

引用格式: 马琪, 王梓柔, 赵永宏. 西安市“三生空间”时空格局演化与功能测度[J]. 山地学报, 2021, 39(5): 722-733.

MA Qi, WANG Zirou, ZHAO Yonghong. Evolution of spatial-temporal pattern and functional measurement of “production-living-ecological” space in Xi'an, China [J]. Mountain Research, 2021, 39(5): 722-733.

西安市“三生空间”时空格局演化与功能测度

马琪, 王梓柔, 赵永宏

(西安外国语大学 旅游学院·人文地理研究所, 西安 710128)

摘要: “三生空间”是主体功能区战略实施、国土空间开发保护新格局构建的重要基础。现有研究多关注土地利用转变, 对长时间序列“三生空间”演化及其功能分异影响研究薄弱, 难以全面揭示不同时期城市土地功能系统变化的复杂性。本文以西安市为研究对象, 利用 1980 年、1990 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年六期 Landsat TM/ETM 以及 Landsat8 遥感影像解译的土地利用数据, 通过 GIS 空间分析方法对 1980—2015 年西安市“三生空间”时空格局演化及功能指数进行分析和测度, 利用地理探测器从自然条件、区位条件、社会经济以及区域政策 4 个方面对“三生空间”功能水平分异的影响因素进行分析。结果表明: (1) 1980—2015 年, 西安市“三生空间”变化整体表现出平原区剧烈、山区稳定的特点; 生活空间呈现集聚扩张态势, 生产和生态空间被大量侵蚀缩减。(2) “三生空间”功能指数变化与“山区—山麓—平原”主体功能开发力度契合, 中心城区外围是功能指数负增长的集中区域, 秦岭山地功能指数始终保持高水平稳定状态。(3) 西安市“三生空间”功能水平分异是自然和社会经济综合作用的结果, 不同维度因子交互作用较单因子影响力更加显著, 而植被覆盖度、地形起伏度和坡度因子等自然条件是“三生空间”功能水平分异的基底条件。研究结果可为西安市不同主体功能区生产、生活、生态空间的优化布局, 为构建国土空间开发保护新格局提供决策参考。

关键词: 三生空间; 时空格局; 功能指数; 地理探测器; 西安市

中图分类号: K909

文献标志码: A

“三生空间”(Production-Living-Ecological Spaces, PLES)是指按照国土利用空间的主要功能划分出生产空间、生活空间和生态空间的总称^[1]。立足于土地利用功能视角, 研究者提出关于“生产空间”“生活空间”和“生态空间”三者概念, 并根据地域空间所提供的各类产品和服务功能进行三生空间的划分^[1-4]。“三生空间”的提出和应用对城市层面的实体空间布局、功能组合具有重要的指导意义^[5], 对认知新型城镇化快速推进下的城市“三生空间”功能变化规律具有促进作用, 是城市国土空间开发保护新格局构建的重要依据^[6]。国际上, 与

“三生空间”类似, 研究者基于国土空间分区、土地多功能性研究^[7-10], 提出了“带形城市”“田园城市”^[11]、“有机疏散理论”^[12]、“城市增长边界”^[13]、生态基础设施等概念及理论^[14], 表明对城市不同类型土地的功能分区及其适宜性研究得到广泛关注。国内学者则围绕不同时空尺度下“三生空间”分类、识别、优化及其数量配比和空间配置的科学问题开展了大量的探索和实践。例如, 在“三生空间”的分类方面, 研究者发现“三生空间”分类在不同研究指向和研究尺度下具有明显的尺度效应和功能复合特性^[1, 15-16], 目前尚未形成统一的分类体系。最近,

收稿日期(Received date): 2020-11-19; 改回日期(Accepted date): 2021-09-26

基金项目(Foundation item): 陕西省教育厅科研计划项目(20JK0315); 西安外国语大学校级科研项目(19XWC15)。[Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department (20JK0315); Research Funds of Xi'an International Studies University (19XWC15)]

作者简介(Biography): 马琪(1987-), 男, 陕西榆林人, 博士, 讲师, 主要研究方向: 土地利用变化与区域发展。[MA Qi (1987-), male, born in Yulin, Shaanxi province, Ph. D., lecturer, research on land use change and regional development] E-mail: maqi86@126.com

“三生空间”的分类研究正逐渐由“生产”“生活”和“生态”的三元结构向特定时空尺度下的多元复合结构演化细分,并在实践探索中形成了“城镇空间、农业空间和生态空间”的空间规划体系^[17-18]。在“三生空间”识别方面,研究者多采用功能价值测算函数群、区位熵模型以及空间多要素叠加分析等定性或定量方法开展“三生空间”功能价值评估,以识别土地空间的单一功能和主导功能^[3, 5]。在“三生空间”的功能优化方面,研究多采取生态位适宜度评价模型、线性规划模型等方法开展特定尺度下“三生空间”优化,以服务于区域国土空间开发与优化布局^[3]。综合来看,已有研究多关注于“三生空间”结构,缺乏对长时间序列时空格局演化下“三生空间”的功能分异变化及其影响机制探索。

在国家“一带一路”战略背景下,随着关中平原城市群发展和新型城镇化的快速推进,西安市“三生空间”发生剧烈变化。然而现有研究多从土地用途转变视角,探究西安市土地利用景观格局动态演变^[19-20],对其变化驱动影响主要以定性分析为主^[21-23],且对土地多功能性的深层次评价研究不足。因此,难以全面揭示西安市不同发展阶段土地功能系统变化的复杂性,尤其针对不同主体功能区“三生空间”演化及其功能影响研究薄弱。基于此,本文从“三生空间”功能视角出发,运用GIS空间分析方法,研究1980—2015年新型城镇化进程和经济快速发展时期西安市“三生空间”的时空格局演变,测度“三生空间”的功能指数,并利用地理探测器从网格尺度分析其空间分异的影响因素,以期对西安市构建国土空间开发保护新格局和生态文明建设提供决策参考。

1 研究区概况

西安市是陕西省省会,关中平原城市群的核心,是丝绸之路经济带的新起点,亦是我国对接全球城市体系的核心城市。西安市处于秦岭山地和关中平原过渡地带,属黄河流域,下辖11个区和2个县,代管1个国家级新区(图1, 107°40′~109°49′E、33°39′~34°45′N),总面积为10 108 km²。境内海拔高度南北差异较大,由北向南逐渐抬升,界限分明;南部秦岭山地和北部关中平原组成了西安市主要的地貌类型^[20]。北部平原区主要是国家级重点

开发区,南部鄠邑区、长安区和蓝田县的秦岭山地和山麓地带属于农产品主产区,周至县属于重点生态功能区。2018年西安市生产总值达8349.86亿元,第一产业比重占3.10%,第二产业占35.04%,第三产业占61.86%,人均GDP高达85114元。城镇居民收入呈现稳步增长趋势,经济整体呈现良好发展势头^[24]。

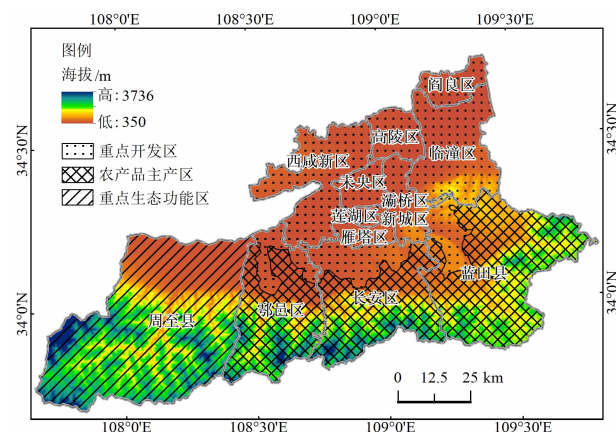


图1 西安市地形及功能分区图

Fig. 1 Topography and major functional zones of Xi'an, China

2 研究方法数据来源

2.1 研究方法

(1) “三生空间”功能测度模型

“三生空间”功能水平是城市任意空间单元的综合特性,既满足自身需求又对其他空间的系统协作功能起保障和支撑作用。为衡量西安市“三生空间”功能水平,构建“三生空间”功能指数(PLESI),分析“三生空间”功能的空间分异特征,计算公式为:

$$PLESI_i = 0.25 \times \overline{PSI_i} + 0.25 \times \overline{LSI_i} + 0.5 \times \overline{ESI_i} \quad (1)$$

式中, $PLESI_i$ 为*i*区域的“三生空间”功能指数; $\overline{PSI_i}$ 为*i*区域的生产空间指数; $\overline{LSI_i}$ 为*i*区域的生活空间指数; $\overline{ESI_i}$ 为*i*区域的生态空间指数^[25]。

该测度模型中的“三生空间”功能指数需依据土地功能强弱的差异性进行评分。本研究基于土地利用遥感监测数据,根据刘继来等^[2]制定的全国土地利用类型“三生空间”评价体系(表1),对西安市土地利用数据进行赋值评分,然后对土地利用数据进行归并与分类来识别“三生空间”^[26]。这一赋值

表 1 西安市“三生空间”土地利用分类体系及评分

Tab.1 Classification system and scoring of “production-living-ecological” spatial land use in Xi'an, China

一级编码	一级土地利用类型	二级编码	二级土地利用类型	评分		
				生产用地	生活用地	生态用地
1	耕地	11	水田	3	0	3
		12	旱地	3	0	3
2	林地	21	有林地	0	0	5
		22	灌木丛	0	0	5
		23	疏林地	0	0	5
		24	其他林地	0	0	5
3	草地	31	高覆盖度草地	0	0	5
		32	中覆盖度草地	0	0	5
		33	低覆盖度草地	0	0	5
4	水域	41	河渠	3	0	1
		42	湖泊	0	0	5
		43	水库坑塘	1	0	1
		46	滩地	0	0	5
5	城乡、工矿居民用地	51	城镇	0	5	0
		52	农村居民点	0	5	0
		53	工交建设用地	3	3	0
6	未利用地	66	裸岩石砾地	0	0	5

评分体系基于土地功能强弱和完整性差异可分别将各种类型用地划分为 4 个等级。

以生产用地为例,生产用地为最高 5 分,半生产用地为 3 分,弱生产用地为 1 分,非生产用地为 0 分,生活用地和生态用地的评分规则与此类似^[2,25]。“三生空间”格局变化根据同一位置研究初期和末期“三生空间”评分的一致与否确定。评分相同的斑块属于未发生变化的区域,归为“保持”类型;评分不同的斑块,根据评分前后的大小变化判断“扩张”或“缩减”,对相邻同质的斑块进行合并后,分别对斑块面积进行升序排列,计算斑块面积的累加百分比,根据面积累加百分比曲线和斑块数量直方图确定划归“保持”类型的区域(表 2)。

(2) 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[27-28]。为探测“三生空间”功能指数 Y 的空间分异性,本文借助地理探测器中的因子探测和交互探测分析影响因子 X 及

表 2 “三生空间”保持型值域范围划分

Tab.2 Range of “production-living-ecological” maintenance type

类型	斑块值域范围/km ²
生产空间“保持”型	0 < 生产空间“扩张”斑块 ≤ 0.003
	0 < 生产空间“缩减”斑块 ≤ 0.012
生活空间“保持”型	0 < 生活空间“扩张”斑块 ≤ 0.026
	0 < 生活空间“缩减”斑块 ≤ 0.003
生态空间“保持”型	0 < 生态空间“扩张”斑块 ≤ 0.003
	0 < 生态空间“缩减”斑块 ≤ 0.026

多种 X 间的两两组合多大程度上解释了 Y 的空间分异,用 q 值进行度量,公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{2}$$

式中, $h = 1, \dots, L$ 为功能指数 Y 或因子 X 的分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。 q 的值域为 $[0, 1]$,值越大说明 Y 的空间分异性越明显;如果分

层是由因子 X 生成的,则 q 值越大表示因子 X 对功能指数 Y 的解释力越强,反之则越弱^[27-28]。

综合已有土地功能空间分异影响研究^[17, 29],本文结合研究区实际和数据的可获取性,主要从自然条件、区位条件、社会经济以及区域政策四个方面进行影响因子的选取。其中,自然条件因子有 X_1 植被覆盖度(%)、 X_2 坡度(°)、 X_3 地形起伏度(m)和 X_4 土地垦殖率(%) 4 个指标;区位条件选择 X_5 交通用地密度(%) 和 X_6 离市中心距离(km^2) 2 个代理指标;社会经济因素主要考虑 X_7 经济密度(亿元· km^{-2})、 X_8 城镇化水平(%)、 X_9 常驻人口密度(人· km^{-2})、 X_{10} 科技投入水平(%)、 X_{11} 地均固定资产投资(亿元· km^{-2}) 和 X_{12} 每万人社会消费品额(亿元) 6 个因子;区域政策因素由 X_{13} 保护地面积占比(%) 和 X_{14} 累计造林面积(hm^2) 组成。

2.2 数据来源及处理

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),该数据以各期 Landsat TM/ETM (1980—2010 年) 以及 Landsat8 (2015 年) 遥感影像为主要数据源,依据《全国生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系》,通过基于地学知识的人机交互解译方法,生成 1980 年、1990 年、2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年共六期 1:10 万比例尺土地利用数据,包括耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和未利用地 6 个一级土地利用类型和 17 个二级类型(表 1)。经混淆矩阵进行分类精度及总精度评价结果显示,一级类型综合评价精度达到 93% 以上,二级类型分类综合精度达 90% 以上,满足本研究需求^[30]。

植被覆盖度数据来源于全国生态十年遥感调查与评估成果;坡度和地形起伏度根据数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 计算获得,DEM 来源于地理数据云网站(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 90 m;保护地矢量数据主要由自然保护区、森林公园、地质公园、大熊猫国家公园、水源地、风景名胜区组成,来源于陕西省生态十年遥感调查与评估数据集;交通用地密度通过 2015 年土地利用数据提取后计算获得;距离市中心距离通过高德地图量测获得;土地垦殖率、经济密度、城镇化水平、人口密度、科技投入水平、地均固定资产投资、每万人社会消费品额来源于《西安市统计年鉴》或间接计

算获得,其中造林面积为 2006—2015 年累计造林面积。通过 ArcGIS 软件将各县区统计指标链接到西安市行政区划矢量地图,建立空间关系后对各变量图层进行栅格化处理,并采用自然断点法对 14 个数值型指标作分级离散化处理^[28]。最后通过创建 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 渔网生成 9994 个网点对功能指数(Y) 和 14 个因子(X) 值进行提取后输入地理探测器计算。

3 结果分析

3.1 “三生空间”的时空格局

3.1.1 生产空间

1980—2015 年西安市生产空间主要分布在西安市北部平原地区(图 2),生产用地面积表现出先小幅度增加、后持续减少的变化趋势。1980—1990 年,西安市生产空间发生 21.55 km^2 小幅扩张后,1990—2000 年,生产空间则开始显现出缩减态势(“变幅”即面积变化幅度: -76.14 km^2),集中在雁塔区、未央区、灞桥区、临潼区中部和阎良区西部;2000—2005 年,生产空间依旧呈缩减趋势且变幅较大(变幅: -132.88 km^2),主要集中在雁塔区、未央区南部、西咸新区东南部、鄠邑区中部和长安区中部;2005—2010 年,生产空间继续缩减(变幅: -112.03 km^2),缩减幅度较大地区为雁塔区、未央区、灞桥区、临潼区、长安区北部以及西咸新区东南部;2010—2015 年,生产空间持续进一步缩减(变幅: -110.72 km^2),主要集中在高陵区、西咸新区东北部和阎良区西部。研究时段内,西安市生产空间时空格局的演变与《西安市城市总体规划(2008—2020 年)》中城乡“分散组团式”的发展布局形态相一致。

对 1990—2015 年西安市生产空间整体变化特征做进一步分析(图 3),发现研究时段内西安市生产空间缩减大于扩张(总变幅: -410.22 km^2)。缩减区主要集中于关中平原的重点开发区,局部区域生产空间扩张明显与现代农业示范园区建设相印证;南部重点生态功能区和农产品主产区的生产空间保持稳定。结合社会经济因素统计进一步分析发现,西安市生产空间变化的直接驱动力可能来源于产业结构调整 and 城镇化。例如,研究区三产结构由 1978 年的 19.05:57.55:23.40 变化为 2015 年的

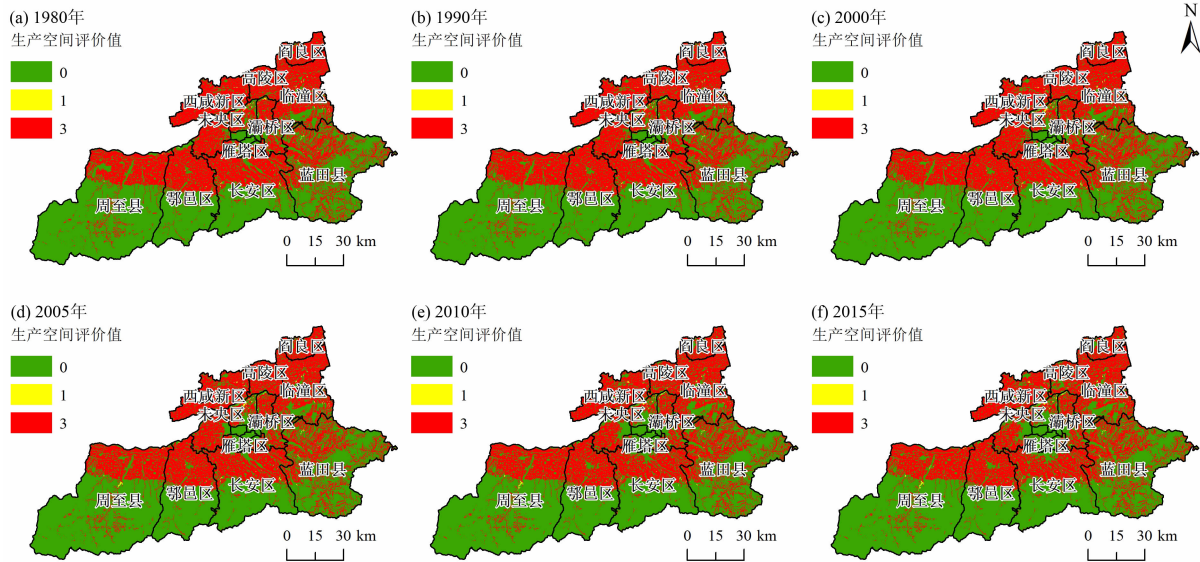


图 2 1980—2015 年西安市生产空间格局

Fig. 2 Spatial pattern of production space in Xi'an from 1980 to 2015

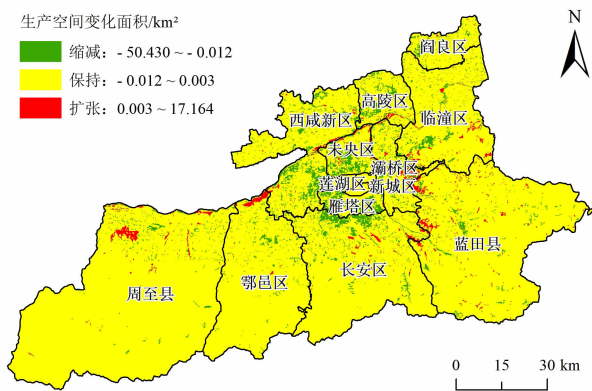


图 3 1980—2015 年西安市生产空间格局变化

Fig. 3 Variation of spatial pattern of production-space in Xi'an from 1980 to 2015

3.8:36.65:59.55,这意味着城市的大量土地会被人口增长、产业积聚和城镇化占用,转向第三产业主导的生产空间开发,从而对农业生产空间产生巨大影响并使其发生根本性的转变,尤其关中平原大量的优质耕地资源被侵占。因此,西安市重点开发亟需划定城市开发边界,限制城镇发展规模,严格控制无序扩张占用生产空间,农产品主产区和重点生态功能区应划定基本农田保护红线,促进农业生产空间高效、规模化经营。

3.1.2 生活空间

1980—2015 年西安市生活空间由 779.07 km² 增加至 1420.80 km²,扩张是各区县生活空间演变

的一个明显特征(图 4)。1980—1990 年,生活空间呈小幅度扩张(变幅:15.72 km²),表现为中心城区外围的零散扩张;1990—2000 年,中心城区莲湖区、新城区、碑林区和雁塔区扩张范围持续增加(变幅:102.20 km²);2000—2005 年,西安市生活空间扩张保持前一个时段水平(变幅:110.14 km²),未央区、雁塔区、高陵区的西南部、西咸新区和莲湖区的交汇处以及新城区和灞桥区的交汇处有较大面积的扩张;2005—2010 年,生活空间大幅扩张(变幅:229.61 km²),主要集中在雁塔区、未央区南部、西咸新区东南部;2010—2015 年,生活空间扩张有所减小(变幅:184.06 km²),主要以中心城区向外扩张,尤其是向西和向北的方向扩张明显。1980—2015 年,西安市人口城镇化率由 33.77% 增长到 73.02%,中心城区人口密度显著增加,城市公共服务设施配置集中。随着关中平原城市群发展和西咸一体化加强,新建运营铁路北客站、1 号和 2 号地铁线路的开通,快速路体系建设逐步完善,生活空间呈聚集扩展状态。西安市生活空间在圈层扩展模式基础,向外沿重要交通干线或地形呈现星形扩展趋势。

分析 1980—2015 年西安市生活空间格局变化(图 5),研究时段内西安市生活空间呈现持续扩张的趋势(总变幅:641.73 km²)。大规模扩张区域主要位于西安市重点开发区域,包括西咸新区、高陵区、未央区、雁塔区、临潼区西部以及鄠邑区中部和北部等生活空间与生产空间交互活跃的区域。南部重点

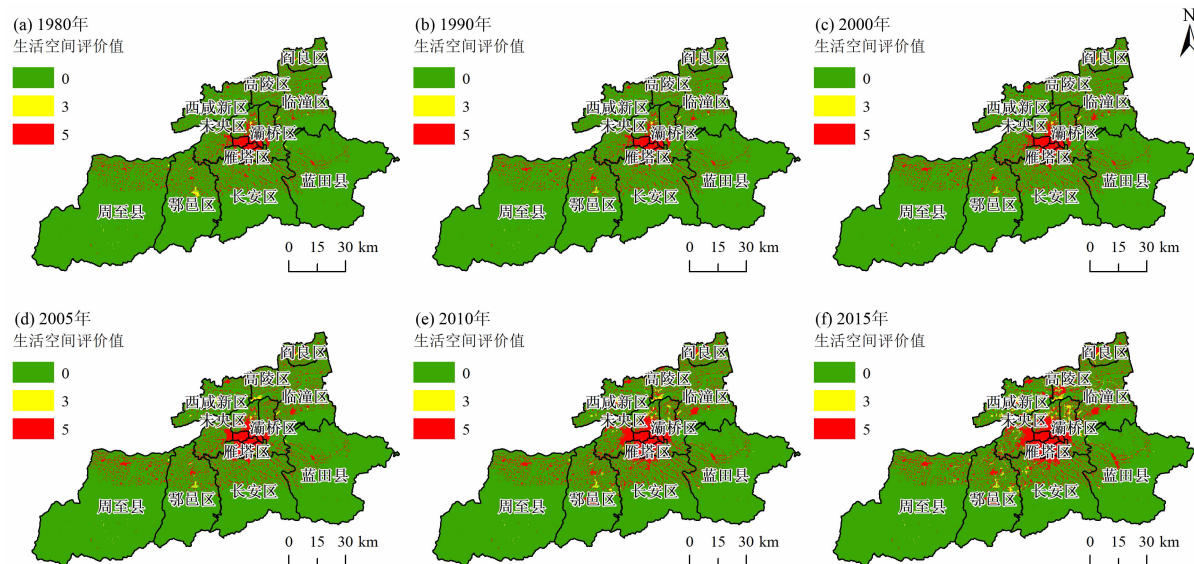


图4 1980—2015年西安市生活空间格局

Fig. 4 Spatial pattern of living-space in Xi'an from 1980 to 2015

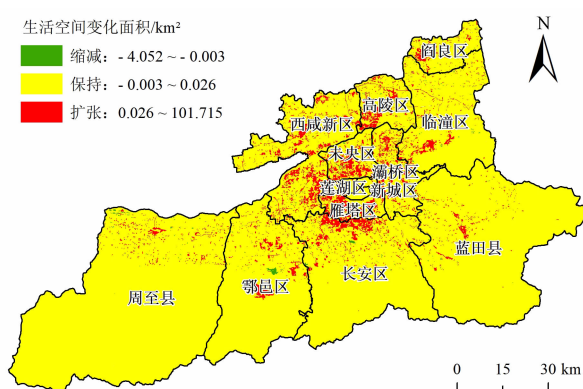


图5 1980—2015年西安市生活空间格局变化

Fig. 5 Variation of spatial pattern of living-space in Xi'an from 1980 to 2015

生态功能区和农产品主产区生活空间基本保持稳定,山麓地带局部存在零星扩展。这一时期西安市改造了大面积的城中村,并成立了曲江管委会、高新管委会、大兴管委会、经开区管委会和西咸新区管委会等政府派出机构,生活空间形成了围绕城市边缘多点集聚的特征,并出现大面积且密集地扩张。这一扩张方式表现为内部紧凑、外部高速扩张的网络状空间结构。然而,这一过程中重点开发区植被覆盖率持续降低,城市热岛效应逐渐加剧,人口密度的剧增亦带来城市可利用水资源压力的增加。因此,亟需综合考虑自然生态环境、居住生活环境、基础设施环境、社会交际环境和可持续发展环境等优化生

活空间布局,进行合理开发^[31]。

3.1.3 生态空间

西安市生态空间的时空变化基本与不同阶段的城市发展建设相契合。随着建成区面积扩张,生态空间逐渐被压缩,整体上呈现减少趋势。1980—2015年,西安市生态空间由 9973.20 km² 减少至 9330.79 km²,空间上主要分布于北部平原区(图6)。具体而言,1980—1990年,西安市生态空间小幅缩减(变幅: -15.75 km²);1990—2000年,生态空间缩减更为明显,面积减少 102.21 km²,主要集中在雁塔区和未央区。进入2000年以来,西安市生态空间缩减更为剧烈,2000—2005年减少 110.15 km²,2005—2010年生态空间减少最为剧烈(变幅: -229.46 km²)。从空间变化来看,这一时期缩减地区由中心城区向外蔓延,周边区县城镇外围生态空间面积减少尤为突出。2010—2015年,生态空间面积仍持续减少,但较上一阶段有所缓和,减少 184.84 km²,空间分布上主要集中在中心城区外围。研究时段内,西安市南部秦岭山区生态空间处于持续稳定状态,山麓地带局部生态空间受到侵占。

如前所述,1980—2015年西安市生态空间的整体变化呈现出大面积缩减,总变幅为 -642.40 km²(图7),集中分布在西安市重点开发区,由于开发区经济快速发展,城镇用地及居民生活空间不断扩张而导致生态空间被大面积侵食,与生活空间扩张区域

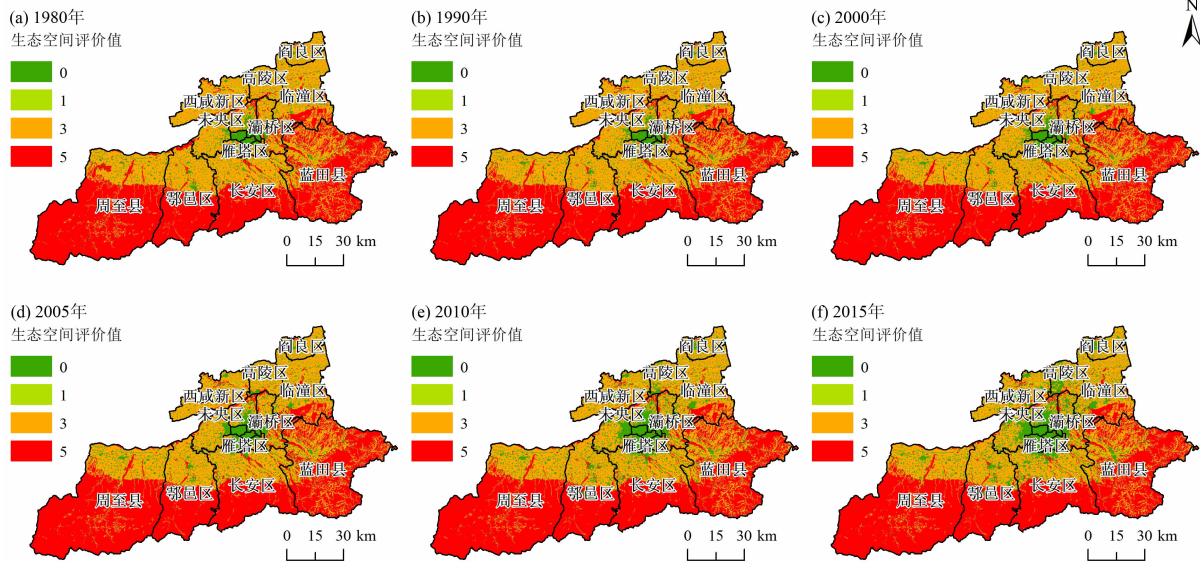


图 6 1980—2015 年西安市生态空间格局

Fig. 6 Spatial pattern of ecological-space in Xi'an from 1980 to 2015

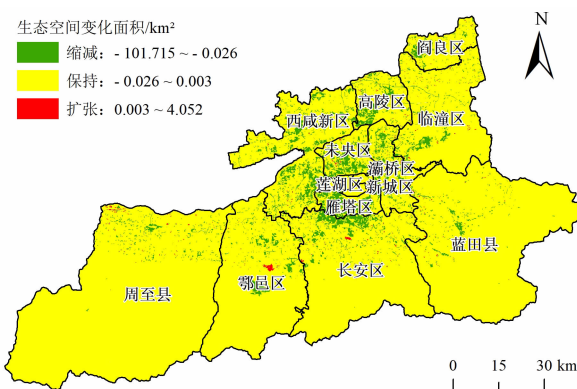


图 7 1980—2015 年西安市生态空间格局变化

Fig. 7 Variation of spatial pattern of ecological-space in Xi'an from 1980 to 2015

和方向保持一致。平原区生活空间扩展与蔓延加剧了生态空间景观破碎化程度,进而影响生态空间内部物质能量循环,造成局地植被覆盖率下降,生态功能和废物处理能力降低^[32]。南部区县由于地处秦岭山区,拥有自然保护区、森林公园、地质公园、风景名胜、水源保护区等诸多保护地,受重点生态功能区和农产品主产区主体功能定位约束,生态空间保持稳定,局部山麓区域受到人类活动干扰,需划定生态保护红线强化生态空间管控。

3.2 西安市“三生空间”功能性时空演化

“三生空间”功能测度结果显示(图 8),1980—2015 年,西安市“三生空间”功能指数(PLESI)均值

总体略有下降,由 1.89 下降至 1.84。以秦岭北麓为界大致分为南北两部分,北部平原区为功能水平低值区,PLESI 均值为 1.24,涉及莲湖区、新城区、碑林区、未央区、雁塔区等区县,这些区域是西安市中心城区,属于重点开发区,是人口集聚经济发展水平较快的区域;南部秦岭山区和山麓地带为功能水平高值区,PLESI 均值为 2.43,该区域属于重点生态功能区和农产品主产区,城镇化的发展受到山区地形条件和主体功能区明显的政策限制,以生态保护为主,为西安市提供持续的生态服务产品,保障城市生态安全。1980—2015 年西安市“三生空间”功能水平整体呈现小幅降低的变化趋势,功能指数负增长的明显区域位于平原区的重点开发区。具体分析可知,1980—1990 年,PLESI 指数变化较小;1990—2000 年,PLESI 指数明显降低的区域位于未央区和雁塔区;2000—2005 年,集中于西咸新区、未央区和雁塔区;2005—2010 年,低值区依旧以中心城区向外扩张,向西和向南方向明显,外围城镇低值区开始出现;2010—2015 年,中心城区低值区范围略有扩大外,周围城镇低值区增加显著。

3.3 西安市“三生空间”功能性水平分异影响的地理探测

地理探测结果显示(表 3),不同影响因子的解释力 q 值不同, q 值由大到小依次为植被覆盖度(0.425)、地形起伏度(0.310)、坡度(0.275)、常住

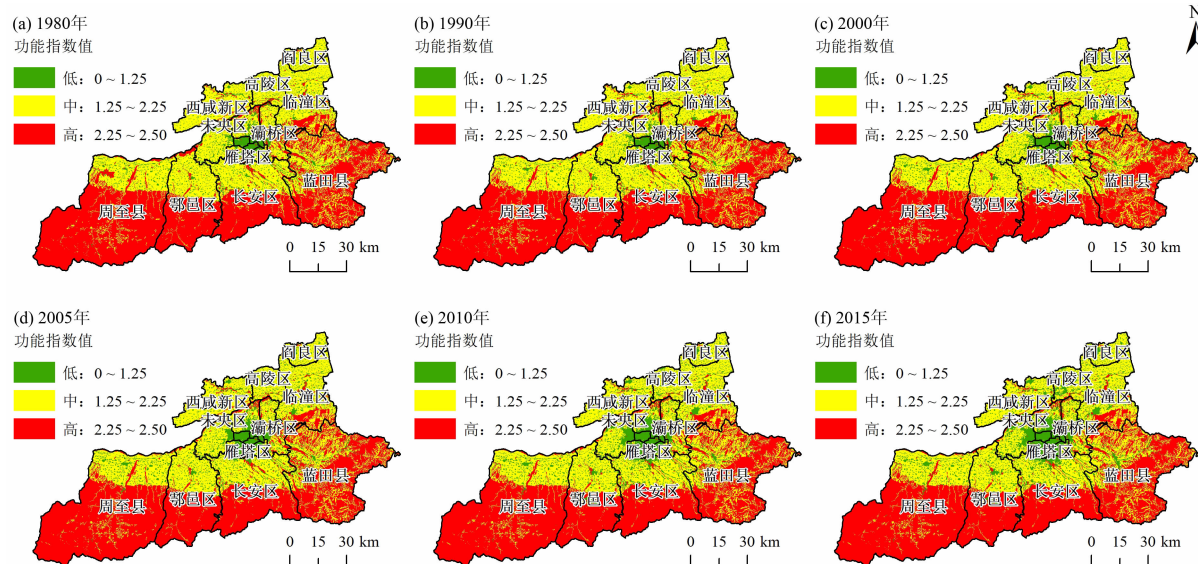


图 8 1980—2015 年西安市“三生空间”功能指数

Fig. 8 Functionality indexes of “production-living-ecological” in Xi'an from 1980 to 2015

人口密度(0.230)、交通用地密度(0.229)、城镇化水平(0.228)。可见植被覆盖度、地形起伏度和坡度等自然条件是影响“三生空间”功能水平分异的本底因素,一定程度上决定了“三生空间”的格局分布和功能发挥。植被覆盖度的影响系数侧面表征了区域土地功能水平的差异,植被覆盖度高生态功能高,反则生产和生活功能高。地形起伏度和坡度是“三生空间”布局 and 协调发展的基础地形条件,所以生活和生产空间主要位于关中平原,秦岭山地则主要为平原区提供生态服务功能、生态服务产品及游憩的生态功能空间,对维护区域生态安全意义重大。社会经济因素中人口密度和城市化水平是土地功能水平高低衡量的重要指标;山区人口密度和城镇化水平低,而生态功能突出,平原区则由于高度的城镇化,生产和生活功能突出。区位条件中道路通达程度对生活和生产功能空间影响较为明显,平原区生活和生产空间邻近道路,便捷的交通和完善的道路体系对生产、生活空间的互联互通和产业扩张有积极的助推作用。此外,对于秦岭山地保护的政策因素不可忽略。保护地面积占比和累计造林面积也是土地功能水平和功能发挥的重要干预因素,生态政策和生态工程的实施对生态修复、土地生态功能的发挥、人居环境的改善具有积极地作用和影响。

因子交互探测结果显示(表3),任何两种因子交互组合形成的综合因子 q 值均要大于单因子的 q

值,整体呈现双因子增强的特征,表明任何两种变量对“三生空间”功能水平分异的交互作用要大于单因子的独自作用。其中,植被覆盖度与其他各因子交互作用的决定力 q 值均大于0.438,坡度、地形起伏度与其他影响因子交互作用的 q 值均在0.321以上,高于其他指标间的交互作用,说明自然条件在“三生空间”结构及其功能耦合发展中起重要作用,尤其植被覆盖度的空间差异影响显著。社会经济因素与自然条件的交互作用多强于其内部的交互作用,突出表现在城镇化水平和常住人口密度与自然因子交互的协同增强作用影响了西安市“三生空间”功能水平的分异效果。常驻人口密度增大反映了人口规模与分布对生活 and 生产空间格局的影响,城镇化水平的提高反映了人们对生活空间需求的扩大和对生态空间的胁迫程度,可见自然条件和社会经济因素的组合对“三生空间”功能水平的分异具有更强的解释力。

4 讨论

1980—2015年,随着西部大开发和关中平原城市群城镇化快速发展,西安市土地利用发生快速变化,随之城市“三生空间”发生剧烈变化,土地利用变化与“三生空间”结构关系密切。北部平原区是生产和生活空间交互活跃的重要区域,表现出生活

表 3 各变量因子探测及其交互作用 q 值
Tab.3 The q value of factors detection and their interaction

因子	各变量因子交互作用 q 值													
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}
X_1	0.425													
X_2	0.450	0.275												
X_3	0.453	0.321	0.310											
X_4	0.449	0.346	0.373	0.188										
X_5	0.454	0.363	0.384	0.238	0.229									
X_6	0.442	0.341	0.367	0.222	0.232	0.180								
X_7	0.441	0.342	0.372	0.188	0.231	0.196	0.156							
X_8	0.455	0.362	0.384	0.238	0.237	0.239	0.230	0.228						
X_9	0.453	0.364	0.386	0.238	0.230	0.232	0.231	0.238	0.230					
X_{10}	0.454	0.349	0.369	0.241	0.230	0.232	0.231	0.240	0.231	0.200				
X_{11}	0.449	0.349	0.374	0.221	0.240	0.227	0.217	0.234	0.240	0.241	0.203			
X_{12}	0.438	0.332	0.361	0.208	0.231	0.184	0.184	0.230	0.232	0.231	0.225	0.163		
X_{13}	0.455	0.346	0.366	0.240	0.229	0.232	0.231	0.239	0.230	0.209	0.240	0.231	0.205	
X_{14}	0.453	0.350	0.371	0.241	0.235	0.237	0.237	0.239	0.237	0.225	0.241	0.241	0.223	0.206

注： X_1 为植被覆盖度， X_2 为坡度， X_3 为地形起伏度， X_4 为土地垦殖率， X_5 为交通用地密度， X_6 为离市中心距离， X_7 为经济密度， X_8 为城镇化水平， X_9 为常住人口密度， X_{10} 为科技投入水平， X_{11} 为地均固定资产投资， X_{12} 为每万人社会消费品额， X_{13} 为保护地面积占比， X_{14} 为累计造林面积。

空间扩大,以侵占生产空间和生态空间为代价。这与以往土地利用的研究中建设用地扩大,侵占大量耕地、林地的研究成果一致^[19-23]。南部秦岭生态空间是关中平原乃至影响全国生态安全格局的重要组成部分,相比较为稳定。本文依据斑块面积累加百分比曲线和斑块数量直方图确定“三生空间”的“保持”类型,较已有研究突出了“三生空间”的“缩减”和“扩展”变化,有助于清晰认识不同主体功能区“三生空间”竞合、冲突等相互作用关系。

“三生空间”功能组合与协调发展是西安市城市可持续发展的重要基础。以往研究多关注土地用途转变,对土地多功能性的深层次评价研究不足,造成大量生态和生产空间被蚕食。“三生空间”协同及其功能耦合的影响因子具有复杂的交互性,自然与社会经济的不同因子间交互程度和作用方向也存在差异。本文较前人所做的定性研究而言^[17, 25],从格网尺度量化了不同维度影响因子对“三生空间”功能水平分异的解释;明确了不同区域“三生空间”结构及其功能耦合受主体功能区规划定位影响,这与周鹏等^[17]人的研究发现类似。目前新一轮国土空间规划中“三区三线”划分工作正在开展,测度

“三生空间”功能水平及其分异的影响因素对城市国土空间开发保护新格局构建具有重要指导和实践意义。针对生活空间的无序扩张和生产生态空间的蚕食,应结合区域资源环境承载力严格控制平原区城市建设用地盲目扩张和城镇化规模,有序疏解人口,强化高效集聚,推动现代农业转型升级。城市南部秦岭山地应继续加强植被保护,进一步提升生态系统服务功能,严格控制生态空间向生产和生活空间转变。

现阶段,区域性的“三生空间”研究多集中于表层结构,注重“三生空间”利用类型、利用形式以及位置、面积、形状、相邻性、连通性等空间结构的刻画^[1, 17, 19, 25]。但不同时期遥感影像解译得到的土地利用数据往往存在误差,相同类型的土地其功能特性亦存在一定的差异,量化尺度也将受遥感解译分类精度和格网大小设置的影响。因此,如何精准对“三生空间”功能进行测度和深层结构评价仍然具有挑战。此外,对于“三生空间”福祉、公平、绿色、活力等方面的评价关注依然较少。如何立足于人地关系理论,更为准确地识别土地多功能的组合规律和形成的内在机理,寻求“三生空间”协同演进

的路径,为多尺度多科学的土地综合开发规划提供依据是今后努力的方向。

5 结论

本文利用 GIS 空间分析方法开展了西安市生产、生活和生态空间时空格局演化分析,在此基础上测度“三生空间”的功能水平,并利用地理探测器对“三生空间”功能水平分异的影响因素进行分析,主要结论如下:

(1)1980—2015 年,西安市的生产空间主要分布于关中平原,缩减明显,集中于雁塔区、未央区、西咸新区等地;生活空间集中于中心城区,散布于平原区,扩张明显的地区包括西咸新区、未央区、雁塔区、临潼区西部以及鄠邑区中部和北部等;生态空间较为稳定主要分布在西安市南部的秦岭山区。

(2)西安市“三生空间”功能指数变化与“山区—山麓—平原”主体功能开发力度相契合,在研究时间范围内功能指数整体有小幅下降,以秦岭北麓为界将西安市分为北部功能性水平低值区和南部功能性水平高值区,且位于平原区的西安市中心城区外围为功能指数负增长的明显集中区。

(3)各影响因素不同程度上解释了“三生空间”功能的水平分异,其中自然条件中植被覆盖度、地形起伏度和坡度因子是“三生空间”功能的基底条件,自然条件、区位条件、社会经济和区域政策因子之间的交互作用相比单因子影响力更加显著。

参考文献 (References)

- [1] 崔家兴,顾江,孙建伟,等. 湖北省三生空间格局演化特征分析[J]. 中国土地科学,2018, 32(8):67-73. [CUI Jiaxing, GU Jiang, SUN Jianwei, et al. The spatial pattern and evolution characteristics of the production, living and ecological space in Hubei province [J]. China Land Science, 2018, 32(8):67-73] DOI: 10.11994/zgtdkx.20180723.121720
- [2] 刘继来,刘彦随,李裕瑞. 中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J]. 地理学报,2017, 72(7):1290-1304. [LIU Jilai, LIU Yansui, LI Yurui. Classification evaluation and spatial-temporal analysis of “production-living-ecological” spaces in China [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7):1290-1304] DOI: 10.11821/dlxb201707013
- [3] 黄金川,林浩曦,漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展,2017, 36(3):378-391. [HUANG Jinchuan, LIN Haoxi, QI Xiaoxiao. A literature review on optimization of spatial development pattern based on ecological-production-living space [J]. Progress in Geography, 2017, 36(3):378-391] DOI: 10.18306/dlkxjz.2017.03014
- [4] 张红旗,许尔琪,朱会义. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. 资源科学,2015, 37(7):1332-1338. [ZHANG Hongqi, XU Erqi, ZHU Huiyi. An ecological-living-industrial land classification system and its spatial distribution in China [J]. Resources Science, 2015, 37(7):1332-1338]
- [5] 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[J]. 地理学报,2016, 71(1):49-65. [LI Guangdong, FANG Chuanglin. Quantitative function identification and analysis of urban ecological-production-living spaces [J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(1):49-65] DOI: 10.11821/dlxb201601004
- [6] 崔树强,朱佩娟,周国华,等. “三生”视角下的城市空间功能变化及调控路径——以长沙市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8):1733-1745. [CUI Shuqiang, ZHU Peijuan, ZHOU Guohua, et al. Urban spatial function change and regulation path from the perspective of “production-living-ecological”: Taking Changsha city as an example [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8):1733-1745] DOI: 10.11870/cjlyzyhj202008006
- [7] PARACCHINI M L, PACINI C, JONES M L M, et al. An aggregation framework to link indicators associated with multifunctional land use to the stakeholder evaluation of policy options [J]. Ecological Indicators, 2011, 11(1):71-80. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.04.006
- [8] LOVELL S T, DESANTIS S, NATHAN C A, et al. Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems [J]. Agricultural Systems, 2010, 103(5):327-341. DOI: 10.1016/j.agry.2010.03.003
- [9] NELSON E, MENDOZA G, REGETZ J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1):4-11. DOI: 10.1890/080023
- [10] GROOT R D. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multifunctional landscapes [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 75(3):175-186. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.02.016
- [11] 刘亦师. 带形城市规划思想及其全球传播、实践与影响[J]. 城市规划学刊,2020(5):109-118. [LIU Yishi. The formation, evolution and global dissemination of the linear city idea [J]. Urban Planning Forum, 2020(5):109-118] DOI: 10.16361/j.upf.202005014
- [12] 刘士林. 中国城市规划理念的反思和变革:超越“集中主义”与“分散主义”[J]. 同济大学学报(社会科学版),2020, 31(3):39-47. [LIU Shilin. A reflective study on the Chinese urban planning concept: Transcending “Centralism” and

- “Decentralism”[J]. Journal of Tongji University (Social Science Section), 2020, **31**(3):39–47]
- [13] YANG Xuedi, BAI Yongping, CHE Lei, et al. Incorporating ecological constraints into urban growth boundaries: A case study of ecologically fragile areas in the Upper Yellow River [J]. Ecological Indicators, 2021, **124**: 107436. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107436
- [14] BRYANT M M. Urban landscape conservation and the role of ecological greenways at local and metropolitan scales [J]. Landscape and Urban Planning, 2006, **76**:23–44. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2004.09.029
- [15] 段亚明, 许月卿, 黄安, 等. “生产-生活-生态”功能评价研究进展与展望[J]. 中国农业大学学报, 2021, **26**(2):113–124. [DUAN Yaming, XU Yueqing, HUANG An, et al. Progress and prospects of “production-living-ecological” functions evaluation [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, **26**(2):113–124] DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2021.02.14
- [16] 黄安, 许月卿, 卢龙辉, 等. “生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, **39**(3):503–518. [HUANG An, XU Yueqing, LU Longhui, et al. Research progress of the identification and optimization of production-living-ecological spaces [J]. Progress in Geography, 2020, **39**(3):503–518] DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.03.014
- [17] 周鹏, 邓伟, 张少尧, 等. 太行山区国土空间格局演变特征及其驱动力[J]. 山地学报, 2020, **38**(2):276–289. [ZHOU Peng, DENG Wei, ZHANG Shaoyao, et al. Evolution characteristics and its driving force of territory space pattern in the Taihang mountain, China [J]. Mountain Research, 2020, **38**(2):276–289] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000509
- [18] 江曼琦, 刘勇. “三生”空间内涵与空间范围的辨析[J]. 城市发展研究, 2020, **27**(4):43–48+61. [JIANG Manqi, LIU Yong. Discussion on the concept definition and spatial boundary classification of “production-living-ecological” space [J]. Urban Development Studies, 2020, **27**(4):43–48+61]
- [19] 李凤霞, 石辉, 冯晓刚, 等. 西安市土地利用格局动态演变及其驱动力研究[J]. 测绘通报, 2015(12):41–45+56. [LI Fengxia, SHI Hui, FENG Xiaogang, et al. Study of land use dynamic evolution and driving factors in Xi'an [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(12):41–45+56] DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2015.374
- [20] 马亚鑫, 丛辉, 周维博, 等. 西安市土地利用景观格局动态演变及驱动力分析[J]. 西北林学院学报, 2017, **32**(4):186–192. [MA Yaxin, CONG Hui, ZHOU Weibo, et al. Landscape pattern of land use dynamic development and driving force in Xi'an [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, **32**(4):186–192] DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2017.04.32
- [21] 王晓峰, 傅伯杰, 苏常红, 等. 西安市城乡建设用地时空扩展及驱动因素[J]. 生态学报, 2015, **35**(21):7139–7149. [WANG Xiaofeng, FU Bojie, SU Changhong, et al. Spatio-temporal characteristics and driving forces of built-up land in Xi'an, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(21):7139–7149] DOI: 10.5846/stxb201306281794
- [22] 葛媛媛, 韩磊, 赵永华, 等. 1984—2016年西安市城市扩张时空度量分析[J]. 生态学杂志, 2019, **38**(5):1491–1499. [GE Yuanyuan, HAN Lei, ZHAO Yonghua, et al. Spatiotemporal analysis of urban expansion in Xi'an from 1984 to 2016 [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019, **38**(5):1491–1499] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201905.036
- [23] 马新萍, 韩申山, 王磊, 等. 大西安地区土地利用类型时空演变分析[J]. 干旱区地理, 2020, **43**(2):499–507. [MA Xinping, HAN Shenshan, WANG Lei, et al. Spatial and temporal evolution of land use types in the greater Xi'an area [J]. Arid Land Geography, 2020, **43**(2):499–507] DOI: 10.12118/j.issn.1000-6060.2020.02.25
- [24] 陕西省统计局, 国家统计局陕西调查总队. 陕西统计年鉴—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019:5–45. [Shaanxi Provincial Bureau of Statistics, Survey Office of the National Bureau of Statistics in Shaanxi. Shaanxi statistical yearbook(2019) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2019:5–45]
- [25] 金星星, 陆玉麒, 林金煌, 等. 闽三角城市群生产-生活-生态时空格局演化与功能测度[J]. 生态学报, 2018, **38**(12):4286–4295. [JIN Xingxing, LU Yuqi, LIN Jinhua, et al. Research on the evolution of spatiotemporal patterns of production-living-ecological space in an urban agglomeration in the Fujian delta region, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(12):4286–4295] DOI: 10.5846/stxb201801310267
- [26] 江东, 林刚, 付晶莹. “三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析[J]. 自然资源学报, 2021, **36**(5):1085–1101. [JIANG Dong, LIN Gang, FU Jingying. Discussion on scientific foundation and approach for the overall optimization of “Production-Living-Ecological” space [J]. Journal of Natural Resources, 2021, **36**(5):1085–1101] DOI: 10.31497/zrzyxb.20210501
- [27] WANG Jinfeng, ZHANG Tonglin, FU Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. Ecological Indicators, 2016, **67**:250–256. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.02.052
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1):116–134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1):116–134] DOI: 10.11821/dlxb201701010
- [29] 孙丕苓, 许月卿, 刘庆果, 等. 张家口市土地利用多功能性动态变化及影响因素[J]. 中国农业资源与区划, 2018, **39**(8):65–74. [SUN Piling, XU Yueqing, LIU Qingguo, et al. Study on dynamic change of multi-functionality of land use and its driving factors in Zhangjiakou city [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, **39**(8):65–74] DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20180810
- [30] 刘纪远, 宁佳, 匡文慧, 等. 2010—2015年中国土地利用变化的时空格局与新特征[J]. 地理学报, 2018, **73**(5):789–802.

- [LIU Jiuyan, NING Jia, KUANG Wenhui, et al. Spatio-temporal patterns and characteristics of land-use change in China during 2010–2015 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(5):789–802] DOI: 10.11821/dlxb201805001
- [31] 王开泳. 城市生活空间研究述评[J]. *地理科学进展*, 2011, **30**(6):691–698. [WANG Kaiyong. Review and prospect of the researches on urban living space [J]. *Progress in Geography*, 2011, **30**(6):691–698] DOI: 10.11820/dlkxjz.2011.06.006
- [32] 秦艳丽, 时鹏, 何文虹, 等. 西安市城市化对景观格局及生态系统服务价值的影响[J]. *生态学报*, 2020, **40**(22):8239–8250. [QIN Yanli, SHI Peng, HE Wenhong, et al. Influence of urbanization on landscape pattern and ecosystem service value in Xi'an city [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(22):8239–8250] DOI: 10.5846/stxb201909282042

Evolution of Spatial-Temporal Pattern and Functional Measurement of “Production-Living-Ecological” Space in Xi'an, China

MA Qi, WANG Zirou, ZHAO Yonghong

(*School of Tourism & Research Institute of Human Geography, Xi'an International Studies University, Xi'an 710128, China*)

Abstract: Production-Living-Ecological Spaces (PLES) is of great significance for the strategy implementation of functional zones and a new pattern of territorial development and protection. In the past, most studies focused on the land-use transformation in PLES; However, the evolution and the functional differentiation of PLES in a long-term were neglected, making it difficult to fairly reveal the complexity of urban land function system in different temporal scale. In this study, Xi'an city of China was targeted as an case study, and the characteristics of the evolution of spatial-temporal patterns of PLES and the functional index (PLESI) were determined by GIS based on land-use data of six periods (i. e. , 1980, 1990, 2000, 2005, 2010 and 2015) obtained from remote sensing images of Landsat TM/ETM and Landsat 8. In addition, Geodetector was used to unravel the controlling factors of PLESI from four aspects including natural conditions, location conditions, social-economics and regional policies. The results are as follows: (1) During 1980–2015, huge changes of PLES in the plains of Xi'an were obviously, but it remained stable in the mountainous areas. The living-space showed a tendency of congregated expansion, whereas the production-spaces and the ecological-spaces were severely invaded and reduced. (2) Overall, changes of PLESI were in accordance with the developments of the main functional areas in the “mountain-piedmont-plain” region. There was negative growth in the periphery of the central urban area, while the PLESI was stable and with a high level at the Qinling Mountains. (3) The differentiation of the PLESI was caused by the combined effects which included natural conditions (e. g. , vegetation coverage, topographic relief, and slope) and social-economic conditions. The effects of interactions between multi-factors were more significant than single factor in the PLES. This study is advisable for the decision-making on optimization of PLES in different topographic and geomorphic areas of Xi'an, and is helpful to the construction of a new pattern of land space development and protection in this city.

Key words: Production-Living-Ecological Space; spatial-temporal pattern; functional index; Geodetector; Xi'an