

黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控

张玉臻¹, 陈阳¹, 王洁¹, 叶剑平^{1,2}, 张蚌蚌^{3*}

(1. 中国人民大学公共管理学院, 北京 100872; 2. 中国人民大学土地政策与制度研究中心, 北京 100872; 3. 西北农林科技大学经济管理学院, 杨凌 712100)

摘 要: 黄河流域对中国经济社会发展和生态安全具有十分重要的作用, 从“三生”功能协调性角度提出国土空间优化与可持续利用的建议, 对黄河流域生态保护和高质量发展具有科学指导意义。因此, 该研究聚焦黄河流域“三生”功能间的关系, 以地理空间数据和社会经济统计数据为支撑, 采用 GIS 空间分析法与力学均衡模型测度黄河流域“三生”功能协调性, 识别出“三生”功能失调区域并分类提出优化调控策略。结果表明: 黄河流域“三生”功能协调度共分 4 种水平 6 种类型, 整体处于“磨合”水平, 不同功能的空间分布特征差距明显; 3.64% 的县域单元处于“失调”水平, 且主要沿黄河两岸分布; 协调度类型主要以高生产低生态和高生态低生活两种类型为主; “三生”功能失调区域需根据协调度水平及类型, 从优化土地利用结构、产业结构、公共服务设施供给以及生态维护等方面分类优化调控, 提升短板功能, 改善“三生”功能的协调度, 促进国土空间的可持续开发利用。

关键词: 功能; 土地利用; “三生”空间; 力学均衡模型; 协调度; 黄河流域; 分类调控

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.029

中图分类号: F301.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0251-11

张玉臻, 陈阳, 王洁, 等. 黄河流域“三生”功能协调性测度及其差异性优化调控[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 251-261. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.029 <http://www.tcsae.org>

Zhang Yuzhen, Chen Yang, Wang Jie, et al. Coordinate degree and differential optimizing “production-living-ecological” function in the Yellow River Basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 251-261. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.029 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

国土空间作为人类社会经济活动的物质载体, 发挥着重要的生产、生活以及生态功能^[1-2], 即“三生”功能。“三生”功能空间的协调有序开发利用, 是实现可持续发展战略的重要基础^[3]。但因空间资源具有稀缺性、用途多宜性等自然属性, 不同功能空间在利用过程中往往会产生冲突^[4-5]。如, 城市发展中绿色生态空间和城市建设用地之间的竞争以及城市开发区建设对基本农田的剥夺等^[6]。“生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”是十八大对“三生”空间格局优化提出的要求。如何对现状中“三生”功能空间的相互关系进行科学有效的判断, 将对优化国土空间布局、实现资源可持续利用产生积极的引导作用。

当前, 国内外学者分别从省域、县域以及村域等尺度, 围绕“三生”功能以及“三生”空间开展了大量研究。整体上可以将已有研究概括为“三生”功能内涵界

定、空间结构演变、质量评定、相互关系判断、空间格局优化 5 个方面。首先, “三生”功能的内涵界定。现有研究普遍认为, “三生”功能主要是依据土地利用过程中为人类所提供的产品和服务数量及类别进行的划分和界定^[7-9]。二是“三生”功能空间的识别及格局演变。当前, “三生”功能空间的识别方法可总结为直接表征法和间接表达法。其中, 直接表征法主要是对各类国土空间功能值进行直接测算后根据功能值大小确定其主导功能的方法^[10-12], 因该方法对数据的完备性要求较高, 导致其应用性较差; 间接表达法, 又可细分为指标表征法^[13]和地类归并法^[14], 前者主要以行政区为基本分析单元, 以统计数据为支撑, 通过设定表征生产、生活以及生态功能的指标对功能值进行间接量化^[15], 因数据的易获得性, 其适用性较为广泛, 但存在功能量化不够精确等缺陷; 而后者则根据“地类-功能”之间的对应关系, 对“三生”功能空间进行识别^[16-17]。三是国土空间质量评估。部分学者在完成“三生”功能空间识别的基础上, 依据十八大对“三生”空间的要求, 采用综合指标评价^[18-19]和居民直观感知评价^[20]等方法, 对“三生”空间的质量状况进行评估, 推动了“三生”空间相关研究由单一数量向数量、质量并重的转变。四是“三生”功能空间之间的相互关系。单一功能空间的分析, 不能全面反映出区域国土资源利用的现状, 因此, 部分学者采用耦合协调度模型^[21-22]、生态位宽度模型^[23]等方法对“三生”功能空间之间的关系进行判断。五是“三生”功能空间优

收稿日期: 2021-03-02 修订日期: 2021-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (41801210; 41961124006); 陕西省社会科学联合会重点项目 (SX-354); 2020 年陕西生态空间治理重点研究项目 (20ST-169); 中国人民大学 2019 年度拔尖创新人才培养资助计划项目

作者简介: 张玉臻, 博士生。主要研究方向为国土资源可持续利用。

Email: zhangyuzhen@ruc.edu.cn.

*通信作者: 张蚌蚌, 博士, 副教授。研究方向为耕地质量与土地评价、耕地细碎化整治工程与农田建设、农村土地改革与乡村振兴。

Email: bangbang.zhang@nwafu.edu.cn.

化。国土空间优化理论及方法是“三生”功能空间优化的基础^[24]。当前部分学者结合区位理论^[25]、空间均衡理论^[26]、时空间行为理论^[27]、可持续发展理论等,采用“双评价”^[28]、“空间冲突识别”^[29-30]以及指标评价等方法,提出国土空间分类优化方案。以上五类研究在内容上存在继承与发展的关系,为国土资源的可持续利用研究奠定了良好基础。但是,进一步分析发现当前已有研究仍有如下三点不足:1) 现有研究主要以单一的省或者市为基本研究范围,对流域尺度的研究相对较少;2) 在“三生”功能值确定方面,未将区域间功能的差异性考虑进来;3) “三生”功能协调性判断多依赖耦合协调度模型,方法过于单一。

黄河流域在地理空间上横跨中国的东中西部地区,拥有多个国家生态安全区,构成了中国重要的生态屏障。同时,黄河流域中下游区域拥有丰富农业和矿产资源,使其在中国的经济发展中占据重要地位。但是,黄河流域生态环境脆弱,不同地域间的自然资源禀赋差异较大,对经济社会可持续发展构成了严峻挑战。为促进黄河流域人地系统的可持续发展,2019 年“黄河流域生态保护和高质量发展”被提升为国家重大发展战略。基于此,本研究在已有研究的基础上,以黄河流域为研究对象,引入物理学领域中的力学均衡模型,对国土空间功能之间的关系进行量化和区分,并尝试测度黄河流域整体“三生”功能的协调性、识别国土空间功能失调区域、针对问题区域提出优化调控策略,以期缓解黄河流域人地关系矛盾和国土空间格局优化提供科学依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

黄河干流全长 5 464 km,是中国第二长河流。以约占全国 2%的径流量,承载了全国 9%的人口。黄河流域以内蒙古自治区的河口镇和河南省的桃花峪为分界点,分为上、中、下游 3 个区域。其中,上游区域主要包括位于黄河源头的青海省以及甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区的部分区域等,是中国重要的生态保护区;中游区域主要包括山西、陕西以及河南省的部分地区,是中国重要的能源基地;下游区域主要以郑州、济南和青岛为中心形成的城市圈为主,涵盖了中国重要的粮食主产区——黄淮海平原。截止到 2018 年底,黄河流经省份的总人口约 4.2 亿,占全国 30.3%;地区生产总值 23.9 万亿元,占全国 26.5%。整个黄河流域自西往东横跨青藏高原、黄土高原、华北平原以及山东丘陵等多种地形,呈现西高东低的地形趋势(图 1),相反,平均气温和降雨量则由东往西逐渐减少。近年来,黄河流域发展迅速,部分区域出现资源耗竭、环境污染、生态破坏等问题,人地矛盾愈发突出。本研究考虑到研究区域的完整性,以黄河干流流经的省区为主体,选取流经的主要地级市范围内的所有区(县)单元为研究范围,即山东省(16 地级市;136 区(县))、河南省(18 地级市;158 区(县))、山西省(11 地级市;117 区

(县))、甘肃省(14 地级市;87 区(县))、青海省(8 地级市;45 区(县))、宁夏回族自治区(5 地级市;22 区(县))6 省区内的所有区(县)单元和陕西省(8 地级市;86 区(县))、内蒙古自治区(7 地级市;51 区(县))、四川省(1 地级市;13 区(县))3 省区的部分区(县)单元,共计 9 省区、88 个地级市和 715 个区(县)(图 1)。

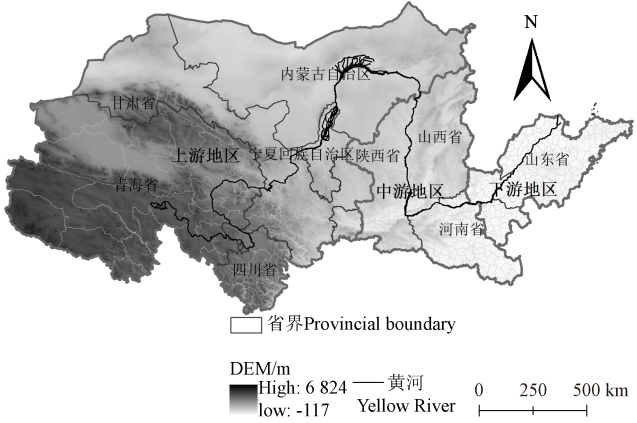


图 1 研究区示意图

Fig.1 Map of research scope

1.2 数据来源

本研究采用的数据,主要包括如下来源:①2018 年市县级行政界线、2018 年土地利用现状数据以及地均 GDP 数据来自于中国科学院资源环境数据云平台(<http://www.resdc.cn>),其中土地利用现状数据和地均 GDP 数据为栅格格式,1 km 分辨率;②数字高程模型(DEM)为 ASTER GDEM V2 数据,来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),1 km 分辨率;③2018 年总初级生产力数据来源于马里兰大学网站(<http://glcf.umd.edu/data/>),1 km 分辨率;④2018 年人口密度数据来源 worldpop 网站(<https://www.worldpop.org/>),1 km 分辨率;⑤生境质量数据是以 2018 年土地利用现状数据为基础,采用 Invest 模型模拟求得。本研究选择人类参与度较高的旱地、水田、工矿用地、农村居民点以及城镇用地 5 种土地利用类型,作为自然生态系统胁迫因子,并结合已有的相关研究以及实地调研,确定威胁因子权重^[31]及生态用地对威胁因子的敏感度^[32-33],详见表 1、表 2。除 DEM 数据外,其余数据均经裁剪、投影转换统一为 Albers 双标准纬线等积投影。

表 1 威胁因子表

Table1 Threat factors table

威胁源 Treat factors	最大影响距离 Maximum distance/km	权重 Weights	空间衰减函数 Decay function
旱地 Dry land	1	0.2	线性
水田 Paddy fields	1	0.2	线性
工矿用地 Mining land	5	0.5	指数
农村居民点 Rural residential land	6	0.7	指数
城镇用地 Urban land	10	1	指数

表 2 生境类型对威胁因子的敏感度
Table 2 Sensitivity of habitat types to threat factors

土地利用类型 Land-use types	生境 适宜度 Habitat suitability	敏感度 Sensitivity				
		旱地 Dry land	水田 Paddy fields	工矿用地 Industrial and mining land	农村 居民点 Rural residential land	城镇 用地 Urban land
草地 Grassland	0.8	0.8	0.8	0.4	0.7	0.4
未利用地 Unused land	0.6	0.5	0.1	0.6	0.7	0.9
水田 Paddy fields	0.3	1.0	0.0	0.6	0.7	0.5
旱地 Dry land	0.3	0.0	1.0	0.6	0.7	0.5
林地 Forestland	1.0	0.5	0.2	0.8	0.2	0.5
灌木林 Shrub land	0.9	0.5	0.3	0.7	0.2	0.8
其他林地 Other forestland	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	1.0
河渠 Canal	0.7	0.2	0.4	0.2	0.3	0.3
水库坑塘 Reservoir and pond	0.7	0.2	0.4	0.1	0.3	0.3
滩地 Beach land	0.7	0.3	0.4	0.1	0.2	0.7

2 研究思路及方法

2.1 “三生”功能协调性判断理论框架

土地是一个多功能综合体，人类通过对土地不同方式和强度的利用，来满足其对多样化产品和服务的需求。不同国土空间功能的实现往往依赖于不同的土地利用类型。依据土地利用类型与国土空间功能之间的对应关系，可识别出不同的功能空间。但是，在区域自然、社会以及经济条件的综合作用下，同一土地利用类型对应的功能值亦有强弱及高低之分。因此，不同功能空间的识别应充分考虑区域间的差异性。生产功能、生活功能和生态功能是国土空间的三种主要功能，三者间的相互作用、博弈的过程是区域多元化发展需求在空间上的体现。区域生态功能的发挥为生产、生活功能的实现提供保障，生产功能的发挥能为生活功能的发挥提供经济基础和物质支撑，而生活功能的实现则是国土空间利用的根本目的。三类功能的协同发挥是国土空间可持续利用的体现。在区域国土空间有限的情况下，过度对单项功能的追求，会挤占其他功能空间，并对其他功能的发挥产生阻尼作用，不利于区域的可持续发展。基于以上逻辑，本研究采用力学均衡模型对黄河流域的“三生”功能关系进行分析，并依据协调性判断的结果识别出“三生”功能失调的区域，针对区域国土空间利用特征以及协调度水平和类型提出差异性优化策略（图 2）。

2.2 “三生”功能值确定

土地的多功能性，往往通过不同的土地利用结构来实现。本文首先依据土地利用类型与国土空间功能之间的对应关系，确定国土空间的“三生”功能初始值，然后根据区域特征数据对初始功能值进行修正，得到相应的国土空间功能值。

1) “三生”功能初始值确定

生产功能是以土地为劳作对象进行生产，直接或间接获取产品或服务的功能。农业生产功能的实现主要依赖于农业用地类型。其中，耕地是保障中国粮食安全的

重要基础资源，发挥着最主要的农业生产功能，同时也承担着调节区域气候、美化区域环境等生态功能；部分人造林地和草地，发挥着增加农民收入的部分农业生产功能。而非农业生产功能，主要以从事二三产业的建设用地为主。生活功能是指土地为人类生存和发展所提供的承载和衣食住行等保障功能，主要通过生活用地类型发挥其功能。其中，居住用地为人类提供了重要的居住场所，发挥着最重要的生活功能，主要包括城市居住用地和农村居民点。生态功能是在生态系统与生态过程中所形成的，能够直接或间接满足人类基本生态需求、维持区域生态系统可持续发展的自然条件及其效用。生态功能的实现，主要依赖于农业用地、水域以及其他未利用地。同时，本文参照刘继来等^[1]研究成果，依照功能值的强弱，分别将不同单位面积土地对应的功能初始值赋为 5、3、1、0 这 4 个等级，详见表 3。

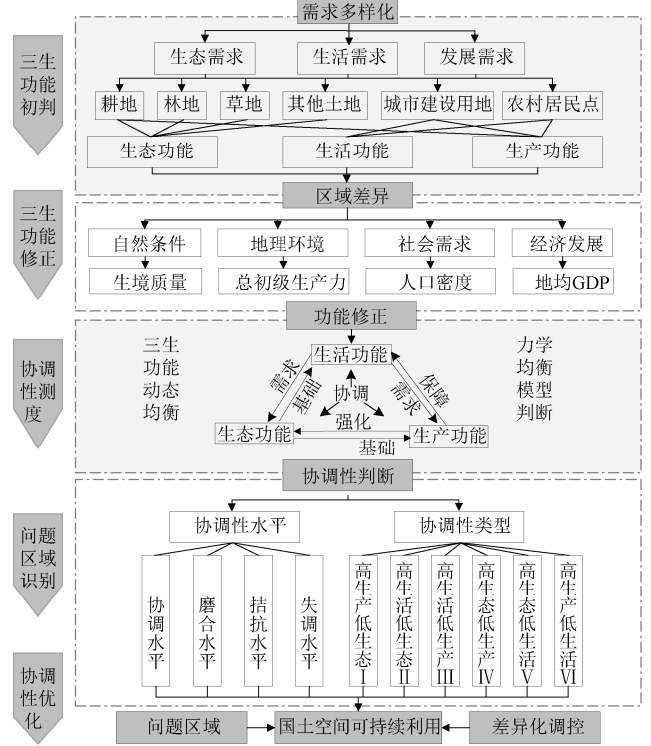


图 2 “三生”功能协调度判断理论框架
Fig.2 Theoretical framework of coordination degree judgment of “production-living-ecological” function

表 3 国土空间功能与土地利用类型对应关系
Table 3 Corresponding relation between land space function and land-use type

功能类型 Function types	土地利用类型 Land-use types	修正变量 Modified variable
农业生产 功能	耕地（5）、有林地（3）、灌木林（3）、疏木林及 其他林地（1）、高覆盖草地（3）、其他草地（1）	总初级生 产力
非农业生 产功能	城镇用地（5）、其他建设用地（5）、农村居民点（3）	地均 GDP
生活功能	城镇用地（5）、农村居民点（5）、其他建设用地（3）	人口密度
生态功能	耕地（5）、有林地（5）、灌木林（5）、疏林地（5）、 其他林地（3）、高中覆盖草地（5）、低覆盖草地（3）、 河渠及湖泊（5）、水库坑塘（1）、雪地滩涂及滩地 （5）、沼泽地（5）、其他土地（1）	生境质量

注：括号中的数值表示单位面积土地所对应空间功能的初始值。
Note: Values in brackets indicate the initial value of land function per unit area land.

2) “三生”功能实际值确定

土地利用类型与土地利用功能之间存在“一对一”或者“一对多”的关系。不同区域的社会经济条件、自然生态保护存在明显差异性,从而导致同一土地利用类型在不同区域发挥的功能值亦存在差异。土地利用类型归并法能充分体现不同区域的“三生”功能在“量”上的差异,但是对于其在“质”上的差异未能反映。为更准确地衡量出区域间“三生”功能价值量之间的差异性,本研究分别将总初级生产力、地均 GDP、人口密度以及生境质量作为区域特征变量,对相应的农业生产功能、非农业生产功能、生活功能以及生态功能初始值进行修正,获得具有区域特征的国土空间功能值。

2.3 “三生”功能协调度判断

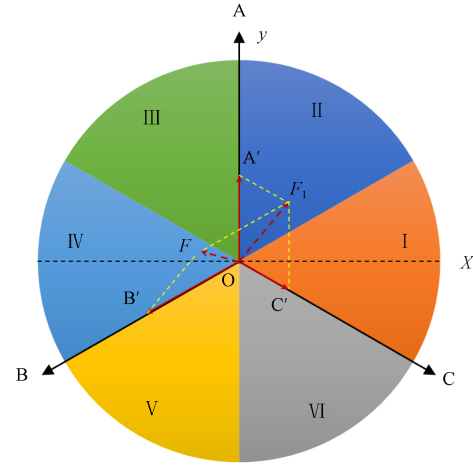
协调性是指通过探索不同系统或系统要素之间相互影响的发展规律,以促使系统或系统要素从原本无序状态趋于有序,彼此之间配合得当、协调发展。力学均衡模型,是基于物理学领域合力求解的方法,用于表达不同要素均衡关系的概念模型。该模型与传统的耦合协调度模型相比,能更好地反映出多个不同评价对象之间的状态和结果。国土空间可持续开发利用的本质是实现生产、生活与生态功能之间的协调。但是,在社会发展过程中,不同地区往往会承担不同的功能,例如,城市的中心城区往往会发挥更多的非农业生产功能和生活功能,而距离城市较远的县域单元往往在生态功能和农业生产功能等方面表现突出。这与区域内不同功能类型的土地数量紧密相关。因此,为了增强区域间不同功能值之间的可比性,本研究以地均功能值(单位面积土地所承担的生活功能、生态功能或者生产功能值)为基本表征指标,依据力学均衡模型对黄河流域“三生”功能的协调关系进行判断,具体步骤如下。

第一,依据 2.2 中“三生”功能值的确定方法,依次确定各类国土空间功能的初始值和修正值;并根据县域单元内国土空间功能总值与相应功能类型土地数量间的比例关系,依次计算地均生活功能值、地均生态功能值以及地均生产功能值。

第二,将县域单元的地均功能值与区域内对应功能的标准值进行比较,求得各国土空间功能的作用力强度 a 、 b 和 c (式 (1))。其中,地均功能的标准值主要反映了单位土地承担的对应该国土空间功能的潜力值。按照相邻单元间的功能相似,而不同地域县域单元因自然环境和人类活动差异而不同的原则,本研究借鉴可持续发展评估中的相对标准确定方法,规定同一地级市内的所有县域单元的功能标准值相同,即以地级市内所有县域单元的功能平均值为标准值。

第三,将求得的地均生活功能、地均生态功能和地均生产功能的作用力强度,分别抽象为 3 个等角度(分别为 $2\pi/3$) 间隔的不同方向的分力,依据合力求解方法(式 (2) - (6)) 求得“三生”功能综合作用力强度和方向,并采用极坐标表示为 (F, θ) 。“三生”功能均达到标准值或同比例趋近于或大于功能标准值时,则三

个作用力的合力为 0,即位于原点位置,表明“三生”功能处于“协调”水平。同理,若三项功能值与相应标准值比较,非同步变化,例如,其中一项或者两项功能值明显高于对应标准值,而其他功能明显低于标准值,则其合力就会偏离原点。合力越大,则表明偏离“协调”水平的程度越高,反之亦然(图 3)。



注: OA、OB、OC 依次表示生活、生态、生产功能方向, OA'、OB'、OC' 依次表示其对应方向的分力; OF_1 表示生活功能作用力和生产功能作用力的合力, OF 表示 OF_1 与生态功能作用力的合力。

Note: OA、OB、OC denote the direction of life, ecology and production function; OA'、OB'、OC' represent the component force in turn; OF_1 indicates the resultant force of living and production function, and OF is the total resultant force of OF_1 and ecological function.

图 3 “三生”功能协调度判断模型

Fig.3 Judgment model of coordination degree of “production-living-ecological” function

第四,将 3 个坐标轴反向延长,形成 6 个分区,分别命名为 I、II、III、IV、V 和 VI。每个分区由一个正向矢量和负向矢量来定义,依据综合作用力所在分区以及与矢量方向的亲疏关系,将“三生”功能协调度划分为 6 种类型(表 4)。

$$x = \frac{v_x - s_x}{s_x} \quad (1)$$

$$\overrightarrow{OA} = (x_A, y_A) = (0, a) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \overrightarrow{OB} &= (x_B, y_B) \\ &= \left(\cos\left(\frac{1-\frac{|b|}{b}}{2}\pi - \frac{5\pi}{6}\right)|b|, \sin\left(\frac{1-\frac{|b|}{b}}{2}\pi - \frac{5\pi}{6}\right)|b| \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\overrightarrow{OC} = (x_C, y_C) = \left(\cos\left(\frac{1-\frac{|c|}{c}}{2}\pi - \frac{\pi}{6}\right)|c|, \sin\left(\frac{1-\frac{|c|}{c}}{2}\pi - \frac{\pi}{6}\right)|c| \right) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= \overrightarrow{OA} + \overrightarrow{OB} + \overrightarrow{OC} = (x_F, y_F) \\ &= (x_A + x_B + x_C, y_A + y_B + y_C) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_F}{x_F}\right) + 2\pi, x_F \geq 0 \\ \arctan\left(\frac{y_F}{x_F}\right) + \pi, x_F < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中 v_x 分别表示各地均功能的实际值, s_x 表示相应功能的标准值; x 分别表示生活功能、生态功能和生产功能标准化后的值, 即 a 、 b 和 c ; \overline{OA} 、 \overline{OB} 及 \overline{OC} 分别表示生活、生态、生产功能的作用力; F 表示合力, $|F|$ 表示合力大小; x_A 、 x_B 、 x_C 和 x_F 分别表示 \overline{OA} 、 \overline{OB} 、 \overline{OC} 、 F 在 x 轴方向上的分力, y_A 、 y_B 、 y_C 和 y_F 则表示 \overline{OA} 、 \overline{OB} 及 \overline{OC} 、 F 在 y 轴方向上的分力; θ 则表示合力与 x 轴正方向的夹角。

表 4 “三生”功能协调度类型特征描述
Table 4 The characteristics of different coordination degree types of “production-living-ecological” function

象限 Quadrant	角度 范围 Angel range	作用力状态特征 Force characteristics			特征状态描述 Characteristic description
		生活功能 Living function	生态功能 Ecological function	生产功能 Production function	
I	$[11\pi/6, 0]$ $[0, \pi/6]$	\pm	-	+	生产功能高于既定标准值, 生态功能低于既定标准值; 生活功能作用力方向正负均有可能。
II	$[\pi/6, \pi/2]$	+	-	\pm	生活功能高于既定标准值, 生态功能低于既定标准值; 生产功能作用力方向正负均有可能。
III	$[\pi/2, 5\pi/6]$	+	\pm	-	生活功能高于既定标准值, 生产功能低于既定标准值; 生态功能作用力方向正负均有可能。
IV	$[5\pi/6, 7\pi/6]$	\pm	+	-	生态功能高于既定标准值, 生产功能低于既定标准值; 生活功能作用力方向正负均有可能。
V	$[7\pi/6, 3\pi/2]$	-	+	\pm	生态功能高于既定标准值, 生活功能低于既定标准值; 生产功能作用力方向正负均有可能。
VI	$[3\pi/2, 11\pi/6]$	-	\pm	+	生产功能高于既定标准值, 生活功能低于既定标准值; 生态功能作用力方向正负均有可能。

注: “+” “-” “ \pm ” 分别表示作用力方向为正、负、不确定。
Note: The signs +, - and \pm indicate that the direction of the force is positive, negative, and uncertain, respectively.

2.3 热点分析

热点分析通过测定“三生”功能值的热点区(高值簇)和冷点区(低值簇), 可进一步揭示“三生”功能空间协调度在空间上的分布特征, 其计算公式为

$$G_i^*(d) = \frac{\sum_{j=1}^n W_{ij}(d) Z_j}{\sum_{j=1}^n Z_j} \quad (7)$$

式中 n 为研究单元个数, Z_i 为研究单元的观测值, W_{ij} 为空间权重矩阵(i 和 j 空间相邻为 1, 不相邻为 0)。若 $G_i^*(d)$ 值显著为正, 表明研究单元 i 地区周围的值相对较高, 属于热点区(高值簇), 反之为冷点区(低值簇)。

3 结果分析

3.1 单项功能评估

确定各类国土空间功能的最优值是本文确定“三生”功能协调度水平和类型的关键要素之一。当前, 关于区域各类功能最优值尚未有相关要求和标准, 本文依据“区域内功能相似、区域间功能差异”的原则, 以各地级市范围内所有县域单元的地均生活功能、地均生态功能和地均生产功能的平均值作为区域各类功能值的标准值。按照上述公式, 分别计算地均生活功能、地均生态功能和地均生产功能的作用力。

1) 地均生活功能状态评估

不同区域的地均生活功能值存在明显差异(图 4a), 尤以黄河下游区域的地均生活功能值最高(表 5), 而黄河流域的源头地区及弯道地区的功能值相对偏低(图 4b)。与地均生活功能标准值相比, 明显高于标准值($a>0$)的县域单元数量相对较少, 约占总县域单元数量 43.77%, 且主要以点状的形式分布在各城市的主城区范围内(图 4c)。

2) 地均生态功能状态评估

黄河流域上游、中游和下游三区域的地均生态功能值差异明显(表 5)。上游区域地均生态功能值普遍偏高, 而以山东省以及河南省的大部分区域为主的黄河下游城市的地均生态功能值则偏低(图 5a); 以地均生态功能值为基础生成的热点分析图呈现了相似的规律。地均生态功能值有两处明显的高值区域, 即: 黄河源头的三江源区域以及以太原市为中心形成的周边城市圈(图 5b); 同样, 与地均生态功能标准值相比, 高于标准值($b>0$)的县域单元数量相对较少, 约占总县域单元 43.50%, 且主要以片状的形式分布在黄河流域的上游以及中下游分界处(图 5c)。

3) 地均生产功能状态评估

按照县域单元农业生产功能总值与非农业生产功能总值之间的比例关系, 得到地均生产功能值的空间分布结果(图 6a)。与地均生活功能值空间分布特征相似, 地均生产功能值随黄河流进方向呈现明显的递增趋势(表 5), 尤以下游区域的郑州城市圈和济南城市圈产能最高(图 6b)。与地均生产功能标准值相比, 高于标准值($c>0$)的县域单元数量较少(图 6c), 约占总县域单元数量的 24%, 且主要分布在黄河沿线周边。

表 5 黄河流域不同分区“三生”功能值
Table 5 Function value of different zones in Yellow River Basin

分区 Zones	区县数量 Number of county	地均生活功能 Living function value per unit	地均生态功能 Ecological function value per unit	地均生产功能 Production function value per unit	合力值 Value of force
上游地区 The upper basin	230	0.88	2.83	1.02	0.55
中游地区 The middle basin	289	1.57	2.18	1.69	0.59
下游地区 The lower basin	196	2.65	1.34	2.16	0.43
总体 Total	715	1.64	2.16	1.60	0.53

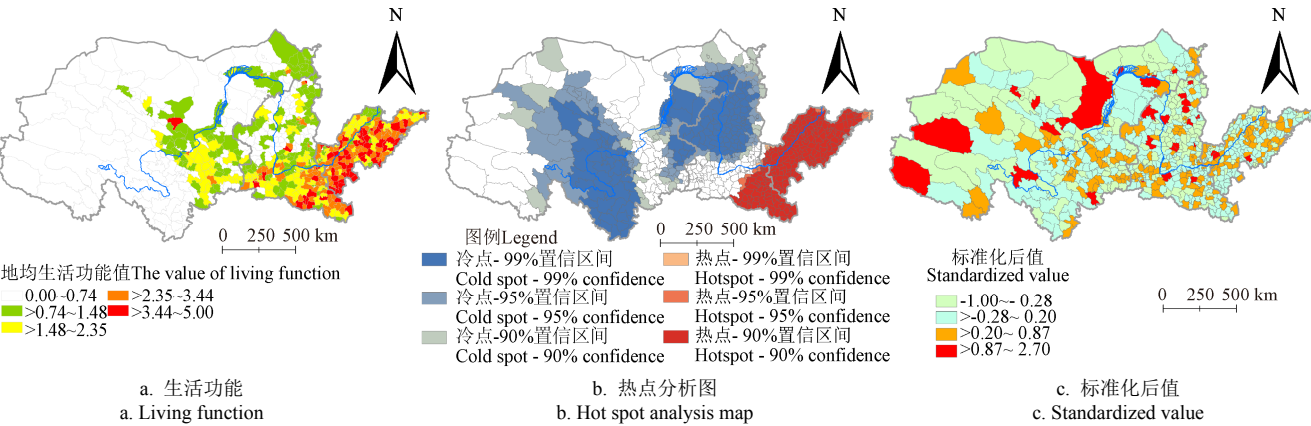


Fig.4 Spatial distribution characteristics of living function values in the Yellow River Basin

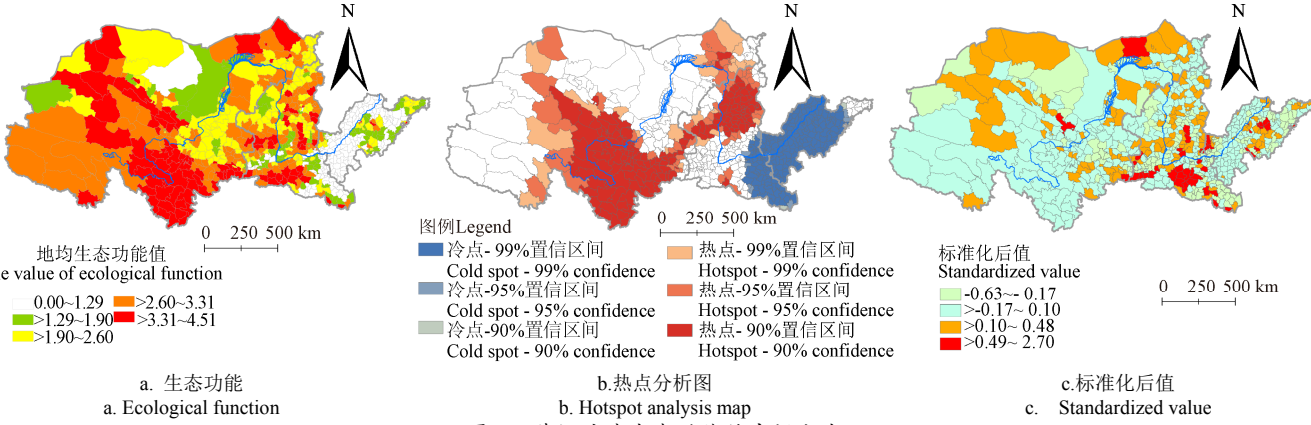


Fig.5 Spatial distribution characteristics of ecological function values in the Yellow River Basin

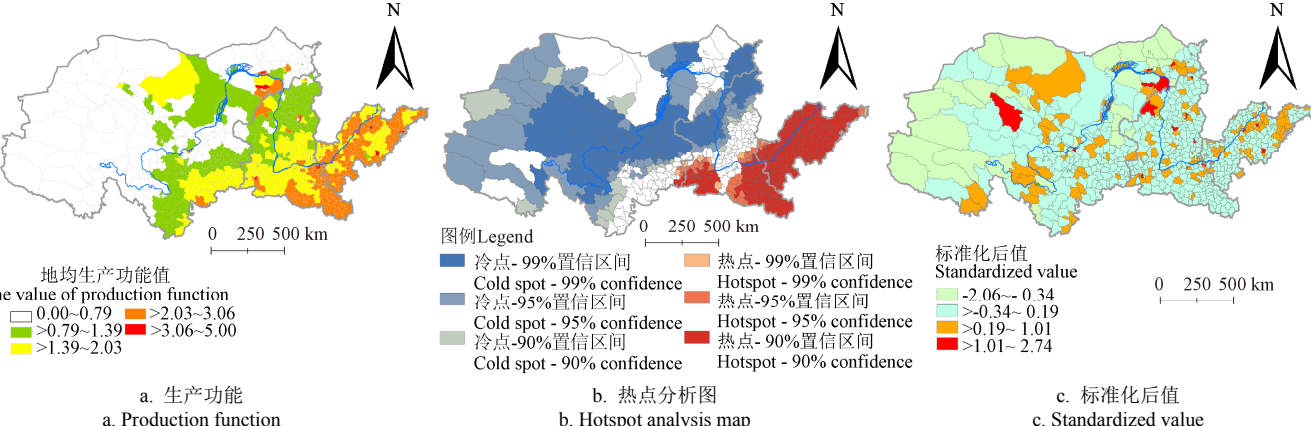


Fig.6 Spatial distribution characteristics of production function values in the Yellow River Basin

3.2 “三生” 功能协调度

根据式 (1) ~ (6)，求得由“三生”功能协调度以及偏离角度组成的各个空间单元的极坐标。分别以协调度水平和协调度类型为分类字段，对“三生”功能协调状态进行评估，结果如图 7 和表 6 所示。

1) “三生” 功能协调度水平

按照自然间断法，将“三生”功能协调度由小到大依次划分为 4 个级别，分别为“协调”水平 ($0 \leq |F| \leq 0.36$)、 “磨合”水平 ($0.36 < |F| \leq 0.75$)、 “拮抗”水平 ($0.75 < |F| \leq 1.43$) 及 “失调”水平 ($1.43 < |F| \leq 2.73$)。

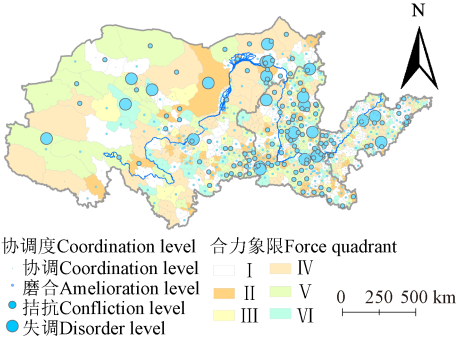


Fig.7 Coordination degree of “production-ecological-living” function in the Yellow River Basin

整个黄河流域的“三生”功能的协调度为 0.53，处于“磨合”水平。不同协调度水平的县域单元数量和空间分布存在差异。处于“协调”水平的县域单元共有 277 个，占总研究单元数量 38.74%，均匀分布在整個黄河流域范围内；处于“磨合”水平的研究单元共有 281 个，占全部研究单元的 39.3%，集中分布在黄河流域的中下游区域，且主要以生态功能或者生产功能为主导功能。处于“拮抗”水平的县域单元较少，仅 131 个，占县域总数的 18.32%，主要分布黄河流域的中游地区。处于“失调”水平的研究单元共有 26 个，约占县域总量的 3.64%，主要沿黄河沿线分布，同时，大同市、西安市和青岛市三地亦有部分县域处于“失调”水平。“三生”功能处于“拮抗”和“失调”水平的城市，是需要进行区域功能优化协调的重点区域。

表 6 “三生”功能协调度类型统计结果
Table 6 Statistical results of “production-ecological-living” function coordination degree

一级类 First class	二级类 Secondary class	协调 Coordination level	磨合 Amelioration level	拮抗 Confliction level	失调 Disorder level	合计 Total	占比 Proportion/%
生产-生态功能作用类型区 Production-ecological function zone	高生产低生态 I	112	96	32	14	254	35.52
	高生态低生产 IV	59	43	29	3	134	18.74
生活-生态功能作用类型区 Living-ecological function zone	高生活低生态 II	25	37	28	8	98	13.71
	高生态低生活 V	29	71	36	—	136	19.02
生产-生活功能作用类型区 Production-living function zone	高生活低生产 III	18	10	3	—	31	4.34
	高生产低生活 VI	34	24	3	1	62	8.67
合计 Total		277	281	131	26	715	100
占比 Proportion/%		38.74	39.30	18.32	3.64	100	—

注：“—”表示无对应类别。
Note: The sign “-” indicate no corresponding category.

3.3 “三生”功能协调性差异性调控策略

黄河流域大部分区（县）“三生”功能处于“协调”和“磨合”水平。其中，“三生”功能处于“磨合”水平的区域，需要加强对相对较弱功能方向的监管，防止“三生”功能差距进一步拉大。而“三生”功能协调度处于“拮抗”和“失调”水平的区域，需要分类施策，优化“三生”功能协调度。具体分类优化策略如下（表 7）。

1) 高生产低生态“拮抗”和“失调”类型区

高生产低生态“拮抗”和“失调”类型区包括“三生”功能处于“拮抗”水平的太原市迎泽区、运城市临猗县和临汾市古县等 32 区（县）以及处于“失调”水平的太原市杏花岭区、包头市昆都区和青山区等 14 区（县），该类区域主要以各地级市市辖区为主，其典型特征是生产功能偏高、而生态功能偏低。以上区域的地理位置以及经济基础相对优越。该类区域应通过优化城市土地利用结构、控制建设用地对生态用地的非法占用、充分挖掘城市内部存量用地潜力以及增加公园和绿色廊道等生态用地供给等方式提升生态功能。其次，充分利用区位优势，积极引进高技术、低污染类产业，在保障生产功能不降低的情况下，淘汰影响生态功能提升的高污染高能耗高排放产业；此外，“三生”功能协调度处于“失调”水平的 14 区（县）还应当考虑在其对应财政支出条目中，适当增加对环境改善方面的财政支持，进一步强化生态环境保护方面的相关规定，促使经济发展提前到

2) “三生”功能协调度类型

依据主导作用力类型及方向，本文将协调度类型划分为 3 大类 6 小类。其中，3 大类依次为生产-生态功能作用类型区（I、IV）、生活-生态功能作用类型区（II、V）以及生产-生活功能作用类型区（III、VI），6 小类依次为高生产低生态区 I、高生态低生产区 IV、高生活低生态区 II、高生态低生活区 V、高生活低生产 III 以及高生产低生活区 VI。整体上，黄河流域主要以高生产低生态 I 和高生态低生活 V 为主，约占总体的 55%，且均匀分布在整個研究区域内。高生活低生态类型区 II 和高生态低生活 V 分别约占总研究单元数量的 14% 和 19%，主要分布在黄河流域的上游区域。高生活低生产 III 和高生产低生活 VI 类型区相对占比较低，分别为 4.34%、8.67%（图 7、表 6），且零星分布在城市的主城区范围内。

达环境库兹涅茨倒“U”型曲线的拐点^[34]。

2) 高生活低生态“拮抗”和“失调”类型区

高生活低生态“拮抗”和“失调”类型区分别包括“三生”功能处于“拮抗”水平的朔州市朔城区、晋中市榆次区和平遥县等 28 区（县）以及处于“失调”水平的大同市平城区、长治市潞州区和忻州市忻府区等 8 区（县），该类区域的典型特征是生活功能较高、而生态功能偏低。以上区域面临的核心问题是：如何保持生活功能不降低的情况下，在追求经济发展的同时提升区域的生态功能。首先，与高生产低生态类型区相似，该类区域亦应通过优化城市内部土地利用结构，增加生态用地面积等方式提升生态功能。其次，优化生活空间与生态空间的布局，充分利用城市内部的零星用地，改善区域内部生态环境。此外，与高生产低生态类型区相比，该类区域经济发展水平并不突出，不宜采取限制生产功能发挥的相关措施，因此，针对“三生”功能处于失调阶段的区域，该类区域可考虑建立企业绿色生产奖惩机制，提高对企业绿色生产的要求和标准，从而降低产业发展对生态环境的负面作用。

3) 高生态低生产“拮抗”和“失调”类型区

高生态低生产“拮抗”和“失调”类型区分别包括“三生”功能处于“拮抗”水平的太原市晋源区、大同市云冈区和临汾市大宁县等 29 区（县）以及处于“失调”水平的包头市白云鄂博矿区、榆林市榆阳区和海西自治

州的额尔古纳市 3 区（县）。该类区域的生态功能偏高，而生产功能偏低，主要分布在距离市中心位置较远的郊区地带。在保持生态功能不降低的情况下，该类区域需要结合区域特征，发展特色产业。同时，通过不断完善区域内的公共基础设施条件，承接核心城区向外转移的产业，提高区域生产功能。此外，核心主城区应充分发挥产业带动力，扶持城市周边县域的社会经济发展。

4) 高生态低生活“拮抗”类型区

高生态低生活“拮抗”类型区主要包括太原市的娄烦县、长治市沁源县和晋中市和顺县等 36 区（县），其典型特征是生态功能偏高、生活功能相对偏低，且“三生”功能处于“拮抗”水平。该类区域在注重生态环境保护的同时，应适当提高公共服务用地占比，增加交通及医疗卫生等基础设施供给，改善居民生活质量；且当地政府可灵活设置用地优惠政策，吸引产业的流入，创造更多就业机会，引导农村剩余劳动力转移，积极响应国家关于人口落户的政策，鼓励有条件进城的农民工落户。此外，在追求经济增长以及公共服务设施完善的过程中，仍需注重对生态环境的保护，

防止生态功能退化。

5) 高生产低生活“拮抗”及“失调”类型区

高生产低生活“拮抗”及“失调”类型区主要包括处于“拮抗”水平的鄂尔多斯市的伊金霍洛旗、延安市的黄龙县和定西市的漳县以及处于“失调”水平的海西自治州的天峻县。以上区域存在生产功能偏高、生活功能偏低的典型特征，需要通过增加公共服务供给，提高人民的生活水平；完善区域内部的产业结构，增加就业机会，提高居民收入水平。此外，在提高生活功能的同时，应继续实施严格的生态保护措施。

6) 高生活低生产“拮抗”类型区

高生活低生产“拮抗”类型区包括济南市的市中区、平凉市的崆峒区和陇南市的武都区。以上三个市辖区的典型特征是生活功能较高、生产功能较低。在今后的发展过程中，为提高“三生”功能的协调性，需要通过增加第三产业比重等方法优化产业结构，提高区域的生产能力；深度剖析区域特色，发展特色产业。同时，在保障生活功能水平不降低的情况下，充分利用区域内部的零星土地改善生态环境。

表 7 “三生”功能“失调”区域优化策略
Table 7 Optimization strategies of “production-living-ecological” function disorder area

类型 Types	代表区域 Representative zone	优化策略 Optimization strategy
高生产低生态 类型区 I	太原市杏花岭区、包头市昆都仑区和青山区、鄂尔多斯市东胜区、调整用地结构，增加生态用地供给；加强监管，限制非法占用生态用 济南市历下区、淄博市张店区、临沂市兰山区、郑州市上街区、洛地 的行为；优化产业结构，淘汰“三高”产业。此外，“三生”功能 阳市涧西区、西安市碑林区、莲湖区、未央区和雁塔区以及兰州“失调”区域还应采取：提供资金支持，增加生态环境改善的财政支 市的城关区，共计 14 区（县）。	出；强化生态环境保护等相关规定。
高生活低生态 类型区 II	大同市平城区、长治市潞州区、忻州市忻府区、临汾市尧都区、调整用地结构，增加生态用地面积；优化生态空间与生活空间布局； 洪洞县、阿拉善盟的阿拉善左旗、张掖市甘州区以及酒泉市肃州区，此外，针对“三生”失调的区域还应采取加强对区域内企业绿色生 共计 8 区（县）。	产的监管，建立企业绿色生产奖惩机制。
高生态低生产 类型区 IV	包头市白云鄂博矿区、榆林市榆阳区以及海西自治州的格尔木市，结合区域特征，发展特色产业；完善公共基础设施，承接城市内部转 共计 3 区（县）。	移产业；发挥主城区的带动力。
高生产低生活 类型区 VI	海西市的天峻县，共计 1 县。	增加公共服务供给；优化产业结构，增加就业机会；坚持生态保护， 防止生态功能退化。

4 结论与讨论

国土空间“三生”功能的协同一致，是实现国土资源可持续开发利用的要求和目的。黄河流域作为中国重点生态保护与发展区域，其“三生”功能协调性的判定及类型划分，对实现其高质量发展具有重要意义。因此，本研究以黄河流域为研究对象，引入物理学领域中的力学均衡模型，对其国土空间功能之间的关系进行定量分析和判断。得到如下结论：

1) 黄河流域“三生”功能协调度系数为 0.53，处于“磨合”水平。协调度类型主要以高生产低生态 I 和高生态低生活 V 两种类型为主，其均匀分布于整个黄河流域。

2) 不同协调度水平的县域单元空间分异特征明显。处于“失调”水平的县域单元主要沿黄河沿线分布，包括太原市杏花岭区等 26 个县域单元，以生产功能与生态功能的不协调以及生活功能与生态功能的不协调为主，占总县域单元的 3.64% 左右。

3) 各区域应结合“三生”功能协调性水平及类型，分别从调整土地利用结构、优化功能空间布局、产业类

型调整等方面分类设置“三生”功能优化措施。此外，针对“三生”功能处于“失调”水平的区域，还应从生态环境修复、监管措施强化以及财政支持等维度分类施策，补齐功能短板，增强“三生”功能协调性。

本研究采用力学均衡模型对黄河流域“三生”功能协调度进行了评价，准确识别出“三生”功能失调区域，并针对失调类型分类设置了优化策略，为黄河流域国土空间格局优化提供了方向性建议。同时，本研究采用的力学均衡模型，与传统的耦合协调度模型相比，不仅能量化协调度大小，且能准确识别出协调度类型，更加合理与完善。此外，在计算“三生”空间的功能值时，考虑到相同地类在不同区域的功能可能不同，本研究选取地域差异性指标分别对“三生”功能的初始值进行了修正。但是，本研究由于数据的可获得性等原因，在选取代表区域差异性指标时，每种国土空间功能仅选取了单一指标进行修正，可能存在不足。在今后的研究中，将继续完善国土空间功能修正系数，考虑将不同产业就业人口数量、生活质量满意度以及其他反映生态功能强弱的因子纳入，进一步优化“三生”功能定量识别方法。

[参 考 文 献]

- [1] 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. (in Chinese with English abstract)
- [2] 林坚, 柳巧云, 李婧怡. 探索建立面向新型城镇化的国土空间分类体系[J]. 城市发展研究, 2016, 23(4): 51-60.
Lin Jian, Liu Qiaoyun, Li Jingyi. Research on establishing a land space utilization classification for new urbanization[J]. Urban Studies, 2016, 23(4): 51-60. (in Chinese with English abstract)
- [3] 欧名豪, 丁冠乔, 郭杰, 等. 国土空间规划的多目标协同治理机制[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 8-17.
Ou Minghao, Ding Guanqiao, Guo Jie, et al. Multi-objective collaborative governance mechanism of territorial space planning[J]. China Land Science, 2020, 34(5): 8-17. (in Chinese with English abstract)
- [4] 廖李红, 戴文远, 陈娟, 等. 平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1823-1833.
Liao Lihong, Dai Wenyuan, Chen Juan, et al. Spatial conflict between ecological- production-living spaces on Pingtan Island during rapid urbanization[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1823-1833. (in Chinese with English abstract)
- [5] 周国华, 彭佳捷. 空间冲突的演变特征及影响效应: 以长株潭城市群为例[J]. 地理科学进展, 2012, 31(6): 717-723.
Zhou Guohua, Peng Jiajie. The evolution characteristics and influence effect of spatial conflict: A case study of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Progress in Geography, 2012, 31(6): 717-723. (in Chinese with English abstract)
- [6] 魏小芳, 赵宇鸾, 李秀彬, 等. 基于“三生功能”的长江上游城市群国土空间特征及其优化[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1070-1079.
Wei Xiaofang, Zhao Yuluan, Li Xiubin, et al. Characteristics and optimization of geographical space in urban agglomeration in the upper reaches of the Yangtze River based on the function of “Production-Living-Ecological”[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1070-1079. (in Chinese with English abstract)
- [7] 甄霖, 曹淑艳, 魏云洁, 等. 土地空间多功能利用: 理论框架及实证研究[J]. 资源科学, 2009, 31(4): 544-551.
Zhen Lin, Cao Shuyan, Wei Yunjie, et al. Land use functions: conceptual framework and application for China[J]. Resources Science, 2009, 31(4): 544-551. (in Chinese with English abstract)
- [8] 刘超, 许月卿, 孙丕苓, 等. 土地利用多功能性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2016, 35(9): 1087-1099.
Liu Chao, Xu Yueqing, Sun Piling, et al. Progress and prospects of multi-functionality of land use research[J]. Progress in Geography, 2016, 35(9): 1087-1099. (in Chinese with English abstract)
- [9] De G R. Function-analysis and valuation as a tool to assess land use conflicts in planning for sustainable, multi-functional landscapes[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 75(3-4): 175-186.
- [10] 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. (in Chinese with English abstract)
- [11] 冀正欣, 刘超, 许月卿, 等. 基于土地利用功能测度的“三生”空间识别与优化调控[J]. 农业工程学报, 2020, 36(18): 222-231.
Ji Zhengxin, Liu Chao, Xu Yueqing, et al. Identification and optimal regulation of the production-living-ecological space based on quantitative land use functions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(18): 222-231. (in Chinese with English abstract)
- [12] 朱从谋, 李武艳, 杜莹莹, 等. 浙江省耕地多功能价值时空变化与权衡-协同关系[J]. 农业工程学报, 2020, 36(14): 263-272.
Zhu Congmou, Li Wuyan, Du Yingying, et al. Spatial-temporal change, trade-off and synergy relationships of cropland multifunctional value in Zhejiang Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(14): 263-272. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhang Yingnan, Long Hualou, Tu Shuangshuang, et al. Spatial identification of land use functions and their tradeoffs/synergies in China: Implications for sustainable land management[J]. Ecological Indicators, 2019, 107:105550.
- [14] 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. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张露洋, 雷国平, 郭一洋. 基于两维图论聚类的辽宁省土地利用多功能性分区[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 242-249.
Zhang Luyang, Lei Guoping, Guo Yiyang. Graph-theoretic clustering for zoning of multifunctional land use in Liaoning Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(13): 242-249. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周浩, 金平, 夏卫生. 省级国土空间“三生”功能评价及其分区研究: 以河南省为例[J]. 中国土地科学, 2020, 34(8): 10-17.
Zhou Hao, Jinping, Xia Weisheng. Functional zoning of territorial space in provincial level based on the Production-Living-Ecological Functions: A case of Henan Province[J]. China Land Science, 2020, 34(8): 10-17. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [18] 刘鹏飞, 孙斌栋. 中国城市生产、生活、生态空间质量水平格局与相关因素分析[J]. 地理研究, 2020, 39(1): 13-24. Liu Pengfei, Sun Bindong. The spatial pattern of urban production-living-ecological space quality and its related factors in China[J]. Geographical Research, 2020, 39(1): 13-24. (in Chinese with English abstract)
- [19] 黄安, 许月卿, 刘超, 等. 基于土地利用多功能性的县域乡村生活空间宜居性评价[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 252-261. Huang An, Xu Yueqing, Liu Chao, et al. Evaluation on livability of living space based on multiple functions of land use at county level[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(8): 252-261. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李欣, 方斌, 殷如梦, 等. 村域尺度“三生”功能与生活质量感知空间格局及其关联: 以江苏省扬中市为例[J]. 地理科学, 2020, 40(4): 599-607. Li Xin, Fang Bin, Yin Rumeng, et al. Spatial pattern and association of production-living-ecological function and life quality on the village scale: A case of Yangzhong City, Jiangsu Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(4): 599-607. (in Chinese with English abstract)
- [21] 魏小芳, 赵宇鸷, 薛朝浪, 等. 山坝分区视角下的贵州省国土空间功能协调演化特征[J]. 山地学报, 2020, 38(1): 105-117. Wei Xiaofang, Zhao Yuluan, Xue Chaolang, et al. Evolutional characteristics of spatial functional coordination in Guizhou Province from a perspective of mountain and basin zoning[J]. Mountain Research, 2020, 38(1): 105-117. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1100-1114. Wang Cheng, Tang Ning. Spatio-temporal characteristics and evolution of rural production-living-ecological space function coupling coordination in Chongqing Municipality[J]. Geographical Research, 2018, 37(6): 1100-1114. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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[J]. 自然资源学报, 2019, 34(11): 2363-2377. Li Xin, Fang Bin, Yin Rumeng, et al. Spatial-temporal change and collaboration/trade-off relationship of “production-living-ecological” functions in county area of Jiangsu province[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(11): 2363-2377. (in Chinese with English abstract)
- [24] 匡文慧. 新时代国土空间格局变化和美丽愿景规划实施的若干问题探讨[J]. 资源科学, 2019, 41(1): 23-32. Kuang Wenhui. Issues regarding spatial pattern change of national land space and its overall implementation on beautiful vision in new era[J]. Resources Science, 2019, 41(1): 23-32. (in Chinese with English abstract)
- [25] 朱媛媛, 余斌, 曾菊新, 等. 国家限制开发区“生产—生活—生态”空间的优化: 以湖北省五峰县为例[J]. 经济地理, 2015, 35(4): 26-32. Zhu Yuanyuan, Yu Bin, Zeng Juxin, et al. Spatial optimization from three spaces of production, living and ecology in national restricted zones: A case study of Wufeng County in Hubei Province[J]. Economic Geography, 2015, 35(4): 26-32. (in Chinese with English abstract)
- [26] 邓文英, 邓玲. 生态文明建设背景下优化国土空间开发研究: 基于空间均衡模型[J]. 经济问题探索, 2015(10): 68-74.
- [27] 刘春芳, 王奕璇, 何瑞东, 等. 基于居民行为的三生空间识别与优化分析框架[J]. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2113-2122. Liu Chunfang, Wang Yixuan, He Ruidong. An analysis framework for identifying and optimizing ecological-production-living space based on resident behavior[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(10): 2113-2122. (in Chinese with English abstract)
- [28] 贾克敬, 何鸿飞, 张辉, 等. 基于“双评价”的国土空间格局优化[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 43-51. Jia Kejing, He Hongfei, Zhang Hui, et al. Optimization of territorial space pattern based on resources and environment carrying capacity and land suitability assessment[J]. China Land Science, 2020, 34(5): 43-51. (in Chinese with English abstract)
- [29] 廖李红, 戴文远, 陈娟, 等. 平潭岛快速城市化进程中三生空间冲突分析[J]. 资源科学, 2017, 39(10): 1823-1833. Liao Lihong, Dai Wenyuan, Chen Juan, et al. Spatial conflict between ecological-production-living spaces on Pingtan Island during rapid urbanization[J]. Resources Science, 2017, 39(10): 1823-1833. (in Chinese with English abstract)
- [30] Cieslak I. Identification of areas exposed to land use conflict with the use of multiple-criteria decision-making methods [J]. Land Use Policy, 2019, 89: 104225.
- [31] 蔡天雨, 徐磊, 陈亚恒, 等. 基于生态安全的青龙满族自治县土地利用冲突识别[J]. 水土保持研究, 2020, 27(5): 273-280. Cai Tianyu, Xu Lei, Chen Yaheng, et al. Identification of land use conflicts in Qinglong Manchu autonomous county based on ecological security[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(5): 273-280. (in Chinese with English abstract)
- [32] 朱杰, 龚健, 李靖业. 青藏高原东部生态敏感区生境质量时空演变特征: 以青海省河湟谷地为例[J]. 资源科学, 2020, 42(5): 991-1003. Zhu Jie, Gong Jian, Li Jingye. Spatiotemporal change of habitat quality in ecologically sensitive areas of eastern Qinghai Tibet Plateau: A case study of the Hehuang Valley, Qinghai Province[J]. Resources Science, 2020, 42(5): 991-1003. (in Chinese with English abstract)
- [33] 周亮, 唐建军, 刘兴科, 等. 黄土高原人口密集区城镇扩张对生境质量的影响: 以兰州、西安、咸阳及太原为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 261-270. Zhou Liang, Tang Jianjun, Liu Xingke, et al. Effects of urban expansion on habitat quality in densely populated areas on the Loess Plateau: A case study of Lanzhou, Xi'an- Xianyang and Taiyuan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 261-270. (in Chinese with English abstract)
- [34] Yan B, Wu L, Wang X H, et al. How can environmental intervention work during rapid urbanization? Examining the moderating effect of environmental performance-based accountability in China[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, 86: 10647

Coordinate degree and differential optimizing “production-living-ecological” function in the Yellow River Basin

Zhang Yuzhen¹, Chen Yang¹, Wang Jie¹, Ye Jianping^{1,2}, Zhang Bangbang^{3*}

(1. School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 2. The Research Center for Land Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China; 3. College of Economics and Management, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: The sustainable utilization of the Yellow River Basin greatly determines the socio-economic development and ecological security in China. Taking the Yellow River Basin as the study area, this study aims to propose some improvement suggestions to optimize the land resources for better ecological protection and high-quality development, particularly from the perspective of the coordination of “living-ecological-production” functions. Therefore, the specific relationship between “living-ecological-production” functions in the study area was the focus. A GIS spatial analysis was made to measure the function coordination. A mechanical equilibrium model was established to identify the dysfunctional areas using geospatial data and socio-economic statistics. Firstly, the initial values of various land use functions were determined, according to the relationship between land-use types and functions. The specific values of the living function, ecological function, agricultural, and non-agricultural production function were corrected using the population density, habitat quality, gross primary productivity, and non-agricultural industry output, concurrently considering the differences of regional socio-economic development and natural conditions. Secondly, three values of land-use function were converted into the standard function per unit of land, further enhancing the comparability of various functions in different regions. Finally, the mechanical equilibrium model was utilized to determine the coordination level and land use type of three functions in each county unit. The results showed that there were four levels and six types of coordination degrees for the “living-ecological –production” function in the study area, namely, the level of coordination, amelioration, confliction, and disorder level, while the higher-production & lower-ecology, higher-life & lower-ecology, higher-life & lower-production, higher-ecology & lower-production, higher-ecology & lower-living, and higher-production & lower-life type. Furthermore, the coordination level of different regions was significantly different, but the coordination was at the “amelioration” level as a whole. Specifically, the lower basin presented the highest coordination degree, as well as the value of living and production function, whereas, the upper basin behaved the maximum ecological function, while the middle basin had the middle value of living-ecological-production functions, compared with the three sub-regions. The production function was the lowest in the study area, where only about 24% of the county units presented a higher value of production function than the standard. There was a similar trend in the ecological and living function, accounting for about 43.50% and 43.77% of the county units, comparing the three functions. The coordination degree was better at the coordination and amelioration level in most county units, considering the specific situation of each county. In addition, only about 3.64% of the county units in the disorder level were mainly distributed along the two sides of the study area. The coordination degrees of the county units were mainly higher-production & lower-ecology, and higher-ecology & lower-life types, most of which were scattered in the whole Yellow River region. Consequently, the county units in the Yellow River Basin needed to optimize the coordination of the “living-ecological-production” function in terms of land use and industrial structure, thereby strengthening the supply of public service facilities and ecological maintenance. The improved short board function can be expected to achieve the ultimate goal of sustainable development and utilization of land resources in the Yellow River region. The finding can provide sound scientific guidance to determine the coordination level and type of land use.

Keywords: function; land use; production-living-ecological space; mechanical equilibrium model; coordinate degree; the Yellow River Basin; differential regulation