

基于FLUS和InVEST模型的山东省生态系统服务研究

孙佳瑶^{1,2}, 孙小银^{1,2*}, 单瑞峰^{1,2}, 田文^{1,2}, 黄茹婷^{1,2}, 陈芝聪³

¹曲阜师范大学地理与旅游学院, 山东 日照

²济宁市地表生态修复重点实验室, 山东 日照

³山东省济宁市规划设计研究院, 山东 济宁

收稿日期: 2023年5月11日; 录用日期: 2023年6月23日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

目的: 模拟山东省在城市自然扩张、生态保护红线和耕地保护三种模拟情景下, 2050年土地利用类型的变化, 并据此分析未来生态系统服务的空间分布情况。方法: 基于山东省2000年与2020年土地利用类型数据, 运用FLUS模型模拟2050年三种情景下的山东省土地利用类型, 并运用InVEST模型分析三种模拟情景下的四种关键生态系统服务的空间格局变化。结果: 1) 在三种模拟情景下, 城市自然扩张情景城乡建设用地面积最大, 林草地面积都有不同程度的减少, 耕地面积在城市自然扩张情景下有较明显的降低; 2) 三种模拟情景在四种关键生态系统服务中与2020年对比, 总体呈现出下降的趋势, 生态保护红线情景下的土地利用变化在三种情景中对生态系统服务的影响最小。结论: 在生态保护红线情景下, 2050年四种关键生态系统服务的总体效益最佳, 在未来的发展中, 对重点地区进行重点管理、采取对生态保护红线内严格限制政策是保护地区生态环境、坚持可持续发展的较为有效的手段。

关键词

FLUS模型, InVEST模型, 土地利用模拟, 生态系统服务, 山东省

Study on Ecosystem Services in Shandong Province Based on FLUS and InVEST Models

Jiayao Sun^{1,2}, Xiaoyin Sun^{1,2*}, Ruifeng Shan^{1,2}, Wen Tian^{1,2}, Ruting Huang^{1,2}, Zhicong Chen³

¹School of Geography and Tourism, Qufu Normal University, Rizhao Shandong

²Key Laboratory of Terrestrial Ecological Remediation in Jining City, Rizhao Shandong

³Jining Planning Design & Research Institute, Jining Shandong

*通讯作者。

文章引用: 孙佳瑶, 孙小银, 单瑞峰, 田文, 黄茹婷, 陈芝聪. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的山东省生态系统服务研究[J]. 地理科学研究, 2023, 12(3): 424-435. DOI: 10.12677/gser.2023.123040

Abstract

Obstrutive: The spatial distribution of future ecosystem services in Shandong Province was analyzed based on the changes in land use types in 2050 under three simulation scenarios: urban natural expansion, ecological protection redline and cultivated land protection. **Method:** Based on the land use type data of Shandong Province in 2000 and 2020, the FLUS model was used to simulate the land use type of Shandong Province under the three scenarios in 2050, and the spatial pattern changes of the four key ecosystem services under the three simulation scenarios were analyzed by the InVEST model. **Result:** 1) Under the above three simulation scenarios, the urban and rural construction land area was the largest in the urban natural expansion scenario, the forest and grassland area was reduced to varying degrees, and the cultivated land area was significantly reduced under the urban natural expansion scenario; 2) The three simulation scenarios showed an overall downward trend in the four key ecosystem services compared with 2020, and the land-use change under the ecological redline scenario had the least impact on ecosystem services among the three scenarios. **Conclusion:** Under the ecological protection redline scenario, the overall benefits of the four key ecosystem services in 2050 are the best, and in future development, key management of key areas and strict restrictions on the ecological protection redline policy are more effective means to protect the regional ecological environment and adhere to sustainable development.

Keywords

FLUS Model, InVEST Model, Land Use Simulation, Ecosystem Services, Shandong Province

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

生态系统服务能够反映一个地区的生态环境与人类活动之间的相互关系，土地利用类型的变化对生态系统服务的影响较大[1]。生态系统服务及其所产生的自然资本对人类赖以生存的地球生命维持系统的功能至关重要[2]，而人类直接或间接地从生态系统中得到惠益[3]。以生态系统服务为主体构成的自然资本对人类社会的发展及人类福祉有着重要作用，是人们赖以生存和发展的资源与环境基础[4] [5] [6]。进入21世纪以来，随着全球经济社会的快速发展，生态环境恶化加快，全球范围的沙漠化、土壤侵蚀、气候变化等问题凸显，重要的生态系统服务在退化。联合国千年生态系统评估(Millennium Ecosystem Assessment, MA) [7]表明，20世纪50年代以来，人类活动引起了大约60%的生态系统服务退化[8]，其中最直接驱动力之一就是栖息地的变化，如林草地向农业用地、建设用地的变化等，改变了原有生态系统结构和功能，降低了原有生态系统的调节、支持、供给能力，破坏了动植物的栖息地，进一步对生物多样性构成威胁[9]。因此，生态系统服务的评估和优化调控已经成为地理学、生态学和环境科学研究的热点，备受世界各国关注。

情景分析是目前生态系统服务研究中常见的方法[10]，通过模拟不同的情景例如生态保护[11] [12]或退耕还林[13] [14]等，分析生态系统服务的空间格局变化，揭示不同时空尺度上生态系统服务的差异，从

而为决策者制定政策提供科学依据。目前, 情景分析方法种类较多, 基于模型的情景分析方法成为近年来研究土地利用变化的热点, 常用的模型有 DLSC (Dynamics of Land System) [15]、CLUE-S [16]、CLUMondo [17]、FLUS [18] [19]等, 用于模拟城市自然扩张、退耕还林等情景模拟, 一般与 ArcGIS 软件共同实现, 主要用于不同情景下生态系统服务空间格局的研究分析。在研究过程中, 情景的选取需要参考当地实际情况, 同时选取研究者的预设方案, 对比不同情景下的生态系统服务的空间演变, 分析各种情景中生态系统的获益情况, 为决策者提供科学建议。

山东省作为我国人口、经济大省, 在过去 20 年的发展中存在一些经济发展与生态系统服务之间的冲突, 使得山东省内耕地面积减少、林草地退化[20], 导致生物多样性降低, 固碳能力减弱, 对山东省的生态环境造成了一定的影响。2021 年 10 月 22 日, 习近平总书记在山东省济南主持召开深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上强调, 要共同抓好大保护, 协同推进大治理, 着力加强生态保护治理、保障黄河全流域高质量发展[21]。山东省地处黄河下游, 是黄河流域生态保护和高质量发展这一重大国家战略的重要组成部分。因此, 在这重大国家战略背景下, 开展山东省生态系统服务的评估、供需匹配及其优化调控, 对于践行党中央的相关决策部署以及习近平总书记提出的“绿水青山就是金山银山”、“山水林田湖草是生命共同体”等的战略思想, 具有重要的现实意义。

本研究基于 FLUS 模型构建山东省城市自然扩张、耕地保护、生态保护红线限制情景, 分析不同情景下生态系统服务的空间布局。构建山东省人地系统的优化指标体系, 明确产水量、土壤保持、碳固存和生物多样性维持四种关键生态系统服务功能改善的贡献, 结合山东省可持续发展适应情景提出可持续发展方案和调控对策。

2. 研究区域概况与数据来源

2.1. 研究区概况

山东省面积 157,900 km², 位于中国东部沿海地区、黄河下游, 北临渤海湾, 东临黄海, 陆地上与河南、河北、安徽、江苏四省毗邻, 位于北纬 34°23'~38°24', 东经 114°48'~122°42'之间, 海洋上与韩国隔海相望。山东省地处华北平原东侧, 地形较为平坦, 以平原、丘陵为主, 最高点位于泰山主峰, 海拔 1527 m。如图 1 所示, 平原面积占全省面积的 66%, 主要分布在西部和北部沿海地区。丘陵面积占全省面积 15%, 主要分布在胶东半岛和南部地区。山地面积占全省面积 19%, 主要分布在鲁中地区和鲁南局部地区[22]。

2.2. 数据来源

本研究使用的山东省 2000、2020 年 2 期土地利用数据, 来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 通过遥感影像解译获得, 分辨率为 30 m。降水数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 精度为 1000 m。DEM 高程数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>), 精度为 30 m。土壤数据来自世界土壤数据库(HWSD)。人口、道路、居民点等驱动因子数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>), 精度为 1000 m。

3. 研究方法

3.1. 土地利用模拟

3.1.1. 模拟情景设定

本研究设置三种情景, 分别是城市自然扩张、生态保护红线限制和耕地保护情景, 并模拟三种情景下的土地利用类型的变化, 进而探讨对生态系统服务的变化。

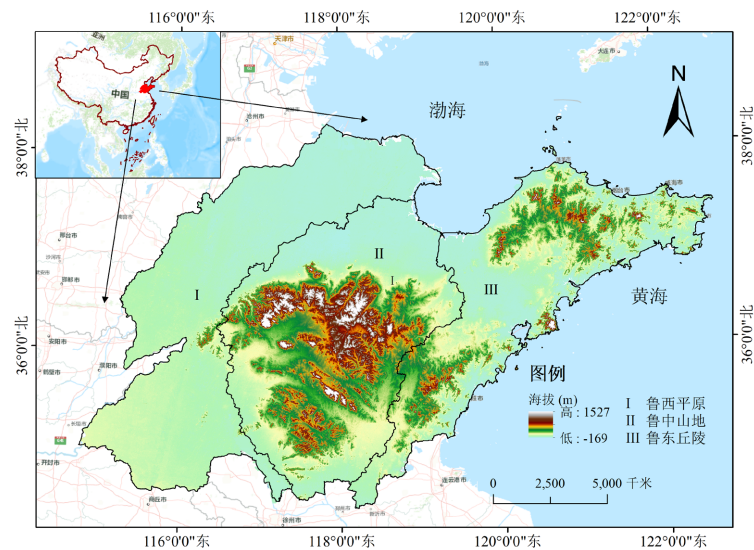


Figure 1. Location map of the study area
图 1. 研究区地理位置图

1) 城市自然扩张情景

近 20 年来，山东省经济发展迅速，城乡建设用地面积不断增加，耕地与林草地面积有显著降低，城市自然扩张情景是在不限制发展的情况下，按照 2000 年~2020 年的土地利用类型的转变情况，模拟未来 2050 年土地利用类型分布。

2) 生态保护红线限制情景

2011 年《国务院关于加强环境保护重点工作的意见》首次明确提出划定生态红线，推进生态文明建设。山东省 2015 年开始推进生态保护红线的规划，共划定 533 个生态保护红线区。生态保护红线是指依法在重点生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区等区域划定的严格管控边界，对于维护生态安全格局、保障生态系统功能、支撑经济社会可持续发展具有重要作用。山东省生态保护红线保护区域如图 2 所示。在 FLUS 模型中，可以通过添加限制区域实现限制区域内土地利用类型转变。

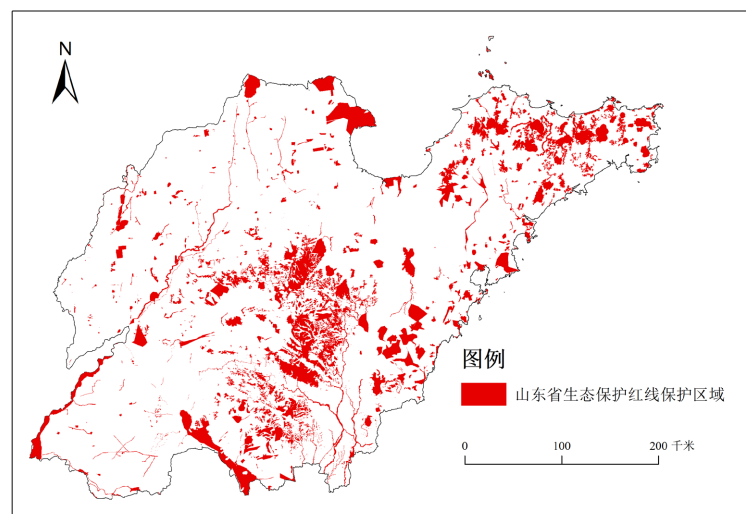


Figure 2. Ecological redlines of protection area in Shandong Province
图 2. 山东省生态保护红线保护区域

3) 耕地保护情景

山东省是我国东部地区的产粮大省,如2020年小麦产量为2568.9万吨,占全国小麦产量的19.13% [23],此外还是全国蔬菜供应大省,潍坊蔬菜大棚可以反季节供应各种蔬果。但在过去的20年间,随着城镇化的快速发展,山东省耕地面积不断下降,从2000年的103,473 km²下降至2020年的101,162 km²,因此保护耕地面积不再减少有利于保证粮食产量。

3.1.2. FLUS 模型设定

FLUS模型是国内学者刘小平等[24]提出的土地利用预测模型,是土地利用变化模拟的最新模型,在元胞自动机、神经网络算法和马尔科夫矩阵等方法上做了较大的改进,提供对在一定情景下对未来土地利用状况的模拟。本研究在此模型的支持下,利用2000年土地利用类型数据模拟2000~2020年土地利用类型变化情况,在此基础上开展对2050年的土地利用模拟预测,从城市自然扩张、生态保护红线以及耕地保护三个具体情景进行模拟预测。

1) 驱动力因子

驱动力因子是驱动土地利用类型转换的要素,本研究选取高程、坡向、坡度和NDVI等自然因素和人口密度、地区生产总值、到公路和城镇的距离等人为因素作为影响土地利用类型转换的驱动力因子。

2) 邻域因子

邻域因子反映的是不同地类相邻单元的扩张能力,取值范围为0~1,数值越大,扩张能力越强。不同地类的邻域因子参数如表1所示。

Table 1. Weight of neighborhood

表 1. 邻域因子

耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用土地
0.8	0.7	0.6	0.7	1	0.8

3) 成本矩阵

成本矩阵是用以表示两种土地利用类型之间相互转化能否发生。数值有0和1两种,其中,0代表该地类不能转化为对应的地类,1表示可以转换。成本矩阵如表2所示。

Table 2. Cost matrix

表 2. 成本矩阵

	耕地	林地	草地	水域	城乡建设用地	未利用土地
耕地	1	1	1	0	1	1
林地	1	1	1	0	1	1
草地	1	1	1	1	1	1
水域	0	0	1	1	0	1
城乡建设用地	0	0	0	0	1	0
未利用土地	1	1	1	0	1	1

3.2. 生态系统服务评估

3.2.1. 产水服务

InVEST模型的产水量模块(Annual Water Yield)是一种基于区域降水量与蒸发量,结合气候、土壤和

植被类型计算得出区域内每个栅格的产水量的估算方法, 其结果为平均水深, 单位为 mm。产水模块计算的基本原理如下:

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格 x 的年产水量(mm); AET_{xj} 为土地利用类型 j 上栅格 x 的年实际蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 上的年降水量(mm)。

3.2.2. 土壤保持服务

InVEST 模型的土壤保持模块(SDR: Sediment Delivery Ratio)是用于量化和绘制陆地上的沉积物的产生和输送, 计算公式如下:

$$S_s = RKLS - USLE = R \times K \times LS - R \times K \times LS \times P \times C \quad (2)$$

式中, R 是降雨侵蚀力因子; K 是土壤可侵蚀因子; LS 是斜率长度梯度因子; P 是土壤保持措施因子; C 是植被覆盖因子。土壤保持因子和植被覆盖和管理因子的数值在 0~1 之间, 参考前人研究结果确定[25] [26]。

土壤保持措施因子和植被覆盖因子参考模型指导手册[27]与前人研究[28] [29]结果设置如表 3 所示。

Table 3. Cover-management factor and Support practice factor

表 3. 土壤保持措施因子和植被覆盖因子

土地利用类型	植被覆盖因子	土壤保持因子
耕地	0.35	0.4
林地	0.003	0.2
草地	0.01	0.2
水域	0	0
城乡建设用地	0	0
未利用土地	1	1

3.2.3. 碳固存服务

InVEST 模型的碳固存模块(Carbon Storage and Sequestration)根据不同的土地利用类型数据及其所对应的地上生物量、地下生物量、死亡有机质。由于死亡有机质碳储量较难获取, 只考虑前四种基本碳库。碳固存模块计算的基本原理如下:

$$C_s = C_{above} + C_{below} + C_{dead} + C_{soil} \quad (3)$$

式中, C_s 表示总碳储量; C_{above} 表示地上碳储量; C_{below} 表示地下碳储量; C_{dead} 表示死亡有机质碳储量; C_{soil} 表示土壤碳储量。各碳储量由碳密度与面积相乘所得, 参考前人研究设置碳库数据如表 4 所示[30] [31] [32]。

3.2.4. 生物多样性维持服务

运用 InVEST 模型中的生境质量模块(Habitat Quality)对山东省生境质量进行评估分析。生境模块计算的基本原理如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

Table 4. Carbon pool data of Shandong Province (kg/m²)**表 4.** 山东省碳库数据(kg/m²)

土地利用类型	地上碳储量	地下碳储量	土壤碳储量
耕地	0.57	2.25	10.84
林地	7.99	2.45	11.96
草地	0.34	2.36	8.65
水域	0.3	1.6	1.4
城乡建设用地	0.25	2.01	7.8
未利用土地	0.13	1.77	3.14

式中, Q_{vj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数; H_j 为土地利用类型 j 中的生境适宜度; D_{vj}^z 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境退化度; z 为模型默认参数; k 为半饱和常数。

生境质量模块的基础数据包括土地利用类型数据、威胁因子和不同土地利用类型的敏感度, 根据前人研究设置威胁因子与生境敏感度如表 5、表 6 所示[27] [33]。

Table 5. Threat factors**表 5.** 威胁因子

威胁因子	最大影响距离	权重	距离衰减类型
农业	6	0.75	线性
城市	10	0.95	指数
工业	12	1	线性
农村居民点	9	0.9	指数

Table 6. Habitat sensitivity of different land types**表 6.** 不同土地类型的生境敏感度

土地利用类型	生境适宜度	农业	城市	工业	农村居民点
耕地	0.2	0.3	0.5	0.55	0.4
林地	0.6	0.5	0.7	0.7	0.6
草地	0.5	0.25	0.4	0.45	0.35
水域	0.9	0.7	0.85	0.9	0.8
城乡建设用地	0	0	0	0	0
未利用土地	0	0	0	0	0

4. 不同模拟情景下土地利用类型及生态系统服务变化分析

4.1. 不同模拟情景下土地利用类型的变化

通过前述的三种情景设置, 模拟出 2050 年城市自然扩张情景、生态保护红线限制情景和耕地保护情景如图 3 所示。在三种模拟情景中, 城乡建设用地的面积都有增加, 其中城市自然扩张情景的城乡建设用地的面积有较明显的增加, 林地和草地的面积在三种模拟情景中也都有不同幅度的下降, 水域面积都有小幅度增加, 这是由于水域较难转变为其他土地利用类型, 另外, 由于山东省未利用土地较少, 且主

要分布在沿海滩涂地区，在此不做讨论。

在城市自然扩张情景中，各中小城镇的面积在 2020 年的基础上有明显扩张，其占用的土地利用类型主要是耕地。从表 7 中可以看出，城乡建设用地的面积从 2020 年的 27,394 km² 增加至 33,599 km²，增加了 22.6%。耕地面积有明显下降，从 2020 年 101,162 km² 下降至 96,105 km²。在该情景中，城市的扩张速度较快，因此占用了大量耕地和少量林地与草地，其趋势与 2000~2020 年土地利用转换趋势基本一致。

Table 7. Land use change under three simulated scenarios
表 7. 三种模拟情景下土地利用变化情况

土地利用类型	城市自然扩张情景		生态保护红线限制情景		耕地保护情景		2020 年	
	面积/km ²	占比	面积/km ²	占比	面积/km ²	占比	面积/km ²	占比
耕地	96105	60.89%	101542	64.34%	104148	65.99%	101162	64.37%
林地	8663	5.49%	8864	5.62%	6322	4.01%	9029	5.74%
草地	8428	5.34%	8429	5.34%	8429	5.34%	8467	5.39%
水域	10624	6.73%	10589	6.71%	10626	6.73%	10471	6.66%
城乡建设用地	33599	21.29%	27837	17.64%	27893	17.67%	27394	17.43%
未利用土地	402	0.25%	560	0.35%	403	0.26%	641	0.41%

在生态保护红线限制情景下，与 2020 年相比，各土地利用类型面积变化不大。城乡建设用地面积增加了 443 km²，有小幅度的增加。耕地的面积虽增加了 380 km²，但由于总面积有变化，因此耕地在比例上几乎不变。林地与草地两种土地利用类型的面积有较小幅度的减少。

在耕地保护情景下，耕地的面积从 101,162 km² 增加至 104,148 km²，增加了 2.95%。林地面积从 9029 km² 降低至 6322 km²，降低了近 30%，这主要是中部山地坡度较低的林地转化为草地、耕地等土地利用类型。该情景下，城乡建设用地也有小幅度增加，增加了 499 km²。

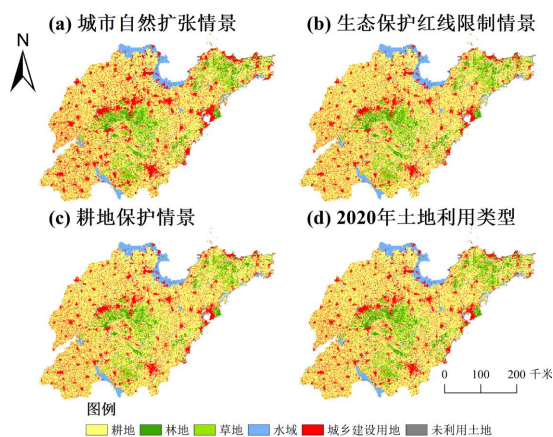


Figure 3. Land use types in 2050 under different simulation scenarios in Shandong Province

图 3. 山东省不同模拟情景下 2050 年土地利用类型

4.2. 不同模拟情景下生态系统服务时空分布格局

根据 FLUS 模拟出的三种情景下的土地利用类型数据，计算在三种模拟情景下 2050 年山东省四种关

键生态系统, 结果如图 4 所示。

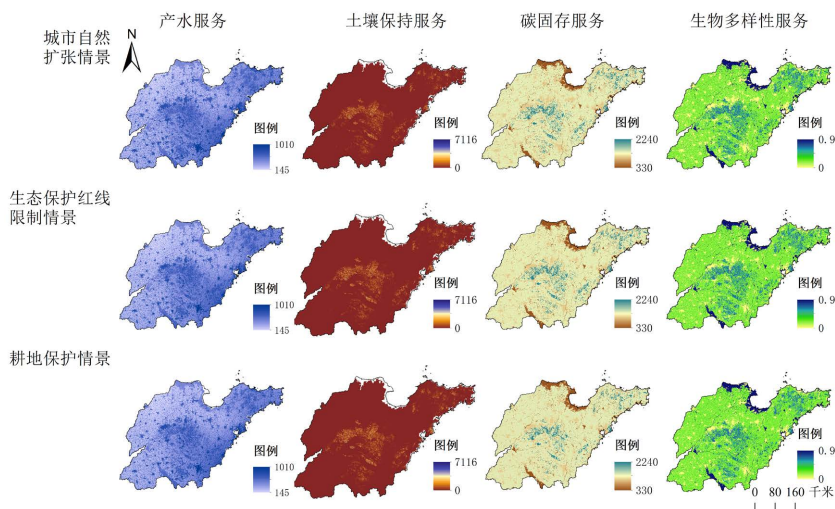


Figure 4. Ecosystem services under different simulation scenarios
图 4. 不同模拟情景下生态系统服务

产水服务由于受降水年际变化较大, 因此在 2050 年的模拟中, 采用多年平均值进行计算分析。在 2050 年的三种情景模拟中, 产水量与产水深度都比 2020 年低, 其中耕地保护情景与生态保护红线限制情景产水量较小, 平均水深分别为 408.20 mm 和 411.50 mm, 相比 2020 年产水总量分别下降了 0.91×10^{13} t 和 0.86×10^{13} t, 城市自然扩张情景产水量最大, 平均水深为 426.53 mm, 产水量相比 2020 年下降了 0.63×10^{13} t。这是由于城市自然扩张情景下, 城乡建设面积大于其他两种情景, 不透水面水流无法下渗对产水量也有较大影响。

如表 8 所示, 在 2050 年的三种情景下, 土壤保持总量与 2020 年相比都有较明显的下降。其中, 耕地保护情景下的土壤保持总量最低, 为 2.84×10^8 t, 比 2020 年低 0.78×10^8 t, 其次是生态保护红线限制情景的土壤保持总量为 2.86×10^8 t, 降低了 0.76×10^8 t, 城市自然扩张情景下土壤保持总量最大, 为 2.87×10^8 t, 但仍比 2020 年低 0.75×10^8 t。在三种情景的模拟中, 林草地的面积都有不同程度的降低, 这影响了土壤保持能力, 因而土壤保持总量呈下降趋势。

Table 8. Ecosystem service assessment under different simulation scenarios
表 8. 不同模拟情景下生态系统服务评估

	产水深度(mm)	土壤保持(10^8 t)	碳固存(10^9 t)	生境质量
2020 年	467.81	3.62×10^8	1.99×10^9	0.2482
城市自然扩张	426.53	2.87×10^8	1.96×10^9	0.2375
生态保护红线限制	411.50	2.86×10^8	1.98×10^9	0.2452
耕地保护情景	408.20	2.84×10^8	1.96×10^9	0.2389

在碳固存服务中, 2050 年的三种情景的碳固存量都低于 2020 年(见表 8)。其中, 生态保护红线限制情景的碳固存量在三种模拟情景中最大, 比 2020 年减少了 0.01×10^9 t; 城市自然扩张情景略低于耕地保护情景的碳固存总量, 比 2020 年减少了 0.03×10^9 t。这是由于在生态保护红线限制情景中, 林地与草地

面积减少比例较小,且生态保护红线区域内的主要土地利用类型即为林地与草地,因此碳固存能力降低较少。城市自然扩张情景下林草地面积变化不大,但城乡建设用地面积增加、耕地面积减少较为明显,农作物也有一定的碳固存能力,因此城市自然扩张情景碳固存总量有所下降。耕地保护情景中,林地面积降低明显,林草地是碳固存能力较高的地类,林地的减少对碳固存的影响也较为明显。

在生物多样性服务中,三种情景下的生境质量都低于 2020 年(见表 8)。生态保护红线限制是三种情景中生境质量最高的,只比 2020 年低 0.003,城市自然扩张情景和耕地保护情景下的生境质量都有明显下降,分别为 0.2375 和 0.2389,与 2020 年相比下降了 0.0107 和 0.0093。其原因是生态保护红线限制情境下的林草地面积相比于其他两种情景面积略大,而林草地能够提供更高的生物多样性服务,因而生境质量更高。城乡建设用地与其他土地利用类型相比能够提供的生物多样性服务更低,所以城乡建设用地面积最大的情景生境质量也最低。

5. 讨论

目前,采用情景分析法对区域内生态系统服务进行评估的研究主要集中在黄河流域[13] [34]和西南[35]等地,主要的情景设定以退耕还林为主,探究退耕还林工程对生态系统服务的保护能力,对平原地区的研究较少。山东省作为粮食生产大省,生态环境的变化间接影响着粮食安全问题,本文采用 FLUS 模型模拟 2050 年城市自然扩张情景、生态保护红线限制情景和耕地保护情景的土地利用类型的变化,并根据土地利用类型数据模拟 2050 年山东省关键生态系统服务的空间分布。总体而言,山东省 2050 年在三种情景下生态系统功能都有一定程度的下降,结合李安林等人[36]对怒江州的研究,生态保护红线情景和耕地保护情景对以不同地形类型为主的地区的区域生态系统服务都可以起到保护作用,且生态保护红线情景是综合效益最高的情景。城市建设用地的扩张速度对生态系统服务的影响较大,在不限城市扩张速度的前提下,生态系统服务功能的下降趋势明显大于生态保护红线情景与耕地保护情景,因而,选择重点关注地区,划定生态保护红线,严格管理生态保护红线内的人类活动,对保护区域内生态系统功能有较明显的作用。

6. 结论

1) 在三种模拟情景下,城乡建设用地的面积都有不同程度的增加,城市自然扩张情景下城乡建设用地面积最大,生态保护红线限制情景下城乡建设用地面积最小;林草地面积都有不同程度的减少,这对生态系统服务的影响较大;耕地面积在城市自然扩张情景下有较明显的降低。

2) 三种模拟情景在四种关键生态系统服务中与 2020 年对比,总体呈现出下降的趋势。在三种情景中,城市自然扩张情景对生态系统的影响较大,在碳固存服务和生物多样性维持服务中是三种情景中最低;生态保护红线在三种情景中对生态系统服务的影响最小。因此,对重点地区进行重点管理,是坚持可持续发展的较为有效的手段。

参考文献

- [1] Rao, Y., Zhou, M., Ou, G., et al. (2018) Integrating Ecosystem Services Value for Sustainable Land-Use Management in Semi-Arid Region. *Journal of Cleaner Production*, **186**, 662-672. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.119>
- [2] Costanza, R., Grasso, M., Hannon, B., et al. (1997) The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital. *Nature*, **387**, 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- [3] Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., et al. (2017) Twenty Years of Ecosystem Services: How Far Have We Come and How Far Do We Still Need to Go? *Ecosystem Services*, **28**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
- [4] Summers, J.K., Smith, L.M., Case, J.L., et al. (2012) A Review of the Elements of Human Well-Being with an Emphasis on the Contribution of Ecosystem Services. *AMBIO*, **41**, 327-340. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0256-7>

- [5] 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[J]. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [6] Kremen, C. and Ostfeld, R.S. (2005) A Call to Ecologists: Measuring, Analyzing, and Managing Ecosystem Services. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3, 540-548.
[https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0540:ACTEMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0540:ACTEMA]2.0.CO;2)
- [7] Millennium Ecosystem Assessment (2005) *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington DC.
- [8] 王佳丽, 黄贤金, 陆汝成, 等. 区域生态系统服务对土地利用变化的脆弱性评估——以江苏省环太湖地区碳储量为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(4): 556-563.
- [9] 苏常红, 傅伯杰. 景观格局与生态过程的关系及其对生态系统服务的影响[J]. 自然杂志, 2012, 34(5): 277-283.
- [10] 李双成, 张才玉, 刘金龙, 等. 生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1379-1390.
- [11] 齐菲, 王丰, 刘斌, 等. 河北滨海湿地生态系统服务供需特征与情景分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023: 1-14.
- [12] 高焱. 甘肃祁连山自然保护区生态脆弱性评价及多情景分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- [13] 于航, 金磊, 谭炳香, 等. 黄土高原退耕还林生态服务权衡协同分析——以安塞县为例[J]. 生态学杂志, 2023, 42(3): 544-551.
- [14] 邓元杰, 姚顺波, 侯孟阳, 等. 退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响——以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(4): 826-844.
- [15] 李亦秋, 邓欧, 张冬有, 等. 丹江口库区土地利用及其生态系统服务价值情景模拟[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 329-335+399.
- [16] 吴文俊, 张雪微, 郭杰, 等. “多目标”需求下扬州市土地利用布局优化[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 7952-7965.
- [17] 郭瑞琦, 陆波, 陈恺霖. 基于 CLUMondo 模型的多情景土地利用变化动态模拟——以广西沿海城市为例[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(1): 176-183.
- [18] 吴淑芳, 张彪, 石学瑾, 等. FLUS-CSLE 模型预测黄土高原典型流域不同土地利用变化情景土壤侵蚀[J]. 农业工程学报, 2022, 38(24): 83-92.
- [19] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响研究[J]. 生态学报, 2023(11): 1-15.
- [20] 吴宵, 王秋贤. 山东省土地利用变化的基本特征与区域差异[J]. 国土与自然资源研究, 2022(1): 3-7.
- [21] 贯彻落实习近平总书记在深入推动黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的重要讲话精神学习交流发言摘编[N]. 山东党校报, 2021-11-16(002).
- [22] 山东省统计局. 山东统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [23] 国家统计局. 中国统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [24] 刘小平, 黎夏, 艾彬, 等. 基于多智能体的土地利用模拟与规划模型[J]. 地理学报, 2006, 61(10): 1101-1112.
- [25] 张大智, 孙小银, 袁兴中, 等. 南四湖流域 1980-2015 年土地利用变化及其对流域生境质量的影响[J]. 湖泊科学, 2018, 30(2): 349-357.
- [26] 刘立程. 兰州市生态系统服务供需关系研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2020.
- [27] Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., et al. (2015) InVEST Version 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project.
<https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/zh/index.html>
- [28] 张大智. 基于 InVEST 模型的南四湖流域生物多样性评价与保护研究[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2018.
- [29] 张世栋. 辽河流域生态系统服务供需关系研究[D]: [硕士学位论文]. 延吉: 延边大学, 2021.
- [30] 张文静. 南四湖流域生态系统服务权衡与协同关系研究[D]: [硕士学位论文]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2021.
- [31] 汪晓珍, 吴建召, 吴普侠, 等. 2000-2015 年黄土高原生态系统水源涵养、土壤保持和 NPP 服务的时空分布与权衡/协同关系[J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 114-121+128.
- [32] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796.
- [33] Sun, X., Shan, R. and Liu, F. (2020) Spatio-Temporal Quantification of Patterns, Trade-Offs and Synergies among Mul-

multiple Hydrological Ecosystem Services in Different Topographic Basins. *Journal of Cleaner Production*, **268**, Article ID: 122338. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122338>

- [34] 刘岩, 李晶, 秦克玉, 等. 基于情景的关中平原土地利用和生态系统服务预测及变化分析[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 95-103.
- [35] 喇露梦, 勾蒙蒙, 李乐, 等. 三峡库区生态系统服务权衡时空动态与情景模拟: 以秭归县为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(11): 1368-1377.
- [36] 李安林, 周艳, 唐丽毅, 等. 怒江州土地利用模拟及生态系统服务价值评估——基于 PLUS 模型的多情景分析[J]. 中国农业资源与区划, 2023, 44(1): 140-149.