

# 山西省“三生”功能协同/权衡关系分析

康庆<sup>1</sup>, 郭青霞<sup>1</sup>, 丁一<sup>1</sup>, 张扬<sup>2</sup>

(1. 山西农业大学资源环境学院, 晋中 030801; 2. 中国冶金地质总局第三地质勘察院, 太原 030000)

**摘要:** 为探究生产—生活—生态(“三生”)功能协调情况, 基于综合评价模型和力学平衡模型, 选用2005年、2010年和2018年土地利用类型和统计数据, 测度山西省“三生”功能时空演变及协同/权衡关系特征。结果表明: (1) 2005—2018年“三生”功能时空分异特征明显, 生产功能为下降态势, 呈现出“平原高, 山区低”的分布格局; 生活功能持续上升, 空间分布与生产功能相似; 生态功能呈上升状态, 但需注意恶化倾向, 空间格局稳定。(2) 研究期间, “三生”功能协同性显著提升且趋势合理, 空间分布与生产、生活功能趋同。(3) 依据“三生”功能协调度偏离情况, 划分功能主导区和提升区, 明确各县域功能特征。研究结果可为国土空间规划提供依据。

**关键词:** 土地利用; “三生”功能; 协同与权衡; 力学平衡模型; 山西省

国土空间是生产—生活—生态空间(简称“三生空间”)的统一体。长期以来, 经济生产导向的土地利用模式引发生产、生活和生态空间的冲突与混乱, 并随城镇化与工业化进程加快而加剧<sup>[1,2]</sup>。当前国土空间规划要求生态文明背景下社会经济的协调发展, 表现为“三生空间”的协调共存<sup>[3]</sup>。而“三生空间”实质是一种功能空间<sup>[4]</sup>, 因此识别功能变化与功能协同/权衡关系已成为区域协调发展的重要保障, 更是国土空间规划顺利开展的重要前提。

“三生”功能是指在自然禀赋和人类活动综合作用下, 土地所提供的产品和服务<sup>[5]</sup>。当前, 国内外学者对“三生”功能的研究主要集中在概念内涵界定<sup>[5,6]</sup>、分类体系和量化识别<sup>[7,8]</sup>、功能格局变化<sup>[7,9]</sup>与影响因素分析<sup>[10,11]</sup>等方面, 而对功能间相互关系量化研究较少<sup>[12,13]</sup>。功能相互关系指生产—生活—生态功能的平衡, “三生”平衡为功能协调最优与负效应最小<sup>[14]</sup>。但囿于“三生”功能的时空异质性, 难以达到平衡<sup>[15]</sup>, 只能表现为功能的协同/权衡关系<sup>[1,16]</sup>。协同是功能相互协作共同增益, 以功能融合反映“三生”功能协调有序; 而权衡为功能对立, 出现“三生”功能此消彼长的胁迫关系, 表现为空间冲突与竞争<sup>[15,17,18]</sup>。目前已有学者运用耦合协调度模型<sup>[10,18,19]</sup>、空间相关分析法<sup>[17]</sup>和Pearson参数相关分析<sup>[20]</sup>等方法探究了“三生”功能协同/权衡关系, 均取得丰富的成果。但耦合协调度模型虽然能够获取“三生”功能的协调度, 却未能对耦合特征进行具体分析。此外, 该模型在研究过程中存在原理、公式和结果解释等方面的混乱<sup>[17]</sup>, 相关分析的方法虽然避免了混乱问题, 但此类方法多是对功能间两两关系进行解析, 未能对“三生”功能系统耦合关系进行量化表达。不同强度的生产、生活和生态功能致使功能协同与权衡交替演变, 测量“三生”功能三者间的协调度, 确定功能协同/权衡的具体特征成为“三生”协调的关键。力学平衡模型在中国经济—社会—生态功能<sup>[1]</sup>和珠三角耕地多功能<sup>[21]</sup>关系的研

收稿日期: 2020-05-18; 修订日期: 2020-12-24

基金项目: 山西省软科学研究一般项目(2018041069-2)

作者简介: 康庆(1995-), 男, 山西五台人, 硕士, 主要从事土地利用与规划研究。E-mail: kq1301@163.com

通讯作者: 郭青霞(1969-), 女, 山西阳城人, 博士, 教授, 主要从事土地利用与规划及土地信息技术研究。

E-mail: gqx696@163.com

究中证明,与上述研究方法相比,能够在获取功能协调度的基础上,更直观地反映出功能协同/权衡关系特征,识别主导功能及“短板”功能,而且克服了研究过程中易出现的混乱问题。为此,本文尝试将力学平衡模型引入“三生”功能研究中,以山西省为研究区域,将“三生”功能评价指标体系与力学平衡模型相结合,构建功能协调性判别模型,旨在刻画2005—2018年山西省“三生”功能协调特征及发展态势,以期为“三生”功能关系研究提供一种新的思路和方法,也为土地利用分区优化、区域功能协调发展和国土空间规划提供参考和依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 分析框架

“三生”功能是评价土地利用变化的一种概念和方法,反映区域土地利用状态<sup>[18]</sup>,表现为土地提供的产品和服务。其中生产功能是指土地作为劳动对象或载体进行社会生产以获取产品和服务的功能<sup>[22]</sup>,是“三生”功能的物质基础,为生活质量提升和生态环境维护提供支持,但生产功能的强化同样挤压生态功能的发挥;生活功能是土地提供空间承载和物质保障的功能<sup>[5]</sup>,是生产和生态功能优化的目标,促进生产功能持续提高和生态功能不断改善,但生活功能的扩张也会挤占生产和生态功能空间;生态功能是土地为人类提供生态产品和服务并维持人类生存的自然条件<sup>[5,22]</sup>,是生产和生活功能实现的前提,其改善或恶化直接影响生产和生活功能的发展变化。“三生”功能相互依存不可替代,单一功能的发挥依赖于另外两种功能的作用,一项功能的滞后同样影响其余两种功能的发挥。只有“三生”功能相互适应、彼此匹配、共同作用才能使土地利用综合效益最大,任何一方的不合理增长都会影响“三生”功能的平衡与发展。

本质上,“三生”功能相互关系是一个受地域分异规律和社会经济发展综合影响的复杂动态变化过程<sup>[1]</sup>。区域自身因素是“三生”功能关系变化的先决条件,社会经济因素则是其外部驱动力。作为复杂动态系统,“三生”功能会随时间推移和社会经济发展变化不断进行自我调节,并表现出不同的协同/权衡特征。通过对这一特征的考量,可以有效识别不同阶段“三生”协调程度及主导和制约功能,进而为国土空间规划提供依据。

### 1.2 研究区概况

山西省位于34°34′~40°44′N、110°14′~114°33′E,土地总面积15.67万km<sup>2</sup>。东缘太行山脉连亘,西至吕梁山脉纵列,中部为谷地发育,形成“两山夹一川”的地形态势,其中山地丘陵占全省总面积的80.1%,平川河谷占总面积19.9%,地域特征明显。矿产资源特别是煤炭资源丰富。研究期间,受国家经济发展战略布局及产业政策的引导,山西省能矿产业发展迅速,凭借雄厚的煤炭资源,工业化进程较快,但生产方式单一,资源过度利用,城镇化落后于工业化,经济社会畸形发展,区域协调发展任务艰巨。近年来,煤炭市场低迷,山西省经济下滑,社会经济开始转型。作为我国首个全省域、全方位、系统性的资源型经济转型综合配套改革试验区,山西省需要在明确国土空间功能基础上,重新规划经济转型、城乡统筹和生态保护格局,重组“三生”发展秩序,增强功能协调。

### 1.3 数据来源及处理

本文所用的社会经济数据来源于2006年、2011年、2019年的《中国县域统计年鉴》和《山西省统计年鉴》;PM<sub>2.5</sub>浓度数据来自“加拿大达尔豪斯大学大气成分分析小组”2005年、2010年、2018年大气PM<sub>2.5</sub>遥感反演数据(V4.CH.02);土地相关数据引用自

“中国科学院资源环境科学数据中心”2005年、2010年、2018年山西省1 km×1 km栅格土地利用现状遥感监测数据。研究期间，山西省县城区划多次调整，为保证研究时间序列的可比性<sup>[23]</sup>，按2018年的行政区进行调整，此外为保持研究单元的完整性，将各地市的市辖区统一合并为单个研究单元，重新整理市辖区、县级市、县共计107个研究单元。

1.4 研究方法

1.4.1 “三生”功能评价指标体系构建

在明确“三生”功能内涵，解析“三生”功能相互关系的基础上，参考已有研究成果<sup>[24-26]</sup>，结合山西省实际，构建“三生”功能评价指标体系（表1）。山西省是典型的农业生产区又是全国首个省级经济转型综改示范区，面临产业结构优化升级、经济结构战略性调整、保障和改善民生、推进生态环境保护修复的重要任务。所以本文将生产功能划分为农业生产功能和经济发展功能，以粮食单产、土地垦殖率和农林牧渔业产值比例反映农业生产情况；以经济密度和产业结构反映经济结构调整和产业结构升级情况，为避免陷入资源优势陷阱，投资逐步成为山西省经济转型的重要驱动力，故而选取经济密度、产业结构、财政贡献率及固定资产投资总额共同表征经济发展功能。生活功能主要为承载和保障民生，承载表现为居住承载，以人口密度和建设用地比例反映承载力，城镇化反映居住承载下居民福祉水平<sup>[30]</sup>；保障是维持生活需求的基础，体现在就业、收入和医疗等方面，所以

表1 山西省“三生”功能指标体系  
Table 1 "Production-Living-Ecological" functional index system of Shanxi province

决策层	目标层与权重	因素层与权重	指标层与属性	单位	权重	
“三生” 综合功能	生产功能	农业生产功能 (0.347)	粮食单产 (+)	t/hm <sup>2</sup>	0.3103	
			土地垦殖率 (+)	%	0.2873	
			农林牧渔业产值比例 (+)	%	0.4022	
		经济发展功能 (0.653)	经济密度 (+)	亿元/km <sup>2</sup>	0.3146	
			产业结构 (+)	亿元/km <sup>2</sup>	0.0702	
			财政贡献率 (+)	亿元/km <sup>2</sup>	0.2994	
	生活功能	固定资产投资总额 (+)	固定投资总额 (+)	亿元	0.3156	
			从业人口密度 (+)	人/km <sup>2</sup>	1.0000	
			人口密度 (+)	人/km <sup>2</sup>	0.4148	
			建设用地比例 (+)	%	0.3484	
		城镇化水平 (+)	城镇化水平 (+)	%	0.2367	
			社会保障功能 (0.440)	农民人均纯收入 (+)	元	0.4454
				城乡居民收入平衡指数 (-)	%	0.1503
			万人拥有卫生机构床位数 (+)	张/万人	0.4068	
	生态功能	生态维持功能 (0.369)	森林覆盖率 (+)	%	0.3541	
			生态服务价值总量 (+)	亿元	0.3474	
			生物丰度指数 (+)	—	0.2985	
		环境净化功能 (0.331)	农药化肥投入强度 (-)	kg/hm <sup>2</sup>	0.4761	
			PM <sub>2.5</sub> 年均浓度 (-)	ug/m <sup>3</sup>	0.5239	
		资源供给功能 (0.300)	人均耕地面积 (+)	hm <sup>2</sup> /人	0.4135	
			人均禽畜产品占有量 (+)	kg/人	0.5864	

注：“+”表示正向指标，“-”表示负向指标；生物丰度指数=Abio×(0.35×林地+0.21×草地+0.28×水域湿地+0.11×耕地+0.04×建设用地+0.01×未利用地)/区域土地总面积<sup>[27]</sup>。生态服务价值总量依据价值当量法计算而出<sup>[28,29]</sup>。

选取从业人口密度表征就业支持功能,选取农民人均纯收入、城乡居民收入平衡指数、万人拥有卫生机构床位数表示社会保障功能。生态环境保护修复背景下生态功能涉及生态维持、环境净化和资源供给等具体功能。森林覆盖率是坚守生态底线的基本指标,生态系统服务价值是量化生态环境,进行生态环境综合补偿的参考指标,生物丰度指数是评价生物多样性,维持生态平衡的重要指标,三者共同反映生态维持功能;考虑到山西省工业导向战略、城镇化提升情况及农业生产现状,本文选取 $PM_{2.5}$ 年均浓度和农药化肥投入强度表征环境净化功能;依据人均耕地面积和人均禽畜产品占有量间接反映资源供给功能。上述指标相互配合,与功能具有关联性,以不同影响程度表征“三生”功能。为消除数据量纲的影响,本文采用极值法对数据进行标准化处理。权重作为指标间的重要性分析,是功能测定的关键,采用主客观相结合的方法,因素层采用德尔斐法,指标层为熵权法(表1)。

#### 1.4.2 综合评价模型

目标层和因素层运用多目标加权求和模型测算土地生产、生活和生态功能值,计算公式如下:

$$F_i = \sum W_j X_{ij} \quad (1)$$

式中:  $F_i$ 表示评价单元*i*的功能值;  $W_j$ 表示第*j*项指标的权重;  $X_{ij}$ 表示*i*单元第*j*项指标的标准化值。

#### 1.4.3 “三生”功能协同/权衡关系

“三生”功能是不同的用地主体利用土地的功能表现,功能之间存在相互作用的共生关系<sup>[10]</sup>。国土空间规划关键在于“三生”功能系统是否协调发展。已有研究表明,力学平衡模型可用于测度系统内部子系统之间的协调关系,该模型以笛卡尔坐标系三个不同方向的矢量力代表不同子系统,以矢量力的合力及合力所在象限客观反映出多个方向力作用下系统的状态和特征,动态识别系统协调程度及匹配问题,以便制定差异化调控措施<sup>[21]</sup>。本文借助力学平衡模型构建“三生”功能协调性判别模型,将生产、生活和生态功能抽象为三个不同方向的矢量力,如果三个作用力全部达到预期目标,则合力为0,即表明“三生”功能均衡发展,此时,合力作用点可以称为均衡点,即图中O点;反之作用合力使得F偏离均衡点O,表明“三生”功能处于失衡状态,因此根据作用合力F的大小和偏离角度 $\theta$ ,可以研究“三生”功能的协调关系特征(概念模型如图1所示)。图中:OA、OB、OC分别表示生产、生活、生态功能值。可用极坐标( $F, \theta$ )来理解“三生”功能的协调状态,F为极径,表示协调度,其值越大说明“三生”功能协调性越差;极角 $\theta$ 表示合力与三个力之间的关系,反映功能协调性的具体特征。为了更容易地解释模型,将OA、OB、OC的方向角分别定义为 $\pi/2$ 、 $7\pi/6$ 、 $11\pi/6$ 。

在合力的计算过程中,首先计算OA和OB的合力,即 $F_1$ ,然后以相同的方式计算 $F_1$ 和OC的合力F,参考已有研究<sup>[1]</sup>,计算公式如下:

$$F_1 = \sqrt{OA^2 + OB^2 + 2 \times OA \times OB \times \cos(\angle XOA - \angle XOB)} \quad (2)$$

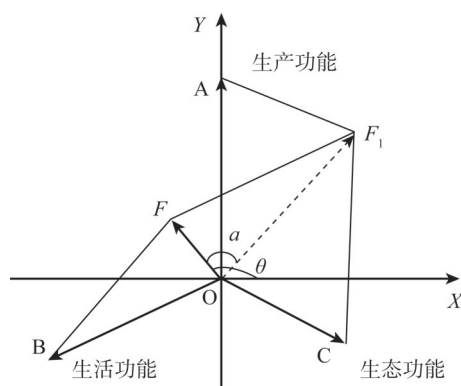


图1 “三生”功能偏离度概念模型

Fig. 1 The conceptual model of "Production-Living-Ecological" functions deviation level



$$\alpha = \arcsin \frac{\text{abs}OB \times \sin(\angle XOA - \text{abs}\angle XOC)}{F_1}$$

(3)

$$F = \sqrt{F_1^2 + OC^2 + \text{abs}(2 \times F_1 \times OC) \times \cos(\angle XOA - \alpha - \text{abs}\angle XOC)}$$

(4)

$$\angle FOB = \arcsin \frac{F_1 \times \sin(\angle XOA - \alpha - \text{abs}\angle XOC)}{F}$$

(5)

$$\theta = \angle XO B - \angle FO B$$

(6)

反向延长OA、OB、OC将合力空间划分为6个象限（图2），根据“三生”功能间矢量正负关系相互组合情况，形成各象限矢量特征表（表2），衡量评价单元合力所在象限和矢量方向即θ角所在范围，识别“三生”功能关系变化规律。

2 结果分析

2.1 单要素功能特征

运用综合评价模型，测度2005—2018年山西省县域“三生”功能值，结合已有研究<sup>[10]</sup>，利用几何间隔法将功能值由小到大划分为6个等级。

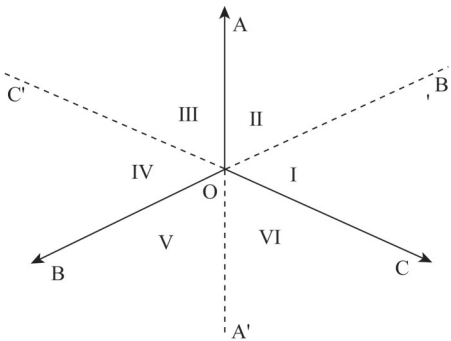


图2 合力偏度象限

Fig. 2 The quadrant of composition of forces

表2 “三生”功能偏离度动力状态划分及其特征

Table 2 Dynamic deviation state and its characteristics of "Production-Living-Ecological" functions

象限	角度范围	矢量动力状态			特征状态描述
		生产	生活	生态	
I	$[11\pi/6, 2\pi] \cup [0, \pi/6)$	—	—	+	生态功能正向，符合既定目标；生活功能逆向，低于既定目标；生产功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中
II	$[\pi/6, \pi/2)$	+	—	—	生产功能正向，符合既定目标；生活功能逆向，低于既定目标；生态功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中
III	$[\pi/2, 5\pi/6)$	+	—	—	生产功能正向，符合既定目标；生态功能逆向，低于既定目标；生活功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中
IV	$[5\pi/6, 7\pi/6)$	—	+	—	生活功能正向，符合既定目标；生态功能逆向，低于既定目标；生产功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中
V	$[7\pi/6, 3\pi/2)$	—	+	—	生活功能正向，符合既定目标；生产功能逆向，低于既定目标；生态功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中
VI	$[3\pi/2, 11\pi/6)$	—	—	+	生态功能正向，符合既定目标；生产功能逆向，低于既定目标；生活功能无论是否符合既定目标均可能出现在这个象限中

2.1.1 生产功能时空分异特征

空间分布上，2005—2018年生产功能呈现以市辖区为高值中心、向外梯度递减的圈层/半圈层分布格局（图3）。2005年山西省除晋北地区外，其他区域已形成中心—外围的生产功能优势区，这些区域地处平原河谷，水热充足，农业生产条件优越，同时交通便利，基础设施聚集，产业基础良好，人口分布集中，是山西省经济社会发展的增长极。2010年在煤炭产业的带动下，晋北煤炭县市发展迅速，形成以大同和朔州为核心的生产功能优势区。2018年煤炭市场低迷，经济社会逐步转型，生产功能有所下降，优势区出现缩减，晋东南地区最为明显，大同市成功转向旅游城市，维持了晋北功能优势区。生产功能劣势区多位于山地丘陵区，受自然条件影响，农业生产条件差、产业基础薄弱、基础设施不足，

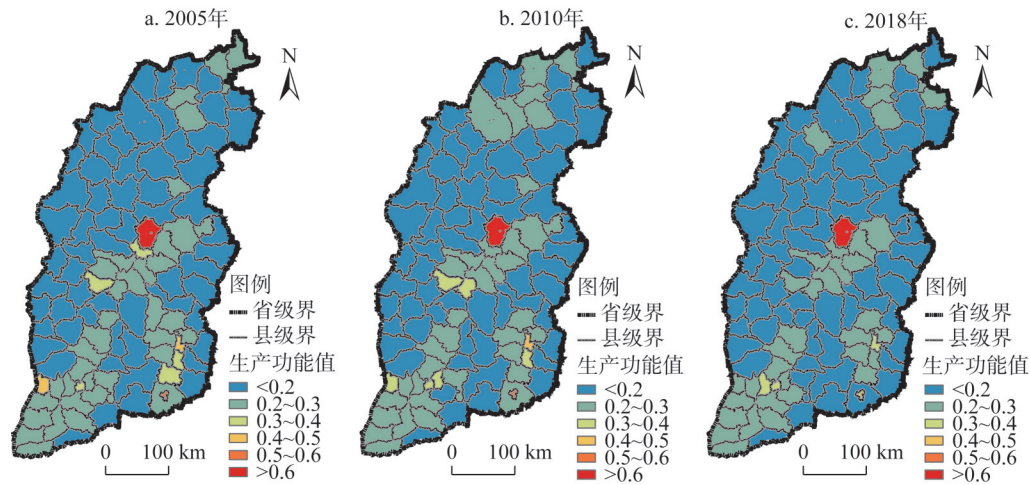


图3 山西省生产功能值时空差异

Fig. 3 Spatio-temporal characteristics of production function in Shanxi province

缺乏经济社会拉动点，是贫困县的主要分布区。

数量上（表3），2005—2018年生产功能均值和中位值先上升后下降，表明生产功能波动变化，这也与其空间分布变化趋同。全距和标准差下降，表明生产功能趋于合理，经济社会转型效果彰显。需要注意的是，多数县域处在低值区，生产功能亟需提升。

表3 2005—2018年山西省生产功能值统计

Table 3 Statistics on the value of production function in Shanxi province from 2005 to 2018

年份	生产功能值特征				各类型区的县域数量/个					
	均值	中位值	全距	标准差	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6
2005	0.197	0.172	0.618	0.095	59	38	6	2	1	1
2010	0.199	0.182	0.617	0.095	60	37	7	1	1	1
2018	0.191	0.181	0.602	0.083	63	37	5	1	0	1

2.1.2 生活功能时空分异特征

空间分布上，2005—2018年生活功能初始值低，功能提升明显，空间分布与生产功能存在重叠（图4）。2005年，生活功能优势区为部分市辖区及周边少量县市，这源于市辖区生活条件优越，就业机会多，服务设施完善，综合承载水平高，对居住承载、就业支持和社会服务等都有所保障。2010年，在城市的辐射带动下，优势区扩展，呈现与生产功能类似的核心—外围逐步衰减式分布，并与生产功能优势区重叠。2018年，空间重叠加剧，生活功能优势区以市辖区为核心点，以山西河谷平原地带为轴，出现条带状规模集聚。生活功能劣势区同样位于山地丘陵区，与生产功能劣势区趋同。

数量上（表4），2005—2018年生活功能提升明显，均值和中位值都有较高的提升；全距和标准差同样存在提升，表明生活功能提升中存在不合理，而且多数县域仍处于低值区，还需继续提高生活功能水平。

2.1.3 生态功能时空分异特征

空间分布上，2005—2018年生态功能呈先扩展后缩减的动态变化，但变化并不明显，分布格局相对稳定，表现为“东西高中部低”的格局状态，这与山西省自然条件特别是地形有较大的关系，同时也与区域生产、生活功能状况存在相关联系（图5）。生态

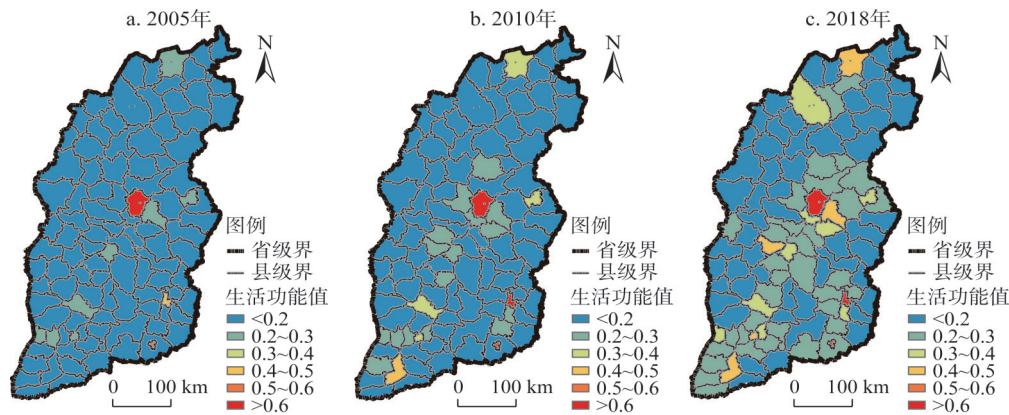


图4 山西省生活功能值时空差异

Fig. 4 Spatio-temporal characteristics of living function in Shanxi province

表4 2005—2018年山西省生活功能值统计

年份	生活功能值特征				各类型区的县域数量/个					
	均值	中位值	全距	标准差	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6
2005	0.127	0.105	0.563	0.087	95	8	0	1	1	1
2010	0.165	0.130	0.702	0.114	83	16	4	1	0	3
2018	0.227	0.195	0.621	0.114	55	35	9	5	0	3

功能优势区主要分布于太行、太岳和吕梁等山地丘陵区沿线，这些区域森林和草地覆盖率较高，生物多样性丰富，生产和生活功能值相对较低，对生态环境压力小。生态功能劣势区分布于以市辖区为核心的平原河谷区，生产和生活空间对生态空间的挤压和占用强度高，环境污染严重，生态承载力降低。

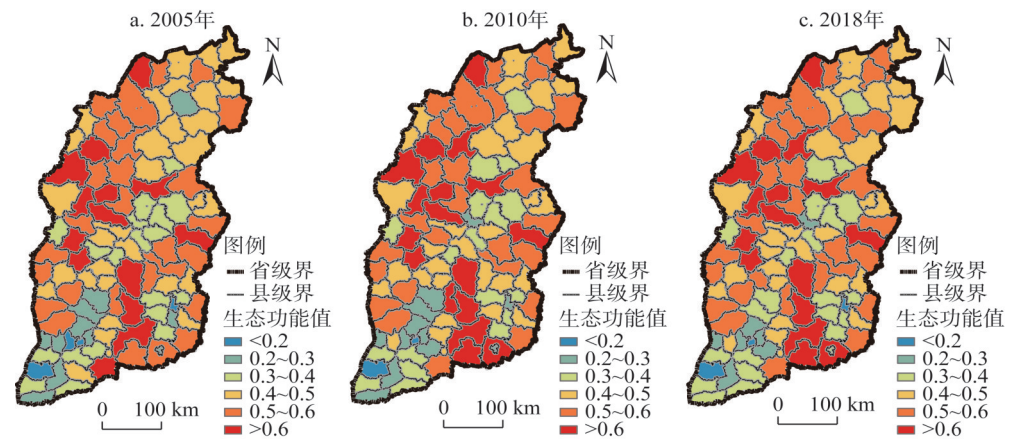


图5 山西省生态功能值时空差异

Fig. 5 Spatio-temporal characteristics of ecological function in Shanxi province

数量上（表5），2005—2018年生态功能均值呈微弱上升，中位值先上升后下降，表明以2010年为分割时点，生态功能波动变化。2005—2010年生态功能上升，源于该时间段生活功能提升幅度小，对生态功能的挤压程度低，生产功能虽有较高提升，但受煤炭产



表5 2005—2018年山西省生态功能值统计

Table 5 Statistics on the value of ecological function in Shanxi province from 2005 to 2018

年份	生态功能值特征				各类型区的县域数量/个					
	均值	中位值	全距	标准差	<0.2	0.2~0.3	0.3~0.4	0.4~0.5	0.5~0.6	>0.6
2005	0.427	0.430	0.713	0.146	8	11	24	24	30	10
2010	0.430	0.448	0.663	0.141	8	12	22	24	29	12
2018	0.430	0.440	0.683	0.142	8	13	21	24	29	12

业“点上开发，面上保护”模式的引导，加之产业集聚，对生态功能的影响存在控制。2010—2018年，经济社会转型，非煤产业扩张，各市县纷纷筹建和升级开发区，挤占生态用地，同时生活水平大幅度提升，生态环境压力加大，生态功能下降。研究期间，生态功能全距和标准差先下降后上升总体下降，表明生态功能变动总体合理却存在恶化倾向。

2.2 “三生”功能协同/权衡特征

2.2.1 “三生”功能协调性时空分异特征

根据式（2）~式（4）计算各县域合力 $F$ ，测度“三生”功能协调性。利用自然断点法将“三生”功能协调性划分为高度协调（ $<0.201$ ）、基本协调（ $0.201\sim0.341$ ）、过度类型（ $0.342\sim0.471$ ）和失调类型（ $>0.471$ ）四类，其中协同包括高度协调和基本协调，权衡包括过度类型和失调类型。

空间上山西省“三生”功能协调性分布格局较为稳定（图6）。协同区域主要位于中部平原河谷地带，该区多数县域随工业化和城市化的发展，生产和生活功能值提升，同时其生态压力未临界生态承载值，三者协同性较强。权衡区域多位于山脉丘陵区，受制于自然和社会经济条件，该区县域生产和生活功能提升有限，出现生态功能高于生产、生活功能的权衡状态。部分县市如太原、长治、侯马和大同等，生产和生活功能提升快，生态环境却未得到相应保护，致使生产和生活功能超越生态功能，同样处于权衡状态。总体而言，2005—2018年协同/权衡状况有所改善，主要是协同县域的扩张，逐渐在晋中、晋南和晋东南区域规模集聚，晋北虽未出现集聚，但协同情况改善，表现为基本协调向高度协调和过度类型向基本协调的转变。

数量上（表6），2005—2018年协调度均值持续下降，中位值总体下降，协调性提

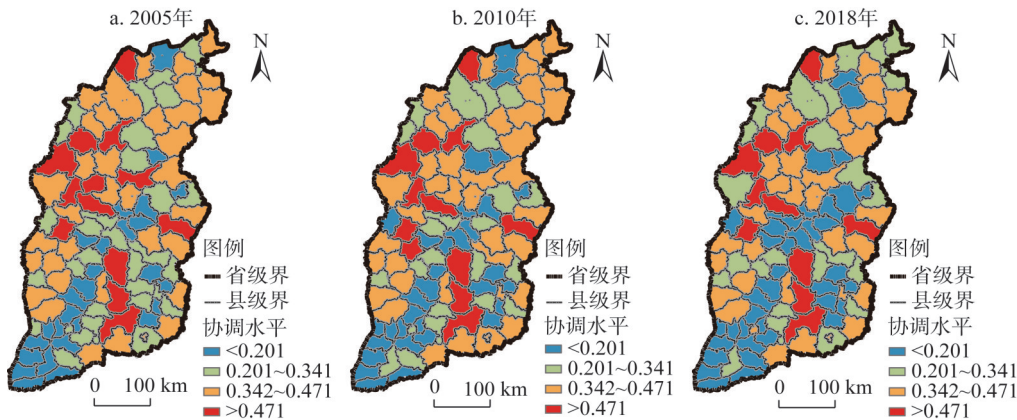


图6 2005—2018年山西省“三生”功能协调度空间格局

Fig. 6 The spatial pattern of coordination degree of "Production-Living-Ecological" functions in Shanxi from 2005 to 2018



升。全距和标准差年际变化中存在下降趋势，协调性变化逐步转向合理。二者综合表明山西省“三生”功能协调情况改善，社会经济转型逐见成效。

表6 2005—2018年山西省“三生”功能协调情况统计

年份	合力值 <i>F</i> 特征				各类型区的县域数量/个			
	均值	中位值	全距	标准差	协同		权衡	
					高度协调	基本协调	过度类型	失调类型
2005	0.316	0.320	0.624	0.145	27	31	36	13
2010	0.305	0.335	0.556	0.151	32	23	40	12
2018	0.286	0.319	0.581	0.144	38	24	34	11

2.2.2 山西省“三生”主导功能分布特征

通过力学平衡模型计算得偏离角 $\theta$ ，以偏离角所在象限分析功能偏离特征，如图7， $\theta$ 角在6个象限均有分布。

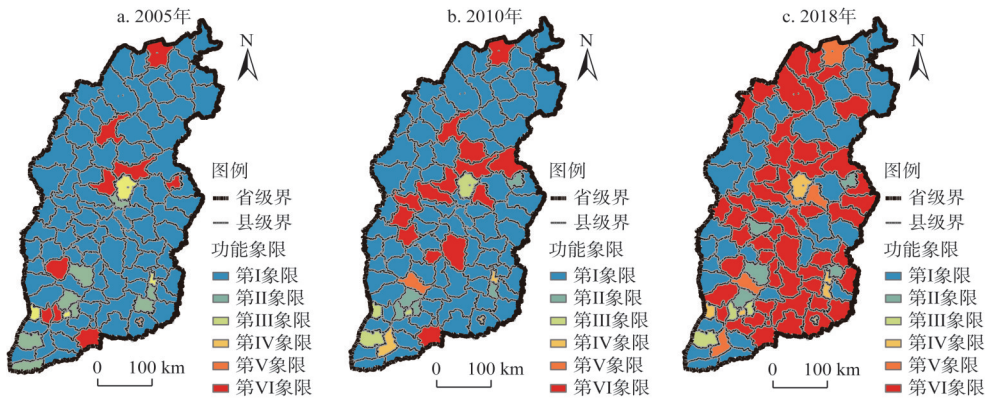


图7 2005—2018年山西省“三生”功能偏差分析结果

Fig. 7 Results of deviation analyses of "Production-Living-Ecological" functions in Shanxi from 2005 to 2018

第I和第VI象限是生态功能主导区，区域社会经济发展滞后，生态功能相对突出。2005—2018年山西省生态功能整体高于生产和生活功能，多数县域为生态功能主导区。2005年山西省80%的县市处于第I象限，这些县域生态功能值高而生活功能值低。到2018年，第I象限县市由80%下降为34%，第VI象限县市数量由6.5%上升至52%，生活功能因城市化进程而快速提升，使部分县域从第I象限转向第VI象限。

第II和第III象限为生产功能主导区，生产功能高于生态和生活功能。该区地处平原河谷，建设用地挤占生态用地，生态功能值相对较低。2005年第II象限县域为市辖区周边县市，数量较少，因其靠近市辖区，在市辖区经济发展的带动下，生产功能高，但城镇化水平落后，生活功能薄弱，高生产功能与低生活、生态水平使其位于第II象限；2018年，第II象限县域数量减少，源于2010年后山西省生产功能下降，生活功能提升；2005年第III象限县市主要有太原、长治、河津和新绛等，这些县市经济发展较快，生产功能高，环境压力相对较大，生态功能值较低。2018年除新绛县外，其余县市皆随生活功能的提升，由第III象限转为第IV象限。

第IV和第V象限代表生活功能主导区，生活功能抵消了生产和生态功能的影响。该

区同样地处平原河谷,生态功能值相对较低。2005年第IV象限县市仅为晋城市,其余县市生活功能值均低。2018年第IV象限县市增多,部分市辖区和经济社会水平较高的县市,如河津和侯马等由第II、III象限转为第IV象限,这些县市生活功能提升明显而生产功能提升缓慢甚至下降,加之生态功能薄弱,使其落在生活功能主导区;第V象限表示生活功能正向、生产功能逆向,主要涵盖生活功能高、但生产功能相对薄弱的部分市辖区。

### 2.2.3 山西省“三生”制约功能分布特征

研究表明,山西省生产功能亟待加强,生活功能亟需提升,生态功能需要保护和改善,但生产和生活功能劣势区存在空间重叠,难以确定功能优先提升顺序。为此,本文依据偏离角 $\theta$ ,识别“三生”制约功能,提出“三生”功能所需提升区(图8)。生态功能所需提升区主要涵盖部分市辖区及周边少量县市,这些县市经济基础好、发展态势乐观、社会服务设施集聚和承载人口多,生态压力大。生产功能所需提升区在晋北以市辖区为核心呈中心—外围集聚,在晋中、晋南和晋东南多数为农业主产区县市,这些县市以农业生产为主,且在转型初期,生产功能相对较低。生活功能所需提升区包括太行山脉中部和北部、吕梁山和中条山沿线区域,受自然条件限制,社会服务供给不足,生活功能水平低。

## 3 结论与讨论

### 3.1 结论

本文运用综合评价模型和力学平衡模型对山西省“三生”功能时空分异特征进行诊断,对“三生”功能协同/权衡关系特征进行解析,得到以下结论:

(1) 山西省“三生”功能时空分异特征明显。生产功能空间分布受自然条件影响,平原河谷区功能值相对高于山地丘陵区,整体功能先上升后下降波动变化,但结构趋于合理,总体而言,生产功能有待提升。生活功能提升明显,空间分布在自然和社会经济综合作用下,与生产功能趋同,其功能同样需要满足更高质量的需求。生态功能亦为先上升后下降的波动状态,结构趋势虽较为合理,却有恶化倾向,需要进行保护和改善,空间分布相对稳定,呈现出“东西高、中间低”的分布格局。

(2) 山西省“三生”功能总体协同性显著提高,结构逐步转向合理,但区域差异明显,协同区域的空间分布与生产和生活功能优势区存在空间重叠,表现为在河谷平原地带,形成中心—外围结构的集聚。权衡区域位于山地丘陵区,同样与生产和生活功能劣势区出现重叠。

(3) 山西省绝大多数县域为生态功能主导县域,但生态功能主导下的具体类型发生变化,随生活功能的提升,多数县域从第I象限转为第VI象限。此外山西省多数市辖区或社会经济发展较快的县市,凭借其不断提升的生活功能,完成了生产功能主导向生活功能主导的转变,但缺乏生态保护,所以未来在提升生产功能、满足生活功能的同时,还需加强对生态功能的维护,促进“三生”功能高质量协调。

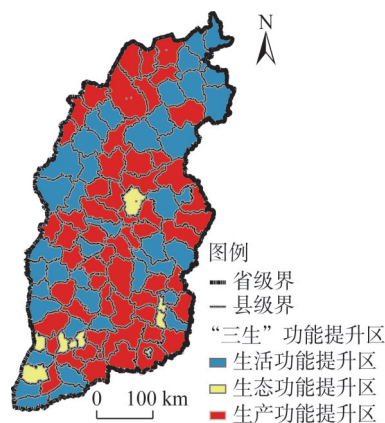


图8 2018年山西省“三生”功能所需提升区

Fig. 8 Zone for improvement of "Production-Living-Ecological" functions in Shanxi in 2018

(4) 根据县域“短板”功能,将其划分为三种类型:生态、生产和生活功能所需提升区,各县域以所处类型区为依据,合理确定优先提升功能,补全“短板”,缓解功能权衡,提升功能协同。

### 3.2 讨论

探究“三生”功能协调/权衡关系是山西省实现“三生”功能协调、合理进行国土空间规划的重要方法和途径。本文在计算2005年、2010年、2018年山西省“三生”功能值、揭示其时空分异规律的基础上,运用力学平衡模型测算了“三生”功能协调程度,为功能耦合度测算提供了一种新的方法和思路,并划分出不同的功能主导区和提升区,探讨了因空间重叠而模糊功能提升顺序的问题,对其他地区合理利用国土空间具有一定的参考价值。

研究表明,山西省“三生”功能协同/权衡关系时空分异特征明显,受地域分异规律与经济社会发展阶段影响,“三生”功能权衡—协同—权衡交替并存,体现出不同的权衡类型,这也与李欣等<sup>[7]</sup>的研究结论一致。首先是生态功能高于生产和生活功能的初级权衡,但这种权衡并非是不合理的,因为该权衡区域为山西省提供生态维护的原始功能,是山西省的生态功能区,加强生态功能为其首要任务,生产和生活的提升则要与地形、气候与资源等生态条件相适应,协同生态补偿机制,推动绿色发展。随着城市化进程推进,生产和生活功能提升,“三生”功能转向协同,但若在提升过程中未能保护生态环境,则出现生产和生活功能超越生态功能的高阶段权衡,所以在未来发展过程中要调整功能演化方向,转变只追求生产和生活功能的导向,调整产业结构,推动社会经济转型发展,严格控制生产和生活空间挤占生态空间,在集聚的城市之间布置生态廊道,提高生态安全,维护生态功能。

本文通过剖析山西省“三生”功能时空分异特征、协调性及功能分区情况,为合理进行土地利用与科学编制国土空间规划提供了依据,但是由于数据收集和量化方法的局限,指标之间复杂关系还有待进一步研究。此外,本文旨在为县域空间规划提供参考,是一种中观尺度上的指导,缺乏与微观地块的联系,所以在未来的研究中,需要对空间尺度进行细化,以解决土地利用实践中出现的具体问题。

### 参考文献(References):

- [1] ZHANG Y N, LONG H L, TU S S, et al. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: Implications for sustainable land management. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 1100-1114.
- [2] KAREN S C, GOLDENJAY S, MARINA A, et al. Sustainability in an urbanizing planet. *PNAS*, 2017, 114(34): 5242-5247.
- [3] 孟鹏,王庆日,郎海鸥,等.空间治理现代化下中国国土空间规划面临的挑战与改革导向:基于国土空间治理重点问题系列研讨的思考. *中国土地科学*, 2019, 33(11): 8-14. [MENG P, WANG Q R, LANG H O, et al. Analysis of the challenges and reform orientation of territorial spatial planning system in china under the background of spatial governance system modernization: Reviews from the serial research of territorial spatial governance. *China Land Science*, 2019, 33(11): 8-14.]
- [4] 崔家兴,顾江,孙建伟,等.湖北省三生空间格局演化特征分析. *中国土地科学*, 2018, 32(8): 67-73. [CUI J X, GU J, SUN J W, et al. The spatial pattern and evolution characteristics of the Production-Living-Ecological space in Hubei province. *China Land Science*, 2018, 32(8): 67-73.]
- [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. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65. [LI G D, FANG C L. quantitative function identification and analysis of urban Ecological-Production-Living spaces. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 49-65.]
- [6] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化. *地理研究*, 2018, 37(6): 1100-1114. [WANG C, TANG N. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural Production-Living-Ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality. *Geographical Research*, 2018, 37(6): 1100-1114.]

- [7] 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. 地理学报, 2017, 72(7): 1290-1304. [LIU J L, LIU Y S, LI Y R. classification evaluation and spatial-temporal analysis of "Production-Living-Ecological" spaces in China. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1290-1304.]
- [8] XIE G D, ZHEN L, ZHANG C X, et al. Assessing the multifunctionalities of land use in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(4): 311-318.
- [9] 李伯华, 曾灿, 窦银娣, 等. 基于“三生”空间的传统村落人居环境演变及驱动机制: 以湖南江永县兰溪村为例. 地理科学进展, 2018, 37(5): 677-687. [LI B H, ZENG C, DOU Y T, et al. Change of human settlement environment and driving mechanism intraditional villages based on Living-Production-Ecological space: A case study of Lanxi village, Ji-angyong county, Hunan province. *Progress in Geography*, 2018, 37(5): 677-687.]
- [10] 张路路, 郑新奇, 孟超, 等. 湖南省土地多功能耦合协调度时空分异. 中国土地科学, 2019, 33(3): 85-94. [ZHANG L L, ZHENG X Q, MENG C, et al. Spatio-temporal difference of coupling coordination degree of land use functions in Hunan province. *China Land Science*, 2019, 33(3): 85-94.]
- [11] 王嘉妮, 陈海, 史琴琴, 等. 陕西省县域土地利用多功能性时空分异及影响因素研究. 中国农业资源与区划, 2019, 40(5): 101-108. [WANG J N, CHEN H, SHI Q Q, et al. Research on spattemporal differentiation and influencing factors of land use multi-functional areas of Shaanxi province. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(5): 101-108.]
- [12] RAUDSEPPHEARNE C, PETERSON G D, BENNETT E M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *PNAS*, 2010, 107(11): 5242-5247.
- [13] PENG J, CHEN X, LIU Y X, et al. spatial identification of multifunctional landscapes and associated influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China. *Applied Geography*, 2016, 74: 170-181.
- [14] 王明, 周忠学, 冯海建. 西安都市圈都市农业多功能协调性研究. 干旱区地理, 2015, 38(4): 858-866. [WANG M, ZHOU Z X, FENG H J. coordinated development of urban agricultural multi-functionality of Xi'an Metropolitan Zone. *Arid Land Geography*, 2015, 38(4): 858-866.]
- [15] JIA X Q, FU B J, FENG X M, et al. The tradeoff and synergy between ecosystem services in the grain-for-green areas in Northern Shaanxi, China. *Ecological Indicators*, 2014, 43: 103-113.
- [16] LIU C, XU Y Q, HUANG A, et al. Spatial identification of land use multifunctionality at grid scale in farming-pastoral area: A case study of Zhangjiakou city, China. *Habitat International*, 2018, 76: 48-61.
- [17] 李欣, 方斌, 殷如梦, 等. 江苏省县域“三生”功能时空变化及协同/权衡关系. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2363-2377. [LI X, FANG B, YIN R M, et al. Spatial-temporal change and collaboration/trade-off relationship of "Production-Living-Ecological" functions in county area of Jiangsu province. *Journal of Natural Resources*, 2019, 34(11): 2363-2377.]
- [18] ZHOU D, XU J C, ZHU L L. Conflict coordination? Assessing land use multi-functionalization using production-living-ecology analysis. *Science of the Total Environment*, 2017, 577: 136-147.
- [19] 刘鹏, 陈荣蓉, 杨朝现, 等. 基于“三生空间”协调的农村居民点布局优化研究. 水土保持研究, 2017, 24(2): 283-288. [LIU P, CHEN R R, YANG C X, et al. Study on layout optimization of rural settlements based on coordination of Production-Living-Ecological space. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 283-288.]
- [20] FAN Y T, JIN X B, GAN L, et al. spatial identification and dynamic analysis of land use functions reveals distinct zones of multiple functions in Eastern China. *Science of the Total Environment*, 2018, 642: 33-44.
- [21] 余富祥, 胡月明, 刘振杰, 等. 基于力学平衡模型的耕地多功能演变及其协调性分析: 以珠江三角洲为例. 农业资源与环境学报, 2019, 36(6): 728-737. [YU F X, HU Y M, LIU Z J, et al. The coordination and evolution of farmland multifunctionality based on a mechanical model: A case study of the Pearl River Delta. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(6): 728-737.]
- [22] 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. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391. [HUANG J C, LIN H X, QI X X. A literature review on optimization of spatial development pattern based on Ecological-Production-Living space. *Progress in Geography*, 2017, 36(3): 378-391.]
- [23] 刘盛和, 张擎. 杭州市半城市化地区空间分布变化. 地理研究, 2008, 27(5): 982-992. [LIU S H, ZHANG Q. the change of spatial distribution of peri-urbanization areas in Hangzhou Municipality. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 982-992.]
- [24] 刘彦随, 刘玉, 陈玉福. 中国地域多功能性评价及其决策机制. 地理学报, 2011, 66(10): 1379-1389. [LIU Y S, LIU Y, CHEN Y F. territorial multi-functionality evaluation and decision-making mechanism at county scale in China. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(10): 1379-1389.]
- [25] 单薇, 金晓斌, 冉娜, 等. 江苏省土地利用“生产—生活—生态”功能变化与耦合特征分析. 长江流域资源与环境,



- 2019, 28(7): 1541-1551. [SHAN W, JIN X B, RANG N, et al. "Production-Living-Ecological" function evaluation and coupling coordination analysis of land use in Jiangsu province. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(7): 1541-1551.]
- [26] 杜国明, 孙晓兵, 王介勇. 东北地区土地利用多功能性演化的时空格局. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 232-244. [DU G M, SUN X B, WANG J Y. Spatiotemporal patterns of multi-functionality of land use in Northeast China. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 232-244.]
- [27] 葛忠强. 基于RS和GIS的城市郊区生态质量综合评价研究. 北京: 北京林业大学, 2006. [GE Z Q. Study on comprehensive evaluation of ecology quality of suburb based on RS and GIS. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.]
- [28] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207. [GUAN Q C, HAO J M, SHI X J, et al. Study on the changes of ecological land and ecosystem service value in China. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(2): 195-207.]
- [29] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196. [XIE G D, LU C X, LENG Y F, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196.]
- [30] 陈明星, 周园, 汤青, 等. 新型城镇化、居民福祉与国土空间规划应对. *自然资源学报*, 2020, 35(6): 1273-1287. [CHEN M X, ZHOU Y, TANG Q, et al. New-type urbanization, well-being of residents, and the response of land spatial planning. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(6): 1273-1287.]

## Tradeoffs/synergies analysis of "Production-Living-Ecological" functions in Shanxi province

KANG Qing<sup>1</sup>, GUO Qing-xia<sup>1</sup>, DING Yi<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>2</sup>

(1. Shanxi Agricultural University, College of Resources and Environment, Jinzhong 030081, Shanxi, China;

2. The Third Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Based on the data of land use data and statistics in 2005, 2010 and 2018, this paper explored the spatial and temporal differentiation characteristics and synergy/tradeoff relations of the "Production- Living- Ecological" functions in Shanxi province by using the comprehensive evaluation model and mechanical model. The results revealed that: (1) The spatio- temporal differentiation feature of the "Production- Living- Ecological" function was obvious in Shanxi from 2005 to 2018. The production function value was generally in a state of decline, showing a pattern of "high in the plains and low in the mountains". The living function continued to rise, and its spatial distribution was similar to that of the production function. Meanwhile, the ecological function was on the rise. However, it is necessary to pay attention to the deterioration tendency and its spatial pattern. (2) During the study period, the coupling coordination of Shanxi province was improved and the trend was reasonable. The spatial distribution of coupling coordination had a certain overlap with that of production and living functions. (3) According to the deviation characteristics of the coordination degree of the "Production-Living-Ecological" functions, the function leading areas and required promotion areas were divided, and the functional characteristics of each county in Shanxi was clarified. The results can provide a basis for land spatial planning.

**Keywords:** land use; "Production-Living-Ecological" functions; synergies/tradeoffs; mechanical equilibrium model; Shanxi province