

DOI: 10.5846/stxb202002130237

李龙, 吴大放, 王芳, 刘艳艳, 刘毅华, 钱乐祥. 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. 生态学报, 2020, 40(24): 9023-9036.

Li L, Wu D F, Wang F, Liu Y Y, Liu Y H, Qian L X. Prediction and tradeoff analysis of ecosystem service value in the rapidly urbanizing Foshan City of China: A case study. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(24): 9023-9036.

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

李 龙, 吴大放*, 王 芳, 刘艳艳, 刘毅华, 钱乐祥

广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510006

摘要: 中国快速城市化区域由于经济迅速发展需要以及人类活动不断干扰, 导致土地利用变化剧烈, 影响生态系统功能发挥和服务供给, 给予生态环境带来巨大压力。分析和预测快速城市化区域生态服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)时空演变特征、权衡与协同关系, 对协调区域可持续发展具有重要意义。通过 FLUS(Future Land Use Simulation)模型、价值当量表估算法、皮尔逊相关分析和双变量自相关等方法, 分析并预测 2005—2025 年佛山市土地利用变化对 ESV 的影响, 同时探究 2025 年多情景下生态系统服务之间的权衡与协同关系。结果表明: ①2005—2025 年佛山市土地利用格局变化明显, 生态保护情景下土地利用变化程度最缓和。②2005—2015 年 ESV 共下降 11.41 亿元, 经济发展情景下的 ESV 下降趋势最明显。③供给、调节、支持与文化 4 种单项 ESV, 分别下降 1.95、5.02、4.08、0.36 亿元; 生态保护情景下的各项 ESV 均上升。④生态系统服务之间均存在明显的协同作用, 经济发展情景下的协同关系最显著; 西南和东北区域主要表现为协同关系, 局部区域表现为权衡关系。研究结果可为快速城市化区域生态系统功能调控和生态安全格局构建提供一定的思路。

关键词: 生态系统服务价值; 土地利用; 情景模拟预测; 权衡与协同; FLUS 模型; 快速城市化区域; 佛山市

Prediction and tradeoff analysis of ecosystem service value in the rapidly urbanizing Foshan City of China: A case study

LI Long, WU Dafang*, WANG Fang, LIU Yanyan, LIU Yihua, QIAN Lexiang

School of Geography and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China

Abstract: Rapid economic development and interference by human activities in rapidly urbanizing areas cause drastic land use changes, which negatively affect ecosystem function and services. This enormously pressurizes the ecological environment; therefore, it is crucial to assess the spatiotemporal evolution of ecosystem service value (ESV) in such rapidly urbanizing areas. The prediction of land use and ESV and the analysis of the relationship between tradeoffs/synergies can provide a basis for scientific decisions regarding regional sustainable development. Therefore, we analyzed and predicted the effect of land use change on the ESV using the FLUS model (Future Land Use Simulation) and the valuation scale estimation in Foshan City from 2005 to 2025. In addition, we explored the tradeoffs and synergies between ecosystem services using Pearson's correlation and spatial autocorrelation analyses for multiple scenarios in 2025. We demonstrated

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101078, 41771096); 广州市哲学社会科学“十三五”规划 2019 年度一般课题(2019GZYB83); 广东省教育科学“十三五”规划 2020 年度研究项目粤港澳大湾区建设和“一带一路”问题研究专项(2020GXJK199)

收稿日期: 2020-02-13; 网络出版日期: 2020-11-05

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wudaf2004@163.com

that (1) the pattern of land use changed significantly and that the degree of land use change in the context of ecological protection was the most moderate. (2) ESV decreased annually, with a total decrease of 1.141 billion yuan from 2005 to 2015; this declining trend was the most obvious under the economic development scenario. (3) The value of four individual ecosystem services, supply, regulation, support, and culture, decreased by 1.95, 5.02, 4.08, and 36 million yuan, respectively. The values of the individual ecosystem services increased in the context of ecological protection. (4) In different scenarios, the ecosystem services showed similar and obvious temporal synergies, especially in the economic development scenario. The southwest and northeast regions were characterized by synergies, whereas the local regions were characterized by tradeoffs. Thus, our study provides a theoretical basis for the regulation of ecosystem function and the construction of an ecological security pattern in rapidly urbanizing areas.

Key Words: ecosystem service value; land use; scenario simulation prediction; tradeoffs and synergies; FLUS model; rapidly urbanizing area; Foshan City

生态系统服务是指人类通过生态系统结构、功能和过程直接或间接获取维持人类生存和生活所需的产品或惠益^[1]。千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)指出生态系统服务包括供给、调节、支持与文化服务,认为全球60%的生态系统功能正在或者已经退化,主要受到人类活动的干扰^[2]。生态系统服务和功能退化会破坏均衡的土地利用结构,从而影响到土地效益以及社会可持续发展。土地利用/覆盖变化是全球环境变化研究热点之一,也是人类活动作用于生态系统的重要体现,通过改变生态系统结构、功能与空间格局,影响生态系统服务形成、供给和分配。因此,土地利用变化与生态系统服务形成相互制约与促进的关系^[3]。随着我国城市化进程急剧推进,人类建设开发活动占用大量土地,导致土地结构失衡,从而引起负面的生态效应^[4]。探究城市化进程中土地利用变化对生态系统服务影响已成为全球变化研究领域焦点,是支持土地可持续利用决策的有效工具,同时对于协调区域可持续发展、优化国土空间格局以及保障国土生态安全具有重要意义^[5]。

生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)作为表征生态安全程度的重要指标,在科学准确评估其价值与刻画其地理分布规律特征等方面,国内外学者已取得丰富成果。自Hughes和Daily^[6]和Costanza等^[7]开展生态系统服务研究以来,该领域的研究内容、方法模型和尺度等研究体系逐渐趋于完善。研究内容主要涉及生态系统服务分类^[8]、价值定量化评估^[9]、功能监测^[10]、生态系统服务之间的权衡与协同关系^[11]以及土地利用变化对生态系统服务影响^[12]等方面;研究尺度涵盖国家^[13]、城市群^[14]、流域^[15]、省^[16]市^[17]县^[18]等区域;研究方法主要包括模型分析法(InVEST^[19]、ARIES^[20]等模型)、能值分析法^[21]、价值当量表估算^[22]、主成分分析^[23]以及情景模拟^[24]等。学者对许多区域进行广泛探索,但仍存在一定不足:目前主要针对流域或者城市群等宏观区域进行研究,忽略了中、微观区域内部空间的ESV差异;虽然已有部分研究对未来ESV进行预测,但从未来不同情景视角进行预测并分析生态系统服务之间权衡与协同关系的研究鲜有报道;现有的模拟土地利用变化模型主要包括CA-Markov^[25]、多智能体^[26]、CLUE-S模型^[27]、Tietenberg模型^[28]、SLEUTH模型等^[29],但大多数模型缺乏分析土地类型之间联系,难以表征城市化扩张下的土地类型之间竞争和相互影响关系。FLUS模型基于自适应惯性竞争机制可以有效解决上述问题^[30],但应用FLUS模型预测ESV并分析未来生态系统服务之间的权衡与协同关系的研究更为少见。随着全球城市化进程推进,区域人口、资源与环境问题突出,探究快速城市化区域的土地利用覆盖变化对生态系统服务影响愈发受到学术界和政府界的关注。然而生态系统服务具有较强的动态性,分析历史时期的ESV时空演变特征存在一定滞后效应,难以准确分析区域目前以及未来的生态状况,亟需更深入分析未来不同发展情景下的生态系统服务变化。因此,分析未来不同情景下土地利用变化对ESV的影响以及生态系统服务之间的权衡与协同关系十分必要,为区域生态系统保护和优化管理决策提供科学的理论依据,并丰富生态系统服务相关研究的理论体系。

佛山市作为典型快速城市化区域,具有土地利用格局变化剧烈、结构功能较为复杂和经济社会发展迅速

等特点,同时随着广佛都市圈和粤港澳大湾区战略的推进,区域经济迅猛发展导致城市扩张问题加剧、人地矛盾、生态保护与经济社会发展矛盾愈发突出。因此探究佛山市 ESV 的时空演变特征及并预测分析不同情景下土地利用变化对其影响,对于优化土地利用决策和统筹国土空间格局具有指导性作用。鉴于此,在分析佛山市 2005—2015 年的土地利用时空演变特征和 ESV 地理分布规律的基础上,运用 FLUS 模型分析未来不同情景下 2025 年佛山市土地利用变化对 ESV 影响,并利用空间自相关等方法探讨佛山市各生态系统服务之间权衡与协同关系,为促进佛山市以及类似的快速城市化区域生态安全格局构建和社会经济协调发展提供科学支撑。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

佛山市位于广东省中部,是粤港澳大湾区重要节点城市之一,地处东经 112°22′—113°23′,北纬 22°28′—23°34′,下辖三水区、南海区、禅城区、高明区和顺德区 5 个区,总面积为 3797 km²。2015 年佛山市耕地、建设用地和林地为主要用地类型,分别为 1310.87、1475.66、687.14 km²。地势总体上西高东低,由西向东倾斜,地形主要以三角洲平原为主,属亚热带季风性湿润气候,年平均气温 23.2℃,年均降水量为 1717.3 mm,气候温和,雨量充沛。该市 GDP 在 2006—2015 年期间由 2983.90 亿元上升至 8003.92 亿元,一二三产业比重分别由 2.2:63.1:34.7 转变为 1.7:60.5:37.8,表明佛山市社会经济发展迅猛,城市化程度较高,逐渐向第三产业转

型。佛山市城市扩张态势迅猛和土地利用结构不均衡,给生态环境造成极大压力并影响其居民生活质量,因此研究该区域土地利用变化对生态系统服务的影响对于快速城市化区域生态安全格局构建具有典型的示范性。

2.2 数据来源

土地利用数据来源于覆盖佛山市域的 Landsat TM/OLI 遥感影像数据(2005-07-18、2010-11-02、2015-09-12),根据佛山市土地利用特点,通过监督分类将研究区分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六类土地利用类型,对比 Google Earth 高分辨率遥感影像及土地利用现状图,对分类结果进行精度验证,三期分类总体精度达到 85% 以上,符合精度所要求;辅助图件包括广东省、佛山市行政区划图(2015 年)来源于国家基础地理信息中心 1:400 万数据库;DEM 数据来源于地理空间数据云平台;社会经济数据来源于《佛山市统计年鉴》(2006—2016 年)、《中国农产品价格调查年鉴》(2010 年)。

2.3 研究方法

2.3.1 不同情景下土地利用模拟预测

(1) 模型介绍

FLUS 模型是由 Li 等^[31]研发的用于土地利用模拟和未来土地利用情景预测分析的有效工具。该模型原理源自元胞自动机(CA),并在其基础上做了较大改进。首先采用多层前馈神经网络(BP-ANN)从一期的土地利用数据和自然、社会经济驱动因子中获取各类用地适宜性概率,其次应用轮盘赌的自适应惯性竞争机制有效处理在人类活动和自然因素共同影响下土地类型相互竞争的复杂性问题,从而弥补 CA 不足,实现更为完善的土地利用模拟预测。基于神经网络的适宜性概率计算和自适应惯性竞争机制原理不再详细阐述,具体参照王宝盛等^[32]文献表述。

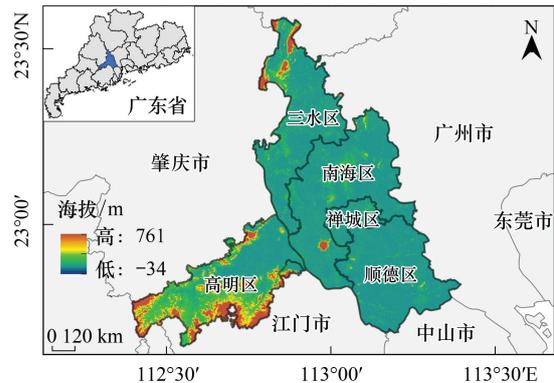


图 1 研究区

Fig.1 Study area

(2) 土地利用变化驱动因子选取

受自然、社会与经济因素等综合影响,土地利用结构和功能发生相应的变化。而在快速城市化区域,空间区位条件和社会经济因素对于土地利用变化和城市扩张的驱动作用更为显著。参考已有的土地利用变化驱动因素研究^[33],最终选取高程、坡度、到市中心、到不同道路的距离等 7 项因素作为驱动因子,归一化结果如图 2 所示:

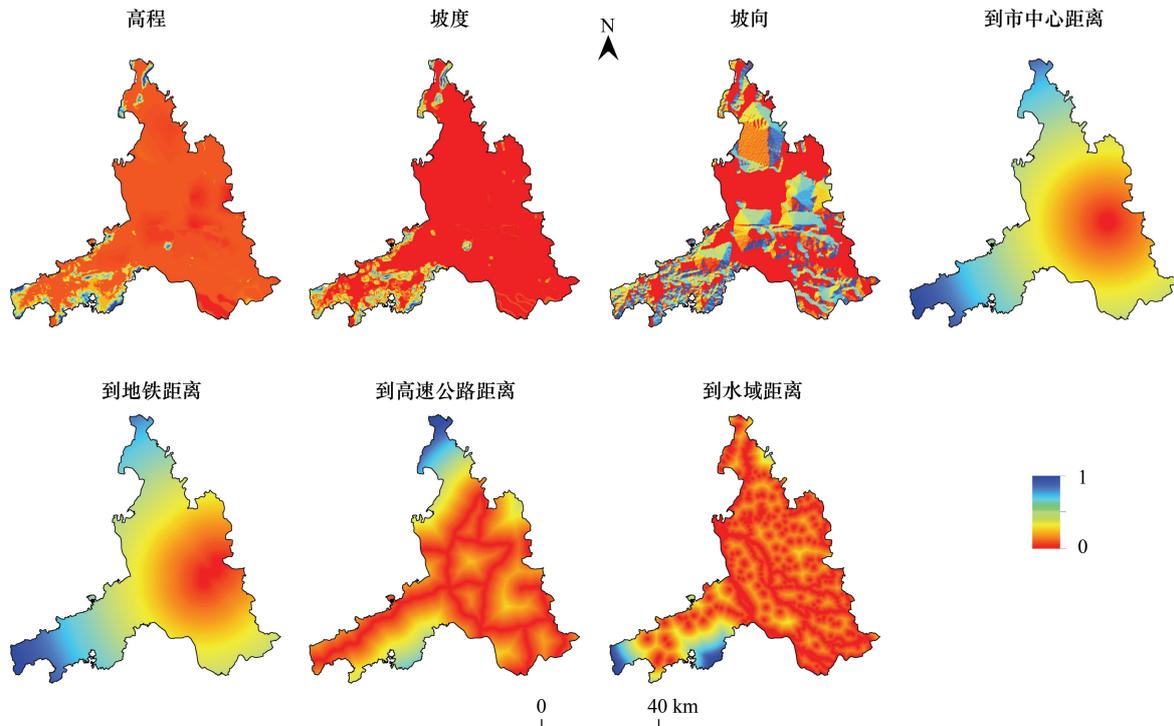


图 2 驱动因子归一化

Fig.2 Normalization of driving factor

(3) 情景设定

分析不同情景下生态环境对土地利用变化的响应特征,对促进生态保护、耕地保护与经济建设协调发展具有重要作用。因此,以 2025 年为目标年设定 3 种土地利用情景。

①情景一:经济发展情景。在快速城市化背景下,以经济效益优先和加快城乡融合趋势作为发展目标,较少受到政策和市场的干预影响,更多的是遵循土地利用自然变化规律,因此仅把水域作为约束条件,实现区域经济快速发展。

②情景二:耕地保护模式。耕地的数量与质量对于保障国家和区域粮食安全极为重要。耕地保护政策干预力度较大,选择耕地和水域作为约束条件,严格控制耕地数量和空间位置,防止在快速城市化过程中被侵占,保证区域基本的粮食安全。

③情景三:生态保护模式。以生态效益优先作为发展目标,加大生态保护的力度,减少城市无序向外扩张对生态系统产生的负面影响。受到政策因素影响较大,选择基本农田、林地以及水域作为约束条件,防止区域生态用地和基本农田被侵占,改善区域的生态环境质量。

不同情景下约束条件如图 3 所示。

(4) 邻域权重参数设置

邻域权重参数表征邻域范围内不同类型土地单元扩张能力,反映在自然和社会因素驱动作用下不同用地类型的侵占强度。邻域因子参数范围为 0—1,值越大说明该用地类型的侵占能力越强。借鉴已有邻域权重参数成果^[34],并结合佛山市实际情况修正,基于扩张能力大小对用地类型排序并赋值,邻域权重参数设置如

表 1 所示.

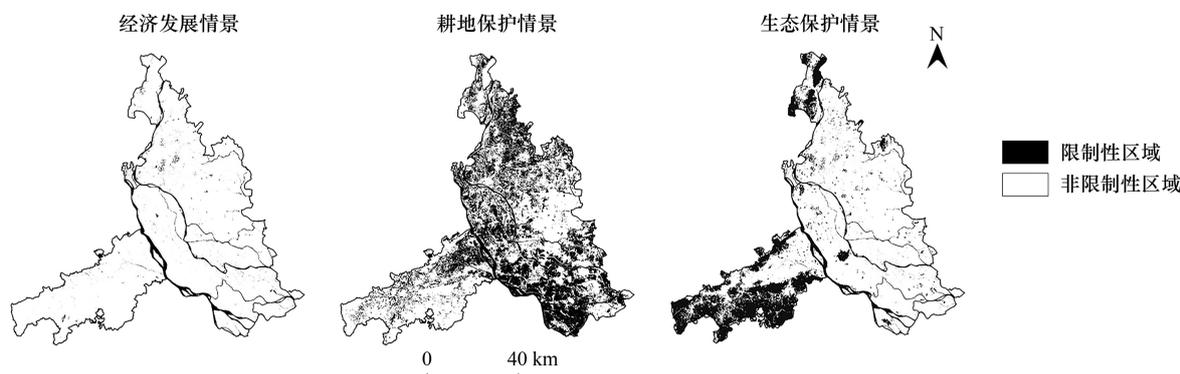


图 3 不同情景约束条件

Fig.3 Constraint conditions of different scenarios

表 1 邻域权重参数表

Table 1 Weight of neighborhood

土地利用类型 Land use type	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
邻域权重 Neighborhood weight	0.56	0.25	0.36	0.43	1	0.25

(5)成本矩阵设置

成本矩阵代表的是各类用地之间是否可以相互转换的规则。如果某类用地可转换为另一类用地,则赋值为 1;如果两类用地之间无法转换,则赋值为 0。基于 3 种不同的情景,相应设计 3 种转换成本矩阵,具体参数设置见表 2。在经济发展情景下,考虑到佛山市经济水平和技术条件较高,且以经济效益为优先目标,因此设置所有用地均可转化为建设用地;而建设用地转化为其余用地可能性较低、成本较高,设置为建设用地不可转化为其他用地,其余用地类型按实际情况相互转化。在耕地保护情景下,主要考虑耕地保护等政策约束下,耕地不允许转化为其他类型用地;同时基于耕地保护的正向驱动作用,设置大部分其他类型用地均可转化为耕地。在生态保护情景下,侧重于生态用地保护并保证生态系统能够提供足够的服务,因此设置大部分其他类型用地仅能单向转换为林地或草地;同时适当兼顾经济发展和粮食安全,设置除林地、草地、水域之外的用地均可转换为建设用地和耕地。

表 2 情景模拟成本矩阵

Table 2 Cost matrix of scenario simulation

	经济发展情景 Economic development scenario						耕地保护情景 Farmland protection scenario						生态保护情景 Ecological protection scenario					
	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f	a	b	c	d	e	f
a	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0
b	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0
c	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0
d	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1
e	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
f	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1

a、b、c、d、e、f 分别代表耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地

2.3.2 生态系统服务价值评估方法

谢高地等^[35]基于 Costanza 的当量因子法,结合中国实际情况和众多专家修正结果,得出中国生态系统服

务价值当量表。考虑到 ESV 区域间的差异性和空间异质性主要体现在社会经济水平上,因此利用佛山市粮食作物单产、播种面积和粮食作物价格(2010 年不变价)修正单位面积农田粮食作物的经济价值,使其更符合佛山市的实际情况,等于佛山市平均粮食单产市场价值的 $1/7^{[36]}$,具体修正方法如下所示:

$$E_a = \frac{1}{7} \left(\sum_{i=1}^n m_i p_i q_i \right) \frac{1}{S} \quad (1)$$

式中, E_a 为佛山市单位面积农田粮食作物的经济价值(元/hm²), i 为粮食作物种类; n 为粮食作物数量; m_i 、 p_i 、 q_i 分别为 i 类粮食作物的面积(hm²)、价格(元/kg)和单产(kg/hm²); S 为农作物总面积(hm²)。

利用单位面积农田粮食作物的经济价值和当量因子表,最终得到佛山市单位面积生态系统服务价值系数表 3:

表 3 佛山市单位面积生态系统服务价值系数/(元/hm²)

Table 3 Value coefficient of ecosystem services per unit area in Foshan City

一级类型 Primary type	二级类型 Secondary type	耕地 Farmland	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Rivers	建设用地 Building land	未利用地 Unused land
供给服务 Supply services	食物生产	4434.29	1463.32	1906.74	2350.17	0.00	88.69
	原材料生产	1729.37	13214.18	1596.34	1552.00	0.00	177.37
调节服务 Regulation services	气体调节	3192.69	19156.13	6651.44	2261.49	0.00	266.06
	气候调节	4301.26	18047.56	6917.49	9134.64	0.00	576.46
	水文调节	3414.40	18136.25	6740.12	83231.62	0.00	310.40
	废物处理	6163.66	7626.98	5853.26	65849.21	0.00	1152.92
支持服务 Support services	保持土壤	6518.41	17825.85	9932.81	1818.06	0.00	753.83
	维持生物多样性	4522.98	19998.65	8292.12	15209.61	0.00	1773.72
文化服务 Cultural services	提供美学景观	753.83	9223.32	3857.83	19688.25	0.00	1064.23
合计 Final total		35030.89	124692.23	51748.16	201095.05	0.00	6163.66

基于佛山市单位面积生态系统服务价值系数,并结合公式 2 计算 ESV。为分析区域内部土地利用变化对 ESV 的影响差异,选取格网为评价单元。以往研究关于格网单元大小选取差异较大,涵盖 0.5、1、3、5 和 10 km 大小不等的尺度,郭椿阳等^[37]认为 5 km 尺度以下的结果总体较为一致,因此考虑图幅限制并凸显空间差异性,多次调整后拟定 3 km 为评价单元。为了消除研究区域边缘不规则格网面积大小差异影响,便于比较区域内部所有差异,本文在传统的 ESV 基础上增加单位面积生态系统服务价值(UESV)这一指标^[38]。基于自然断点法,将 UESV 划分为一至五级,UESV 值越大,等级越高。二者计算公式如下所示:

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_j E_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$UESV = \frac{ESV}{S} \quad (3)$$

式中,ESV 为格网内总生态系统服务价值(元); A_j 为 j 类生态系统面积(hm²); E_{ij} 为 j 类生态系统的 i 类生态系统服务价值系数(元/hm²); m 为生态系统服务种类总数; n 为土地利用类型总数;UESV 为格网单位面积生态系统服务价值(元); S 为格网单元面积(hm²)。

2.3.3 生态系统服务权衡与协同量化表达

空间自相关分析分为全局和局部自相关。全局自相关用于分析区域内研究单元之间关于某一属性的整体关联水平,局部自相关用于度量局部邻近单元之间关于某一属性关联程度,能更准确把握局部集聚和分异特征。双变量空间自相关分析是在两者的基础上进一步完善,用于度量两个变量属性之间的空间相关程度。双变量全局自相关和局部自相关模型的计算方式如下所示:

$$I = \frac{\left[n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (y_i^m - \bar{y}_m) (y_j^z - \bar{y}_z) \right]}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (y_i^m - \bar{y}_m) (y_j^z - \bar{y}_z)} \quad (4)$$

$$I_{ij} = Q_i^m \sum_{j=1}^n (w_{ij} Q_j^z); Q_i^m = \frac{y_i^m - \bar{y}_m}{\sigma_m}; Q_j^z = \frac{y_j^z - \bar{y}_z}{\sigma_z} \quad (5)$$

式中, I 为全局双变量空间自相关指数; n 为格网单元个数; w_{ij} 为空间权重; y_i^m, y_j^z 为 i 格网单元的 m 属性值和 j 格网单元的 z 属性值; \bar{y}_m, \bar{y}_z 分别为属性 m 和 n 的平均值; I_{ij} 为局部双变量空间自相关指数; σ_m, σ_z 分别为属性 m, z 的方差。 I 取值为 $[-1, 1]$, 表征供给、调节、支持和文化服务之间的权衡与协同关系, 其中 I 大于 0 且越接近 1, 则说明生态系统服务之间的协同关系越明显; I 等于 0, 则说明不表现为权衡或协同关系; I 小于 0 且越接近 -1, 则说明权衡关系越明显。通过 Geoda 软件计算 I_{ij} 值得到 LISA 聚类图, 分析不同生态系统服务之间权衡与协同关系的局部空间自相关格局, 其中高高集聚和低低集聚表示协同关系, 高低集聚和低高集聚表示权衡关系。

3 结果和分析

3.1 2005—2025 年佛山市土地利用变化

为预测 2025 年佛山市不同情景下的土地利用变化情况, 首先利用 2010 年现状数据模拟 2015 年土地利用状况并结合 2015 年实际土地利用数据进行验证, Kappa 系数为 87.32%, 精度符合需求。再利用 2010 和 2015 年现状数据, 基于 Markov 模型测算未来土地利用需求量, 最后预测 2025 年佛山市不同情景下土地利用情况。从图 4 可知, 2005—2015 年佛山市主要用地类型为耕地、建设用地和林地, 其中耕地主要分布在佛山市东北部和南部区域, 建设用地分布在佛山市中部和东部区域, 林地主要分布在西南和北部区域。南海和三水区的耕地数量下降速度最快, 南海区和顺德区建设用地扩张速度最高。2015—2025 年, 在耕地保护情景中, 耕地面积总体保持稳定, 林地、草地和未利用地面积分别下降 31.86、28.39、8.59 km², 主要分布在高明区南部和三水区北部。在生态保护情景中, 除建设用地数量略有下降以外, 其余用地数量均有上升, 其中高明区林地数量增长趋势最显著, 增加了 34.39 km²。在经济发展情景中, 耕地、草地和未利用地数量均呈下降趋势, 其中顺德区南部和南海区北部耕地下降数量最多, 下降了 76.83 km²; 顺德区南部的建设用地扩展程度最大, 增加了 87.25 km²。

从图 5 可知, 2005—2015 年佛山市土地利用结构变化剧烈, 耕地、林地和未利用地面积逐年下降, 分别下降了 255.35、20.02、43.17 km², 占比分别下降了 6.72%、0.47%、1.18%。建设用地面积增加了 339.49 km², 占比增加了 8.94%, 水域和草地面积基本保持稳定。2015—2025 年期间, 耕地保护和生态保护情景土地利用结构变化相对缓和, 经济发展情景下的土地结构变化最为剧烈, 水域和建设用地面积略有增加, 其余用地面积均减少。

3.2 2005—2025 年佛山市生态系统服务价值变化

2005—2015 年 ESV 逐年下降, 由 183.22 亿元下降至 171.81 亿元, 下降了 11.41 亿元, 由于建设用地扩张占用大量耕地和林地造成。从图 6 中可以看出, 佛山市 UESV 整体呈现显著的西高东低、南北两侧高以及中部低的空间格局特征。西南部和北部 UESV 高值区的海拔较高且林地居多, 具有较好自然生态本底条件; 东部和中部 UESV 低值区的地形平坦, 以 ESV 较低的建设用地和耕地为主。

从图 7 可知, 2015—2025 年不同情景的 UESV 总体变化显著, 其中经济发展情景 UESV 下降程度相对较高。从内部空间格网来看, 经济发展情景下的格网 UESV 值变化较大, 东部 UESV 整体呈下降趋势, 主要是政策约束小以及经济效益驱动造成, 给予城市东部生态环境造成极大压力; 而北部和西南局部区域 UESV 上升, 主要是因为拥有良好生态本底条件。在耕地保护情景下, 格网的 UESV 值变化不大, 由于受到严格耕地保护政策的影响, 耕地被占用几率降低, 建设用地扩张也受到一定的制约, 因此大部分区域 UESV 趋于稳定; 同时

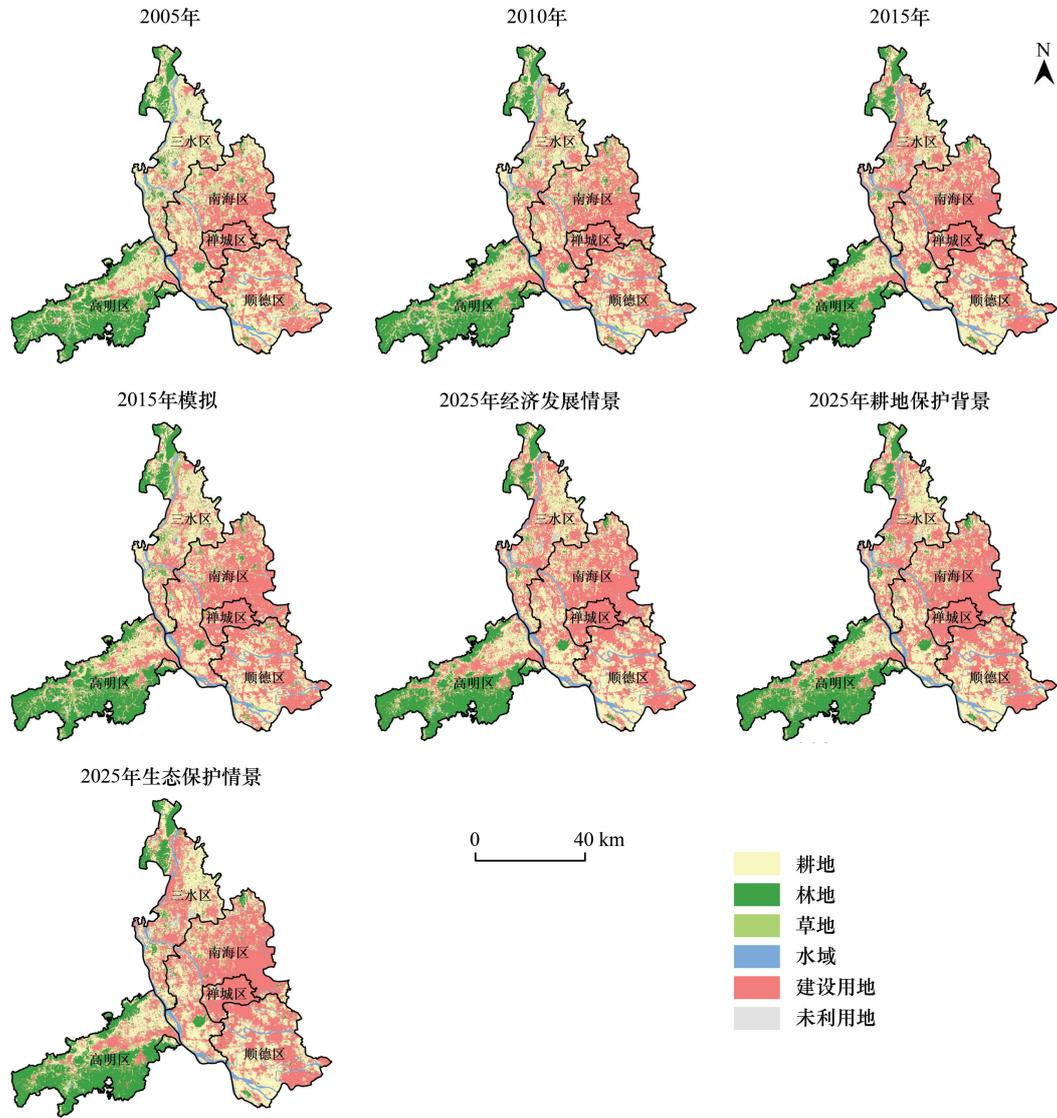


图 4 2005—2025 年佛山市土地利用时空演变及预测

Fig.4 The land use spatiotemporal evolution and prediction in Foshan from 2005 to 2025

受到耕地保护政策的影响,耕地周围的生态也会受到相应的保护,因此部分林地区域表现为 UESV 上升。在生态保护情景下,格网总体 UESV 值变化不大,主要是因为林地在严格的生态保护政策下极少被占用,而建设用地扩张未能保护耕地免于被侵占,因此局部表现为下降。

从图 8 可知,2005—2015 年佛山市供给服务价值呈逐年下降趋势,共下降 1.95 亿元,2015—2025 年三种情景下,生态保护情景的供给服务价值略有提升,共增长 0.05 亿元,受到生态保护政策影响,林地较少被侵占,生态环境质量提升促使供给服务价值有所提升;其余两种情景由于城市发展侵占林地或者耕地导致原材料生产和食物生产服务价值下降。2005—2015 年调节服务价值呈逐年下降趋势,共下降 5.02 亿元,2015—2025 年三种情景下,调节服务价值均略有提升,主要是土地利用结构更为均衡,其中生态保护情景的服务价值提升程度最大。2005—2015 年佛山市支持服务价值呈逐年下降趋势,共下降 4.08 亿元,2015—2025 年三种情景下,耕地保护和经济发展情景下的支持服务价值略有下降,分别下降了 1.43 亿元和 0.99 亿元,而生态保护情景增长了 0.04 亿元。前两种情景未能有效重视生态用地保护,因此服务价值有所下降。2005—2015 年佛山市文化服务价值呈逐年下降趋势,共下降 0.36 亿元,2015—2025 年三种情景下,生态保护和经济

发展情景下的文化服务价值略有上升,分别上升了 0.30 亿元和 0.20 亿元,耕地保护情景减少了 0.36 亿元。耕地保护情景下的耕地被严格管控,林地、草地被大量占用,美学景观功能未能得到有效发挥。

3.3 生态系统服务权衡与协同关系特征

为探究佛山市不同情景下生态系统服务权衡与协同关系,本文以 3 km 格网单元为评价单元,获取三个情景下每个格网单元单一服务的 UESV, 然后进行 SPSS 相关性分析、双变量全局自相关分析。Person 相关系数大于 0,说明不同生态系统服务之间则呈现为协同特征,系数越大,表明在时间上生态系统服务协同关系越显著;反之,则表现为权衡关系。从耕地保护、生态保护和经济发展三个情景下的 Pearson 相关系数和双变量全局自相关 Moran's I 指数来看,佛山市的供给、调节、支持和文化服务在不同情景下表现出一致的协同关系,并且经济发展情景下协同关系最显著。从 Pearson 系数可知,显著程度为供给-支持>调节-文化>支持-文化>

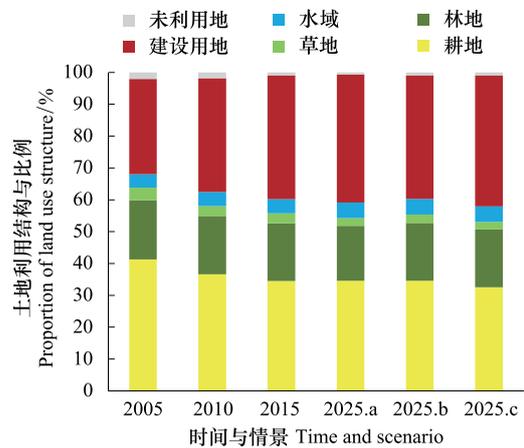


图 5 2005—2025 年佛山市土地利用结构变化

Fig.5 The land use structure change in Foshan from 2005 to 2025

2025.a、2025.b、2025.c 分别为 2025 年耕地保护、生态保护、经济发展情景

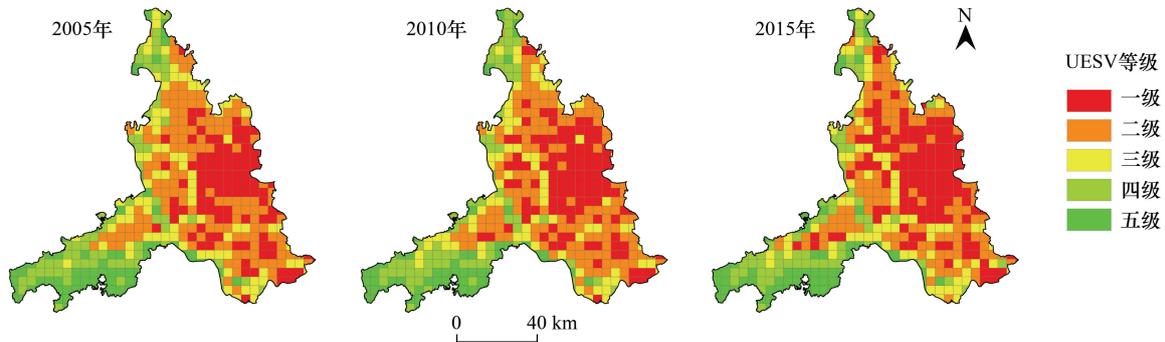


图 6 2005—2015 年佛山市 UESV 时空演变

Fig.6 The spatiotemporal evolution of UESV in Foshan from 2005 to 2015

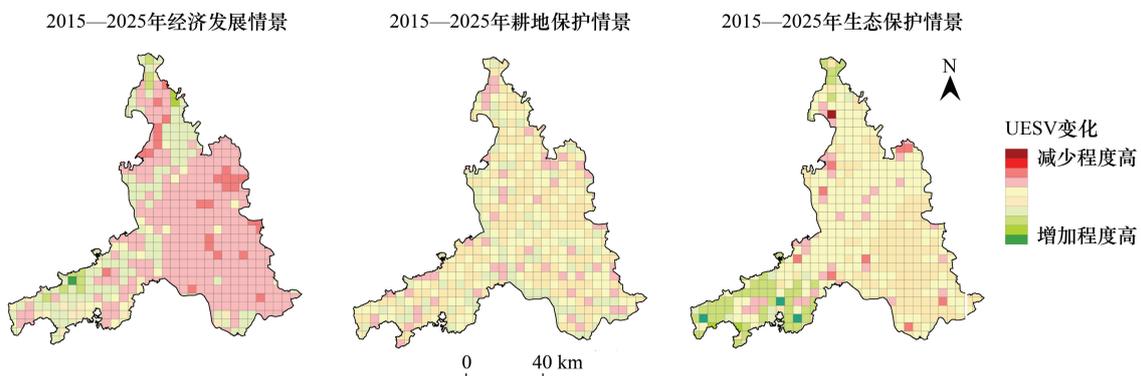


图 7 2015—2025 年佛山市 UESV 变化

Fig.7 Changes of UESV in Foshan from 2015 to 2025

UESV: 单位面积生态系统服务价值 Unit ecosystem service value

供给-文化>调节-支持>供给-调节;从 Moran's I 指数可知,空间上协同关系显著程度为供给-支持>支持-文化>

供给-文化>供给-调节>调节-支持>调节-文化,具体结果如表 4 所示.

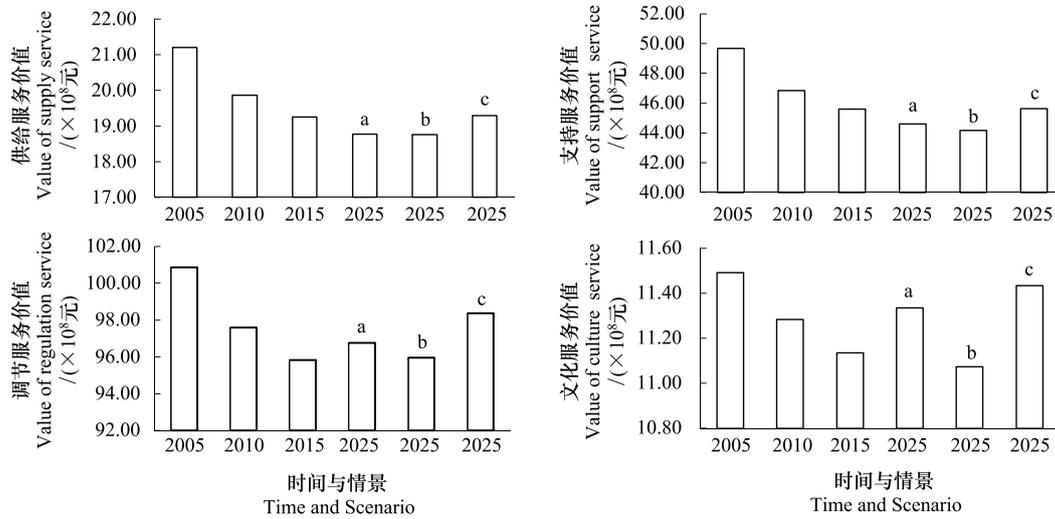


图 8 2005—2025 年供给、调节、支持与文化 ESV 变化

Fig.8 Changes of ESV in supply, regulation, support and culture from 2005 to 2025

a、b、c 分别为耕地保护、生态保护、经济发展

表 4 2025 年佛山市不同情景 4 种生态系统服务相关分析结果

Table 4 Correlation analysis results of 4 kinds of ecosystem services in different scenarios in Foshan in 2025

生态系统服务 Ecosystem services	Pearson 系数 Pearson coefficient			Moran's I		
	耕地保护	生态保护	经济发展	耕地保护	生态保护	经济发展
供给-调节 Supply-Regulation	0.605	0.604	0.616	0.3239	0.3216	0.3413
供给-支持 Supply-Support	0.99	0.991	0.991	0.5448	0.5391	0.5596
供给-文化 Supply-Culture	0.695	0.694	0.699	0.3848	0.3817	0.3947
调节-支持 Regulation -Support	0.68	0.678	0.687	0.3167	0.3148	0.3313
调节-文化 Regulation-Culture	0.984	0.984	0.984	0.2502	0.2495	0.2595
支持-文化 Support- Culture	0.772	0.77	0.773	0.3926	0.3895	0.3999

为深入了解佛山市不同生态系统服务在内部空间上协同与权衡关系的分异特征,本研究引入双变量局部自相关分析法进行细化分析。由于经济发展情景的时空协同关系显著性最强,因此以经济发展情景的 UESV 为基础单元表征生态系统服务的协同与权衡关系。从图 9 可知,生态系统服务之间协同与权衡关系的空间集聚特征总体较为显著。供给、调节、支持和文化四种服务在空间上主要表现为协同关系,分布在佛山市西南部和东部区域,局部表现为权衡关系,主要分布在三水区东部和高明区东北部区域。其中供给-调节、供给-文化、供给-支持、调节-文化、调节-支持和支持-文化表现为协同关系的格网数目分别为 267、304、392、277、347 和 304;表现为权衡关系的格网数目为 27、26、44、53、89 和 26。东北部的协同关系表现为低低集聚,主要由于建设用地数量较高以及城市迅速向外扩展导致;西南地区协同关系表现为高高集聚特征,是因为高明区林地数量较多,生态本底质量较高;表现为权衡关系的格网零散分布各区,大多处于林地等生态用地外围区域,位于建设用地与林地、耕地之间,由于经济发展破坏稳定的生态系统结构,导致呈现出权衡特征。

4 结论与讨论

4.1 讨论与建议

4.1.1 提升生态系统服务的城市土地利用管理建议

佛山市 ESV 呈逐年下降趋势,反映了城市化和人类干预等因素造成土地利用格局的不合理性,对生态系

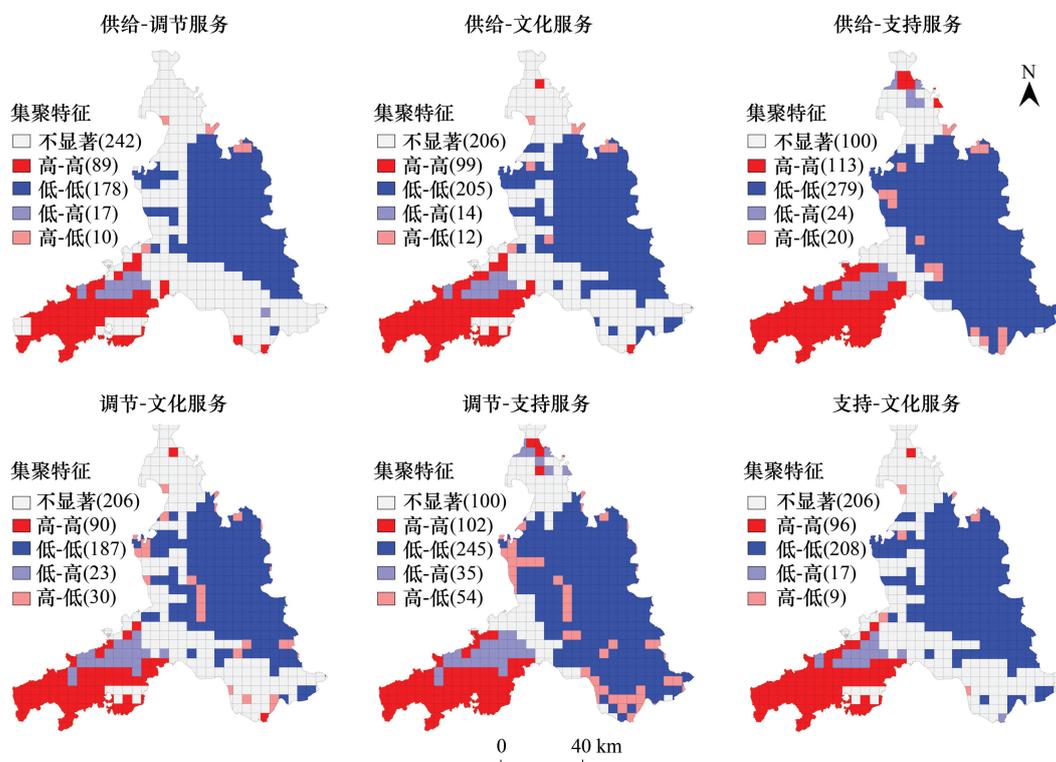


图9 2025年佛山市经济发展情景4种生态系统服务局部LISA图

Fig.9 The local LISA diagram of 4 ecosystem services under economic development scenario of Foshan in 2025

统造成一定的负面效应^[39]。林地、耕地和建设用地是影响ESV变化的主要类型,林地等农业资源面临严重威胁^[40]。因此,在快速城市化过程中,需要加强耕地和林地等能提供较高ESV的用地保护,避免城市建设用地摊大饼式的无序扩张,同时政府应更重视土地集约利用水平提升和环境保护工作。2025年耕地保护情景ESV低于经济发展情景,与欧阳晓等^[41]结果不一致。这是由于耕地保护情景的约束对象是所有耕地,假设所有耕地不被侵占这一参数设置过于苛刻,破坏了城市和生态系统自身的规律,城市生态系统引发更为严重的负面效应^[42]。生态保护情景的ESV高于耕地保护情景,主要是生态保护情景以基本农田和林地作为约束对象,并未将所有耕地纳入约束条件,政策干预力度相对较小,合理地优化了结构和布局,因此生态保护情景ESV更高。在快速城市化区域,耕地保护的政策不能过于严苛,在严守耕地红线的前提下,可适当对低质量、散乱的耕地进行结构调整,以实现区域的可持续发展。就快速城市化区域中的国土空间规划和生态修复等政策而言,未来不仅要重视农业结构调整和生态用地保护,还要提升建设用地集约利用水平、严格控制基本农田数量以及合理优化生态安全格局。同时,城镇化建设中还需建立生态补偿机制,通过实施生态补偿项目来提升区域ESV。此外,因地制宜设计相关政策、合理调整土地利用方式,注重城市的合理开发和有序建设,实现快速城市化区域建设开发和生态保护的协调发展。

4.1.2 权衡与协同关系及尺度效应分析

ESV是表征生态安全程度的重要性指标,准确科学评估其价值,对于生态系统结构、功能以及过程调节和优化,统筹优化生态安全格局具有重要意义。厘清生态系统服务在不同情景与尺度下协同与权衡关系更是提升生态、经济和社会效益的前提。本文关于调节、支持与文化服务之间的协同关系结果与他人研究成果基本一致^[43],但供给服务与其他服务之间均表现为协同关系,与部分学者的结果不同^[44],尚且需更多深入研究进行验证。主要是由于生态系统服务权衡与协同关系表现显著的空间异质性,不同区域权衡与协同关系不同,对于此消彼长的生态系统服务,在不同区域可能会表现协同关系^[45]。生态系统服务的评估方法也不一致,目

前多数运用的 InVEST 模型提升生态系统服务评估的精确度,但由于方法模型和参数的不足,不能方便计算总体 ESV 的空间变化^[46],而本文利用价值当量法计算 ESV,由于评估机制不一致,内涵和结果也会有所差别,同时人地环境系统的时空异质性和多样性导致价值转移泛化而形成误差^[47]。由于图幅限制并尽可能凸显佛山市 ESV 的内部异质性,选择 3 km 的评价单元,然而权衡与协同关系具有明显复杂的尺度效应,如城市群、区域以及城市尺度存在一定差异^[48],同时也与自然要素的空间异质性以及不同利益方的需求差异息息相关,不同尺度下的利益群体对同类服务具有不同选择结果^[49],因此权衡与协同关系可以相互转化,造成与其他学者结果在一定程度上不相符。由于整体上的权衡协同关系趋于一致,所以需要更深入分析内部空间异质性,以便结合局部特征因地制宜制定生态保护政策。局部产生权衡关系,表明区域土地利用在一定程度上存在着竞争和博弈关系,经济发展、粮食生产和生态保护之间存在一定的冲突^[50]。科学划定城镇开发边界、基本农田和生态保护红线,缓和建设用地的无序扩张、提升区内生态环境质量、促进经济可持续发展,从而实现生态、经济和社会效益的统一。

4.1.3 不足与展望

采用多情景模拟预测的方法分析不同情景下佛山市土地利用变化对 ESV 的影响,并利用相关系数法和双变量自相关分析法研究 4 种服务之间的权衡与协同关系不够全面,未来可以将生态系统服务种类和情景进行更细化、多样化划分。此外,在模拟预测未来土地利用时,具有一定的客观局限性,例如耕地保护情景下的耕地被严格保护,不受城市扩张影响,生态保护情景下的基本农田和林地不受城市化影响这一设计过于僵化,与实际情况有一定差距。虽然结果在一定程度上会夸大和缩小,但仍能反映不同政策设计影响下土地利用对 ESV 的影响总体趋势。未来可基于基本农田保护区和生态红线划定结果,并结合实际情况修正,更为准确探究不同情景下生态系统服务对土地利用变化的响应特征。同时加强 ESV 及其权衡协同关系的尺度效应的内部机理和相互作用机制进行分析,制定合理的土地利用政策,寻求经济发展和生态良好的双赢局面,可为决策者和利益相关者提供可行的政策方案和科学的决策依据,为国家生态文明建设战略提供有效的支撑。

4.2 结论

(1) 在 2005—2025 年快速城市化过程中,佛山市土地利用格局变化明显,建设用地扩张态势显著;林地、草地以及耕地等农用地数量呈下降趋势,而建设用地面积逐年增加,水域保持相对稳定。2025 年生态保护和耕地保护情景下的土地利用变化程度比经济发展情景更缓和,人类活动、政策干预对土地利用格局影响显著。

(2) 2005—2015 年 ESV 整体呈下降趋势,共减少 11.41 亿元,2015—2025 年经济发展情景下的 ESV 下降趋势比耕地保护和生态保护情景明显。2000—2025 年各时期的 UESV 空间分布特征总体一致,呈现显著的西高东低、南北两侧高中部低空间格局特征,佛山市东部和北部区域的 ESV 呈持续下降趋势,应引起重视。

(3) 就供给、调节、支持与文化 4 种单项 ESV 而言,2005—2015 年总体呈下降趋势,分别下降 1.95、5.02、4.08、0.36 亿元。2015—2025 年期间,耕地保护和经济发展情景下的部分单项生态服务价值有所下降,而生态保护情景下的各项 ESV 均有上升。因此,制定和落实快速城市化区域生态补偿、生态修复等生态保护政策,并加强区域生态保护力度,对于协调区域生态平衡、维持生态系统健康和促进生态文明建设具有重要意义。

(4) 时间上,2025 年不同情景下佛山市各项生态系统服务的权衡与协同关系表现一致,均存在明显的协同作用,经济发展情景下协同关系最显著。空间上,西南和东北区域“高高协同”和“低低协同”的格网集聚特征明显,但各格网数量和分布位置不同;局部区域表现为“高低权衡”和“低高权衡”关系,零散分布于建设用地与林地、耕地之间的格网,各格网数量均有差异。研究结论可为快速城市化区域生态系统功能调控和生态安全格局构建提供一定的思路。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems. Washington DC: Island Press, 1997: 49-68.
- [2] MEA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and human well-being. Washington, D C: Island Press, 2005.
- [3] Wu X T, Wang S, Fu B J, Liu Y, Zhu Y. Land use optimization based on ecosystem service assessment: A case study in the Yanhe watershed.

- Land Use Policy, 2018, 72: 303-312.
- [4] Pan H Z, Zhang L, Cong C, Deal B, Wang Y T. A dynamic and spatially explicit modeling approach to identify the ecosystem service implications of complex urban systems interactions. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 426-436.
- [5] 雷军成, 王莎, 汪金梅, 吴松钦, 游细斌, 吴军, 崔鹏, 丁晖. 土地利用变化对寻乌县生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2019, 39(9): 3089-3099.
- [6] Hughes J B, Daily G C, Ehrlich P R. Population diversity: Its extent and extinction. *Science*, 1997, 278(5338): 689-692.
- [7] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(6630): 253-260.
- [8] Wang J L, Zhou W Q, Pickett S T A, Yu W J, Li W F. A multiscale analysis of urbanization effects on ecosystem services supply in an urban megaregion. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 824-833.
- [9] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. *资源科学*, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [10] Chen Y M, Li X, Liu X P, Zhang Y Y, Huang M. Tele-connecting China's future urban growth to impacts on ecosystem services under the shared socioeconomic pathways. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 765-779.
- [11] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系. *地理研究*, 2020, 39(1): 64-78.
- [12] 卢龙辉, 陈福军, 许月卿, 黄安, 黄玲. 京津冀“生态系统服务转型”及其空间格局. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 532-545.
- [13] 陈峰, 李红波, 张安录. 基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价. *地理学报*, 2019, 74(3): 432-445.
- [14] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 吕金霞, 邓越. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究. *自然资源学报*, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [15] 田义超, 白晓永, 黄远林, 张强, 陶进, 张亚丽. 基于生态系统服务价值的赤水河流域生态补偿标准核算. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 312-322.
- [16] 朱文博, 李双成, 朱连奇. 中国省域生态系统服务足迹流动及其影响因素. *地理研究*, 2019, 38(2): 337-347.
- [17] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 何孙鹏, 王金礼. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例. *地理研究*, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [18] 谢余初, 张素欣, 林冰, 赵银军, 胡宝清. 基于生态系统服务供需关系的广西县域国土生态修复空间分区. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 217-229.
- [19] Lin Y P, Chen C J, Lien W Y, Len W Y, Chang W H, Petway J R, Chang L C. Landscape conservation planning to sustain ecosystem services under climate change. *Sustainability*, 2019, 11(5): 1393.
- [20] Bagstad K J, Johnson G W, Voigt B, Villa F. Spatial dynamics of ecosystem service flows: A comprehensive approach to quantifying actual services. *Ecosystem Services*, 2013, 4: 117-125.
- [21] 马程, 王晓玥, 张雅昕, 李双成. 北京市生态涵养区生态系统服务供给与流动的能值分析. *地理学报*, 2017, 72(6): 974-985.
- [22] 张彪, 史芸婷, 李庆旭, 谢高地. 北京湿地生态系统重要服务功能及其价值评估. *自然资源学报*, 2017, 32(8): 1311-1324.
- [23] Grafius D R, Corstanje R, Harris J A. Linking ecosystem services, urban form and green space configuration using multivariate landscape metric analysis. *Landscape Ecology*, 2018, 33(4): 557-573.
- [24] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 郑辉, 朱连奇. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估——以太行山淇河流域为例. *地理学报*, 2019, 74(3): 446-459.
- [25] 李龙, 吴大放, 刘艳艳, 龚建周, 刘毅华, 郑金育. 基于 CA-Markov 模型的惠州市生态与经济协调度时空演变特征及模拟预测. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(2): 161-170.
- [26] Ge X H, Han Q L. Distributed Formation Control of Networked Multi-Agent Systems Using a Dynamic Event-Triggered Communication Mechanism. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(10): 8118-8127.
- [27] Gong J Z, Hu Z R, Chen W L, Liu Y S, Wang J Y. Urban expansion dynamics and modes in metropolitan Guangzhou, China. *Land Use Policy*, 2018, 72: 100-109.
- [28] 李斌, 刘越岩, 张斌, 黄锦丞, 郭晓宇. 基于 Tietenberg 模型的土地利用变化多情景模拟预测——以武汉市蔡甸区为例. *资源科学*, 2017, 39(9): 1739-1752.
- [29] Chaudhuri G, Clarke K C. Modeling an Indian megalopolis: a case study on adapting SLEUTH urban growth model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 77: 101358.
- [30] Liu X P, Liang X, Li X, Xu X C, Ou J P, Chen Y M, Li S Y, Wang S J, Pei F S. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [31] Li X, Chen G Z, Liu X P, Liang X, Wang S J, Chen Y M, Pei F S, Xu X C. A new global land-use and land-cover change product at a 1-km

- resolution for 2010 to 2100 based on human-environment interactions. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(5): 1040-1059.
- [32] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 邱全毅, 王琳, 唐立娜. 基于历史情景的 FLUS 模型邻域权重设置——以闽三角城市群 2030 年土地利用模拟为例. *生态学报* 2019, 39(12): 4284-4298.
- [33] 马恩朴, 蔡建明, 林静, 韩燕, 廖柳文, 韩炜. 远程耦合视角下的土地利用/覆被变化解释. *地理学报*, 2019, 74(3): 421-431.
- [34] 王旭, 马博文, 李丹, 陈昆仑, 姚华松. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 230-242.
- [35] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [36] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 唐建军. 近 30 年淀山湖地区生态系统服务价值对土地利用变化的响应. *生态学报*, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [37] 郭椿阳, 高尚, 周伯燕, 高建华. 基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究. *生态学报*, 2019, 39(10): 3482-3493.
- [38] 张天海, 田野, 徐舒, 唐立娜, 郭蔚. 滨海城市土地利用格局演变及对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38(21): 7572-7581.
- [39] Liu W, Zhan J Y, Zhao F, Yan H M, Zhang F, Wei X Q. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China. *Ecological Indicators*, 2019, 98: 228-238.
- [40] Zhou R B, Lin M Z, Gong J Z, Wu Z. Spatiotemporal heterogeneity and influencing mechanism of ecosystem services in the Pearl River Delta from the perspective of LUCC. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(5): 831-845.
- [41] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. *经济地理*, 2020, 40(1): 93-102.
- [42] Hasegawa Y, Okabe K, Taki H. A scenario approach for ecosystem service changes. *Futures*, 2020, 96: 23-31.
- [43] 王川, 刘春芳, 乌亚汗, 刘宥延. 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. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 521-531.
- [44] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 齐松, 曹丽萍, 蔡正妹, 陈瑶瑶. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 995-1004.
- [45] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. *地理研究*, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [46] Yang D, Liu W, Tang L Y, Chen L, Li X Z, Xu X L. Estimation of water provision service for monsoon catchments of South China: Applicability of the InVEST model. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 182: 133-143.
- [47] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 张静. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析. *地理学报*, 2017, 72(3): 521-532.
- [48] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 胡熠娜. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析. *地理科学进展*, 2017, 36(12): 1571-1581.
- [49] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. *地理学报*, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [50] 孙孝平, 李双, 余建平, 方彦君, 张银龙, 曹铭昌. 基于土地利用变化情景的生态系统服务价值评估: 以钱江源国家公园体制试点区为例. *生物多样性*, 2019, 27(1): 51-63.