DOI: 10.20103/j.stxb.202409082161
何蕾,李梦可,王诗雅,蒙继英.江西省生态系统服务对城镇化的响应及模拟研究.生态学报,2025,45(17): - .
He L, Li M K, Wang S Y, Meng J Y.Response and simulation of ecosystem services to urbanization in Jiangxi Province.Acta Ecologica Sinica,2025,45(17): - .

江西省生态系统服务对城镇化的响应及模拟研究

何 蕾,李梦可*,王诗雅,蒙继英
江西财经大学公共管理学院,南昌 330013

摘要:研究城镇化与生态系统服务关系的历史演变及未来发展趋势,对构建区域生态安全格局、优化资源配置和实现区域可持续发展具有重要意义。以江西省为研究区,利用 LUSD 模型综合宏观因素驱动与微观地块演化,模拟城镇化主导下的 2035 年土地利用变化,采用 InVEST 模型估算产水量、土壤保持、碳储量以及生境质量等四种典型生态系统服务功能并刻画其时空动态演变特征,旨在揭示未来生态系统服务对城镇化的响应关系。结果表明:(1)与 2020 年相比,2035 年江西省建设用地需求依然随着人口及其他社会经济因素的变化呈增长的趋势,并将导致林地、耕地等面积进一步减少。(2)城镇化与产水量、土壤保持存在正相关性,与碳储量、生境质量存在显著的负相关性;随着城镇化指标的增长,2035 年产水量与土壤保持量有所增加,而碳储量与生境质量呈下降趋势;空间上,产水量逐渐由北到南递减,土壤保持、碳储量、生境质量则均呈现中间低四周高的分布格局。(3)与 2020 年相比,2035 年江西省生态系统服务权衡与协同关系均有所增强,协同关系约占 83%,表明协同关系仍为主导。本研究评估了未来江西省生态系统服务功能、分析了生态系统服务间的权衡协同关系,揭示了城镇化与生态系统服务的响应关系,可为均衡城市发展和生态环境保护并制定相应的政策提供科学依据。

关键词:生态系统服务;城镇化;响应分析; LUSD 模型; InVEST 模型;江西省

Response and simulation of ecosystem services to urbanization in Jiangxi Province

HE Lei, LI Mengke*, WANG Shiya, MENG Jiying
School of Public Administration, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, *China*

Abstract: Understanding the evolution of the relationship between urbanization and ecosystem services is crucial for establishing an ecological security paradigm, optimizing resource allocation, and achieving regional sustainable development. In this study, Jiangxi Province was taken as an example, and the land use/cover change (LUCC) in 2035 and its effects on ecosystem services were investigated. We first employed the LUSD model to simulate LUCC in 2035 by coupling macro driving factors and micro parcel dynamics. Then, the InVEST model was used to estimate four key ecosystem service functions (water yield, sediment delivery ratio, carbon storage, and habitat quality) and characterize their spatiotemporal patterns to reveal the future response. The results showed that: (1) Compared to 2020, the demand for construction land in Jiangxi Province in 2035 would continue to increase with population and socio-economic fluctuations, leading a further reduction in forestland and arable land. (2) Urbanization showed a positive correlation with water yield and sediment delivery ratio and a significant negative correlation with carbon storage and habitat quality. With increasing of urbanization indicators, water yield and sediment delivery ratio would increase, while carbon storage and habitat quality would decline in 2035. Spatially, water yield decreased from north to south, while sediment delivery ratio, carbon storage, and habitat quality all showed a distribution pattern of low in the middle and high around the periphery. (3) Relative to 2020, both trade-off and synergistic correlations intensified in Jiangxi Province in 2035. The synergistic correlation

基金项目:国家自然科学基金项目(41901130); 江西省教育厅基金(GJJ2200532);江西财经大学第十八届学生科研课题(20231015103620069)
收稿日期:2024-09-08; **网络出版日期**:2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: 2758467779@qq.com

accounted for approximately 83%, dominating. This study evaluated the future ecosystem service functions in Jiangxi Province, analyzed their trade-off and synergistic relationships, and revealed the response relationship between urbanization and ecosystem services. These findings provided a scientific basis for balancing urban development and ecological protection, and for formulating relevant policies.

Key Words: ecosystem services; urbanization; response analysis; LUSD model; InVEST model; Jiangxi Province

近 20 年,我国城镇化率由 2000 年的 36.21%增长到 2020 年的 63.89%,几乎翻了一番。快速城镇化带来城镇景观的不断增长和扩大[1],同时也导致水土流失、碳排放增加、生物多样性受损、生境退化等[2—4],对生态系统结构和功能造成严重影响,其主要原因之一是忽视了生态系统服务间此消彼长的权衡关系[5—6]。研究表明,未来城镇化水平仍会进一步提高[7],人类对生态系统各种服务的需求也将随之增加,生态系统服务面临更多更严峻的挑战[8]。研究城镇扩张驱动下生态系统服务在未来会发生怎样的变化,对土地利用变化的响应关系如何,对于有效平衡城市发展和生态保护具有重要的科学价值。

联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA)指出,生态系统服务是指人类从自然生态系统中所获得的收益[9],包括食物、原材料等物质[5,10—11],以及产水服务、土壤保持、生境质量、碳固存等非物质服务。生态系统各服务并不是独立存在,而是相互影响的,往往表现为此消彼长的权衡关系和相互增益的协同关系[12]。近年来国内外研究者聚焦于生态系统服务权衡研究[13],利用不同的研究方法[14]、模型[15—16]探讨了不同类型和尺度生态系统的权衡与协同关系[17],并获得了较丰富的研究成果。土地覆盖变化作为人类活动最直接的结果,在全球变化研究中的地位日益突出,其对生态系统服务的影响逐渐成为研究的核心内容之一[18]。但现有研究主要集中在历史和现状演变特征[19]、不同土地利用类型和强度对生态系统服务的影响[20—21]、生态系统服务之间的权衡协同关系[22]等方面,对未来生态系统服务时空动态的研究相对较少。揭示未来土地利用覆盖变化以及其所驱动的生态系统服务的变化,对于区域经济和生态的可持续发展至关重要。

生态系统服务主要受土地利用变化影响,准确掌握未来生态系统服务变化,首先要对土地利用变化进行有效模拟[23]。目前,土地利用变化模拟可从数量及空间格局两方面进行约束,数量约束模型多见马尔可夫链(Markov Chain)模型[24]、多目标规划模型[25]、系统动力学(System Dynamics, SD)模型[26—27]等,空间约束模型则以元胞自动机(Cellular Automata, CA)[28]、CLUE-S(Conversion of Land Use and its Effects at Small Region Extent)模型[29]等为主。虽然这些模型运用较为广泛,但大多是单一地从土地利用数量、结构或空间布局的某一方面进行约束[30],具有一定局限性。土地利用情景变化动力学模型(Land Use Scenario Dynamics, LUSD)[31]综合了 SD 和 CA 模型的优势,可结合情景模拟、宏观驱动因素和微观的土地利用空间分布进行多指标、多尺度的综合模拟[32],弥补了大多数模型难以同时兼顾宏观驱动和微观演化、以及由此导致的模拟精度不高[33]等问题,有利于准确模拟未来土地利用变化。

江西省地处我国东南偏中部,长江中下游南岸,境内的鄱阳湖作为中国第一大淡水湖、长江中下游主要的支流之一,在调节长江水位、涵养水源、改善气候和维持生态平衡等方面起着重要的作用。近年来,社会经济高速发展和自然资源不合理开发对江西省生态环境造成了严重威胁,水土流失未能有效遏制,季节性和水质性缺水频发,生物多样性水平持续下降等[34],制约着区域可持续发展。科学阐明江西省未来土地利用变化及其表征的城镇化驱动下生态系统服务变化,对区域经济和生态的可持续发展具有重要指导意义。因此,本研究基于江西省 2000—2020 年土地利用遥感监测数据,运用 LUSD 模型综合宏观因素驱动与微观地块演化,模拟 2035 年城镇化主导下的土地利用变化,并利用 InVEST 模型评估不同时期产水量、土壤保持、碳储量以及生境质量等 4 种典型生态系统服务功能并刻画其时空动态演变特征,探讨未来生态系统各类服务间的权衡协同关系及对土地利用变化的响应。本研究对实现区域资源合理配置,调整生态保护与经济发展相关布局,保障区域甚至国家生态安全具有重要理论与现实意义。

1　研究区概况

江西省(24°29′N—30°05′N,113°33′E—118°29′E)位于中国东南部,在长江中下游南岸,全省总面积为16.69 万 km^2(图 1)。2020 年末区域常住总人口为4518.89 万人,占全国总人口的 3.2%,城镇人口比重达到了 60.44%,首次高于 60%;GDP 为 25691.5 亿元,占全国 GDP 的 2.53%。研究区主要由山地和丘陵构成,地形地貌大致为“六山一水二分田,一分道路和庄园”,位于中亚热带地区,受季风气候的显著影响,四季变化明显。年均气温约 16.3—25℃ 之间,年均降水量 1341—1943 mm,水热条件差异较大,多年平均气温自北向南依次增高,南北温差约 3 ℃,水资源比较丰富,河网密集,区域内有全国最大的淡水湖——鄱阳湖。鄱阳湖不仅具有丰富的生物多样性,还是亚洲最大的候鸟越冬栖息地[35—36]。省内自然资源丰富多样,土地利用类型主要以农田、森林和草地为主,是我国重要的粮食生产基地;植被以常绿阔叶林为主,具有典型的亚热带森林植物群落,森林覆盖率约 63%,生态环境位居全国前列。

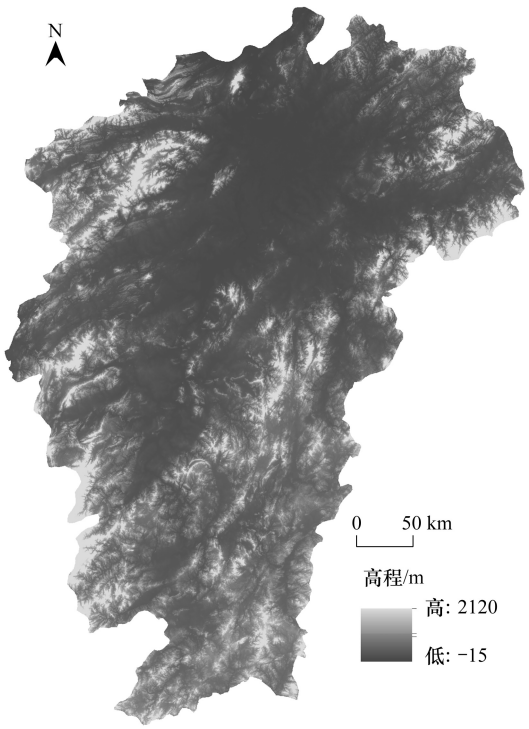

图 1　研究区概况图

Fig.1　Overview of study area

2　数据来源及研究方法

2.1　数据来源及处理

数据主要包括土地利用数据(2000、2005、2010、2015、2020 年共五期)、土壤、降水、蒸散发、DEM 以及人口、GDP 等社会经济数据(表 1)。研究区人口、GDP 等社会经济数据来源于江西省 2000—2020 年历年统计年鉴及统计公报。本研究基于 2000—2020 年历史气象数据,借助 ArcGIS Pro 3.2 软件的趋势栅格预测工具模拟 2035 年的降水和蒸散发数据;对土地利用数据进行重分类,分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 大地类。对于不同来源的数据,统一转换为投影坐标系 CGCS2000,并通过重采样将分辨率统一为 30m。

表 1　数据来源

Table 1　Data sources

数据类型 Data type	数据来源 Data sources	空间分辨率 Resolution
土地利用数据 Land use data	中国科学院资源环境科学与数据中心 (https://www.resdc.cn/)	30 m
降雨和潜在蒸散发数据 Rainfall and potential evapotranspiration data	国家地球系统科学数据中心 (http://www.geodata.cn/)	1000m
根系限制层深度 Root restriction layer depth data	《Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100meters》	30m
土壤数据 Soil data	国家冰川冻土沙漠科学数据中心(https://www.ncdc.ac.cn/)	1000m
高程数据 Elevation	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)	30m
基础地理数据 Fundamental geographic data	国家基础地理信息中心(https://www.ngcc.cn/)	矢量数据
社会经济数据 Socio-economic data	江西省统计年鉴以及统计公报(2000—2020 年)	统计数据

2.2 研究方法

2.2.1 城镇化驱动的土地利用变化模拟

本研究基于 LUSD 模型[32],将宏观驱动与微观演化相结合模拟城镇化驱动下未来土地利用变化。首先利用历史数据建立人口、GDP 等宏观社会经济驱动因素与建设用地的关系模型,测算未来建设用地需求;再根据元胞自动机的转移规则,计算每个单元地块的转移概率,将转换概率最高的非建设用地单元格转换为建设用地单元格,直到建设用地总面积满足预估的需求,转换过程停止[37],得到未来土地利用格局。LUSD 模型中,非建设用地转换为建设用地的概率主要受扩张适宜性、土地利用继承性、邻域效应和随机干扰四个因素的影响[32, 37]。本研究选取了海拔、坡度和到市中心、铁路、公路的欧氏距离等 5 个适宜性因素和湖泊 1 个限制性因素。

(1)LUSD 模型校准

为了确保模型的可靠性和有效性,本研究利用历史土地利用数据校准模型参数。具体而言,以 2000 年和 2010 年的土地利用数据为训练数据,用 2020 年土地利用数据作为验证数据。首先,基于 2000 年土地利用数据,在模型中分别输入海拔、坡度、到市中心、铁路、公路、湖泊的距离等因子,进行随机权重组合的模拟,得到以上六个因素和邻域、土地利用继承性的权重组合以及模拟的 2010 年土地利用数据。其次,比较 2010 年模拟结果与实际数据之间的 kappa 系数,系数最高的权重为最优权重组合。最后利用最优权重对 2020 年的土地利用变化进行模拟,模拟结果与实际数据之间的 kappa 系数越接近 1,代表模型结果可靠性和准确性越高。

(2)土地利用变化模拟

本文参考 XIE 等[33]、He 等[37]和 López 等[38]预测未来建设用地需求的线性回归方程,基于历史的土地利用和社会经济等数据,构建建设用地面积(因变量)与主要影响因素(自变量)的多元回归方程,再通过模拟未来自变量并代入方程,测算未来建设用地需求。城镇化发展涉及人口、经济、用地三大核心要素[39]。因此,参考相关文献[39—40],本文从人口、经济、社会、空间四个方面,选取了总人口、人口密度、人均 GDP、城镇居民人均可支配收入、每万人拥有的在校大学生数、每万人拥有的卫生技术人员数、人均公园绿地面积、人均城市道路面积等 8 个指标表征城镇化进行建设用地需求量建模。综合考虑《江西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二 0 三五年远景目标纲要》等相关规划约束,利用 2000—2020 年历史社会经济指标数据,采用线性外推法,推算研究区 2035 年 8 个指标数据,并代入构建的建设用地需求量关系模型,测算得到 2035 年建设用地需求量,公式[33, 37—38]如下:

$$Z_t = a \times Y_{1t} + b \times Y_{2t} + c \times Y_{3t} + d \times Y_{4t} + e \times Y_{5t} + f \times Y_{6t} + g \times Y_{7t} + h \times Y_{8t} + k \tag{1}$$

式中,Z 表示建设用地面积,t 表示年份,Y_1、Y_2、Y_3、Y_4、Y_5、Y_6、Y_7、Y_8分别表示总人口、人口密度、人均 GDP、城镇居民人均可支配收入、每万人拥有的在校大学生数、每万人拥有的卫生技术人员数、人均公园绿地面积、人均城市道路面积,a、b、c、d、e、f、g、h 表示各对应指标的系数,k 为常数项。

基于方程(1),估算江西省 2035 年的建设用地需求量,再利用校正后的 LUSD 模型对 2035 年的江西省土地利用空间分布进行模拟。

2.2.2 生态系统服务评估

参考相关研究以及研究区的实际情况,本研究选取产水量、土壤保持、碳储量和生境质量等 4 种典型的生态系统服务开展江西省生态系统服务评估。相关计算方法如下:

(1)产水量(Water Yield, WY)

使用 InVEST 模型中的产水模块计算江西省的产水量,计算公式如下:

$$Y_{jx} = \left(1 - \frac{\mathrm{AET}_x}{P_x}\right) \times P_x \tag{2}$$

式中,Y_{jx}为年产水量(mm);P_x为年平均降雨量(mm);AET_x为年平均蒸散量(mm)。

(2)土壤保持(Sediment Delivery Ratio, SDR)

通过 InVEST 模型中的土壤保持模块计算土壤保持量,计算公式如下:

$$SEDRET_x = R_x \times K_x \times LS_x \times (1 - C_x \times P_x) \tag{3}$$

式中,$SEDRET_x$为栅格单元 x 的土壤保持量(t),R_x为降雨侵蚀力(MJ mm hm^{-2} h^{-1} a^{-1});K_x为土壤可蚀性;LS_x为坡长—坡度因子;C_x为植被覆盖因子;P_x为管理因子。

(3)碳储量(Carbon Storage, CS)

InVEST 模型使用土地利用分布图和每种土地利用类型的碳密度来估计每个单元中的碳储量。计算公式如下:

$$C_i = C_{i,a} + C_{i,b} + C_{i,s} + C_{i,d} \tag{4}$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \tag{5}$$

式中,i 为土地利用类型;C_i、$C_{i,a}$、$C_{i,b}$、$C_{i,s}$、$C_{i,d}$分别为土地利用类型 i 的总碳密度、地上碳密度、地下碳密度、土壤碳密度、死亡有机质碳密度,t,t hm^{-2};S_i为土地利用类型 i 总面积,hm^{-2};n 为土地利用类型总数,本文中为 6。

(4)生境质量(Habitat Quality, HQ)

利用 InVEST 模型的生境质量模块计算研究区生境质量,计算公式如下:

$$Q_{xj} = H_j\left(1 - \left(\frac{D_{xj}^{z}}{D_{xj}^{2} + k^{2}}\right)\right) \tag{6}$$

式中,Q_{xj}为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量;H_j为土地利用类型 j 的生境适宜度;D_{xj}表示栅格 x 的生境退化度。k 是半饱和参数,一般取生境退化程度最大值的 1/2。Z 为模型默认参数,为 2.5。

基于 ArcGIS 软件,对采用上述方法得到的产水量、土壤保持、碳储量、生境质量等生态系统服务进行重分类,在空间上分别划分为低、中低、中、中高、高五个等级(其中碳储量分为低、中低、中高、高四个等级)。

2.2.3　生态系统服务权衡与协同分析

本研究采用 Spearman 相关性分析测算各项生态系统服务间的权衡协同关系以及城镇化与生态系统服务间的相关关系,并借助 ArcGIS 和 SPSS 软件制图。

$$P_{(X,Y)} = \frac{\operatorname{cov}(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E((X-\mu_X)(Y-\mu_Y))}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E(XY) - E(X)E(Y)}{\sqrt{E(X^2) - E^2(X)}\sqrt{E(Y^2) - E^2(Y)}} \tag{7}$$

$$r_g = P_{rgX,rgY} = \frac{\operatorname{COV}(rgX, rgY)}{\sigma_{rgX}\sigma_{rgY}} \tag{8}$$

式中,$P_{X,Y}$为变量 X 和 Y 的 Pearson 相关系数;$\operatorname{cov}(X,Y)$为两个变量的协方差;σ_X和σ_Y为两个变量的标准差;$P_{rgX,rgY}$为应用于原始变量秩次的 Spearman 相关系数。

3　结果与分析

3.1　土地利用变化与模拟分析

3.1.1　2000—2020 年土地利用变化

2000—2020 年,研究区建设用地和水域面积呈上升趋势,其他地类面积均在下降。所有地类中,建设用地的面积变化量最大,近 20 年持续增加了 $0.26\times10^4 km^2$,面积占比提升了 1.58%,其中 2010—2020 年增长量占总增长量的 75.94%,研究区人口与 GDP 分别增长了 0.76%、53.62%,这表明城镇化与建设用地剧烈扩张高度相关。2000—2020 年研究区水域面积增加了 $0.04\times10^4 km^2$,上升了 0.26%;在面积减少的地类中,林地最多,并呈现出先增后减的变化趋势,共减少 $0.14\times10^4 km^2$,下降了 0.84%,其次是耕地,共减少 $0.12\times10^4 km^2$,下降了 0.75%。

3.1.2 2035 年土地利用模拟分析

模型模拟结果表明(图 2),与 2020 年相比,2035 年建设用地面积共增加了 $0.15\times10^4 km^2$,面积占比将达到 4.17%。这主要是由于城镇化情景下,LUSD 模型假定建设用地的需求随社会经济的发展变化,而现阶段研究区乃至我国仍然在城镇化进程中,社会经济稳步发展,虽然建设用地增加幅度有所下降,但是对建设用地需求呈增长态势。模拟结果显示由其他土地利用类型转为建设用地的面积均有所增加。其中,转为建设用地最多的是耕地,转化面积为 $0.29\times10^4 km^2$,其次为林地,面积 $0.14\times10^4 km^2$,草地和未利用地虽然也有转化,但变化不大,水域在 LUSD 模型中为限制因素,没有变化。

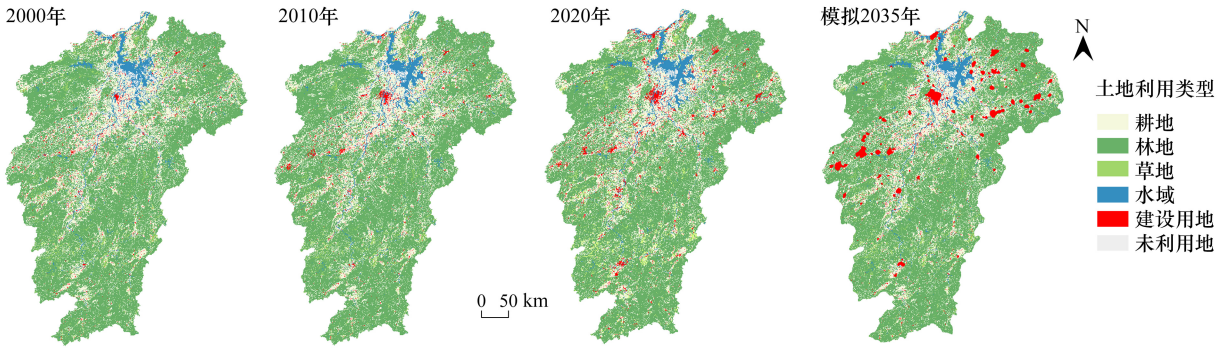

图 2 2000—2035 年江西省土地变化格局时空演变及预测

Fig.2 Spatio-temporal evolution and prediction of land change pattern in Jiangxi Province from 2000 to 2035

3.2 生态系统服务时空动态变化与模拟分析

3.2.1 2000—2020 年生态系统服务变化

与 2000 年相比,2020 年研究区产水量增加了 $123.32\times10^9 m^3$(图 3),空间上产水高值区整体上集中在东北地区,鄱阳湖湖区及西北地区是产水量低值区(图 1 和图 4)。土壤保持总量共增加了 $0.43\times10^9 t$,空间整体上表现出中部低四周高的分布特征,湖区及其四周是土壤保持的低值区域,研究区四周地区是土壤保持的高值区。碳储总量共减少了 $0.20\times10^9 t$,空间上呈现四周高中部低,高值区面积大,中高、中低和低值区面积小的空间分布特征。生境质量指数整体上偏低,共减少了 0.041,空间上最高值主要分散于研究区的南部、西北以及东北地区,低值区分布在鄱阳湖湖区以及湖体周围的平原地区。

3.2.2 2035 年生态系统服务模拟分析

未来生态系统服务变化模拟结果(图 3 和图 4)显示,与 2020 年相比,2035 年江西省产水总量将增加

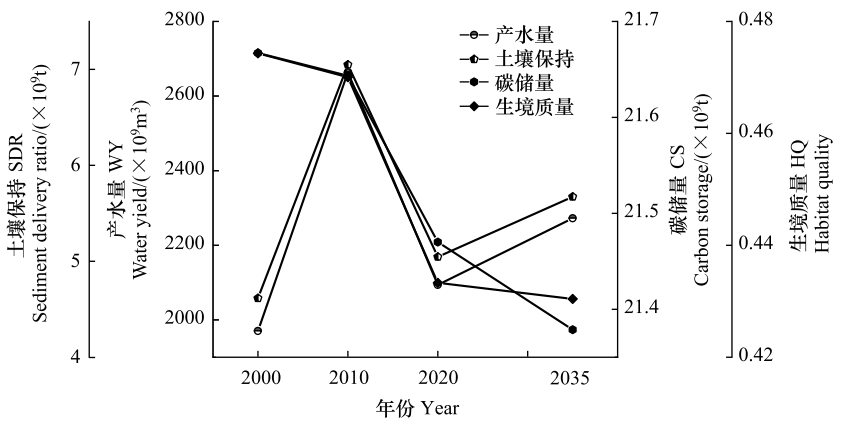

图 3 2000—2035 年江西省 4 项生态系统服务功能

Fig.3 Four ecosystem service functions of Jiangxi Province from 2000 to 2035

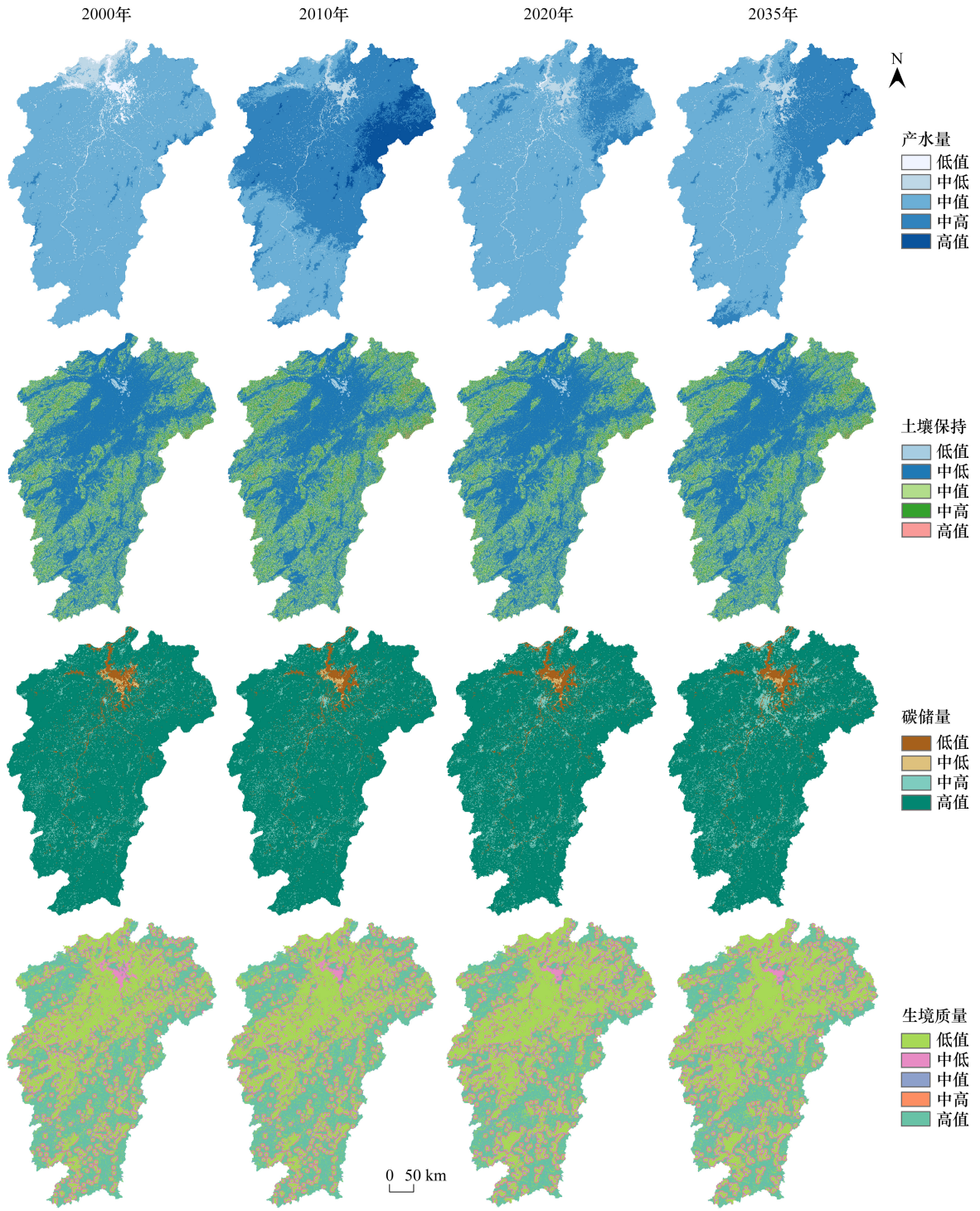

图 4　2000—2035 年江西省生态系统服务空间分布格局及预测

Fig.4　Spatial distribution pattern and prediction of ecosystem services in Jiangxi Province from 2000 to 2035

$178.74\times10^{9}m^{3}$;产水量的高低与区域的降水量和潜在蒸散发量有关,根据气候因子模拟结果,2035 年年降水量将为 2.44×10^{8}mm,潜在蒸散发量为 1.66×10^{8}mm,与 2020 年相比,潜在蒸散发量变化不大,但降水量呈增加趋势,一定程度上使得研究区产水量的增加。空间上,产水量中高值、高值区分布在东北地区,少量分布在南部,中高值和高值区的面积有明显扩张趋势,将分别增加 15.06%和 0.23%。江西省除北部较为平坦外,东西南部三面环山,中部丘陵起伏,高海拔地区温度低,雨水充足,因此产水高值区主要聚集在中北部及东北地区。

土壤保持总量将增加 0.63×10^9 t,年均增长量为 0.04×10^9 t;空间上仍表现为中部低四周高的分布特征,中值和中高值区面积呈现扩张趋势,面积比重将分别增加 0.98%、1.12%,低值区面积收缩较为明显,下降 1.95%。2020—2035 年研究区碳储量减少 0.09×10^9 t,年均减少量为 0.006×10^9 t;空间上高值区面积大、其他等级面积小,高值区面积减少、中高区增加。生境质量指数减少量为 0.003,年均减少量为 0.0002,空间分布上虽变化不大,但高值区面积比重将减少 0.17%,而低值区则增加 0.41%。

3.3 生态系统服务协同权衡关系与模拟分析

3.3.1 2000—2020 年生态系统服务协同权衡分析

本研究基于各类生态系统服务 Spearman 相关分析的结果,绘制了相关性系数图(图 5)。由图 5 可知,2000—2020 年,江西省(产水量-土壤保持、产水量-碳储量、产水量-生境质量、土壤保持-碳储量、土壤保持-生境质量、碳储量-生境质量)“两两”对应的生态系统服务中,产水量-生境质量相关系数由正变负,相关关系由同增共减的协同关系转变为此消彼长的权衡关系,其余五项“两两”服务间均表现为正相关,存在同增共减的协同关系,其中碳储量-生境质量的协同关系最强。各生态系统服务相关性均通过 0.05 显著性检验。

3.3.2 2035 年生态系统服务权衡协同模拟分析

生态系统服务未来变化的模拟结果表明(图 5),2035 年,在江西省六项“两两”生态系统服务中,产水量-生境质量为权衡关系,其余五项为协同关系,协同关系占比 5/6,约为 83%,表明研究区各生态系统服务之间协同关系仍为主导。相关系数从大到小排序为:碳储量-生境质量>土壤保持-碳储量>土壤保持-生境质量>产水量-土壤保持>产水量-碳储量>产水量-生境质量(负值)。与 2020 年相比,2035 年,土壤保持-碳储量与生境质量-碳储量相关系数分别增加了 0.003、0.005;土壤保持-生境质量的相关系数总体上增加了 0.002;产水量-土壤保持与产水量-碳储量的相关系数经历了先增后减,但总体上分别增加了 0.011、0.020。其中,碳储量-生境质量相关性变化最大,可能是由于虽然该区域土地利用类型多为林地,植被覆盖度较高,但随着城镇扩张加剧,林地面积减少,碳储量、生境质量随之下降,因此两者的协同关系变化较大。

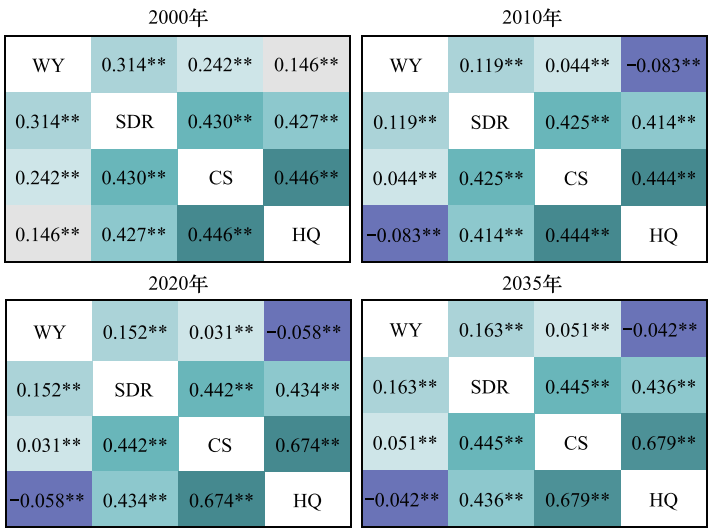

图 5 2000—2035 年江西省生态系统服务相关系数图

Fig.5 Correlation coefficient of ecosystem services in Jiangxi Province from 2000 to 2035

** 表示在 0.01 水平上显著相关;青色代表正相关,紫色代表负相关,颜色越深说明两个变量的相关性越大

3.4 生态系统服务对城镇化的响应

3.4.1 生态系统服务对城镇化(指标)的响应

将表征城镇化的指标与建设用地面积进行相关分析(图 6),可以看出 8 个城镇化指标与建设用地面积占比均表现为显著的正相关,相关系数均在 0.93 以上,通过 0.05 显著性检验。其中经济指标(人均 GDP(Y_3)、

城镇居民人均可支配收入(Y_4))与建设用地扩张的相关系数最大,其次是社会指标(每万人拥有的在校大学生数(Y_5)、万人拥有的卫生技术人员数(Y_6))、空间指标(人均城市道路面积(Y_7)、人均公园绿地面积(Y_8)),人口指标(人口(Y_1)、人口密度(Y_2))的相关性最小,表现出经济增长与城镇化快速发展的极强相关。

城镇化指标与生态系统服务的相关性分析表明,社会指标(每万人拥有的卫生技术人员数(Y_6))与生态系统服务呈负相关,其中与碳储量、生境质量呈显著负相关,相关系数分别为-0.99、-0.96,与产水量、土壤保持的负相关性不显著;其余 7 个指标人口(Y_1)、人口密度(Y_2)、人均 GDP(Y_3)、城镇居民人均可支配收入(Y_4)、每万人拥有的在校大学生数(Y_5)、人均公园绿地面积(Y_7)、人均城市道路面积(Y_8)与产水量、土壤保持相关性为正,与碳储量、生境质量呈现显著的负相关。表明随着以上 7 个城镇化指标如人口等的增加,江西省产水量、土壤保持将增强,碳储量与生境质量将下降。建设用地面积占比与四项服务均呈负相关,其中与碳储量、生境质量呈现显著负相关,相关系数分别为-0.99、-0.96,而与产水量、土壤保持量相关性较小。

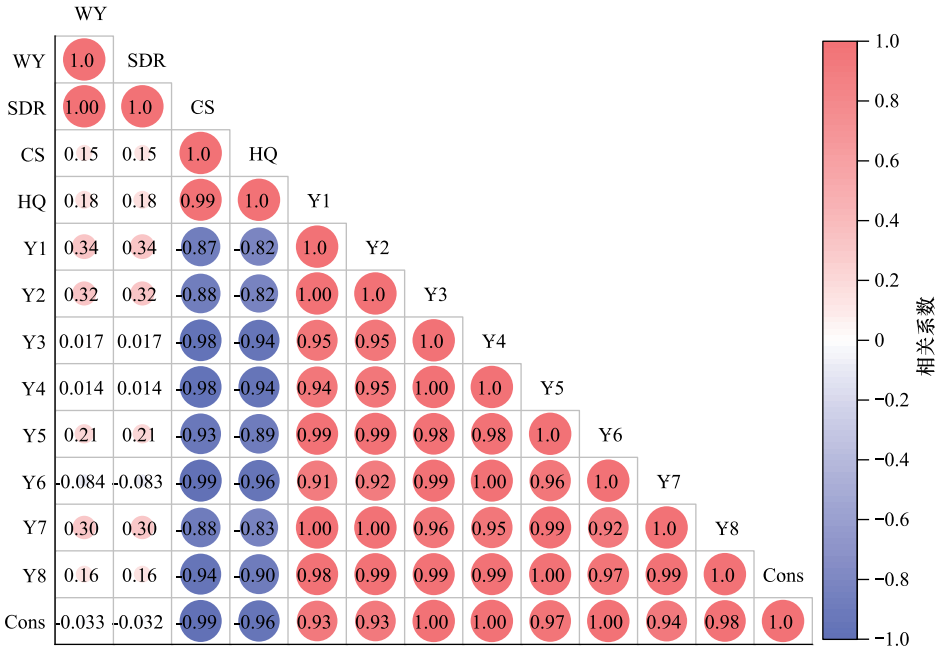

图 6　城镇化指标与生态系统服务相关系数图

Fig.6　Correlation coefficient diagram of urbanization index and ecosystem services

Y1: 总人口;Y2:人口密度;Y3:人均 GDP;Y4:城镇居民人均可支配收入;Y5:每万人拥有的在校大学生数;Y6:每万人拥有的卫生技术人员数;Y7:人均公园绿地面积;Y8:人均城市道路面积;Cons:建设用地面积占比

3.4.2　土地利用变化对生态系统服务的影响

对 2000—2035 年江西省的产水量、土壤保持、碳储量、生境质量进行分区统计(图 7)可知,与 2020 年相比,2035 年,研究区林地、耕地、建设用地等六种地类的产水总量均呈现增加的趋势,其中林地最多,建设用地次之,分别为 $10.99\times10^6 m^3$、$2.94\times10^6 m^3$。产水量与土壤深度、植被可利用含水量相关,同时还受气候变化(主要是降水和潜在蒸散发)和土地利用变化影响。根据本论文气候因子数据统计及模拟结果,研究区 2020—2035 年的蒸散发量变化不大,但是降水量在逐渐增加,一定程度上使得研究区各地类产水量增加。各土地利用类型的土壤保持量均在增加,其中林地增加最多,为 $54.95\times10^6 t$,耕地次之。林地是土壤保持功能的主体,降水增多,植物生长迅速,根系发达,更有利于土壤保持;由于人类活动加剧,建设用地面积增加,建设用地的土壤保持量增加。林地、耕地、草地、未利用地的碳储量持续减少,其中耕地幅度最大,为 $13.89\times10^6 t$,建设用地碳储量的增加量为 $5.35\times10^6 t$,水域的碳储量未发生变化。研究区耕地面积减少最多,因此碳储量变化最大,建设用地碳储量的增加主要是面积的增加所致。林地、草地的固碳能力较建设用地强,但其面积的减少也

使得固碳量持续下降。研究区 2035 年平均生境质量指数最高是林地,为 0.649,其次为水域,建设用地则为 0,除建设用地外,其他五类土地利用类型的平均生境指数均呈现下降的趋势,其中,水域变化幅度最大,林地次之,耕地变化微小。说明随着城镇化进程加快,人类活动加剧,建设用地扩张可能会威胁到周围生境,导致各地类生境碎片化[41]、生境质量下降。

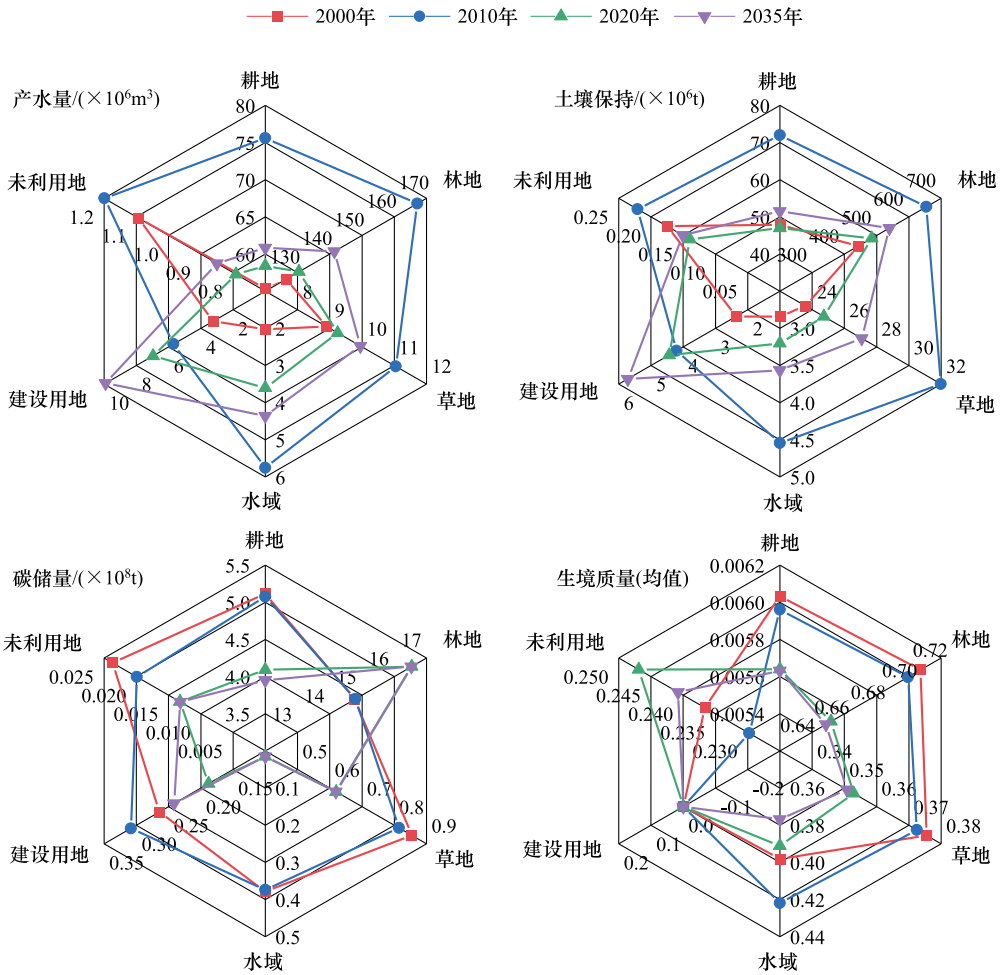

图 7 2000—2035 年江西省不同土地利用类型生态系统各项服务变化

Fig.7 Changes in ecosystem services of different land use types in Jiangxi Province from 2000 to 2035

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 城镇化驱动下生态系统服务对土地利用变化的响应

人类活动不仅改变了土地利用的类型、强度和格局[20],也会影响区域的气候特点、水文水资源、土壤特征以及生态系统过程,从而对生态系统的服务和功能造成影响[42]。本研究表明江西省产水量、碳储量、土壤保持、生境质量在空间上表现出显著的差异,这与杨绍微等人在研究江西省生态系统服务权衡协同的时空动态变化中得出生境质量、碳储量和土壤保持量均呈中间低四周高的地理格局、高产水区逐渐向北部延伸[43]的结果较为一致。江西省四周山地林区的生境质量、碳储量和土壤保持较为丰富,而中部地区农业种植区、城镇区域以及水域则相对较弱;产水量整体上从北到南递减,这可能主要与江西省的地势有关,中北部较为平坦,湖泊河流较多,蓄水能力较强,而东西南部三面环山地势较高,不利于水资源的储存[43—44]。从时间上来看,城镇化进程中,研究区建设用地大量侵占耕地、林地和草地等,产水和土壤保持服务增加,碳储量和生境质量下降,

这与范耘恺等人对辽宁省土地利用变化下的生态系统服务评估研究结论相似[45]。研究区耕地、林地向建设用地转化过程中绿色植被被移除,植物蒸腾减少和冠层截留降低,导致蒸散和下渗显著减少,地表径流大幅度增加,从而使得产水量增加[46—47]。林地、草地中大量的植物的光合作用,因此固碳效果显著,所以当林地、草地面积下降时,碳储量也随之下降。在建设用地持续增加的情况下,无论林地面积是增加还是减少,研究区的生境质量均下降,表明研究区城市建设用地的扩张对生境质量的影响作用大于退耕还林还草等生态保护政策的影响[48],也在一定程度上说明了城镇扩张是生境质量较为严重的威胁[49]。建设用地面积增长与产水量、土壤保持、碳储量、生境质量均呈现出负相关性,其中与碳储量、生境质量的负相关性较强,揭示了建设用地的扩张与碳储量、生境质量此增彼减的关系,这可能是由于城镇化的快速发展,导致建设用地的需求递增,林地草地面积逐渐下降,生境破碎化加剧。

4.1.2　城镇化对生态系统服务的影响

城镇化涉及到人口、经济、社会、空间等多个方面的,直接或间接作用于生态系统服务,使各服务产生差异性变化[50]。研究结果表明,江西省城镇化指标与碳储量、生境质量表现为较强的负相关,表明未来将出现城镇化指标的增长与碳储量、生境质量此增彼减的现象,对研究区碳储量、生境质量的威胁将进一步加大。城镇化指标与产水量、土壤保持呈现正相关,表明随着城镇化的发展,产水量和土壤保持服务逐渐增强,产水量是降水、蒸散发等共同作用下的产物,而城镇用地相较于林地、草地等会减少水分的截留、蒸散和渗入[51],从而导致总体产水量的增加。研究中江西省的人口城镇化(人口、人口密度)对产水量、土壤保持的正向的影响最大,经济城镇化(人均 GDP、城镇居民人均可支配收入)影响较小,而无论人口、经济还是社会、空间方面的城镇化指标均对碳储量和生境质量均呈现负向的影响。未来城镇化过程中,应进一步完善生态环境保护体系,优化区域的发展空间,既要保障各产业发展对建设用地的需求,也要考虑生态用地的布局及质量,提升生态用地质量以缓解城镇化对生态系统服务的干扰。

4.1.3　局限性与展望

受模型与研究尺度等影响,本研究也存在着一些局限性。首先,LUSD 模型在计算城镇扩张时,未考虑自然因素和政策制度对土地利用变化的影响等,可能会导致土地利用变化模拟存在着一定程度的误差。其次,在讨论生态系统服务权衡协同关系时,未考虑到市域、县域尺度效应等。因此,后续研究中,可改进 LUSD 模型模拟土地利用变化,综合考虑自然因素(如降雨等)、耕地保护、生态保护和节地等政策对土地利用变化的影响,同时更全面、有针对性地选取社会经济指标和适宜性因素;未来还将进一步细化尺度研究,综合考虑尺度效应带来的不同影响,并进一步探讨生态系统服务对城镇化的响应机理/机制。

4.2　结论

城镇化背景下,研究并分析土地利用变化对生态系统服务的影响,可以为统筹社会经济发展和生态保护以及政策制定提供有力的支撑。目前国内外探讨生态系统服务时空演变大多数基于已有的土地利用变化等数据,对历史的生态系统服务变化特征进行总结,而对其演变进行预测的较少[52]。因此,本研究基于 LUSD 和 InVEST 模型,将宏观驱动与微观演化相结合模拟城镇化驱动下江西省 2035 年土地利用格局,量化产水量等典型四项生态系统服务功能,并分析城镇化对生态系统服务的影响,具有重要的研究意义和一定的前瞻性。本研究主要结论如下:

(1)与 2000—2020 年相比,江西省 2035 年建设用地的面积仍然随着人口及其他社会经济因素的变化呈逐渐增长的趋势,年均增长率约为 0.06%,2035 年建设用地面积占比增长至 4.17%。各地类中,耕地的转出面积最多,林地次之。

(2)江西省建设用地需求的增加,将对生态系统各服务产生不同的影响, 与 2020 年相比,2035 年产水量与土壤保持量均有所增加,将分别增长 $178.74\times10^9 m^3$、$0.63\times10^9 t$,而碳储量与生境质量均有所下降,将分别减少 $0.09\times10^9 t$、0.03。在空间上,除产水量逐渐由北到南递减,土壤保持、碳储量、生境质量均呈现中间低四周高的空间分布格局。

(3)2035 年,江西省生态系统的服务的相互关系中,协同关系约占 83%,表明协同关系仍为主导,其中产水量与生境质量之间呈现显著的协同关系。与 2020 年相比,2035 年生态系统服务权衡与协同关系均有所增强。研究表明,城镇化造成的耕地和林地的大面积减少是生态系统服务权衡协同关系发生变化的重要原因。

(4)生态系统服务与城镇化之间的相关性存在差异性,城镇化指标与碳储量、生境质量均呈现显著的负相关性,不同指标(除每万人拥有的卫生技术人员数)与产水量、土壤保持呈现出不同强度的正相关性,这表明随着城镇化指标的增长,产水量、土壤保持服务增强,碳储量、生境质量出现明显的下降。

参考文献(References):

[1] Hasan S, Shi W Z, Zhu X L. Impact of land use land cover changes on ecosystem service value-A case study of Guangdong, Hong Kong, and Macao in South China. PLoS One, 2020, 15(4): e0231259.

[2] Wang S J, Wang J Y, Fang C L, Li S J. Estimating the impacts of urban form on CO_2 emission efficiency in the Pearl River Delta, China. Cities, 2019, 85: 117-129.

[3] Sarkodie S A, Owusu P A, Leirvik T. Global effect of urban sprawl, industrialization, trade and economic development on carbon dioxide emissions. Environmental Research Letters, 2020, 15(3): 034049.

[4] 韩磊, 高毅丰, 常钰卿, 曹鑫鑫, 杨梅丽, 李亚北, 刘钊, 康宏亮. 黄土高原城镇化与生态系统服务脱钩关系. 生态学报, 2024, 44(20): 9108-9121.

[5] Costanza R. Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability. Ecosystem Services, 2020, 43: 101096.

[6] Peng J, Hu X X, Zhao M Y, Liu Y X, Tian L. Research progress on ecosystem service trade-offs: From cognition to decision-making. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(6): 960-973.

[7] 张晓彤, 张立新. 中国城镇化进程概述和未来城镇化水平预测. 云南农业大学学报: 社会科学版, 2021, 15(1): 20-25.

[8] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 朱文博, 马程, 王珏. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.

[9] 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.

[10] Leviston Z, Walker I, Green M, Price J. Linkages between ecosystem services and human wellbeing: a Nexus Webs approach. Ecological Indicators, 2018, 93: 658-668.

[11] Peng J, Hu X X, Wang X Y, Meersmans J, Liu Y X, Qiu S J. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in Northwestern Yunnan, China. Ecosystem Services, 2019, 39: 100998.

[12] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 段艺芳. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3443-3454.

[13] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 郭旭东. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望. 中国土地科学, 2018, 32(12): 82-89.

[14] 冯漪, 曹银贵, 李胜鹏, 王舒菲, 刘施含, 白中科. 生态系统服务权衡与协同研究: 发展历程与研究特征. 农业资源与环境学报, 2022, 39(1): 11-25.

[15] 霍思高, 黄璐, 严力蛟. 基于 SolVES 模型的生态系统文化服务价值评估——以浙江省武义县南部生态公园为例. 生态学报, 2018, 38(10): 3682-3691.

[16] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 陈玉美, 陈艳. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系——以普达措国家公园为例. 地理科学, 2022, 42(7): 1283-1294.

[17] 许静, 刘慧. 甘肃省生态系统服务权衡协同关系评估与预测. 中国环境科学, 2024, 44(4): 1863-1874.

[18] 王军, 顿耀龙. 土地利用变化对生态系统服务的影响研究综述. 长江流域资源与环境, 2015, 24(5): 798-808.

[19] Fu B J, Wang S, Liu Y, Liu J B, Liang W, Miao C Y. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45(1): 223-243.

[20] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.

[21] 周杰, 杨洁, 张文柳. 甘南州生态系统服务时空变化及权衡协同关系. 环境科学, 2025, 46(4): 2398-2409.

[22] 王世豪, 徐新良, 黄麟, 师华定, 谷庆宝, 刘寒冰. 东北黑土区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2024, 44(21): 9504-9519.

[23] 高伟, 李欣悦, 张远, 陈岩. 长江流域生态系统服务价值时空演变与预测. 生态学报, 2023, 43(15): 6203-6211.

[24] 刘强, 杨众养, 陈毅青, 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花. 基于 CA-Markov 多情景模拟的海南岛土地利用变化及其生态环境效应. 生态环境学

报, 2021, 30(7): 1522-1531.

[25] 曹帅, 金晓斌, 杨绪红, 孙瑞, 刘晶, 韩博, 徐伟义, 周寅康. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化. 自然资源学报, 2019, 34(6): 1171-1185.

[26] 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.

[27] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化 SD 模型与模拟. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062-1084.

[28] 罗紫薇, 胡希军, 韦宝婧, 曹盼, 曹诗怡, 杜心宇. 基于多准则 CA-Markov 模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例. 经济地理, 2020, 40(10): 58-66.

[29] 耿鑫, 胡实, 肖玉, 王训明. 基于生态系统服务价值的东北农牧交错区土地利用格局优化与评价. 自然资源学报, 2022, 37(7): 1799-1814.

[30] 陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰. 中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估. 环境科学, 2023, 44(8): 4655-4665.

[31] 何春阳, 史培军, 陈晋, 潘耀忠, 李晓兵, 李京, 李月臣, 李景刚. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. 中国科学: D 辑, 2005(5): 464-473.

[32] He C Y, Okada N, Zhang Q F, Shi P J, Zhang J S. Modeling urban expansion scenarios by coupling cellular automata model and system dynamic model in Beijing, China. Applied Geography, 2006, 26(3/4): 323-345.

[33] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: a case study in Beijing, China. Ecological Indicators, 2018, 84: 183-193.

[34] 黄兰贵, 殷环环, 张航, 吴越. 鄱阳湖出口浮游植物群落与环境因子分析. 水利水电快报, 2021, 42(8): 77-82.

[35] 吴怡, 王成, 王华, 李晓瑛, 徐浩森. 基于 CCME-WQI 方法的鄱阳湖流域乐安河水质分析. 环境科学, 2024, 45(9): 5235-5243.

[36] Mu S J, Li B, Yao J, Yang G S, Wan R R, Xu X B. Monitoring the spatio-temporal dynamics of the wetland vegetation in Poyang Lake by Landsat and MODIS observations. Science of The Total Environment, 2020, 725: 138096.

[37] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. Environmental Modelling & Software, 2016, 75: 44-58.

[38] López E, Bocco G, Mendoza M, Duhau E. Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe A case in *Morelia city*, Mexico. Landscape and Urban Planning, 2001, 55(4): 271-285.

[39] 任婉侠, 韩彬, 谢潇. 东北地区城镇化与资源环境承载力耦合关系的时空变化. 生态经济, 2024(5): 79-88.

[40] 李明鸿, 卢辞. 淮河生态经济带新型城镇化、经济发展与水生态环境耦合协调关系及其驱动因素. 水土保持通报, 2024: 1-12. (2024-01-30). https://link.cnki.net/doi/10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.034.

[41] 杨洁, 谢保鹏, 张德罡. 黄河流域生境质量时空演变及其影响因素. 中国沙漠, 2021, 41(4): 12-22.

[42] 刘世梁, 安南南, 王军. 土地整理对生态系统服务影响的评价研究进展. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1010-1019.

[43] 杨绍微, 刘建锋, 旷远文, 王奇, 黄睿智, 聂稳, 孙婧依, 赵倚霈. 江西省生态系统服务的权衡与协同关系时空动态及其驱动力. 生态学杂志, 2025, 44(1): 216-225.

[44] 孟丽红, 范旋, 刘友存, 廖晓洪, 王宁波. 江西省水资源承载力时空分布格局研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2023, 44(1): 34-42.

[45] 范耘恺, 马书明. 多情景模拟土地利用变化下的生态系统服务评估及其权衡/协同研究——以辽宁省沈抚地区为例. 环境科学学报, 2023, 43(10): 419-434.

[46] 郭洪伟, 孙小银, 廉丽姝, 张大智, 徐燕. 基于 CLUE-S 和 InVEST 模型的南四湖流域生态系统产水功能对土地利用变化的响应. 应用生态学报, 2016, 27(9): 2899-2906.

[47] 郝璐, 孙阁. 城市化对流域生态水文过程的影响研究综述. 生态学报, 2021, 41(1): 13-26.

[48] 薛曾辉, 高驭洋, 卢枰达, 周静, 王可琳, 张斌, 马玉, 刘梦云. 基于土地利用和地形的生态系统服务空间分布及权衡-协同-独立关系——以安塞区为例. 水土保持研究, 2024, 31(2): 240-251, 263.

[49] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 李政旸. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, 2023, 43(22): 9416-9429.

[50] 荣益, 李超, 许策, 严岩. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异——以黄骅市为例. 生态学杂志, 2017, 36(5): 1374-1381.

[51] 夏楚瑜, 国淏, 赵晶, 薛飞, 王楚玥, 周珺, 孙彤, 李淞, 张念慈. 京津冀地区生态系统服务对城镇化的多空间尺度动态响应. 生态学报, 2023, 43(7): 2756-2769.

[52] 白羽萍, 王佳斌, 刘恋, 杜昱东, 邓祥征, 陈建成. 黑河流域生态系统服务价值预测及权衡分析——以张掖市为例. 生态学报, 2022, 42(13): 5187-5199.