

# 基于土地利用的武汉城市圈生态系统 服务权衡/协同分析

张 斌<sup>1</sup>, 李 璐<sup>2</sup>, 夏秋月<sup>1</sup>, 李嘉成<sup>1</sup>, 董 捷<sup>1</sup>

(1.华中农业大学 公共管理学院, 武汉 430070; 2.湖南工商大学 公共管理与人文地理学院, 长沙 410205)

**摘 要:**为探究生态系统服务间的权衡/协同关系,以对区域可持续发展提供决策参考。在分析和模拟土地利用变化的基础上,对武汉城市圈 39 个区县的食物供给服务、碳储量服务和生境质量服务进行了评估,探究其时空演变特征和权衡/协同关系。结果表明:(1) 武汉城市圈 2005—2018 年建设用地和水域面积不断增加,而耕地、林地、草地和未利用地持续减少。2035 年综合发展情景下耕地减少趋势得到缓解,林地面积有所增加,建设用地实现有序扩张。(2) 武汉城市圈食物供给服务持续提高,碳储量服务不断下降,生境质量总体上也呈下降趋势。多重服务重要区识别表明,各年份中度重要区域面积最大,而极其重要区域面积最小。(3) 相关系数法和双变量空间自相关法均表明多尺度下不同情景的生态系统服务间权衡/协同关系是一致的,但程度有所区别。由此可得,区域 3 种生态系统服务间以权衡关系为主,且不同情景下权衡/协同关系的程度不同。

**关键词:**土地利用变化; 生态系统服务; 权衡与协同; 武汉城市圈; 情景模拟分析

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0377-10

## Trade off/Synergy Analysis of Ecosystem Services in Wuhan City Circle Based on Land Use

ZHANG Bin<sup>1</sup>, LI Lu<sup>2</sup>, XIA Qiuyue<sup>1</sup>, Li Jiacheng<sup>1</sup>, DONG Jie<sup>1</sup>

(1.School of Public Management, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.School of Public Administration and Human Geography, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China)

**Abstract:** To explore the trade-off/synergy between ecosystem services to provide decision-making reference for regional sustainable development, based on the analysis and simulation of land use change, the food supply service, carbon storage service and habitat quality service of 39 districts and counties in Wuhan city circle were evaluated to explore their temporal and spatial evolution characteristics and trade-off/synergy. The results show that: (1) from 2005 to 2018, the construction land and water area of Wuhan City circle continued to increase, while the cultivated land, forestland, grassland and unused land continued to decrease; under the comprehensive development scenario in 2035, the decreasing trend of cultivated land will be alleviated, the area of forestland will increase, and the construction land will expand orderly; (2) the food supply service in Wuhan City circle continues to improve, the carbon storage service continues to decline, and the habitat quality also shows a downward trend on the whole; the identification of multiple service important areas shows that the area of moderately important areas is the largest and the area of extremely important areas is the smallest in each year; (3) both correlation coefficient method and bivariate spatial autocorrelation method show that the trade-off/synergy relationship between ecosystem services in different scenarios is consistent at multiple scales, but the degree is different. It can be seen that the trade-off relationship is dominant among the three ecosystem services in the region, and the degree of trade-off/synergy relationships are different in different scenarios.

**Keywords:** land use change; ecosystem services; trade off and coordination; Wuhan city circle; scenario simulation analysis

收稿日期:2021-06-08

修回日期:2021-06-28

资助项目:国家自然科学基金“土地发展空间异质性与跨区域碳排放权交易及补偿机制研究——以武汉城市圈为例”(71774064)

第一作者:张斌(1997—),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为土地经济与管理。E-mail:1480992336@qq.com

通信作者:董捷(1960—),女,湖北武穴人,教授,博士生导师,主要从事土地资源经济研究。E-mail:dongjie@mail.hzau.cn

生态系统服务是生态系统给予人类的所有惠宜,是人类社会可持续发展的必要条件,包含供给、支持、调节和文化服务<sup>[1]</sup>。人类因自身需求对生态系统服务存在选择性,其活动在增加供给服务的同时,可能引起支持、调节或文化服务的衰退,反过来损害人类福祉。为了降低服务间的负面效应,增强相互增益作用,达到效用最大化,生态系统服务的权衡/协同关系相关研究应运而生,成为目前生态系统服务研究的前沿课题<sup>[2]</sup>。权衡是指某项生态系统服务供给能力的提高会导致其他生态系统服务供给水平降低的情况,而协同为多种生态系统服务间相互促进的情况<sup>[3]</sup>。土地利用变化是人类活动作用于生态系统的重要体现,通过改变生态系统服务功能,进而影响生态系统服务间的关系<sup>[4]</sup>。千年生态系统评估指出,全球60%以上的生态系统功能正在衰退,且趋势不断加剧<sup>[5]</sup>。同时,我国正处于新型城镇化进程中,经济建设不可避免改变土地利用结构,进而造成负面的生态效应。在此背景下,以特定研究区为例,选择典型生态系统服务,科学认知土地利用变化下的生态系统服务变化及彼此间权衡/协同关系,有利于提高生态系统管理效率,实现区域经济-生态协同发展。

近年来,国内外学者研究土地利用变化对生态系统服务的影响,大致可分为3个方面,其一是基于某个时间点的静态分析或长时间序列的动态分析,着重探讨不同生态系统服务的时空演变特征及权衡关系<sup>[6-8]</sup>;其二是基于不同尺度,对比分析生态系统服务间权衡/协同关系的尺度效应<sup>[9-11]</sup>;其三是利用预测模型,设置不同情景,讨论生态系统服务在多情景下的权衡/协同关系差异<sup>[12-14]</sup>。从研究对象上看,多集中于流域、干旱区、海岸带等重要生态区,但以县域为单位的城市群的研究相对少见。城市群既是经济发展的引擎,又是新型城镇化的核心区,需注重对生态系统服务的需求,同时县域治理是国家治理的基础和重点,也是我国生态系统治理和维护的最小单位<sup>[15]</sup>,以此开展生态系统服务间关系的研究具有重要意义。在研究内容上,集中于从定性和定量角度分析区域权衡协同关系,较少涉及内部的空间差异分析,缺乏生态系统服务关系形成的内在机理探析。在研究尺度上,生态系统服务间关系存在尺度依赖性已得到共识<sup>[16]</sup>,但基于情景模拟法,预测并探讨不同情景和不同尺度下生态系统服务间的权衡关系较为少见。

在长江经济带绿色发展的共识下,武汉城市圈作为长江经济带的重要节点,长中游三大城市群之一,近些年来由于城镇化进程的加快,人口快速扩张,经济的快速发展对土地利用产生巨大影响,面临的生态系统服务

退化等问题具有很强的代表性。目前学者们对该区域的生态系统服务的研究已有一定基础,但主要集中于生态系统服务价值的评估及其影响因素的探究,较少涉及以县域为视角的生态系统服务间的权衡关系<sup>[17-19]</sup>。同时,生态系统服务具有很强的动态性和滞后性,分析目前的状态难以把握未来的演变趋势,亟需研究不同情景下的生态系统服务差异特征<sup>[20]</sup>。就生态系统服务的选取而言,湖北省是产粮大省,是13个粮食主产省之一、10个粮食净调出省之一,是长江经济带上重要的“粮仓”,因此研究其食物供给能力刻不容缓;2020年9月22日,中国政府在第75届联合国大会上提出:中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,CO<sub>2</sub>排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和。而碳储量服务因地表大量分布的固碳单位,对吸收CO<sub>2</sub>,调节气候变化方面起着关键作用,有利于碳中和目标更快达成<sup>[21]</sup>。武汉城市圈中耕地和林地面积占比接近80%,是两大重要碳库,其地类转换对碳储量服务影响深远。因此研究其碳储量服务,对武汉城市圈生态功能维系和自然资源的合理开发有重大意义;长江流域因独特的地质结构,造就了极其丰富的生物多样性,位居我国七大流域之首<sup>[22]</sup>,因此研究处于长江中游的武汉城市圈的生境质量服务,对加强物种保护及生态空间修复具有借鉴意义。综上所述,本文以武汉城市圈各县(市、区)为研究对象,分析不同情景下的土地利用变化,在此基础上探讨食物供给服务、碳储量服务和生境质量服务的时空演变特征和彼此间权衡与协同关系,并据此提出针对性的生态系统管理措施,降低生态风险,改善生态环境和促进可持续发展,为区域生态安全的构建和高质量发展提供科学参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

武汉城市圈地处112°30′—116°07′E, 29°05′—31°51′N,湖北省东部,长江中游,中国中部,是以武汉为中心城市,覆盖黄石、黄冈、鄂州、咸宁、孝感、仙桃、天门和潜江周边8个城市所组成的城市群。该区域自然环境多样,地形以平原和丘陵为主,属亚热带季风湿润性气候,四季分明、光照充足、雨水充沛,水热条件匹配相对较好。2005—2018年武汉城市圈GDP由4 019.05亿元增加到24 897.5亿元,三产比重由13.4:43.4:43.2转变为6.6:45.7:47.7,表明武汉城市圈经济正处于高速发展时期,逐渐向第二、三产业转型。武汉城市圈城镇化进程的不断加快会促使建设用地侵占大量生态用地和耕地实现迅速扩张,导

致生态环境的恶化、生态系统服务的不断衰退并影响居民福祉。因此,研究武汉城市圈土地利用变化对生态系统服务的影响并提出相应政策建议,有助于实现区域高质量发展和生态环境保护的“双赢”。本文将武汉城市圈分为 39 个县(市、区),其中为处理方便,将武汉和黄石的市辖区统称为武汉城区和黄石城区。

## 1.2 数据来源

本文数据包括:(1) 土地利用数据来源于 landsat-8 遥感数据,年份为 2005—2018 年,一共 4 期,依据 LUCC 分类体系将地类划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地,经检测综合精度为 88.82%。(2) 各县(区、市)年平均气温和年平均降雨来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。(3) DEA 数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。(4) 基础地理数据来源于 <http://www.ngcc.cn/>。(5) 食物产量数据来源于《湖北省统计年鉴》、《中国县域统计年鉴》以及各地级市统计年鉴。

# 2 研究方法

## 2.1 食物供给服务

食物供给是生态系统最基础的供给服务,对人类生存和可持续发展的作用不可忽视。参照郝梦雅等<sup>[23]</sup>的研究方法,本文以单位面积的食物总产值来代表食物供给服务,公式如下:

$$N_i = \sum N_{ij} = \sum \frac{F_{ij}}{S_{ij}} \quad (1)$$

式中: $i$  为各个县(区、市); $j$  为不同地类; $N$  为各县(区、市)不同地类单位面积的食物总产值; $F$  为各县(区、市)不同地类的食物总产值; $S$  为各县(区、市)不同地类的面积,其中耕地面积对应农业总产值,林地面积对应林业总产值,草地面积对应牧业总产值,水域面积对应渔业总产值。

## 2.2 碳储量服务

碳储量作为生态系统重要的调节服务,能够将大气中的碳固持到土壤或植被中,代表了生态系统的固碳能力。InVEST 模型自 2007 年开发以来,被广泛应用在区域生态系统服务评估中,并得到普遍认同<sup>[24]</sup>。InVEST 模型中的 Carbon 模块假设每一个地类的碳密度都由地上碳密度、地下碳密度、死亡有机质碳密度和土壤有机质碳密度所构成,且均为常量<sup>[25]</sup>。公式为:

$$C_i = C_{i\text{-above}} + C_{i\text{-below}} + C_{i\text{-dead}} + C_{i\text{-soil}} \quad (2)$$

$$C_{i\text{-total}} = C_i \times A_i \quad (3)$$

式中: $C_i$  为地类  $i$  的碳密度; $C_{i\text{-above}}$  为地类  $i$  的地上碳密度; $C_{i\text{-below}}$  为地类  $i$  的地下碳密度; $C_{i\text{-dead}}$  为地类  $i$  的死亡

有机质碳密度; $C_{i\text{-soil}}$  为地类  $i$  的土壤有机质碳密度; $C_{i\text{-total}}$  为地类  $i$  的总碳储量; $A_i$  为地类  $i$  的面积。

碳密度数据的来源需遵循:湖北省的实测数据优先,如若数据不全,则选用临近湖北省的实测数据或文献汇总数据。同时因方法或取样时间不同造成的实测数据的差异,需经比较舍弃异常值,取同一地类碳密度的平均值。

## 2.3 生境质量服务

作为生态系统重要的支持服务,生物多样性保护是生态保护主要的目标之一。InVEST 模型中生境质量模块作为生物多样性指标之一,用于反映外界环境对物种分布与丰富度的影响<sup>[26]</sup>,计算公式如下:

$$Q_{x,y} = H_j \left[ 1 - \left( \frac{D_{x,y}^z}{D_{x,y}^z + K^z} \right) \right]^2 \quad (4)$$

式中: $Q_{x,y}$  为地类  $j$  中栅格  $x$  的生境质量; $H_j$  为地类  $j$  的生境属性; $D_{x,y}^z$  为生境退化度; $K^z$  为半饱和常数,一般为最大生境退化度的 1/2, $z$  为归一化常量。

## 2.4 权衡与协同分析方法

为了探究生态系统服务间权衡/协同关系的量化表达,本文运用 SPSS 软件计算生态系统服务间的相关系数,当通过显著性检验时,其数值的多少代表变量间相关性的强弱,符号的正(负)代表变量间存在协同(权衡)关系<sup>[27]</sup>。

为了更进一步探究生态系统服务间权衡/协同关系的空间格局,本文基于 GeoDA 软件进行空间自相关分析。空间自相关由全局和局部自相关构成。全局自相关可分析研究区内单元间某一特征的整体相关水平,而局部自相关用于计算局部临近单元间某一特征的相关水平,能更准确地把握局部聚集和分异水平。双变量空间自相关在二者的基础上进一步扩展,可对两种要素之间的空间相关关系进行度量。其中,“高高聚类”和“低低聚类”均为协同关系,“高低聚类”和“低高聚类”均为权衡关系<sup>[28]</sup>。

## 2.5 土地利用情景模拟

情景分析法的基本思路是依据现有发展趋势来模拟未来状态的方法,在土地利用与生态系统服务的权衡关系中得到广泛应用<sup>[29]</sup>。本文研究多情景下的土地利用变化对生态系统服务的影响,对促进区域协调经济建设-生态保护具有借鉴意义。因此,本文运用 Markov-FLUS 模型,依据不同情景,设定不同约束条件,得到 2035 年两种土地利用类型图。情景一:自然发展情景  $Q_1$ ,即依据 2005—2018 年区域发展现状,假定发展趋势不会发生变化,且地类转换不作任何限制条件。情景二:综合发展情景  $Q_2$ ,统筹考虑经济发展、生态保护和耕地保护,需要严控生态保护红线和永



久基本农田保护红线,遏制城市的无序扩张。同时考虑到长江大保护的背景,将水域也作为约束条件。

### 3 结果与分析

#### 3.1 土地利用变化特征

研究显示,耕地和林地是武汉城市圈最主要的地类,2018 年两者占比达 79.21%,建设用地和水域面积虽持续增加,但仍占比不多。而草地和未利用地面积均较小,占比仅为 2.42%,0.35%,呈缓慢减少趋势。由表 1 可知,2005—2018 年期间共转移地类面积为

1 223.78 km<sup>2</sup>。其中耕地转出面积最大,为 927.66 km<sup>2</sup>,转出贡献率达 75.80%,转入建设用地的最多,达 791.88 km<sup>2</sup>,其次是林地,转出面积(137.24 km<sup>2</sup>)中有 93.57%转入了建设用地。从转入方向上看,转向建设用地的面积高达 1 010.30 km<sup>2</sup>,转入贡献率为 82.56%,主要来自于耕地和林地,表明了武汉城市圈的经济建设仍处于牺牲生态环境和农田的模式。水域是第二大转入地类,转入面积达 165.94 km<sup>2</sup>,显示了武汉城市圈在发展经济的同时也注重了对水体的保护,符合长江经济带的发展战略。

表 1 2005—2018 年土地利用面积变化

年份	土地利用	2018 年转移面积/km <sup>2</sup>						转出面积/ km <sup>2</sup>	转出 贡献率/%
	类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地		
2005 年	耕地	28498.51	14.40	0.41	120.09	791.88	0.89	927.66	75.80
	林地	0.60	17359.16	3.34	4.75	128.42	0.12	137.24	11.21
	草地	0.22	3.40	1399.42	0.44	12.90	0.36	17.32	1.42
	水域	14.31	1.46	0.79	5909.05	72.40	2.43	91.40	7.47
	建设用地	3.11	0.73	0.13	7.34	3285.16	0.13	11.43	0.93
	未利用地	0.67	0.04	0.02	33.32	4.69	198.29	38.74	3.17
	转入面积/km <sup>2</sup>	18.92	20.03	4.69	165.94	1010.30	3.92	1223.78	
	转入贡献率/%	1.55	1.64	0.38	13.56	82.56	0.32		

两种情景下的土地利用结构具有较大差异。由图 1 可知,从整个区域来看,耕地在两种情景下均有所下降,在自然发展情景下面积减少 1 093.107 km<sup>2</sup>,而在综合发展情景下仅仅减少 641.17 km<sup>2</sup>,体现了永久基本农田的保护作用。林地在自然发展情景下面积减少了 120.88 km<sup>2</sup>,而在综合情景中由于生态保护红线的功能,面积实现了增长,为 48.487 km<sup>2</sup>。水域和建设用地在两种情景下都在增长,但水域在自然发展情景下增加的面积(43.729 km<sup>2</sup>)远小于综合发展情景(153.065 km<sup>2</sup>),而建设用地正好相反,其在综合发展情景下(519.352 km<sup>2</sup>)扩张的面积仅为自然发展情景下(1 229.236 km<sup>2</sup>)的一半。草地在两种情景下无较大区别,可能由于草地既具备生态服务功能,其畜牧业又可以带动经济发展和保障粮食安全。未利用地面积在综合发展情境下(157.373 km<sup>2</sup>)小于自然发展情景(175.271 km<sup>2</sup>),可能的原因是其更多地被保护性地开发利用。就县域尺度而言,武汉城区、新洲区和江夏区的建设用地增长最为迅猛,在自然发展情景下共增长 215.58 km<sup>2</sup>,在综合发展情景下也增长了 133.717 km<sup>2</sup>,可能的原因是武汉三大国家级开发区的蓬勃发展。其他新增建设用地多为各城市的建成区,同时也是耕地大量减少的区域。而武汉的蔡甸区,黄冈的红安县、麻城市、罗田县、英山县和浠水县,咸宁的通山县、通城县和崇阳县,孝感的孝昌县,黄石的阳新县以及鄂州的梁子湖区,其境内含有大量重要生态保护区和水源涵养地,是武汉城市圈在综合发展情景下林地

和水域面积增长的主要来源。

#### 3.2 生态系统服务时空演变与多重重要区识别

在土地利用变化的影响下,武汉城市圈生态系统服务发生了剧烈变化。由图 2 可知,就食物供给服务而言,单位面积的食物供给能力处于持续上升趋势,从 2005 年的平均值 240.68 万元/km<sup>2</sup>到 2018 年的平均值 588.68 万元/km<sup>2</sup>,增幅达 144.59%。两种模拟情景下,由于综合发展情景下生态保护红线和永久基本农田红线的存在,农林牧渔业得到较好发展,其食物供给能力的平均值 1 111.86 万元/km<sup>2</sup>,高于自然发展情景的 887.42 万元/km<sup>2</sup>。从时空变化上,武汉城市圈食物供给服务较好地区由西北向东南偏移,尤其是孝感的云梦县和应城市,鄂州的梁子湖区,黄冈的武穴市提升较快,可能由于这些地区耕地占比较大,水源充足,同时由于生产条件和技术提高使得供给效率增长。同时值得注意的是,武汉城区的食物供给服务较低,但其周边的远城区却很高,特别是新洲区、黄陂区、汉南区和江夏区。它们是湖北省重要的粮棉油供应基地,耕地、林地和水域占比均超过 85%。

武汉城市圈碳储量呈持续下降趋势,由 2005 年的 680.984 Tg,下降到 2018 年的 673.134 Tg,降幅较为明显。在自然发展情景下,下降趋势进一步加快,为 664.912 Tg,而在综合发展情景下为 670.045 Tg,碳储量的流失大大减缓。从图 3 可以看出,武汉城市圈碳储量较低区域由中心逐渐往四周扩散。碳储量

高值区主要集中于黄冈的红安县、麻城市、罗田县、英山县和浠水县以及咸宁的崇阳县、通城县与通山县,其境内耕地和林地占比较多,固碳量较大。低值区主要分布在武汉城区、黄石城区、孝南区 and 咸安区,它们

城镇化水平较高,建设用地密度大,碳流失较为严重。需要说明的是,两种情景下,新增建设用地都是通过侵占耕地和林地等碳密度大的地类实现扩张,这是导致碳储量损失的主要原因。

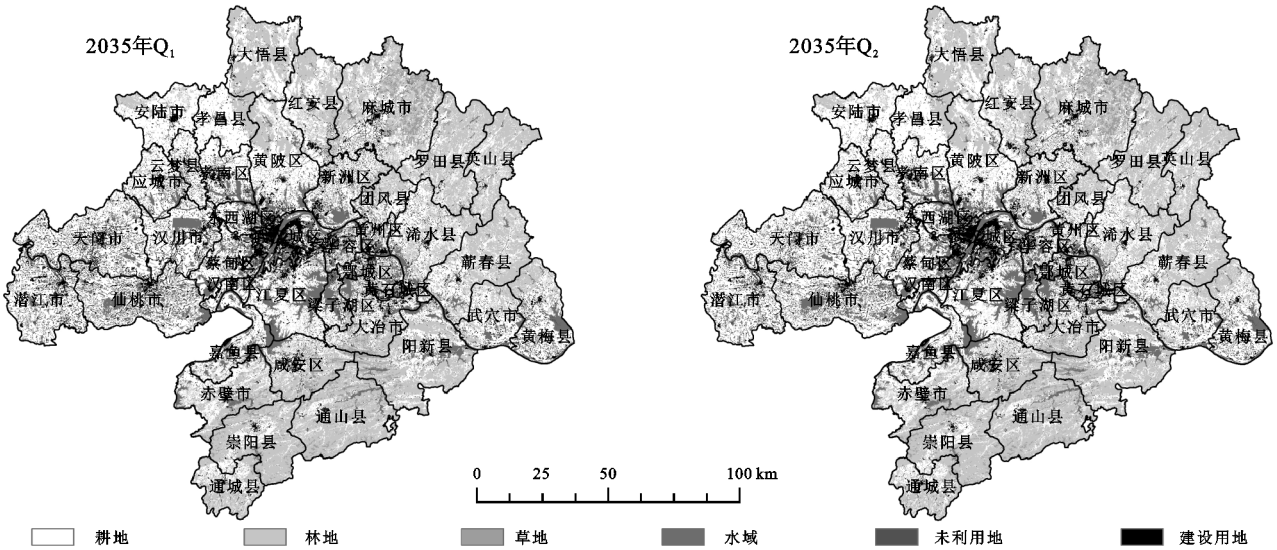


图 1 2035 年两种情景下土地利用模拟图

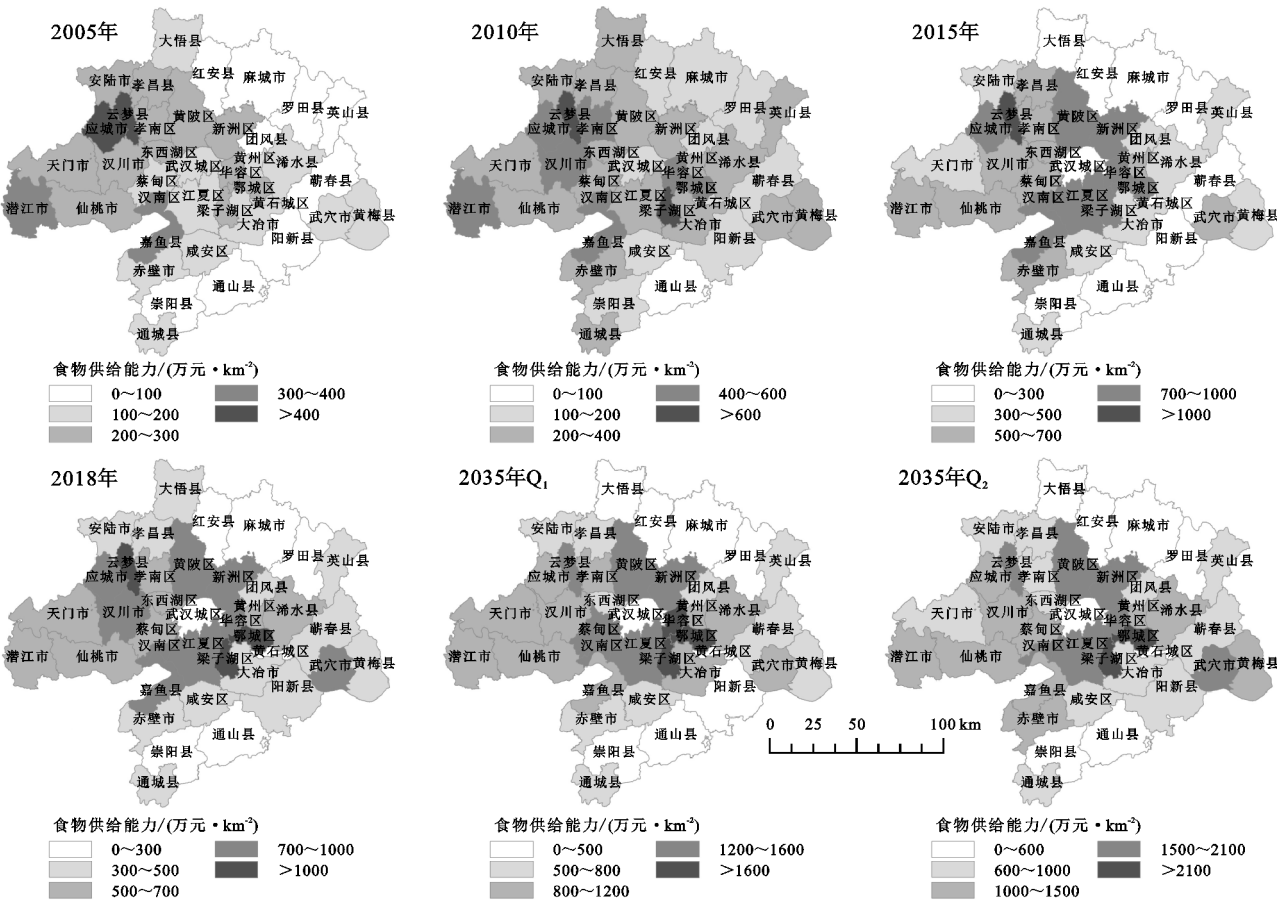


图 2 2005—2035 年食物供给分布

2005—2018 年武汉城市圈生境质量分别为 0.578,0.577,0.573,0.572,总体上呈下降趋势,尤其是 2010—2015 年期间最为明显。在自然发展情景下生境质量为 0.566,生境质量进一步恶化,而在综合发

展情景下生境质量与 2018 年相当,也为 0.572,表明区域在经济发展的同时,没有以生境质量的破坏作为牺牲。如图 4 所示,武汉城市圈生境质量大致呈现东西低南北高而中间最低的格局,且生境较差区域愈发



聚集。北方的大悟县、红安县、麻城市、罗田县、英山县和蕲春县靠近大别山脉,同时境内水库众多,水资源丰富,能较好地为野生动植物提供栖息之所,而南方的崇阳县、通山县和通城县南接幕阜山区,具有

国家级的森林公园、湿地公园和地质公园,生物多样性极其丰富,因此生境质量好。东西区域和中心的武汉城区生境质量持续变差,主要在于随着建设用地的扩张,人类活动强度增加,导致动植物生存环境恶化。

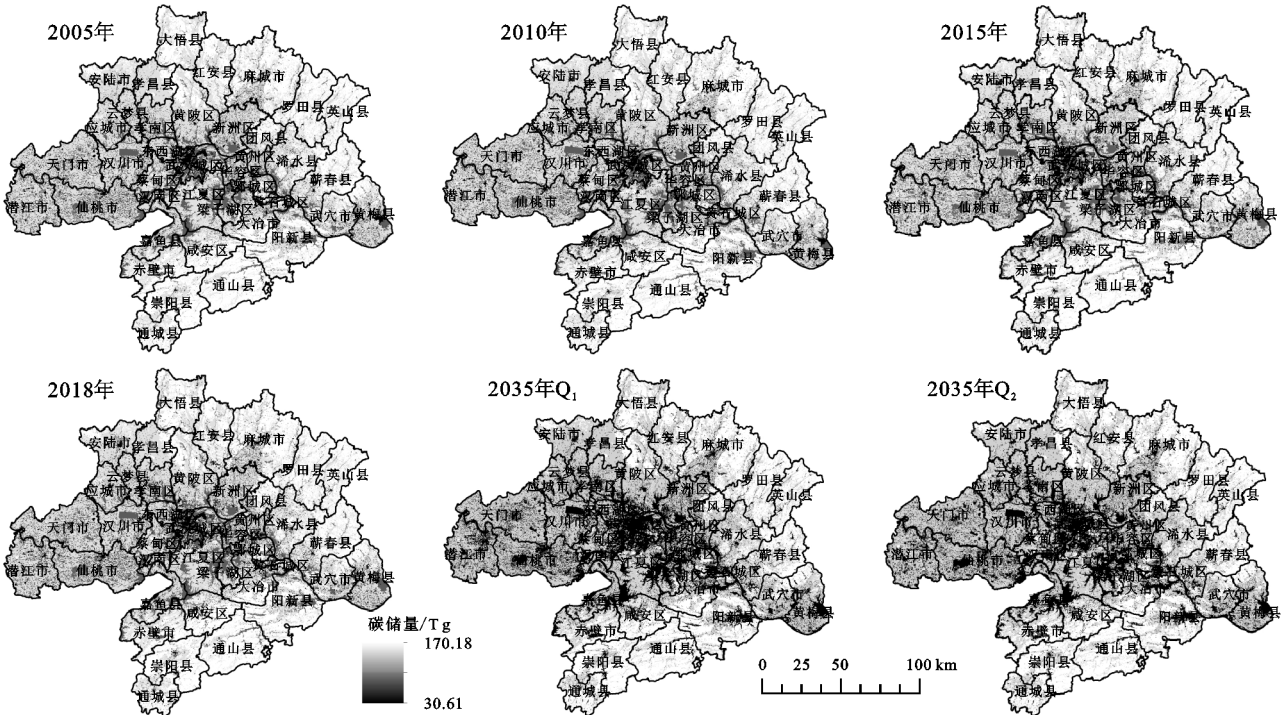


图 3 2005—2035 年碳储量分布

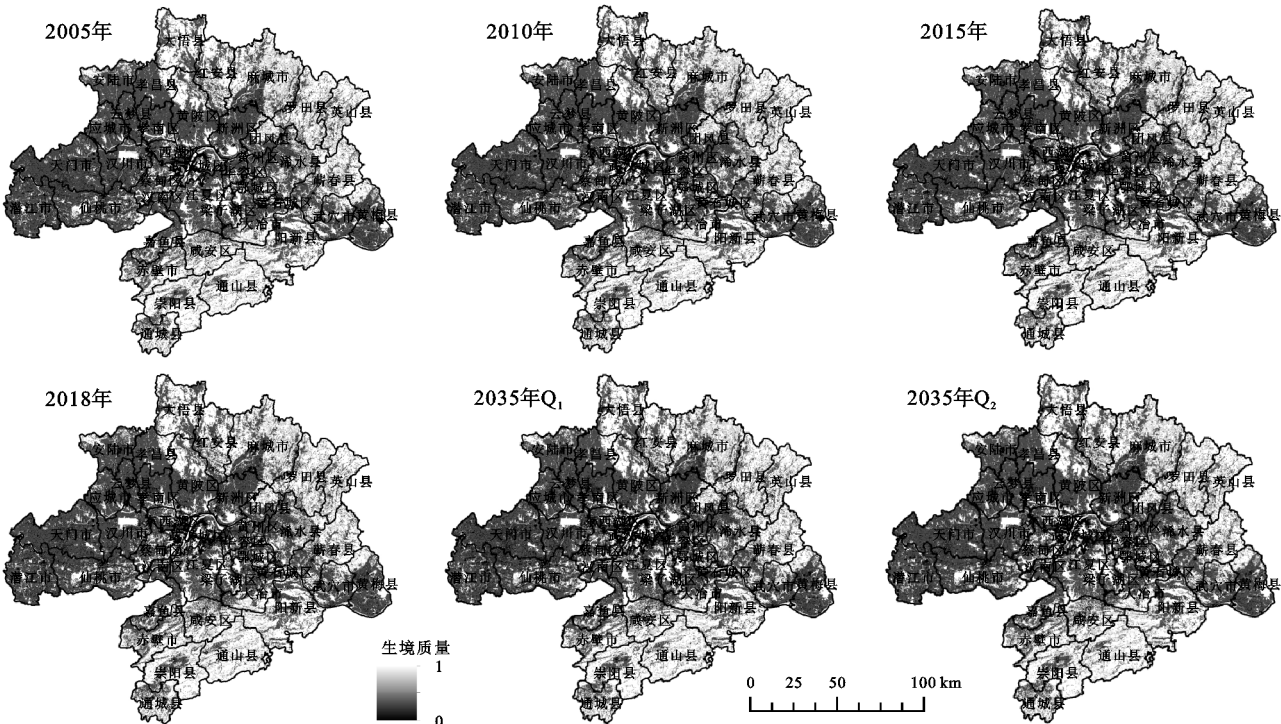


图 4 2005—2035 年生境质量分布

同一地类可以提供多种生态系统服务,如林地既具有碳储存能力,又能提供较好地生境质量服务。因此,本文对不同时期各生态系统服务结果进行叠加分析,通过各栅格上提供服务的能力,判断其重要性。

其中,能够提供 1,2,3 种超过全域服务平均值的区域分别定义为“中度重要”“高度重要”和“极其重要”,均小于服务平均值的区域为“一般重要”<sup>[30]</sup>。由图 5 和表 2 可知,从数量上看,各年份“中度重要”区域面积

最大,均超过 40%,且在自然发展情景下占比最多,为 42.07%。而“极其重要”区域在各年份面积都最小,仅仅只有在综合发展情景下超过 4%。从时空分布上看,2005 年“中度重要”区域集中分布在武汉城市圈的西侧以及武穴市,主要以食物供给服务为主,该区域为江汉平原,耕地面积较多。但在 2018 年和模拟年份,逐渐扩张到武汉市远城区和鄂州全境以及浠水县和嘉鱼县。“一般重要”和“高度重要”区域始终分布在武汉城市圈的北侧、东侧和南侧,主要以碳储量服务和生境质量服务为主,包含大量林地和水

域。而“极其重要”区域在 2005 年时零星分布在安陆市的西北侧,孝昌县和黄陂区的交界区和武穴市,但在 2018 年时安陆市的部分降为“高度重要”,而增加了浠水县的部分区域。在自然发展情景下孝昌县的部分区域也变为“高度重要”,但增加了大冶市南部区域。综合发展情景与自然发展情景大致相同,但黄梅县的北部从“高度重要”升为“极其重要”,且赤壁市的“极其重要”面积大幅增加。纵观“极其重要”区域,其境内建设用地占比极少,植被茂盛,水土保持量高且耕地富足。

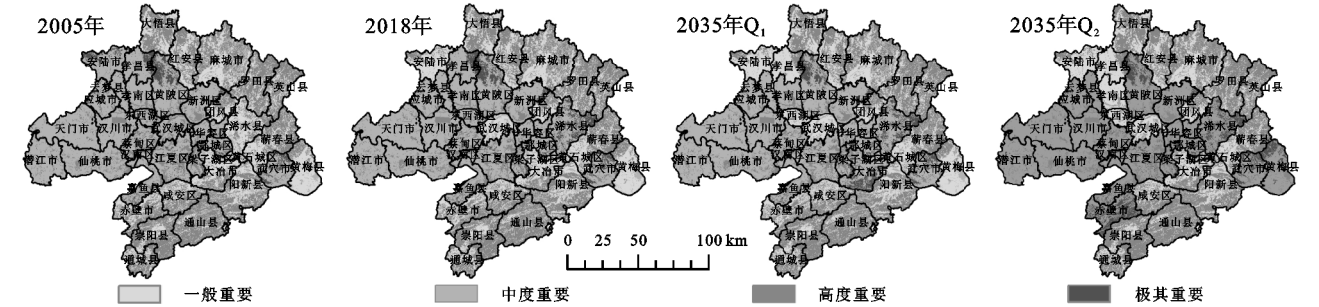


图 5 2005—2035 年多重生态系统服务分布

表 2 多重服务重要性分级面积占比 %

重要性占比	2005 年	2018 年	2035 年 Q <sub>1</sub>	2035 年 Q <sub>2</sub>
极其重要	0.0338	0.0387	0.0364	0.0489
高度重要	0.343	0.3328	0.3261	0.3192
中度重要	0.4091	0.4042	0.4207	0.4151
一般重要	0.2141	0.2242	0.2169	0.2168

3.3 不同情景下的生态系统服务权衡与协同关系分析

首先分析武汉城市圈生态系统服务权衡/协同关系的数值体现。本文运用 SPSS 软件,分析全域尺度和区县尺度的生境质量、碳储量和食物供给 3 种服务两两之间的相关性。如表 3 所示,就相关关系来说,不同情景下的生境质量与碳储量的相关系数均显著为正,表明这

对生态系统服务为显著的协同关系,而食物供给与生境质量,碳储量与食物供给的相关系数均显著为负,代表这两对生态系统服务间是显著的权衡关系。就不同尺度而言,生态系统服务相关关系的正负是一致的,但数值的大小有所区别,全域尺度下生境质量与碳储量的协同程度高于区县尺度,而食物供给与生境质量,碳储量与食物供给的权衡程度随着尺度增大而变强。从不同情景上来看,综合发展情景下的生境质量与碳储量的协同程度在两种尺度上均高于自然发展情景,而食物供给与生境质量,碳储量与食物供给的权衡程度在两种尺度上也都低于自然发展情景。

表 3 多尺度下的生态系统服务相关关系

项目	自然发展情景			综合发展情景		
	h	c	f	h	c	f
h	1.000	0.598 **	-0.299 **	1.000	0.607 **	-0.275 **
c	0.427 **	1.000	-0.447 **	0.516 **	1.000	-0.447 **
f	-0.257 **	-0.433 **	1.000	-0.235 **	-0.411 **	1.000

注:\*\*表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;右上方为全域尺度,左下方为区县尺度;h 为生境质量服务,c 为碳储量服务,f 为食物供给服务。

再进一步探究武汉城市圈各生态系统服务权衡/协同关系的空间表达。从表 4 可知,从双变量全局自相关 Moran's I 可知,区域内各生态系统服务都通过了 0.01 水平的显著性检验,且生境质量与碳储量在两种情景下均呈正相关关系,即协同关系,而食物供给与生境质量、碳储量与食物供给在两种情境下都为负相关关系,即权衡关系,这与表 3 的分析结论保持一致。为细化探究武汉城市圈内部各区县空间权衡/协同特征,本文运用双变量局部自相关分析得到图

6。就生境质量与碳储量而言,协同关系的占比在自然发展情景下为 40.17%,其中“高高聚类”主要分布在黄冈北部和咸宁南部,而“低低聚类”主要分布在天门、仙桃、潜江等区域。协同关系在综合发展情景下占比达 41.46%,除上述区域外,增加了新洲区、东西湖区和浠水县等部分区域。而权衡关系在自然发展情景下占比达 12.9%,在综合发展情景下占比为 12.5%,主要分布在武汉的偏远城区和鄂州。这表明了生态系统服务间的权衡/协同关系具有空间异质性。从食



物供给与生境质量来看,权衡关系在两种情景下均占比较多,在自然发展情景下为 47.94%,其中“高低聚类”主要分布在天门、潜江、仙桃、孝感以南、武汉远城区和鄂州等区域。而“低高聚类”是主要在黄冈以北以及咸宁南侧。权衡关系在综合发展情景下占比达 46.32%,在上述区域中减少了孝南区部分。协同关系在自然发展情景下占比达 14.25%,在综合发展情景下占比为 15.79%,大体位于孝感往北、武汉城区、东西湖区和黄梅县,零星分布在江夏区、梁子湖区和大冶市。就碳储量与食物供给来说,同样为权衡关系较多,在自然发展情景和综合发展情景下分别为 41.48%,39.24%,与食物供给和生境质量的权衡关系区域较为相似,但增加了武汉南部的蔡甸区、汉南

区、江夏区和咸宁的嘉鱼县,少了天门、仙桃和潜江等部分区域。另外,综合发展情景比自然发展情景少了应城市和通城县部分。协同关系占比较少,在自然发展情景下为 17.89%,在综合发展情景下为 18.89%,主要分布在武汉城区、黄冈和咸宁等部分区域。

表 4 生态系统服务双变量全局自相关

变量 1	变量 2	年份	情景	Moran's I	p value	z score
生境质量	碳储量	2035	Q <sub>1</sub>	0.39	0.001	505.9211
生境质量	碳储量	2035	Q <sub>2</sub>	0.409	0.001	469.1863
食物供给	生境质量	2035	Q <sub>1</sub>	-0.284	0.001	-363.0925
食物供给	生境质量	2035	Q <sub>2</sub>	-0.261	0.001	-331.4581
碳储量	食物供给	2035	Q <sub>1</sub>	-0.381	0.001	-457.7459
碳储量	食物供给	2035	Q <sub>2</sub>	-0.351	0.001	-433.4087

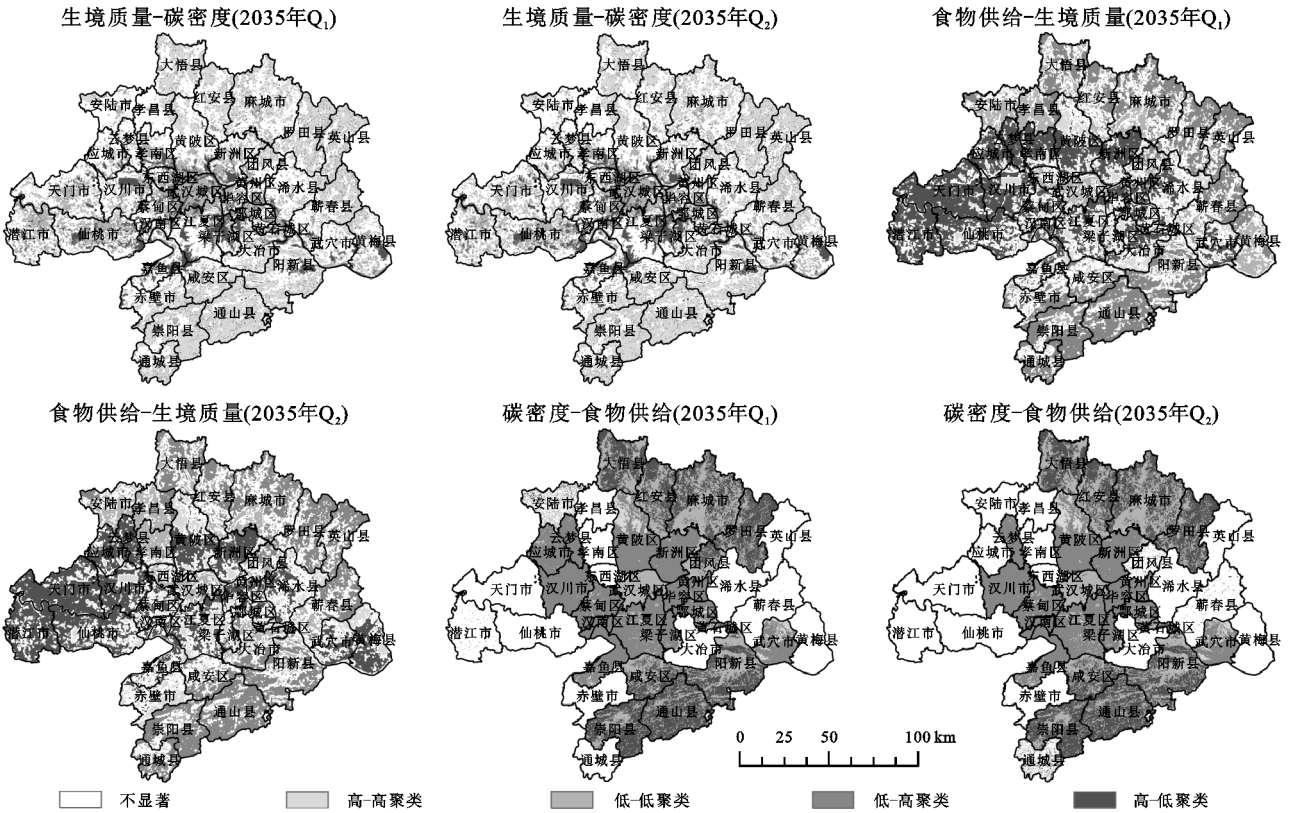


图 6 生态系统服务权衡与协同空间分异

单独统计县域单元的各生态系统服务权衡/协同占比,结果见图 7。生境质量与碳储量在各县以协同关系为主,占比比例从高到低依次为通山县、崇阳县、武汉城区、英山县、罗田县和大悟县。其中,除武汉城区是因建设用地密集,导致生境质量和碳储量均低而呈现“低低聚类”外,其他区域均是“高高聚类”。这些区域林地茂盛,水域众多,有机物含量较高,且生境质量较好。而权衡关系占比从高到低依次为梁子湖区、鄂城区、汉南区、江夏区和蔡甸区,这些区域水域与草地相间分布,是良好的动植物栖息地,但林地偏少,碳储量相对不足。食物供给与生境质量在各县中权衡关系占比较大,依次为云梦县、天门市、崇阳县、应城

市和汉川市,这些地区地势平坦,多为耕地,食物供给充足,但受人为干扰大,生境质量较差。而协同关系占比从高到低依次为孝昌县、安陆市、大冶市和东西湖区,其地类以林地和耕地为主,保障粮食供给的同时,生境质量也没受到损害。在碳储量与食物供给的关系中,各区县中权衡关系占比介于 0~99.28%,协同关系占比介于 0~91.89%,表现为复杂的权衡/协同关系。其中权衡关系最高的是汉南区,协同关系最高的是武汉城区,但整体来说还是以权衡关系居多。权衡关系处于优势的有新洲区、江夏区、嘉鱼县、华容区、汉川市和云梦县,这些区域是耕地和草地的组合地类,由于常年的耕作,食物供给较高的同时也导致了碳储量的



流失。协同关系为主的有武汉城区、黄石城区、阳新县、麻城市和咸安区,它们主要呈现“低低聚类”,其建设用地占比多,城市扩张侵占耕地,会同时导致碳储量和食物供给两种生态系统服务的衰退。值得注意

的是,综合发展情景下各区县的权衡占比在多数情况下均低于自然发展情景,而协同关系占比恰恰相反,说明综合发展情景在一定程度上增强了各生态系服务间的协同作用,减弱了它们之间的权衡对抗。

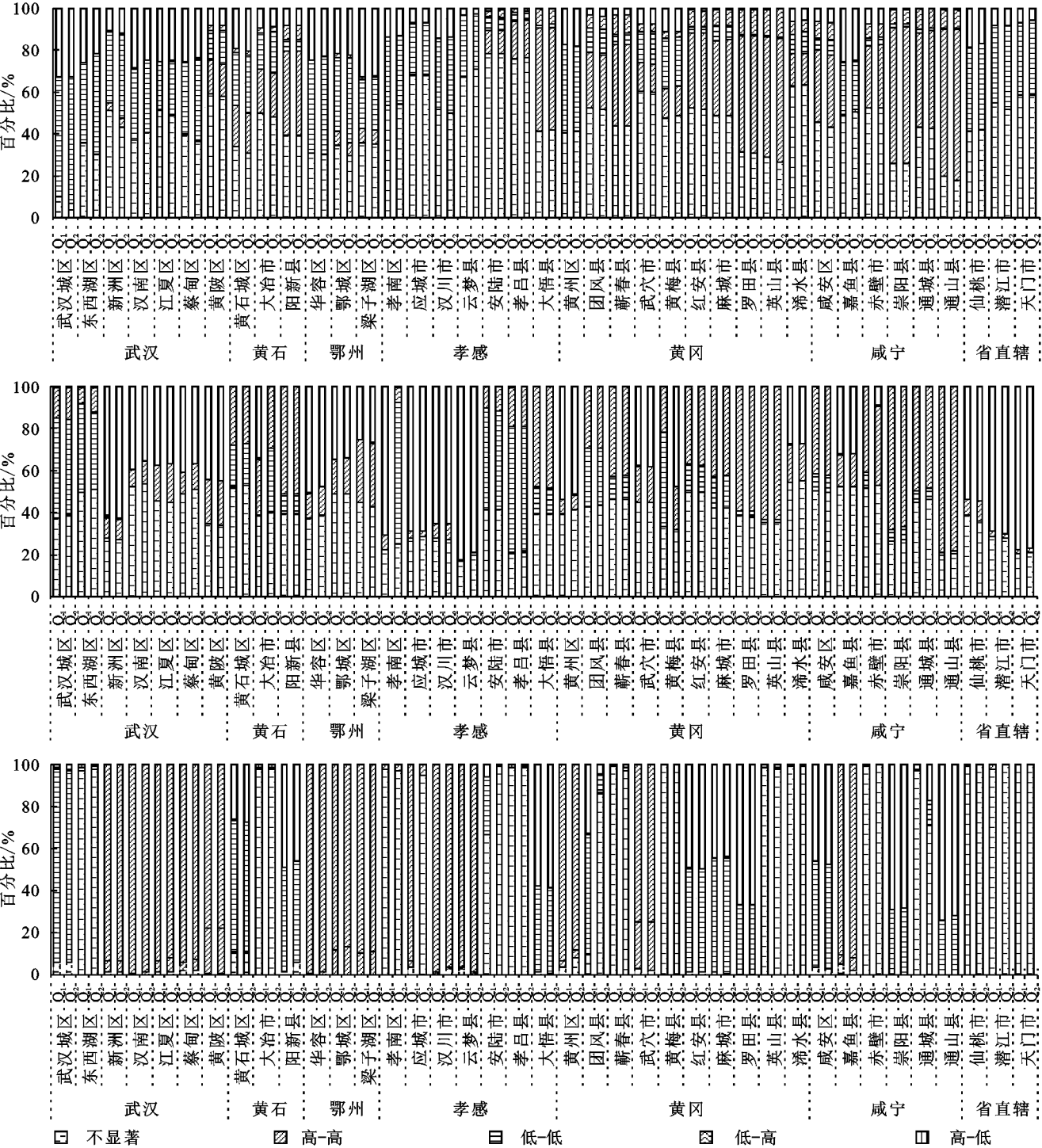


图 7 各区县生态系统服务权衡与协同关系占比

4 结论

(1) 2005—2018 年,武汉城市圈耕地、林地、草地、未利用地面积持续减少,建设用地和水域面积不断增加,主要是来源于耕地和林地的转入。综合发展

情景下耕地减少面积约为自然发展情景的一半,林地面积实现了增长,建设用地有序且缓慢扩张。

(2) 武汉城市圈 2005—2018 年食物供给服务处于持续上升趋势,且综合发展情景下食物供给能力高于自然发展情景,服务较好地区由西北向东南偏移;

2005—2018年碳储量呈持续下降趋势,在自然发展情景下进一步加快,而在综合发展情景下有所缓解,碳储量较低区域由中心逐渐往四周扩散;2005—2018年生境质量总体上也呈下降趋势,在自然发展情景下继续恶化,但在综合发展下得到维持,呈现东西低南北高而中间最低的格局,且生境较差区域愈发聚集。识别多重服务重要区发现,从数量上看,各年份“中度重要”区域面积最大,而“极其重要”面积最小,只有在综合发展情景下超过4%。从时空分布上看,“一般重要”和“高度重要”区域始终分布两大山区,以碳储量服务和生境质量服务为主,包含大量林地和水域。而“高度重要”区域成零星分布,其境内建设用地较少,植被茂盛,水土保持量高且耕地富足。

(3) 相关性分析表明不同尺度和情景下生境质量与碳储量均呈显著正相关,食物供给与生境质量、碳储量与食物供给均呈显著负相关,但程度有所差别。双变量空间自相关分析发现,服务间的权衡关系与相关系数分析保持一致。从空间分布上看,生境质量与碳储量协同关系主要分布在黄冈北部、咸宁南部和省直辖市,但在梁子湖区、鄂城区、汉南区、江夏区和蔡甸区呈现权衡关系。食物供给与生境质量协同关系主要分布在孝感南部、武汉远城区、鄂州等地区,但在孝昌县、安陆市、大冶市和东西湖区为协同关系。碳储量与食物供给服务在武汉南部、嘉鱼县、华容区和汉川市以权衡关系为主,但在武汉城区、黄石城区、阳新县、麻城市和咸安区呈现协同关系。

#### 参考文献:

- [1] Wang C, Tang C, Fu B, et al. Determining critical thresholds of ecological restoration based on ecosystem service index: A case study in the Pingjiang catchment in southern China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,303(2):114-125.
- [2] Yee S H. Contributions of ecosystem services to human well-being in Puerto Rico[J]. *Sustainability*, 2020,12(22):96-112.
- [3] Rolo V, Rocas-Diaz J V, Torralba M, et al. Mixtures of forest and agroforestry alleviate trade-offs between ecosystem services in European rural landscapes [J]. *Ecosystem Services*, 2021,50(8):101-113.
- [4] Cabral P, Campos F S, David J, et al. Disentangling ecosystem services perception by stakeholders: An integrative assessment based on land cover[J]. *Ecological Indicators*, 2021,126(7):107-116.
- [5] Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being: Synthesis* [R]. Washington DC: Island Press,2005.
- [6] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J]. *生态学报*, 2019,38(2):521-531.
- [7] Adelisardou F, Jafari H R, Malekmohammadi B, et al. Impacts of land use and land cover change on the interactions among multiple soil-dependent ecosystem services (case study: Jiroft plain, Iran)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021,43(3):1-20.
- [8] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2020,31(4):1278-1288.
- [9] 徐建英,陈吉星,刘焱序,等.“一带一路”地区生态系统服务关系的时空分异与区域响应[J]. *生态学报*, 2020,40(10):3258-3270.
- [10] Gao J, Yu Z, Wang L, et al. Suitability of regional development based on ecosystem service benefits and losses: A case study of the Yangtze River Delta urban agglomeration, China[J]. *Ecological Indicators*, 2019,107(11):105-116.
- [11] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J]. *地理学报*, 2020,75(5):975-988.
- [12] 李龙,吴大放,王芳,等.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究:以佛山市为例[J]. *生态学报*, 2020,40(24):9023-9036.
- [13] Liu Y, Hou X, Li X, et al. Assessing and predicting changes in ecosystem service values based on land use/cover change in the Bohai Rim coastal zone[J]. *Ecological Indicators*, 2020,111(4):106-119.
- [14] 陈心盟,王晓峰,冯晓明,等.青藏高原生态系统服务权衡与协同关系[J]. *地理研究*, 2021,40(1):18-34.
- [15] 祁宁,赵君,杨延征,等.基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同[J]. *生态学报*, 2020,40(9):2827-2837.
- [16] 高艳丽,李红波,侯蕊.汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J]. *长江流域资源与环境*, 2020,29(7):1619-1630.
- [17] 赵育恒,曾晨.武汉城市圈生态服务价值时空演变分析及影响因素[J]. *生态学报*, 2019,39(4):1426-1440.
- [18] 姚小微,曾杰,李旺君.武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. *农业工程学报*, 2015,31(9):249-256.
- [19] Peng K, Jiang W, Ling Z, et al. Evaluating the potential impacts of land use changes on ecosystem service value under multiple scenarios in support of SDG reporting: A case study of the Wuhan urban agglomeration[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,307(7):127-140.
- [20] 王晓萌,潘佩佩,王晓旭,等.基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021,37(1):80-88.
- [21] 曹世雄,刘玉洁,苏蔚,等.中国陆地生态系统服务净价值评估[J]. *中国科学:地球科学*, 2018,48(3):331-339.
- [22] 陈洪波.协同推进长江经济带生态优先与绿色发展:基于生物多样性视角[J]. *中国特色社会主义研究*, 2020,10(3):79-87.



[8] Conrad C, Rudloff M, Abdullaev I, et al. Measuring rural settlement expansion in Uzbekistan using remote sensing to support spatial planning[J]. *Applied Geography*, 2015, 62: 29-43.

[9] Hoffman-Hall A, Loboda T V, Hall J V, et al. Mapping remote rural settlements at 30 m spatial resolution using geospatial data-fusion [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 233: 111386.

[10] 董光龙, 许尔琪, 张红旗. 华北平原不同乡村发展类型农村居民点的比较研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2019, 40(11): 1-8.

[11] 佟艳, 牛海鹏, 樊良新. 不同城镇化进程农村居民点空间演变及影响因素研究[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(1): 152-160.

[12] Cao Y, Bai Z, Sun Q, et al. Rural settlement changes in compound land use areas: Characteristics and reasons of changes in a mixed mining-rural-settlement area in Shanxi Province, China[J]. *Habitat International*, 2017, 61: 9-21.

[13] Yang R, Xu Q, Long H. Spatial distribution characteristics and optimized reconstruction analysis of China's rural settlements during the process of rapid urbanization[J]. *Journal of Rural Studies*, 2016, 47: 413-424.

[14] 师满江, 颜耀文, 曹琦. 干旱区绿洲农村居民点景观格局演变及机制分析[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 692-702.

[15] 姜广辉, 何新, 马雯秋, 等. 基于空间自相关的农村居民点空间格局演变及其分区[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(13): 265-273.

[16] 宋文, 吴克宁, 刘浩然, 等. 基于地理空间适宜性指数自相关的农村居民点整理分区[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 249-257.

[17] 刘耀林, 范建彬, 孔雪松, 等. 基于生产生活可达性的农村居民点整治分区及模式[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 247-254.

[18] 郑文升, 姜玉培, 李孝环, 等. 公安县农村居民点用地分布影响因素评价: 基于 GWR 的空间异质性分析[J]. *人文地理*, 2015, 30(5): 71-76.

[19] Farber S, Páez A. A systematic investigation of cross-validation in GWR model estimation: Empirical analysis and Monte Carlo simulations[J]. *Journal of Geographical Systems*, 2007, 9(4): 371-396.

[20] Wang N, Mei C L, Yan X D. Local linear estimation of spatially varying coefficient models: an improvement on the geographically weighted regression technique[J]. *Environment and Planning A*, 2008, 40(4): 986-1005.

[21] 王新刚, 孔云峰. 城市住房价格局部线性地理加权回归分析: 以湖北省黄石市为例[J]. *中国土地科学*, 2015, 29(3): 82-89.

[22] 任国平, 刘黎明, 卓东. 都市郊区景观生态质量空间差异及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(21): 252-263.

[23] Cleveland W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots[J]. *J Amer Stat Assoc*, 1979, 74(368): 829-836.

[24] Bowman A W. An alternative method of cross-validation for the smoothing of density estimates [J]. *Biometrika*, 1984, 71(2): 353-360.

[25] Stephen A S, Wagner A K. Assessing the market value of real estate property with a geographically weighted stochastic frontier model[J]. *Real Estate Economic*, 2008, 36(4): 717-751.

[26] 杨斌, 王占岐, 张红伟, 等. 高山贫困地区农村居民点空间格局演变特征及驱动机制[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(4): 285-293.



(上接第 386 页)

[23] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. *地理研究*, 2017, 36(3): 592-602.

[24] 于媛, 韩玲, 李明玉, 等. 哈长城市群生态系统服务时空特征及其权衡/协同关系研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 293-300.

[25] 吴佩君, 刘小平, 黎夏, 等. 基于 InVEST 模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估: 以广东省为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(5): 22-28.

[26] 申嘉澍, 梁泽, 刘来保, 等. 雄安新区生态系统服务簇权衡与协同[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 79-91.

[27] Jopke C, Kreyling J, Maes J, et al. Interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 49(2): 46-52.

[28] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. *地理研究*, 2020, 39(1): 64-78.

[29] 吴晶晶, 田永中, 许文轩, 等. 基于 CA-Markov 模型的乌江下游地区土地利用变化情景分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(4): 133-139.

[30] 徐彩仙, 巩杰, 李焱, 等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4291-4301.