25, 28, 32—33]	2.576
	坡度	ArcGIS 坡度工具	[4, 10, 32—33]	3.163
	年降雨量	中国气象局	[4, 10, 25, 28, 32—33]	3.675
	年平均气温	中国气象局	[4, 10, 25, 28, 32—33]	3.070
经济动力 Economic dynamics	夜间灯光指数	夜间灯光数据集	[4, 10, 25]	2.015
	国内生产总值	统计年鉴	[4, 10, 25, 28, 32—33]	3.024
	第一产业产值	统计年鉴	[4, 10, 25, 28, 32—33]	1.428
	第二产业产值	统计年鉴	[4, 10, 25, 28, 32—33]	3.905
社会发展 Social development	第三产业产值	统计年鉴	[4, 10, 25, 28, 32—33]	4.686
	区域土地面积	统计年鉴	[32, 34]	1.920
	区域开发强度	建设用地面积/土地面积	[32, 34]	4.098
	土地利用强度	基于土地利用类型数据计算	[32, 34]	4.737
	人口密度	人口密度数据集	[4, 10, 33]	1.872

2.4.2 基于最优参数的地理探测器模型

地理探测器是揭示空间现象背后驱动力的常用手段^[35]。其中,通过空间数据离散化确定空间分层异质性的最佳尺度是地理探测器运行的关键步骤^[36]。离散化分类效果可通过 q 值大小来反映, q 值越大代表分类效果越好。因此,本文运用 R 语言中 GD 包,借助相等间隔、自然断点、分位数、几何间隔、标准差分类 5 种分类方法,将分类等级数设置为 4—10 类,进而选择 q 值最大的空间尺度作为地理探测器分析的最优参数。

在选择最优参数的基础上,应用地理探测器中因子探测器与交互作用探测器对上述影响因子展开分析,探讨各因子对国土空间功能演化博弈过程的影响力和多因子交互作用强度,计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (8)$$

式中, q 代表因子的解释力,取值范围在 $[0, 1]$ 之间; h 代表解释变量或被解释变量的分层; N_h 和 N 为层 h 和全区的单元数; σ_h 和 σ^2 分别代表层 h 和全区的 Y 值的方差。

3 结果与分析

3.1 国土空间功能博弈类型与博弈主体识别结果

从博弈类型的分布来看(图 1),正和博弈的县域数量大于零和博弈的县域数量,且随着时间的推移,正和博弈的县域数量呈上升趋势。从博弈主体的分布来看(图 1),占据主导地位的博弈主体为农业空间与城镇空间,研究期间农业空间与城镇空间作为博弈主体的县域从 1415 个增加到 1984 个,说明县域国土空间功能发展中该两类空间的矛盾与冲突最为普遍;农业空间与生态空间作为博弈主体的县域集中在农业主产区,研究期间农业空间与生态空间作为博弈主体的县域从 682 个增加到 701 个;生态空间与城镇空间作为博弈主体的县域在研究期间集中在胡线西侧,随着时间的推移,生态空间与城镇空间作为博弈主体的县域从 747 个减少到 159 个。

3.2 国土空间功能博弈强度测度结果

3.2.1 转移强度测度结果

研究期间国土空间功能转移强度呈现先上升后下降的趋势(图 2)。1980—1990 年国土空间功能的转移强度最低。1990—2000 年县域间的转移强度差异和转移强度平均值与上期基本持平。2000—2010 年县域间

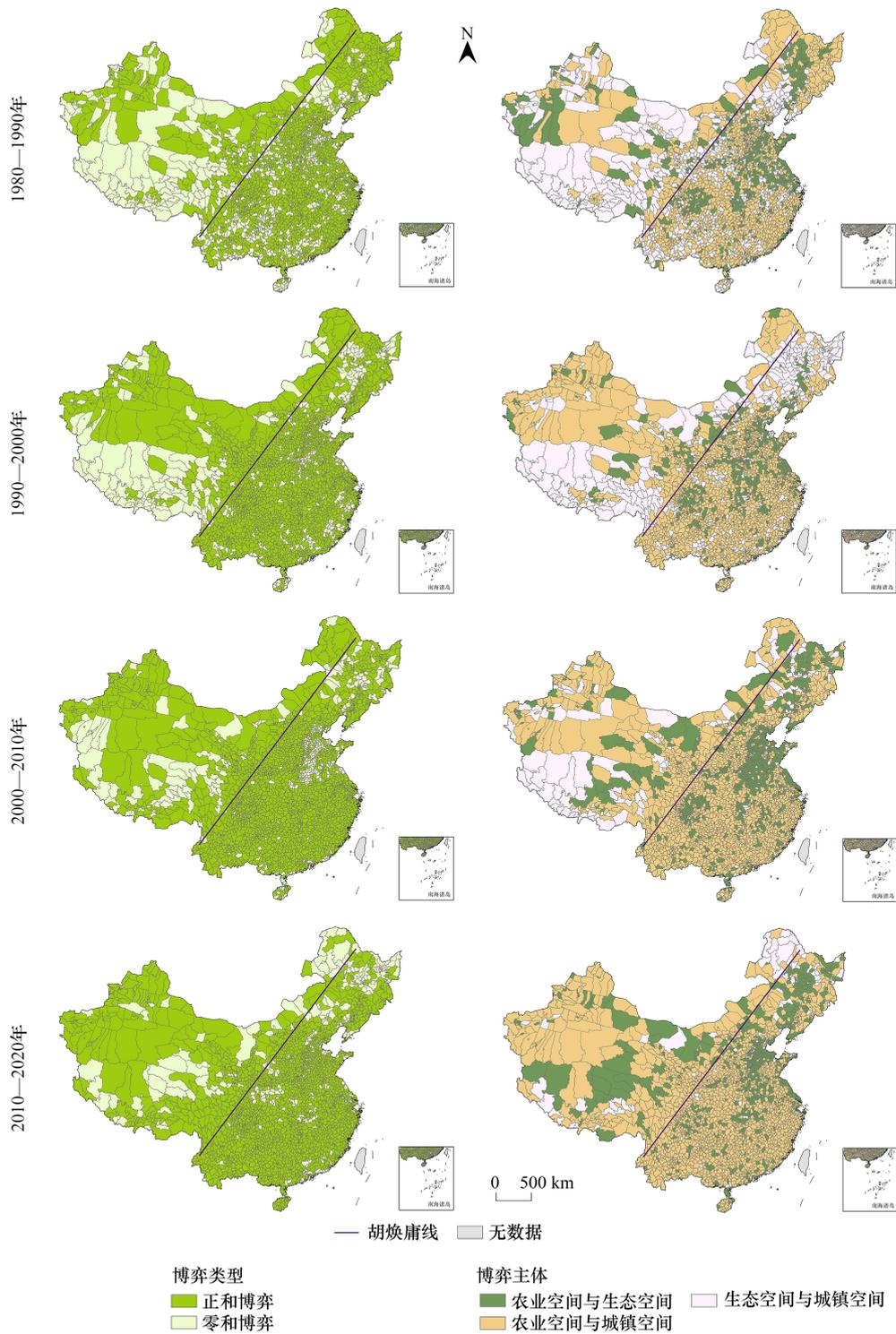


图 1 中国县域国土空间功能博弈类型与博弈主体识别结果

Fig.1 Identification results of game types and game subjects of territorial spatial functions at county level in China

的转移强度差异显著增大,这一变化表明,这一时期大多数县域的转移强度上升,而且县域之间的差距也在扩大。2010—2020 年转移强度平均值与上期持平,但最大值与最小值之间的差距缩小,表明在这一时期县域之间的转移强度差距逐步缩小。

3.2.2 景观格局变化强度测度结果

研究期间县域景观格局变化强度呈现先增长后下降的趋势,2000—2010 年是景观格局变化强度最为强烈的时期(图 3)。与县域景观格局变化强度相似,国土空间功能景观格局变化强度也呈现先增长后下降的趋势,在 2000—2010 年达到峰值。其中,城镇空间的景观格局变化强度最为显著,生态空间的景观格局变化强度最小。

3.2.3 博弈强度测度结果

研究期间中国县域国土空间功能博弈强度表现出明显的空间集聚特征(图 4)。1980—1990 年绝大多数县域博弈强度均表现为低值(博弈强度 ≤ 0.5);1990—2000 年大部分县域博弈强度仍以低值为主;2000—2010 年是博弈强度最强烈的时期,除西北地区外,县域博弈强度大幅度提高;2010—2020 年博弈强度 >0.5 的县域主要集中在胡线东侧,胡线西侧的县域博弈强度回归到低值。

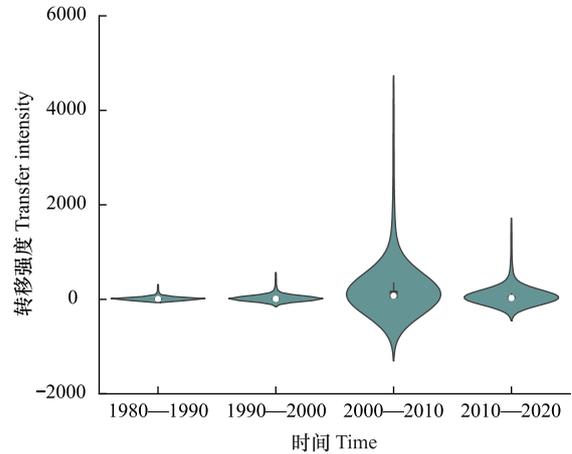


图 2 中国县域国土空间功能转移强度

Fig.2 Transfer intensity of territorial spatial functions at county level in China

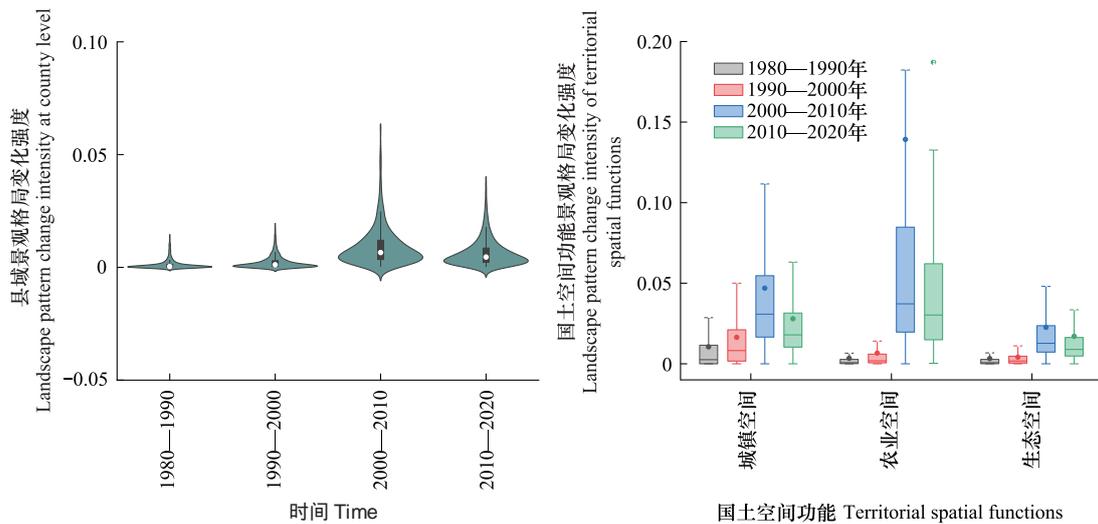


图 3 中国县域景观格局变化强度与国土空间功能景观格局变化强度

Fig.3 Landscape pattern change intensity at county level in China and landscape pattern change intensity of territorial spatial functions

3.3 国土空间功能演化博弈过程

从演化博弈过程结果来看(图 5),研究期间大多数县域均表现为低强度正和博弈,表现为高强度零和博弈的县域数量最少。1980—1990 年表现为低强度零和博弈的县域集中在胡线西侧,博弈主体以生态空间与城镇空间为主;高强度正和博弈的县域大多出现在胡线东侧,博弈主体主要为农业空间与生态空间;1990—2000 年低强度零和博弈的县域集中在青藏地区,博弈主体以生态空间与城镇空间为主,高强度正和博弈的县域聚集在胡线东侧,博弈主体大多为农业空间与生态空间;2000—2010 年表现为低强度零和博弈的县域数量减少,主要分布在胡线西侧,表现为高强度正和博弈的县域大多出现在胡焕庸线沿线;2010—2020 年演化博弈过程的分布特征与前一时期趋同。

3.4 国土空间功能演化博弈过程的影响因素

结合国土空间功能演化博弈过程在胡焕庸线两侧表现出的显著差异,研究从胡焕庸线两侧进一步探究国

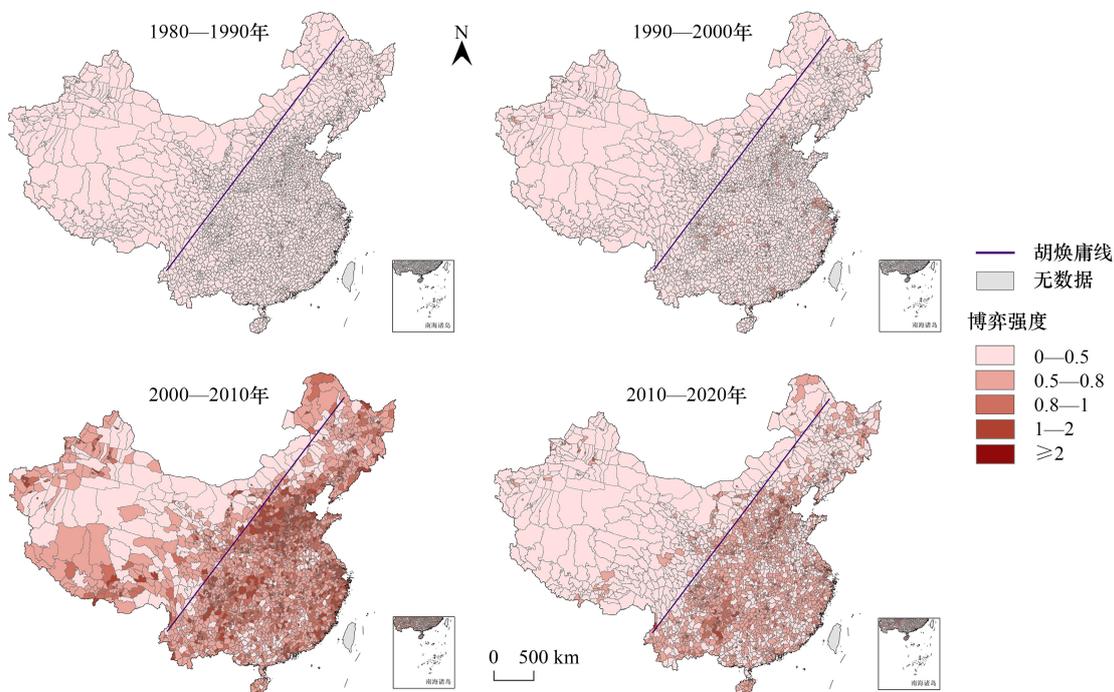


图 4 中国县域国土空间功能博弈强度测度结果

Fig.4 Measurement results of the game intensity of territorial spatial functions at county level in China

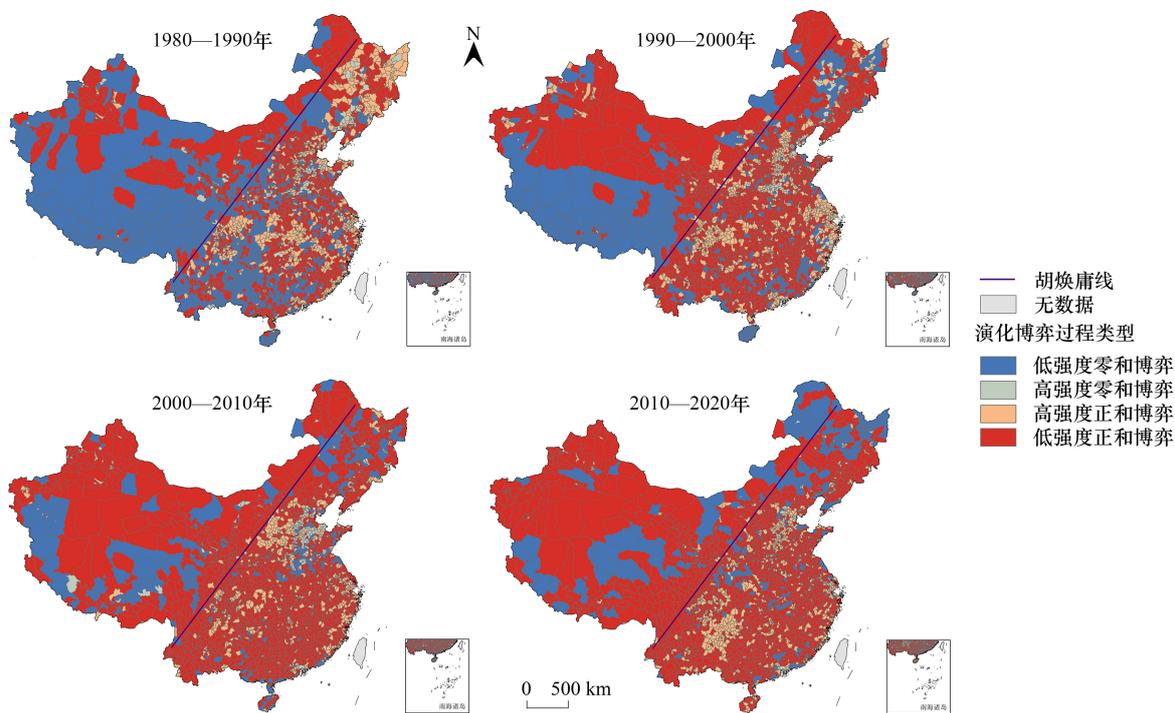


图 5 中国县域国土空间功能演化博弈过程

Fig.5 The evolutionary game process of territorial spatial functions at county level in China

土空间功能演化博弈过程的影响因素。因子探测器结果显示(图 6),胡线东侧国土空间功能演化博弈过程的影响因素在不同阶段呈现差异。研究期间社会发展要素是影响国土空间功能演化博弈过程的主要因素,驱动

作用逐渐增强,而 1990 年之后自然环境要素对国土空间功能演化博弈过程的解释力减弱,2010 年之后经济动力要素的影响力也逐渐减弱。

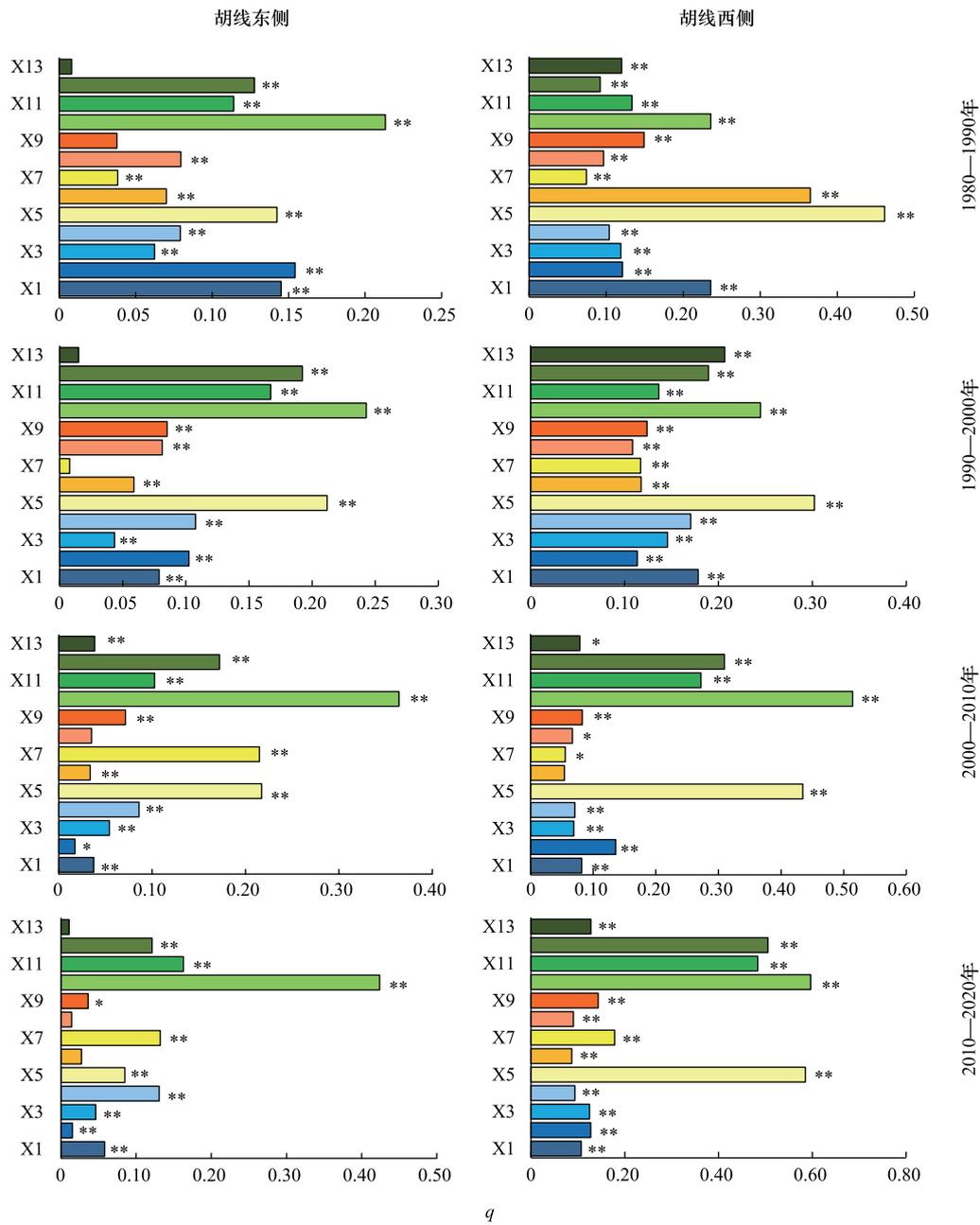


图 6 国土空间功能演化博弈过程因子探测器结果

Fig.6 Factor detection results of the evolutionary game process of territorial spatial functions

X1: 高程; X2: 坡度; X3: 年降雨量; X4: 年平均气温; X5: 夜间灯光指数; X6: 国内生产总值; X7: 第一产业产值; X8: 第二产业产值; X9: 第三产业产值; X10: 区域土地面积; X11: 区域开发强度; X12: 土地利用强度; X13: 人口密度。 ** 代表在 0.01 的水平上显著, * 代表在 0.05 的水平上显著。本文所指的胡线西侧包括内蒙古自治区(不含赤峰市、通辽市、兴安盟)、甘肃省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、青海省、西藏自治区、大兴安岭地区、陕西省榆林市、四川省阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州、云南省迪庆藏族自治州和怒江傣族傣族自治州; 胡线东侧是除西侧以外的全国部分^[37]

研究期间社会发展要素对胡线西侧国土空间功能演化博弈过程的驱动作用较为突出,且影响作用在后期不断增强,其中,2010—2020 年区域土地面积、土地利用强度、区域开发强度 q 值达到 0.596、0.505、0.484。在

这一过程中,经济动力要素也发挥了重要作用,夜间灯光指数始终为主导影响因素, q 值在 0.302—0.585 之间,但其余经济动力要素解释力有限。此外,2000 年之后自然环境要素的驱动作用逐渐减弱。

1990—2020 年 78 对因子组合对国土空间功能演化博弈过程的交互作用类型以双因子增强和非线性增强为主(图 7)。对于胡线东侧,自然环境要素和社会发展要素存在较强的交互作用,在指标上主要体现为

	胡线东侧													胡线西侧													
X13	0.211	0.227	0.108	0.129	0.212	0.104	0.119	0.153	0.046	0.21	0.185	0.218	0.008	0.614	0.403	0.554	0.507	0.54	0.575	0.295	0.455	0.652	0.673	0.384	0.446	0.12	1980—1990年
X12	0.214	0.204	0.27	0.324	0.221	0.179	0.195	0.218	0.21	0.294	0.194	0.127	NE	0.485	0.562	0.39	0.371	0.55	0.562	0.382	0.421	0.49	0.625	0.306	0.092	NE	
X11	0.171	0.208	0.231	0.284	0.238	0.136	0.165	0.195	0.154	0.252	0.114	BE	NE	0.535	0.59	0.341	0.406	0.578	0.554	0.265	0.335	0.39	0.402	0.133	NE	NE	
X10	0.282	0.356	0.311	0.381	0.297	0.244	0.298	0.294	0.224	0.213	BE	BE	UNW	0.745	0.68	0.528	0.556	0.598	0.685	0.729	0.375	0.732	0.235	NE	NE	NE	
X9	0.206	0.219	0.155	0.168	0.192	0.113	0.114	0.141	0.037	BE	NE	NE	BE	0.66	0.662	0.648	0.439	0.548	0.433	0.382	0.302	0.149	NE	NE	NE	NE	
X8	0.223	0.231	0.208	0.222	0.237	0.142	0.145	0.079	NE	NE	NE	NE	NE	0.499	0.638	0.333	0.404	0.545	0.355	0.404	0.096	NE	NE	NE	NE	NE	
X7	0.193	0.212	0.134	0.199	0.237	0.102	0.038	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0.627	0.526	0.649	0.365	0.571	0.596	0.074	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
X6	0.204	0.21	0.164	0.184	0.219	0.07	UNW	UNW	NE	BE	BE	BE	BE	0.634	0.555	0.662	0.603	0.56	0.364	NE							
X5	0.24	0.259	0.221	0.26	0.142	NE	NE	NE	NE	BE	BE	BE	NE	0.578	0.566	0.587	0.568	0.461	BE	NE	NE	BE	BE	BE	BE	BE	
X4	0.325	0.299	0.131	0.079	NE	0.517	0.585	0.404	0.103	NE																	
X3	0.256	0.261	0.062	BE	NE	NE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	NE	0.652	0.636	0.118	NE										
X2	0.216	0.154	NE	NE	BE	BE	NE	NE	NE	BE	BE	BE	NE	0.568	0.12	NE	NE	BE	BE	NE							
X1	0.145	BE	NE	NE	BE	BE	NE	BE	NE	BE	BE	BE	NE	0.235	NE	NE	NE	BE	NE								
X13	0.16	0.164	0.085	0.183	0.244	0.11	0.064	0.134	0.147	0.305	0.254	0.273	0.015	0.41	0.349	0.36	0.429	0.398	0.312	0.339	0.312	0.313	0.424	0.297	0.331	0.206	1990—2000年
X12	0.258	0.238	0.239	0.313	0.299	0.259	0.259	0.246	0.235	0.331	0.22	0.192	NE	0.444	0.416	0.386	0.405	0.47	0.434	0.357	0.326	0.473	0.375	0.249	0.189	NE	
X11	0.213	0.218	0.237	0.305	0.278	0.241	0.229	0.224	0.22	0.318	0.167	BE	NE	0.387	0.374	0.299	0.392	0.437	0.381	0.313	0.291	0.421	0.328	0.136	BE	BE	
X10	0.316	0.323	0.331	0.35	0.322	0.306	0.303	0.318	0.335	0.242	NE	BE	NE	0.56	0.457	0.481	0.461	0.462	0.466	0.413	0.412	0.472	0.244	BE	BE	BE	
X9	0.202	0.188	0.192	0.241	0.241	0.082	0.15	0.152	0.085	NE	BE	BE	NE	0.356	0.315	0.382	0.42	0.504	0.236	0.271	0.198	0.123	NE	NE	NE	BE	
X8	0.169	0.183	0.173	0.209	0.233	0.108	0.193	0.081	BE	BE	BE	BE	NE	0.247	0.283	0.303	0.268	0.397	0.169	0.229	0.108	BE	NE	BE	NE	BE	
X7	0.177	0.191	0.09	0.171	0.25	0.175	0.007	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0.287	0.263	0.268	0.312	0.381	0.257	0.117	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
X6	0.171	0.174	0.152	0.219	0.251	0.058	NE	BE	BE	NE	NE	NE	NE	0.338	0.355	0.467	0.385	0.478	0.117	NE	BE	BE	NE	NE	NE	BE	
X5	0.284	0.281	0.276	0.343	0.211	BE	NE	BE	BE	BE	BE	BE	BE	0.398	0.474	0.467	0.408	0.302	NE	BE	BE	NE	BE	BE	BE	BE	
X4	0.257	0.261	0.222	0.107	NE	NE	NE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	0.356	0.392	0.457	0.17	BE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	NE	NE	
X3	0.218	0.211	0.043	NE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0.467	0.385	0.145	NE										
X2	0.212	0.102	NE	NE	BE	NE	NE	BE	NE	BE	BE	BE	NE	0.311	0.113	NE											
X1	0.078	NE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	NE	NE	BE	BE	NE	0.178	NE	NE	NE	BE	NE	BE	BE	NE	NE	NE	NE	NE	
X13	0.143	0.122	0.129	0.146	0.356	0.109	0.232	0.127	0.139	0.363	0.212	0.249	0.038	0.202	0.304	0.177	0.238	0.505	0.156	0.238	0.196	0.165	0.552	0.313	0.405	0.078	2000—2010年
X12	0.213	0.212	0.241	0.241	0.265	0.215	0.318	0.186	0.203	0.383	0.239	0.172	NE	0.425	0.504	0.511	0.483	0.574	0.4	0.504	0.42	0.385	0.582	0.483	0.309	NE	
X11	0.178	0.176	0.21	0.184	0.288	0.177	0.347	0.159	0.229	0.395	0.102	BE	NE	0.374	0.524	0.393	0.424	0.559	0.359	0.342	0.33	0.313	0.56	0.272	BE	BE	
X10	0.413	0.384	0.402	0.419	0.392	0.392	0.402	0.388	0.397	0.364	BE	BE	BE	0.623	0.633	0.637	0.642	0.633	0.575	0.605	0.589	0.558	0.514	BE	BE	BE	
X9	0.204	0.146	0.159	0.18	0.284	0.089	0.239	0.147	0.071	BE	BE	BE	NE	0.192	0.289	0.239	0.3	0.478	0.176	0.382	0.235	0.082	BE	BE	BE	NE	
X8	0.109	0.086	0.109	0.136	0.288	0.092	0.253	0.035	NE	BE	NE	BE	NE	0.194	0.335	0.178	0.203	0.531	0.107	0.277	0.066	NE	NE	BE	NE	NE	
X7	0.318	0.272	0.283	0.301	0.405	0.293	0.214	NE	BE	BE	NE	BE	BE	0.305	0.347	0.189	0.346	0.522	0.413	0.055	NE	NE	NE	NE	NE	NE	
X6	0.172	0.121	0.142	0.155	0.282	0.033	NE	NE	BE	BE	NE	NE	NE	0.184	0.292	0.181	0.256	0.528	0.054	NE	BE	NE	NE	NE	NE	NE	
X5	0.316	0.303	0.273	0.289	0.217	NE	BE	NE	BE	BE	BE	BE	BE	0.578	0.583	0.548	0.587	0.434	NE	NE	NE	BE	BE	BE	BE	NE	
X4	0.16	0.196	0.174	0.085	BE	NE	BE	NE	NE	BE	BE	BE	NE	0.267	0.424	0.293	0.07	NE									
X3	0.196	0.181	0.054	NE	NE	NE	NE	NE	NE	BE	NE	NE	NE	0.231	0.266	0.069	NE										
X2	0.184	0.017	NE	BE	NE	NE	NE	0.328	0.135	NE	BE	NE	NE	NE													
X1	0.037	NE	0.081	NE																							

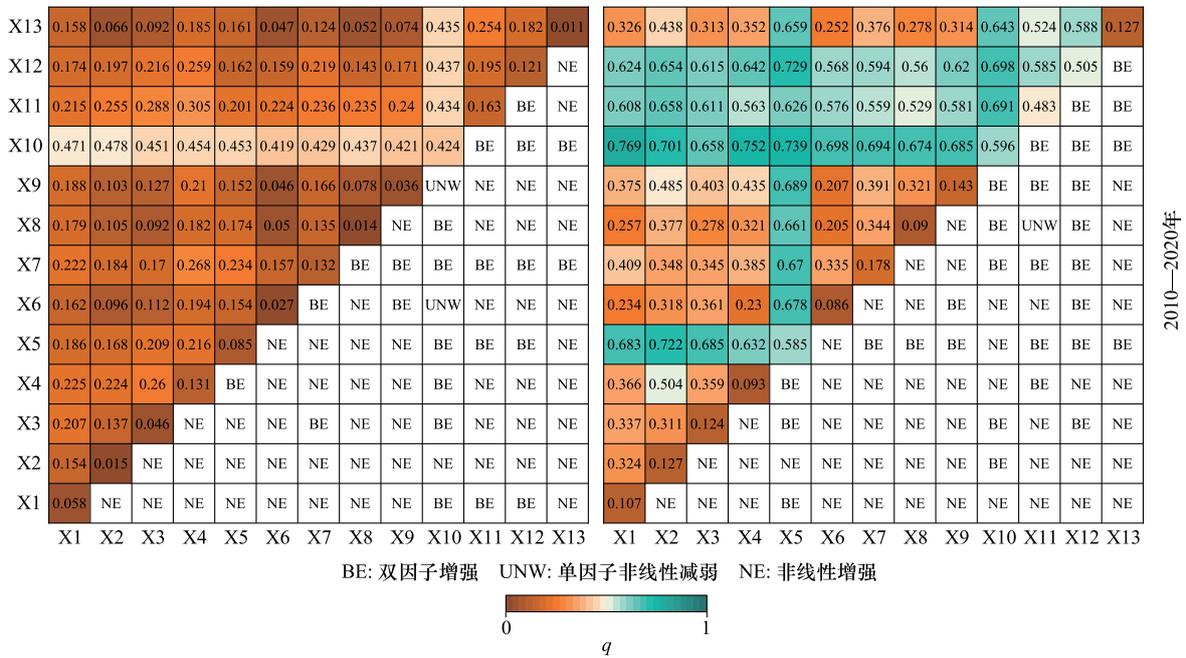


图7 国土空间功能演化博弈过程交互探测器结果

Fig.7 Interaction detection results of the evolutionary game process of territorial spatial functions

BE: 双因子增强; UNW: 单因子非线性减弱; NE: 非线性增强

1980—1990 年前 3 对交互效应的因子组合为: 区域土地面积∩年平均气温、区域土地面积∩坡度、高程∩年平均气温。1990—2000 年区域土地面积与其他因子交互后解释力增强,交互 q 值达到 0.303—0.350。2000—2010 年区域土地面积与其他因子交互后解释力最强,其中, q 值第一位的为区域土地面积∩年平均气温,其次是区域土地面积∩高程。2010—2020 年区域土地面积与其它因子交互后解释力最强,交互 q 值达到 0.552—0.642,其中,区域土地面积∩坡度解释力居首位,其次为区域土地面积∩高程、区域土地面积∩区域开发强度。

对于胡线西侧,不同阶段因子之间的交互作用存在一定的差异。1980—1990 年自然环境要素存在强交互作用,交互 q 值达到 0.341—0.745。1990—2000 年前 3 对交互效应的因子组合为: 高程∩区域土地面积、夜间灯光指数∩第三产业产值、年降雨量∩区域土地面积。2000—2010 年经济动力要素与社会发展要素的影响力逐步增强,其中区域土地面积与其它因子交互后解释力最强,交互 q 值达到 0.552—0.642,夜间灯光指数与其它因子交互后解释力也显著提高,交互 q 值达到 0.478—0.633。2010—2020 年社会发展要素的影响力进一步凸显,区域土地面积、区域开发强度、土地利用强度与其它因子交互后解释力均显著增强,此外,夜间灯光指数与其它因子交互后解释力也显著提高。总体来看,区域土地面积是胡线西侧国土空间功能演化博弈过程关键驱动因素。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文在博弈论的基础上,定量评估 1980—2020 年中国县域国土空间功能演化博弈过程,并通过基于最优参数地理探测器模型揭示胡焕庸线两侧国土空间功能演化博弈过程的关键要素,主要研究结论如下:

(1) 1980—2020 年中国县域国土空间功能的主导博弈类型表现为正和博弈,博弈强度呈倒 U 型变化,2000—2010 年是博弈类型和博弈强度的重要转折时期。

(2) 中国县域国土空间功能演化博弈过程以低强度正和博弈为主,但国土空间功能演化博弈过程在胡焕

庸线两侧表现出显著差异。具体来看,胡线东侧城市化水平高,博弈强度高,国土空间功能的冲突强烈,表现为以牺牲农业空间为代价的零和博弈;胡线西侧博弈与冲突类型分布最为广泛,但博弈强度较低;胡焕庸线沿线区域是博弈类型和博弈强度最多变的区域,也是国土空间功能协同发展程度最高的区域。

(3)中国县域国土空间功能演化博弈过程受自然环境、经济动力、社会发展要素的综合作用影响。影响胡焕庸线两侧国土空间功能演化博弈过程的主导因素较为一致,但作用效果存在差异,其中,社会发展要素在国土空间功能演化博弈过程中发挥着关键作用。

4.2 讨论

上述研究为探讨国土空间功能协同发展路径带来启示如下:(1)严守基本农田红线,加强农业空间管理。从国土空间功能博弈类型与博弈主体识别结果发现,中国县域国土空间功能的矛盾主要发生在农业空间,在未来的发展中,需结合土地整治规划、农业空间规划等行动性规划,遏制农业空间退化、破碎化,恢复耕地地力,保障农业空间合理开发利用。(2)合理匹配人类功能需求与自然环境“双评价”结果,探索高效土地利用模式。针对少数大城市边缘地区仍然表现为高强度零和博弈的现象,应积极探索加速都市农业发展的措施,提高城市土地混合利用水平,同时制定有效的城市扩张途径,对城市蔓延与生态保护空间进行协调,以推动大城市边缘地区国土空间功能转向协同发展。(3)充分运用国土空间功能抓手,强化国土空间用途管制。进一步落实主体功能区规划对各县区地域功能的定位,依据地方自然资源与社会结构的本底差异,合理确定城镇、农业、生态空间的规模参数和空间结构,明确各类空间的管制要求和措施,探索国土空间功能的协同发展机制。

本文参考目前已有研究,融合博弈论视角揭示国土空间功能演化博弈过程,但仍存在改进之处:一是博弈类型识别方法忽略了三类国土空间功能的本质差异,直接按照等效数据处理;二是针对国土空间功能演化博弈过程的影响因素分析未能涉及完整的驱动机制剖析,有待在后续研究中进行探讨。

参考文献(References):

- [1] 邹利林,章丽君,刘彦随.生态文明背景下国土空间功能研究:过去、现在与未来.地理科学进展,2022,41(7):1312-1324.
- [2] 邹利林,章丽君,梁一凡,文琦.新时代国土空间功能的科学认知与研究框架.自然资源学报,2022,37(12):3060-3072.
- [3] 魏伟,尹力,谢波,薄立明.国土空间规划背景下黄河流域“三区空间”演化特征及机制.经济地理,2022,42(3):44-55,86.
- [4] 顾观海,吴彬,张文主,卢盛权,陆汝成,谢双蜜,黄思静.中国陆地边境地区国土空间功能的区域差异及其驱动机制.地理研究,2024,43(7):1644-1660.
- [5] 刘春艳,张继飞,赵宇鸾,朱昌丽.基于生态位理论的国土空间功能重要性评估——以攀西地区为例.城市规划,2018,42(4):84-93.
- [6] 王兆峰,赵松松.长江中游城市群旅游资源环境承载力与国土空间功能空间一致性研究.长江流域资源与环境,2021,30(5):1027-1039.
- [7] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析.地理学报,2016,71(1):49-65.
- [8] 苑韶峰,黄洁雨,朱从谋,梅志恒.都市圈“三生”功能空间关联网络特征与形成机制分析——以杭州都市圈为例.中国土地科学,2024,38(5):56-67.
- [9] 王乐,熊昌盛,田宇,周斌雄.中国“三生”空间功能异质性评价、时空演变及分区调控.农业工程学报,2024,40(10):265-275.
- [10] 魏伟,尹力.东北地区“三区空间”格局演化特征及驱动机制.地理科学,2023,43(2):324-336.
- [11] 魏伟,王宁,尹力.近10年长江经济带上游地区“三区空间”时空演化特征及机制分析.长江流域资源与环境,2023,32(2):297-310.
- [12] 薄立明,尹力,魏伟,赵浪,夏俊楠.主体功能区视角下山东省国土空间格局演变及驱动因素分析.地理与地理信息科学,2024,40(1):37-46.
- [13] 胡其玉,王兴邦,沈问苍,张正峰.城市群国土空间功能均衡发展研究——以京津冀地区为例.中国土地科学,2023,37(7):53-65.
- [14] 林树高,陆汝成,叶宗达,刘少坤.中越边境地区国土空间功能时空演变与耦合协调.中国土地科学,2022,36(9):90-101.
- [15] 冯琰玮,甄江红.国土空间功能演变及协同/权衡关系研究——以内蒙古呼包鄂地区为例.干旱区研究,2022,39(5):1642-1654.
- [16] 陈晓茜,江志猛,陈金文,黄冠宇,李岩,樊凯旋,周寒,吴浩.基于“保护-开发”权衡协同关系的国土空间功能综合分析研究——以武汉黄黄都市圈为例.华中师范大学学报:自然科学版,2023,57(6):846-858.
- [17] 魏伟,段云生,尹力,薄立明,夏俊楠.珠江流域地域主体功能时空演化特征及驱动机制.热带地理,2024,44(11):1933-1948.
- [18] 林树高,诸培新,陆汝成,陈昌玲,毕佳港,罗金玲.长江经济带国土空间格局与功能演变的时空特征和响应过程.农业工程学报,

- 2024, 40(4): 304-316.
- [19] 马利邦, 牛叔文, 石培基, 郭晓东. 天水市国土空间功能区划与未来空间发展格局——基于主体功能区划框架. *经济地理*, 2015, 35(6): 68-77.
- [20] 金贵, 郭柏枢, 成金华, 邓祥征, 吴锋. 基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架. *地理学报*, 2022, 77(3): 534-546.
- [21] 贺大为, 金贵, 王新生, 郭柏枢. 长江经济带国土空间开发与保护路径优化. *生态学报*, 2023, 43(14): 5776-5787.
- [22] 董寅, 金贵, 邓祥征. 中国国土空间布局优化研究. *地理学报*, 2024, 79(3): 672-687.
- [23] 魏伟, 缪江波, 夏俊楠, 武静. 湖北省长江经济带沿岸地区“三区空间”演化特征及机制分析(2010—2017). *经济地理*, 2020, 40(2): 132-142.
- [24] 张轲, 魏伟, 周婕, 尹力, 夏俊楠. 三江源地区“三区空间”时空演化及驱动机制分析(1992—2020年). *地球信息科学学报*, 2022, 24(9): 1755-1770.
- [25] Zhang R L, Tian G H, Borowiak K, Lisiak-Zielińska M, Lei Y K, Yang M, Tian Y, Zhao R T, Yan J J, Mu B. Measuring the evolutionary game process among three functional space types at the county scale in Henan Province, China. *Cities*, 2023, 142: 104560.
- [26] 孙宁, 杨忠伟. 从“零和”至“正和”——博弈视角下城市公共空间合作开发要件研究. *城市发展研究*, 2012, 19(3): 108-112.
- [27] Jiang L, Deng X Z, Seto K C. The impact of urban expansion on agricultural land use intensity in China. *Land Use Policy*, 2013, 35: 33-39.
- [28] 顾观海, 吴彬, 张文主, 陆汝成, 王培琼, 廖文惠, 冯晓玲. 中国边境地区国土空间演变及驱动机制的区域差异研究. *自然资源学报*, 2024, 39(5): 1022-1038.
- [29] 朱从谋, 苑韶峰, 杨丽霞. 主体功能区视角下国土空间格局演变及生态环境效应——以浙江省为例. *生态学报*, 2023, 43(11): 4488-4501.
- [30] 穆博, 张若兰, 穆涛, 董娜林, 盛思雨, 赵汝婷, 田国行. 地形梯度视角下郑州城镇建设用地扩张格局时空动态特征. *地域研究与开发*, 2022, 41(5): 133-138.
- [31] 方创琳. 京津冀城市群协同发展的理论基础与规律性分析. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 15-24.
- [32] Zhu C M, Dong B Y, Li S N, Lin Y, Shahtahmassebi A, You S X, Zhang J, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Identifying the trade-offs and synergies among land use functions and their influencing factors from a geospatial perspective: a case study in Hangzhou, China. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 314: 128026.
- [33] 魏伟, 曾诗瑶, 尹力, 薄立明, 余侃华, 夏俊楠. 近40年海南岛国土空间格局演化的生态效应及其影响因素. *生态学报*, 2024, 44(12): 5083-5101.
- [34] 杨帆, 熊素文, 雷婷, 赵子羽, 刘传虎. 城镇化进程中洞庭湖区“三生空间”格局演变与驱动机制. *生态学报*, 2022, 42(17): 7043-7055.
- [35] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [36] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, Xu C D. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data. *GIScience & Remote Sensing*, 2020, 57(5): 593-610.
- [37] 方创琳, 李广东, 戚伟, 孙思奥, 崔学刚, 任宇飞. “胡焕庸线”东西部城乡发展不平衡趋势及沿博台线微突破策略. *地理学报*, 2023, 78(2): 443-455.