

DOI: 10.20103/j.stxb.202210192970

冯雨柯, 翟石艳, 姜昕彤, 罗静静, 闫培雪, 董畅畅, 韩嘉惠. 中原城市群“三生”空间模拟及生态效应评估——基于未来土地利用模拟模型和共享社会经济路径情景. 生态学报, 2023, 43(20): 8292-8308.

Feng Y K, Zhai S Y, Jiang X T, Luo J J, Yan P X, Dong C C, Han J H. Simulating spatio-temporal pattern of production-living-ecological space and evaluating eco-environmental effects in Zhongyuan Urban Agglomeration based on FLUS model and shared socioeconomic pathways. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8292-8308.

中原城市群“三生”空间模拟及生态效应评估 ——基于未来土地利用模拟模型和共享社会经济路径情景

冯雨柯¹, 翟石艳^{1,*}, 姜昕彤², 罗静静², 闫培雪², 董畅畅², 韩嘉惠²

1 河南大学黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475000

2 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

摘要:黄河流域高质量发展背景下, 加强该流域典型城市群“三生”空间(PLES)时空演变和生态效应具有重要现实意义。以中原城市群为例, 基于 2010 年、2015 年和 2020 年的土地利用数据, 耦合未来土地利用变化情景模拟模型(FLUS)、共享社会经济路径(SSPs)和生态环境效应模型, 分析了 2025—2100 年五种 SSPs 情景下中原城市群“三生”空间的时空演变特征, 以及 2035 年不同情景下的生态环境效应。结果表明: (1) 从 2025 年到 2100 年, 除 SSP4 情景外, 其余 4 种情景均表现为生产空间面积持续缩减、生活空间面积明显扩张、生态空间面积略有起伏总体缩减。(2) 5 种 SSPs 情景下, “三生”空间的空间分布格局相对一致。城镇生活用地较为聚集呈片状分布, 农村生活用地呈点状零散分布。农业生产用地较大, 分布均匀。林地和牧草生态用地主要分布在西部和南部, 水域生态用地呈东西向带状分布在中原城市群中北部。(3) 2035 年, 研究区生态环境质量空间分布不均衡, 呈现“西南高-中部低”特征。中间发展情景(SSP2), 生态环境质量略高于其他情景。研究结果对中原城市群的国土空间规划和生态文明建设具有一定的理论和实践价值。

关键词: 中原城市群; 三生空间; 未来土地利用模拟(FLUS)模型; 共享社会经济路径; 生态效应

Simulating spatio-temporal pattern of production-living-ecological space and evaluating eco-environmental effects in Zhongyuan Urban Agglomeration based on FLUS model and shared socioeconomic pathways

FENG Yuke¹, ZHAI Shiyan^{1,*}, JIANG Xintong², LUO Jingjing², YAN Peixue², DONG Changchang², Han Jiahui²

1 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475000, China

2 College of Geography and Environmental Science, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: In the context of the high-quality development of the Yellow River Basin, it is important to simulate spatio-temporal pattern of production-living-ecological space and analysis of eco-environmental effects of the typical urban agglomerations in the Basin. This study took the Zhongyuan urban agglomeration as an example. Based on land use data for 2010, 2015 and 2020, coupled with the future land use simulation (FLUS), the shared socioeconomic pathways (SSPs) and the eco-environmental effect model, we simulated the spatio-temporal pattern of production-living-ecological space in Zhongyuan urban agglomeration under five SSPs scenarios from 2025 to 2100, and analyzed the eco-environmental effects of different scenarios in 2035. The results show that: (1) from 2025 to 2100, except for SSP4 scenario, the area of production space will continue to shrink, the area of living space will expand significantly, and the area of ecological space decreases

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(32130066); 河南省高等学校重点科研项目(21A170007)

收稿日期: 2022-10-19; **采用日期:** 2023-02-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zsyncu@hotmail.com

slightly under SSP1, SSP2, SSP3, and SSP5 scenarios. (2) Under the five SSPs scenarios, the spatial distribution pattern of PLES is relatively consistent. The urban living land presents the clustered distribution pattern, while the rural living land is relatively scattered in a dotted pattern. The agricultural productive land is large and evenly distributed. The woodland and pasture ecological land are mainly distributed in the west and south, and the water ecological land is distributed in an east-west strip in the middle and north of the Central Plains urban agglomeration. (3) In 2035, the spatial distribution of eco-environmental quality in the study area will be uneven, showing the characteristics of high in the southwest and low in the center. The ecological quality is higher in intermediate development scenario (SSP2) than in other scenarios. The results of the study will provide helpful reference for territorially spatial planning and ecological civilization construction in the Zhongyuan Urban Agglomeration.

Key Words: Zhongyuan Urban Agglomeration; production-living-ecological space; FLUS model; shared socioeconomic pathways; ecological effect

中原城市群是黄河流域三大城市群的中心,同时也是连接东西部的桥梁。随着《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》和《中共中央国务院关于新时代推动中部地区高质量发展的意见》等政策的出台,中原城市群具有较强的发展潜力^[1]。自 2003 年河南省制订的《河南省全面建设小康社会规划纲要》初步提出中原城市群发展战略构想以来,中原城市群的经济在全国中占据不可忽视的重要地位,但是发展不平衡不充分的问题仍然较为突出^[2-3]。

土地利用是人类活动的真实反映,是自然人文等因素综合作用的结果,而土地利用变化是指在一定时期内与区域社会经济转型发展相对应的土地利用形态在时空序列上的演变过程^[4]。在城镇化进程中,土地利用变化会造成景观破碎化、生态环境退化和发展不平衡等负面影响,故在有限的土地资源之间保持平衡,并在不断变化的社会和经济因素下促进可持续发展,已经成为一个重大的科学挑战^[5]。

早在 2012 年,为了实现城市和生态环境的可持续发展,中国政府在国土空间规划中制定了“三生”空间(PLES)战略,其中“三生”分别指的是生产、生活和生态^[6]。同时,党的十八大明确提出“促进生产空间集约高效、生活空间宜居适度、生态空间山清水秀”的发展目标^[7]。党的十九大还强调科学划定生态保护红线、永久性基本农田和城镇发展边界,以协调生产、生活和生态空间的发展,促进经济和环境的可持续发展^[8]。国内外学者围绕“三生”空间(PLES)做了大量研究^[9],主要集中在“三生”空间划分^[10-11]、“三生”空间识别^[12-14]和“三生”空间优化^[15-17]3 个方面。此外,许多学者^[18-26]还将“三生”空间与土地利用时空格局演变、生态效应分析相结合。例如,高星等利用历史土地利用变化数据定量分析研究区“三生”空间的时空演变及其功能转型的生态环境效应^[25]。但已有研究,空间尺度多围绕县域、市域、省域和区域等,以城市群为研究尺度的较少^[26]。时间尺度多关注于“三生”空间历史时期的时空格局变化,而对未来不同社会经济发展情景下城市群尺度“三生”空间转型及其所带来的生态环境质量问题尚不清楚^[27-28]。联合国政府间气候变化专门委员会发布 5 种共享社会经济路径(SSPs),描述了未来人类社会经济发展模式^[29]。SSPs 情景框架可以为“三生”空间未来土地利用变化模拟提供人口、国内生产总值(GDP)等重要参数^[30]。目前常用的土地利用变化模拟方法包括系统动力学^[31]、元胞自动机(CA)^[32]、全局土地利用变化模拟模型(CLUE-S)^[33-34]、未来土地利用变化情景模拟模型(FLUS)^[35-36]等。其中,FLUS 模型能够以较高的精度模拟未来土地利用变化的分布情况,被广泛应用^[37-38]。

目前,中原城市群中一半以上的城市发展过度依赖自然资源,第二产业的比重大,导致生态环境污染相对严重^[39-40]。而生态环境问题一直是学术界关注的热点问题^[41]。常见的评估生态环境质量的方法包括景观生态格局与生态系统服务价值构建的生态风险综合评价体系^[42]、生境退化度与生境质量构建的生物多样性评价体系^[43-45]和生态环境质量指数和生态贡献率构建的生态效应评价体系^[24,47-48]等。例如,万慧琳等^[42]利用构建的生态风险综合评价体系分析三江平原湿地生态风险时空变化;张学儒等^[43]运用 InVEST 模型重建研究区的生境质量空间格局,并对计算得到的生境退化度指数和生境质量指数进行等级划分与统计分析;杨清可等^[24]通过生态环境质量指数和土地利用转型的生态贡献率等方法,定量分析长江三角洲地区的生态环

境效应。

本研究区作为黄河流域快速发展的城市群,2010—2020 年间快速发展时期三生空间的时空格局和生态环境如何?未来不同社会经济发展路径下三生空间和生态环境又是怎么样?何种发展路径更适合中原城市群?因此,本文耦合 SSPs 情景、FLUS 土地利用变化模型和生态环境质量评估模型,构建城市群尺度的“三生”空间时空变化趋势分析和生态环境效应定量评估的研究框架。以中原城市群为例,分析该城市群历史时期(2010—2015)和未来时期(2025—2100)“三生”空间土地利用时空变化趋势,评估 2035 年 5 种不同 SSPs 情景下的生态环境效应。研究成果将对如何协调城市群有限的土地资源与生态环境保护之间的关系提供理论依据。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

中原城市群位于中国中东部,是北京、武汉、济南、西安之间,半径 500 km 区域内城市群体规模最大、人口最密集、经济实力较强、工业化进程较快、城镇化水平较高、交通区位优势突出的城市群(图 1)。根据国务院 2016 年 12 月 28 日批复的《中原城市群发展规划》,中原城市群涵盖河南省、山西省、河北省、山东省和安徽省等 5 个省份,包括河南省全部 18 个城市,山西省长治市、晋城市和运城市,河北省邢台市和邯郸市,山东省聊城市和菏泽市以及安徽省淮北市、蚌埠市、宿州市、阜阳市和亳州市等共计 30 座城市,面积约为 28.7 万 km²,其中山地占 56%、丘陵及平原湖区占 44%。十三五期间,中原城市群地区生产总值达 81266 亿元,占全国的比重为 8.0%。按可比价格,比 2015 年增长 33.4%,年均增长 5.9%,高于全国年均增长水平,但在环境治理、城市功能建设等方面则相对滞后,因此亟需对其未来的发展思路做出前瞻性思考,推动国土空间的均衡开发。

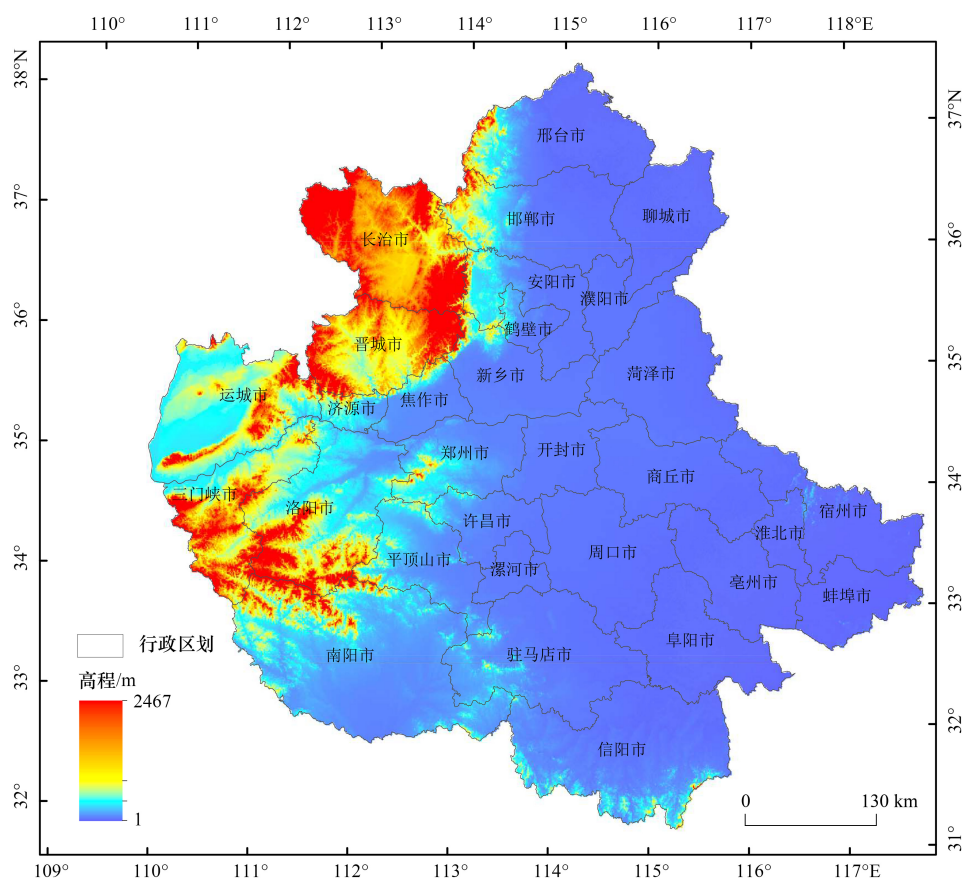


图 1 研究区位置及范围

Fig.1 Location and scope of the study area

1.2 数据来源与处理

本文用到的四大类数据分别为:“驱动因子数据”“共享社会经济路径(SSPs)数据”“研究区人口、GDP 和城镇用地面积的统计数据”和“行政区划、土地利用等基础数据”。

考虑到模型的精确性,本文参考相关文献^[30,49],从自然和人文两个方面选取 13 个驱动因子,包括自然因素(高程、坡度、坡向、降水、温度、土壤)、社会经济因素(人口密度、GDP)和交通区位因素(距主要河流距离、距主要公路距离、距主要铁路距离、距市中心距离、距县中心距离)共 13 个驱动因子数据(图 2)。其中高程、降水、温度、土壤、人口密度和 GDP 数据来源于中国科学院资源环境与数据中心,年份均为 2010 年。坡度和

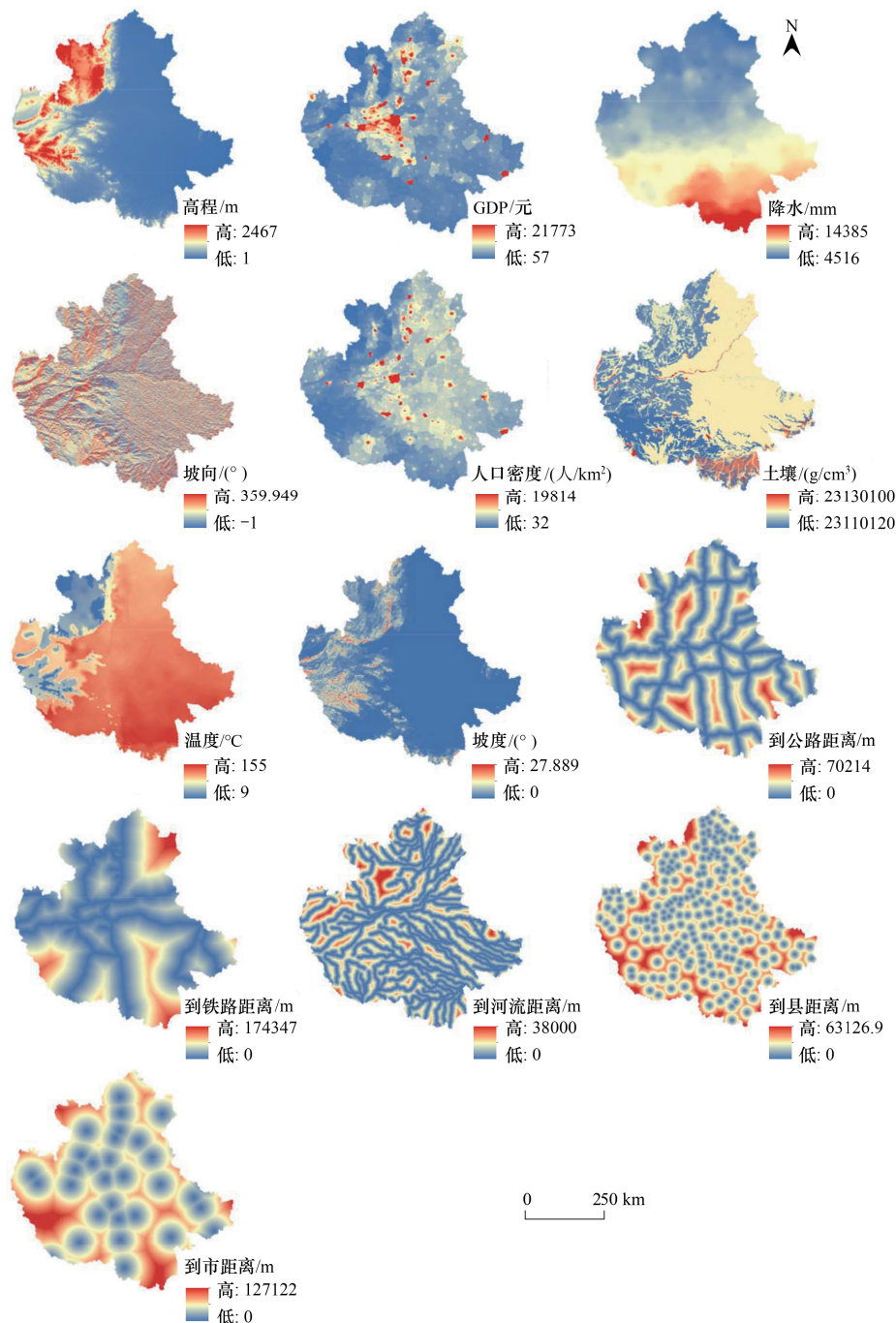


图2 驱动因子

Fig.2 Driving factors

坡向数据由高程数据通过 ArcGIS 预处理得到。距主要河流、主要公路、主要铁路等距离(2016 年)以欧式距离进行度量,其数据来源于 OpenStreetMap 数据网。并对所有驱动因子数据进行重采样处理,统一成 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的分辨率。

共享社会经济路径(SSPs)下的人口与经济预估数据库来源于南京信息工程大学(<https://geography.nuist.edu.cn/>)。该数据库包含 2010—2100 年中国、“一带一路”区域和全球范围内分年龄、性别和教育水平的人口以及分三次产业的 GDP 数据,数据分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。中原城市群 1989—2019 年人口、GDP 和城镇面积数据,来源于各省的统计年鉴。基础数据包括 2010、2015 和 2020 年分辨率为 1 km 的土地利用数据和 2015 年行政区划数据,均来源于中国科学院资源环境与数据中心。

2 研究方法

2.1 研究框架

如图 3 是本文的研究框架,参考 Jiang 等^[30]的研究。首先,本文对中原城市群的土地利用类型按照土地利用主导功能进行“三生”空间划分。其次,根据 5 种共享社会经济路径下的社会经济预测数据集,设置情景模拟参数(GDP 和人口),利用多元线性回归模型计算 5 种情景下的土地利用需求。再次,利用 FLUS 模型对各土地利用需求在各像元处的空间分布进行分配并基于 FLUS 模型的模拟结果得到 2025—2100 年 5 种不同 SSPs 情景下研究区“三生”空间的时空变化格局。最后,利用生态环境质量指数和生态贡献率定量评价生态效应的变化。

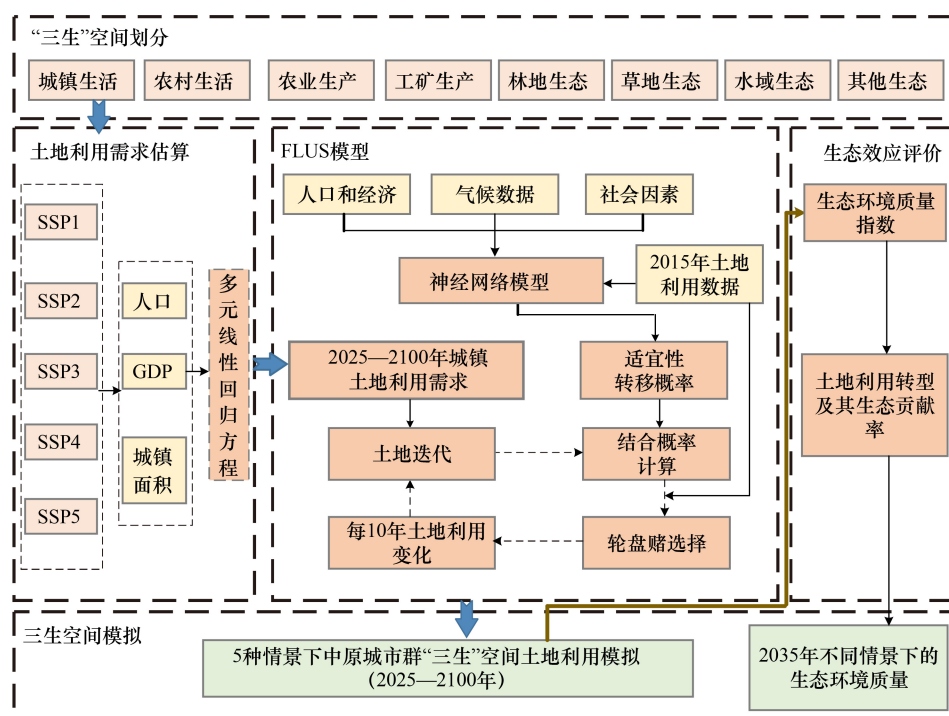


图 3 研究方法与框架图

Fig.3 Research methods and Framework map

SSP: 共享社会经济路径; FLUS: 未来土地利用模拟 GDP: 国内生产总值

2.2 “三生”空间划分

“三生”空间的分类和评价体系是构建合理的“三生”空间格局的基础,关于“三生”空间的划分体系,学者们做了大量研究并取得了重要的理论成果。总的来说分为两种划分视角,一种是根据土地利用主导功能进行划分,另一种是根据土地利用复合功能进行划分。但由于同一用地类型可能兼顾多种功能,从利用功能视

角开展土地分类具有一定难度^[10]。本文基于土地利用主导功能的视角参考刘继来^[10]、白如山^[50]等的研究将 22 个二级土地类型划分为农业生产用地、工矿生产用地、牧草生态用地、林地生态用地、水域生态用地、其他生态用地、城镇生活用地和农村生活用地,并将这 8 种用地类型分类再划分为生产空间、生活空间和生态空间。同时,参考李晓文等^[47]制定的不同二级地类的生态环境质量值,在不调整土地利用基本分类的基础上,利用面积加权法对“三生”空间土地利用分类系统的二级地类的生态环境质量指数进行赋值(表 1)。

表 1 “三生”空间土地利用主导功能划分及其生态环境质量指数

Table 1 Division of land use leading functions and its eco-environmental quality index of PLES

“三生”空间土地利用功能分类 Land use function classification of production-living-ecological space		土地利用分类系统的二级地类 Secondary classification of land use classification system	生态环境质量指数 Eco-environmental quality index
一级分类 First class	二级分类 Second class		
生产空间 Productive land	农业生产用地	旱地	0.30
		水田	0.40
	工矿生产用地	其他建设用地	0.15
生态空间 Ecological land	林地生态用地	有林地、灌木林地、疏林地、其他林地	0.65
	牧草生态用地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	0.50
	水域生态用地	河渠、水库坑塘、滩涂、滩地	0.55
		湖泊	0.75
	其他生态用地	沙地、盐碱地、裸土地、裸岩石地	0.03
生活空间 Living land		沼泽地	0.65
	城镇生活用地	城镇用地	0.20
	农村生活用地	农村居民点	0.20

2.3 基于 SSPs 土地利用需求估算

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)综合考虑了人口增长、经济发展、技术进步、环境条件、公平原则、政府管理、全球化等发展特点,提出了共享社会经济路径(SSPs)^[29]。SSPs 通常用于定量描述气候变化与社会经济发展路径之间的关系,在中国的发展与应用集中于基本要素的预估及气候影响评估^[51]。SSPs 是一种社会经济假设情景下的全球模拟情景,由 5 种不同的发展模式导致的未来社会经济情景组成。其中,SSP1 代表一种可持续发展的情景,该情景基于全球合作背景的较高经济增长率以及人口总量的减少,各国开始向可持续发展转变,从强调经济的高速增长到强调人类整体的未来福祉;SSP2 代表一种中间发展情景,在该情景下大多数经济体在政治体系上是稳定的,遵循历史开发模式,一切照旧;SSP3 代表一种区域间竞争的情景,总体上经济发展缓慢,教育水平相对较低,生育率和死亡率较高,社会不平等加剧;SSP4 代表一种不均衡发展的情景,主要反映在低收入地区人口快速增长,高收入地区人口减少。随着社会的发展,高收入地区愈加繁荣,而低收入地区在增加收入方面进展甚微,人均收入差距拉大;SSP5 代表一种化石燃料为主的发展情景,是一种以大量化石燃料为代价的高速发展模式,全球经济快速发展,但人们将面临减少排放的严重挑战^[52—53]。

本文基于研究区 1989—2019 共 30 年的人口、GDP 和城镇用地面积的统计数据,用多元线性回归模型建立人口、GDP 和城镇用地面积之间的关系。以中原城市群的人口和 GDP 历史数据为因变量,城镇土地历史面积为自变量,建立的多元回归方程表达式如下:

$$U_i = -788.58 + 0.06 \times \text{GDP}_i(\text{亿元}) + 0.14 \times \text{POP}_i(\text{万人}) \quad (1)$$

式(1), U_i 是第 i 年的城镇土地需求; POP_i 是第 i 年的城市群人口; GDP_i 是第 i 年城市群的 GDP。多元线性回归模型的 R^2 为 0.96,能够解释因变量 96% 的变化。 t 检验后,显著性 P 值均小于 0.05,这意味着水平上呈现显著性,通过了检验。

用 ArcGIS10.7 对获得的共享社会经济路径下 2010—2100 年中国人口与经济数据进行掩膜提取,得到中原城市群 2010 到 2100 年人口和 GDP 数据。最后将提取到的研究区人口和 GDP 数据分别代入此方程,即可

得到 5 种情景下城镇土地面积需求。最后将土地利用需求输入到 FLUS 模型中即可模拟出各情景下的土地利用变化情况。

2.4 FLUS 模型

FLUS 模型是将人为效应和自然效应耦合为多种类型土地利用情景仿真的综合模型,由黎夏团队于 2017 年完成,在传统元胞自动机的基础上做了很大改进,用于促进多种土地利用变化分析,可以设置多种情景,对未来土地利用变化进行预测和分析^[54]。此模型主要分为三部分,一是马尔可夫(Markov)模块,二是基于神经网络的出现概率计算模块,三是基于自适应惯性机制的元胞自动机计算模块。

2.4.1 Markov 模型

Markov 模型是用于计算未来用地类型数量的方法,其表达式为:

$$S(t+1) = S(t) \times P_{i,j} \quad (2)$$

式(2), $S(t+1)$ 、 $S(t)$ 分别表示 $t+1$ 、 t 时某区域空间类型的状态矩阵, $P_{i,j}$ 表示由空间类型 i 转化为空间类型 j 的转移概率矩阵。

2.4.2 神经网络模型

神经网络算法(Artificial Neural Networks, ANN)从一期土地利用数据与包含人为活动和自然效应的多种驱动力因子(气温、降水、土壤、地形、交通、区位、政策等方面)中获取各用地类型在研究范围内的适宜性概率。ANN 包含了 3 个隐含层,分别是输入层、隐含层和输出层,用于训练和评估每个栅格转化的概率,其表达式为:

$$sp(p,i,t) = \sum_j w_{j,i} \times 1/(1 + e^{-net_j(p,t)}) \quad (3)$$

$$\sum_i sp(p,i,t) = 1 \quad (4)$$

式(3), i 为用地类型; j 为隐藏层; p 为栅格; t 为时间; $sp(p,i,t)$ 为适宜性概率; $w_{j,i}$ 为权重; $-net_j(p,t)$ 为接收到的信号;式(4),通过神经网络模型计算的各用地类型转换的适宜性概率的和应为 1。本文选取人口、GDP、高程等 13 个驱动因子,进行了统一抽样,并将隐藏层设置为 13,对每一种土地类型进行神经网络训练,得到其训练概率。

2.4.3 自适应惯性竞争模型

自适应惯性竞争模型采用具有随机性特点的轮盘赌选择机制,以土地利用栅格数据为初始输入数据,通过 Markov 模型预设各用地类型变化数量,根据经验确定不同用地类型间的转换矩阵,在适宜性概率和用地类型邻域权重以及各参数的作用下,得出预设年份的土地利用数据。其表达式如下:

$$TP_{p,t}^t = sp(p,i,t) \times Inertia_i^t(1 - sc_{c \rightarrow i}) \times \frac{\sum_{N \times N} \text{con}(c_p^{t-1} = i)}{N \times (N - 1)} \times w_i \quad (5)$$

式(5), $TP_{p,t}^t$ 表示第 t 次迭代时转换为用地类型 p 的总概率; $sp(p,i,t)$ 表示适宜性概率; $Inertia_i^t$ 表示自适应惯性系数; $sc_{c \rightarrow i}$ 表示空间类型转换成本; $N \times N^{\text{con}(c_p^{t-1} = i)}$ 表示用地类型 i 在迭代结束后所产生的栅格数量; w 为各用地类型的邻域权重。

2.5 生态环境效应模型

2.5.1 生态环境质量指数

生态环境质量指数是指为定量分析区域生态环境质量而对不同土地类型的生态质量进行的评价^[24]。不同土地利用类型的生态环境质量指数在研究区域之间存在差异,指数的变化主要归因于研究区域内各土地利用类型面积和总面积的变化。从生态环境的角度出发,定量研究中原城市群 2035 年在 5 种 SSPs 情景下的生态环境质量的总体情况。其表达式为:

$$EV_t = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (6)$$

式(6), EV_t 表中原城市群 t 时期内的生态环境质量指数; n 表示该区域内土地利用类型的数量; A_{ki} 表示第 k 个生态单元内用地类型 i 的面积; A_k 表示第 k 个生态单元的总面积; R_i 表示第 i 种土地利用类型的生态环境质量指数。

2.5.2 土地利用转移矩阵

本文使用的土地利用转移矩阵方法来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述。转移矩阵并非是一种指数,只是将土地利用变化的类型转移面积按矩阵或表格的形式加以列出,可作为结构分析与变化方向分析的基础。其意义在于它不仅可以反映研究“期初”和研究“期末”的土地利用类型结构,同时还可以反映研究时段内各土地利用类型的来源与构成。利用 ArcGIS10.7 对不同时期的土地利用数据进行叠加分析,通过 Excel 绘制数据透视表,从而得到中原城市群 2015 年到 2035 年各情景下的土地利用转移矩阵。转移矩阵的数学形式为:

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{vmatrix} \quad (7)$$

式(7): S 代表面积, n 代表土地利用类型数目; i, j 分别代表研究期初和研究期末的土地利用类型。

2.5.3 生态贡献率

生态贡献率是指某一地区因土地利用功能变化而引起的该地区生态环境质量的改变,既有正值,也有负值,正值表示某地区生态环境质量改善;负值则表示某地区生态环境质量恶化^[24]。通过 2010、2015 年和 2035 年中原城市群某区域的生态环境质量指数,计算不同时期内因区域土地利用功能变化而产生的生态贡献率。其表达式为:

$$LEI = (LE_{t+1} - LE_t) LA / TA \quad (8)$$

式(8), LEI 表示为区域内土地利用功能变化的生态贡献率; LE_{t+1} 、 LE_t 分别表示为某一时期某种土地利用功能变化的变化末期和变化前期的生态环境质量指数; LA 为该变化类型的面积; TA 表示该研究区域的总面积。

3 结果分析

3.1 2010—2020 年“三生”空间时空格局分析

2010、2015 和 2020 年中原城市群“三生”空间土地利用现状如图 4 所示。2010 年至 2020 年中原城市群生产空间面积持续下降,下降率为 2.52%;生活用地面积持续增加,从 2010 年 30641 km²增加到 2020 年 35781 km²,增长率为 16.77%;生态用地面积持续下降,但变化率较小,下降率仅为 0.56%。空间分布上,2010—2020 年间中原城市群生产空间在“三生”空间中分布最为广泛。生产空间包括农业生产和工矿生产用地,其中农业生产用地占生产用地的 99%,大面积覆盖在研究区中;工矿生产用地零星分布在中原城市群各处。生活空间占地面积最小,分为城镇生活用地和农村生活用地,农村生活用地呈点状零散状分布在研究区,而城镇生活用地大部分呈片状分布;生态空间主要包括水域、草地、林地以及其他生态用地^[30]。其中部分水域生态用地呈东西向带状分布在中原城市群中北部,还有部分水域生态用地呈片状分布在中原城市群的西南部;林地生态用地主要呈片状聚集分布在中原城市群的西部,而牧草生态用地主要穿插分布在林地生态用地中。

3.2 模型调整与模拟精度验证

参考现有研究成果^[30,55],对中原城市群土地利用类型进行邻域因子参数调整,如表 2 所示。并对转移矩阵做出了几个假设:第一,城镇生活用地不能转化为其他生态用地,其他生态用地不能转化为城镇生活用地;第二,农业生产用地不能转化为其他生态用地;第三,林地生态用地不能转化为其他生态用地^[30]。本文采用 FLUS 模型进行土地利用变化模拟,以 2010 年的土地利用作为基准数据,分别对 2015 年和 2020 年的土地利

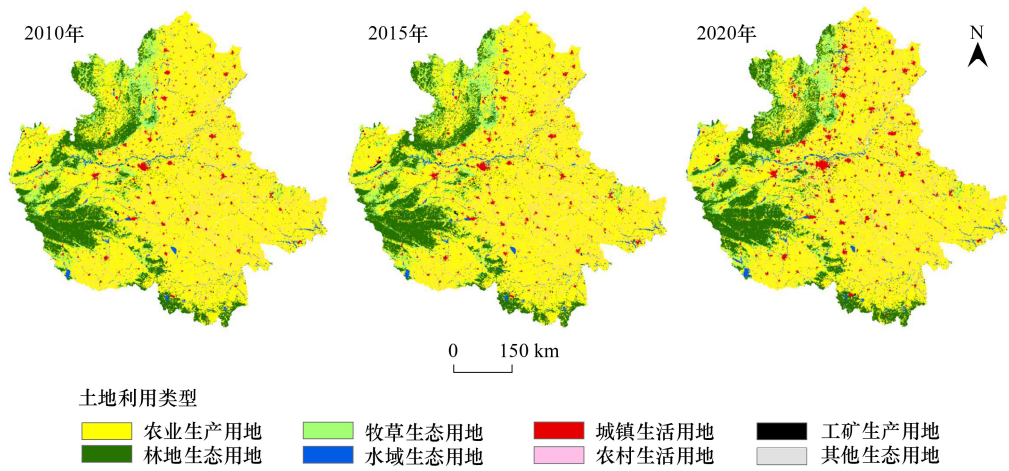


图4 中原城市群 2010—2020 年“三生”空间分布图

Fig.4 Distribution of production-living-ecological space of Zhongyuan Urban Agglomeration from 2010 to 2020

用变化进行模拟。模拟结果表明,2015 年的 Kappa 系数为 0.89,总体精度为 0.94;2020 年的 Kappa 系数和总体精度分别为 0.75 和 0.86。Kappa 系数满足精度要求,且总体精度较高。

表 2 邻域权重设置

Table 2 Neighborhood weight settings

土地类型 Land types	农业生产 Agricultural production	林地生态 Forest ecological	牧草生态 Meadow ecological	水域生态 Water ecological	城镇生活 Urban living	农村生活 Rural living	工矿生产 Industrial and mining	其他生态 Other ecological
邻域权重 Neighborhood weight	0.4	0.5	0.5	0.6	1	0.7	0.9	0.3

3.3 未来 SSPs 情景下“三生”空间模拟及生态效应分析

3.3.1 2025—2100 年“三生”空间趋势分析

为了定量分析共享社会经济路径下中原城市群“三生”空间土地利用变化的趋势,本文选取 2025、2035、2045、2055、2065、2075、2085、2095 和 2100 年为预测节点,将基于 SSPs 土地利用需求估算的城镇用地面积分别输入 FLUS 模型进行多次迭代,直至满足预测节点的各项情景模式下土地利用类型栅格数量,据此对不同 SSPs 情景下的土地利用变化进行预测。

2025—2100 年中原城市群的生产空间发展趋势如图 5 所示。在 5 种共享社会经济路径下,除了 SSP4 情景,其余 4 种情景从 2025 年到 2100 年生产空间的用地面积一直是下降趋势。2025—2095 年间 SSP5 的生产空间面积下降最快,下降率为 9.59%,但在 2095 年到 2100 年间生产空间面积有略微上升趋势;SSP3 的生产空间面积下降最慢,下降率仅为 4.59%;在 SSP4 情景下生产空间面积先下降后上升最后趋于稳定,2025—2065 年间呈现下降趋势下降率为 3.86%,从 2065 年到 2075 年生产空间面积将从 186605 km²增加到 188006 km²,

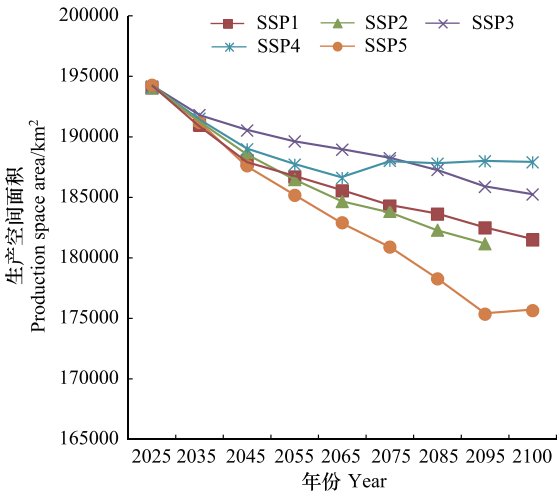


图5 2025—2100 年中原城市群生产空间趋势图

Fig.5 Production space trend of Zhongyuan urban agglomeration from 2025 to 2100

增长率为 0.75%。从 2075 年往后趋于平缓,总体上生产空间面积是下降的,下降率为 3.20%。

如图 6 所示,从 2025 年到 2100 年,除了 SSP4 情景外的其余 4 种情景下,中原城市群的生活空间面积持续增加。其中,SSP5 的生活空间面积增加最快,增长率为 79.81%;SSP3 的生活空间面积增加最慢,增长率为 39.39%;SSP1 和 SSP2 的生活空间面积增加趋势较为接近,增长率分别为 55.14%和 57.83%。;SSP4 的生活空间面积从 2025 年到 2045 年快速增加,2045 年到 2065 年缓慢增加,2065 年至 2100 年生活空间面积趋于稳定。

图 7 为 2025—2100 年中原城市群 5 种情景下的生态空间发展趋势。除了 SSP4 情景,其余 4 种情景从 2025 年到 2100 年生产空间的用地面积呈现下降趋势。其中,SSP1 和 SSP2 的生态空间面积下降趋势较为接近,下降率分别为 3.49%和 3.58%;从 2025 到 2085 年 SSP5 的生态空间面积下降最快,下降率为 3.49%,随后在 2085—2095 年间面积增加,增长率为 1.28%,接着在 2095—2100 年间又迅速下降,下降率为 1.93%;2025—2100 年间 SSP3 的生态空间用地面积下降最慢,下降率为 2.48%,但除了 2035—2045 期间面积下降较快,其余都较为平缓;SSP4 情景下的生态空间面积变化无明显规律,在 2025—2055 年间呈现下降趋势,下降率为 1.33%,在 2055—2065 年间面积增加,增长率为 1.46%,在 2065—2075 年间面积又下降,下降率为 1.86%,随后在 2075—2100 年间面积缓缓增加,增长率为 0.53%。

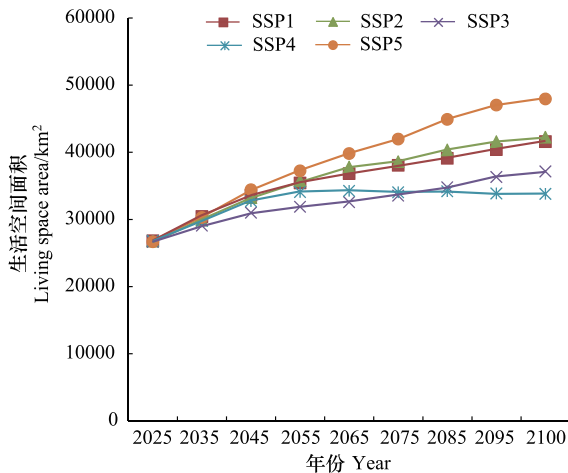


图 6 2025—2100 年中原城市群生活空间趋势图

Fig.6 Living space trend of Zhongyuan urban agglomeration from 2025 to 2100

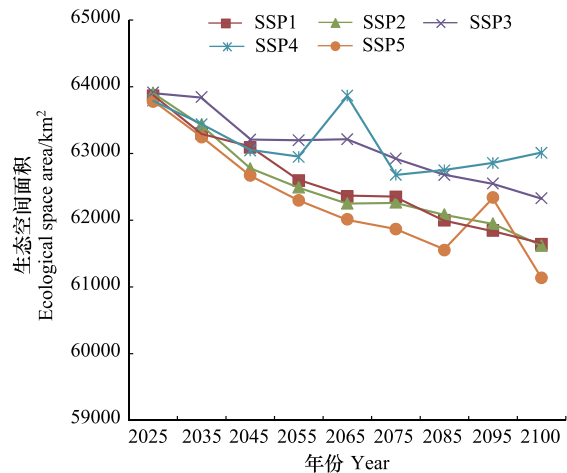


图 7 2025—2100 年中原城市群生态空间趋势图

Fig.7 Ecological spatial trend of Zhongyuan urban agglomeration from 2025 to 2100

3.3.2 2025—2100 年三生空间的多情景模拟

SSPs 分为 5 种情景,即可持续发展情景(SSP1)、中间发展情景(SSP2)、区域间竞争情景(SSP3)、不平衡发展情景(SSP4)和化石燃料情景(SSP5)。根据不同 SSPs 情景对城镇用地的不同需求作为约束条件,模拟结果如图 8 所示。从图中可以看出,随着时间的推移,不同情景的用地类型变化是不同的,其中城镇生活用地的变化最为明显。同时可以进一步说明,在 SSP1、SSP2、SSP3 和 SSP5 情景下,2025—2100 年间中原城市群的生活空间将持续增加。到 2100 年中原城市群的城镇生活用地将分别增加到 24676 km²(SSP1)、25475 km²(SSP2)、19678 km²(SSP3)和 31550 km²(SSP5),平均增长率为 202.95%。而在 SSP4 情景下,从 2025 到 2065 年城镇生活用地持续增加。2025—2045 年间增长较快,增长率为 75.21%;2045—2065 年间增长缓慢趋于平缓,增长率仅为 10.98%;随后在 2065—2100 年间有略微波动,城镇生活用地面积总体是减少的。而农业生产用地和农村生活用地受到城镇生活用地扩张或减少的影响最大。这表明当城镇生活用地扩张时,农业生产用地和农村生活用地的面积将会减少,反之亦然。就生态空间而言,不同 SSPs 的用地面积变化相对来说不太明显,总的来说生态空间的面积在减少,仅在 SSP4 情景下,生态空间的面积在未来呈现增长趋势。

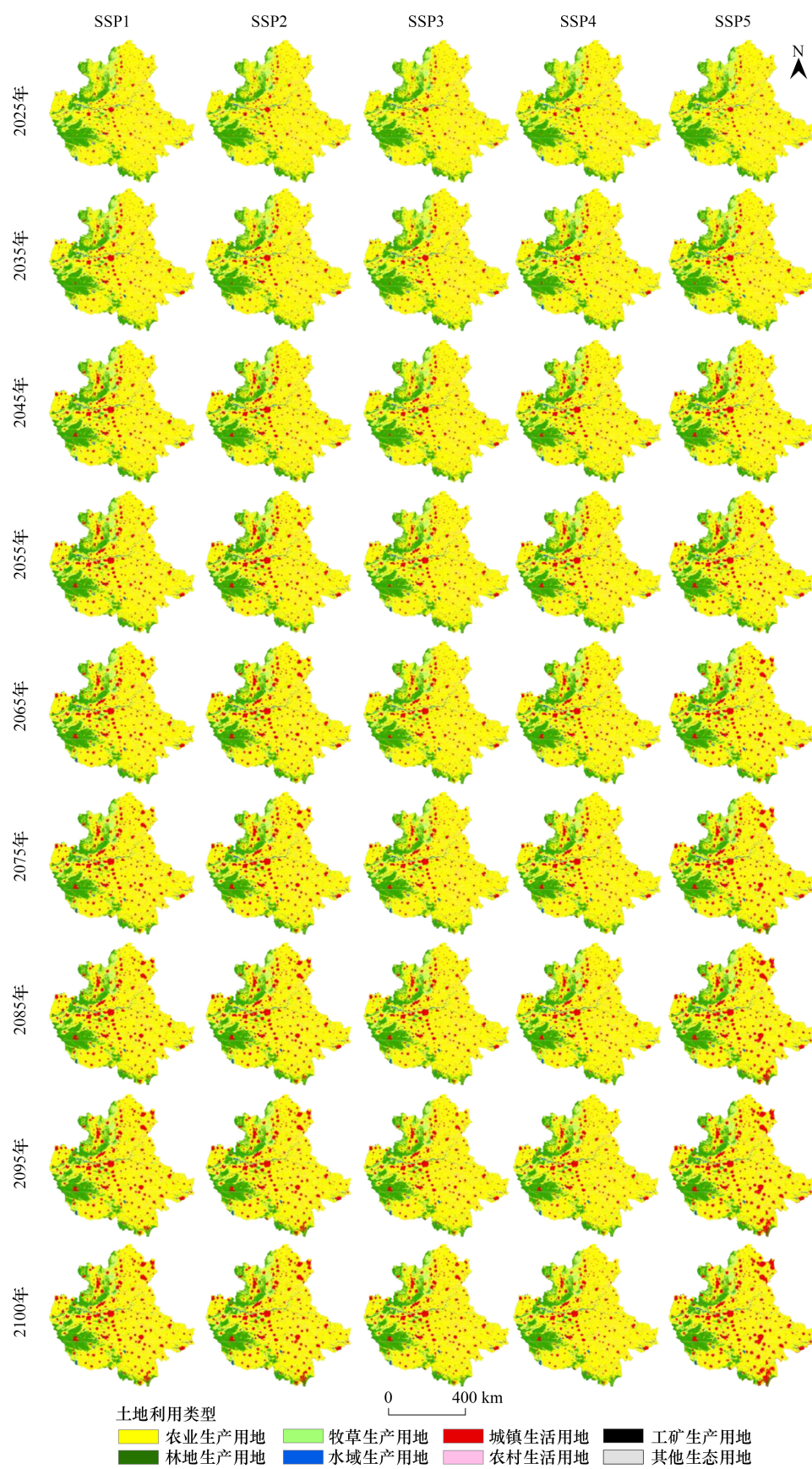


图 8 2025—2100 年 5 种 SSPs 情景下中原城市群“三生”空间模拟图

Fig.8 PLES simulation diagram of Zhongyuan urban agglomeration under five SSPs scenarios from 2025 to 2100

3.3.3 2035 年不同情景下生态环境质量对比分析

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》明确指出到 2035 年要广泛形成绿色生产生活方式,碳排放达峰后稳中有降,生态环境根本好转,美丽中国建设目标基本实现。故本文选择以 2035 年为例,分析不同 SSPs 情景下中原城市群市的生态环境质量。根据方程(6)分别计算出 5 种情景 2035 年中原城市群的生态环境质量指数,并采用 ArcGIS 自然间断点分级法将该指数划分为 5 个等级。如在 SSP1 情景下 2035 年的生态环境质量指数分区:低质量区($EV \leq 0.15$)、较低质量区($0.15 \leq EV \leq 0.2$)、中质量区($0.2 \leq EV \leq 0.3047$)、较高质量区($0.3047 \leq EV \leq 0.5562$),以及高质量区域($0.5562 \leq EV \leq 0.65$),同理可得其他情景下的生态环境质量指数分区(图 9)。

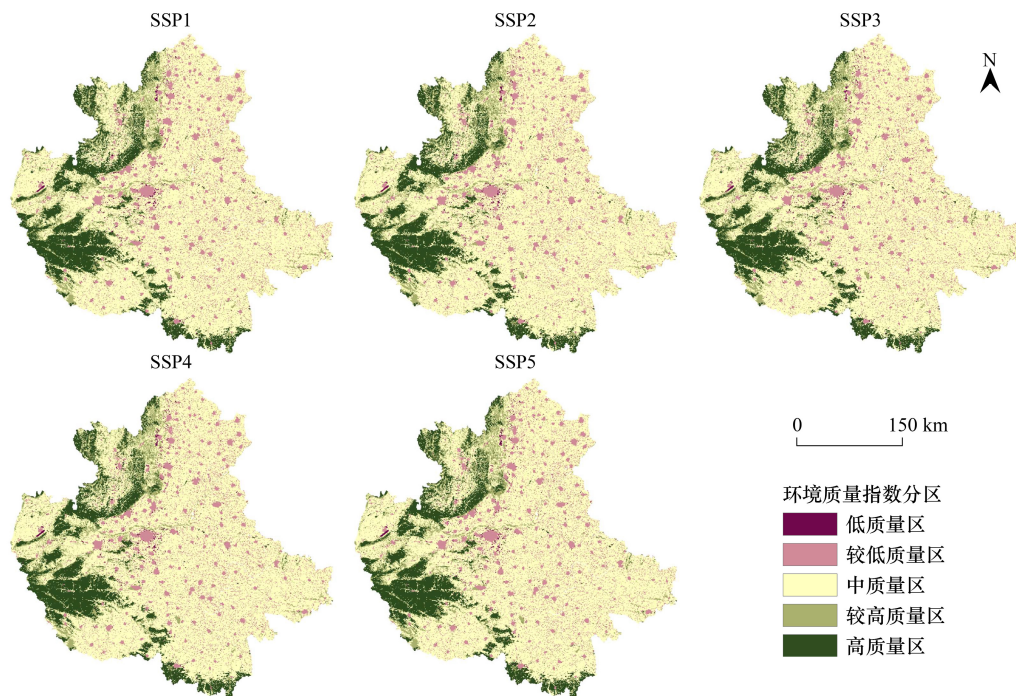


图 9 2035 年中原城市群多情景生态环境质量空间分布

Fig.9 Spatial distribution of eco-environmental quality in multiple scenarios of Zhongyuan urban agglomeration in 2035

从空间分布来看,5 种 SSPs 情景下的空间生态质量分布基本相同,总体表现为“西南高-中部低”,其中 SSP5 情景下的高质量面积相较于其他情景最小。高质量区主要分布在中原城市群的西部,少数分布在南部。较高质量区主要分布在中原城市群的西北部,还有不少和高质量区交叉分布在中原城市群的西部和西南,小部分分布在东部偏南。中质量区大面积的分布在中原城市群中东部。较低质量区主要分布在中原城市群的中部和北部。低质量区主要分布在中原城市群的西部,少部分零星分布在东部偏南。低质量区主要是工矿生产用地;较低质量区主要是农村和城镇生活用地;中质量区主要是农业生产用地;较高质量区主要是牧草和水域生态用地;高质量区主要是森林生态用地。

2015 年研究区的生态环境质量指数是 0.3577917,2035 年 5 种 SSPs 情景下的生态环境质量指数分别为 0.3594462 (SSP1)、0.3612058 (SSP2)、0.3597037 (SSP3)、0.3591957 (SSP4)、0.3590614 (SSP5)。从生态质量指数的大小来看,2035 年 5 种情景下研究区的生态质量指数与 2015 年相比,生态环境质量指数均略有提高,说明 2035 年各情景下的生态环境相较于 2015 年都有所改善。在 5 种 SSPs 情景下,SSP5 的生态环境质量指数最小,表明 SSP5 的生态环境质量水平最低;SSP2 的生态环境质量指数最大,表明 SSP2 的生态环境质量水平最高。

区域内生态质量总是同时发生着改善和恶化两种相反趋势,在相当程度上这两种趋势会相互抵消,从而

使整体上维持相对稳定。但生态环境质量指数只能代表一段时间内该地区的生态环境质量,故指数的稳定并不意味着生态环境没有发生改变。根据方程(8),计算 2035 年中原城市群市多种情景下“三生”空间土地利用类型相互转换引起的生态贡献率变化。表 3—7 展示了 2035 年中原城市群市 5 种情景下土地利用变化的主要类型、生态贡献率和贡献比重。通过对五种情景的生态贡献率比较,发现 SSP3 对改善中原城市群市生态环境质量的生态贡献率最低,为 0.01183531;SSP2 对改善中原城市群市生态环境质量的生态贡献率最高,

表 3 2015—2035 年 SSP1 情景下影响中原城市群生态环境质量的主要用地转型及其生态贡献率

Table 3 Main land use transformation and ecological contribution rate affecting the eco-environmental quality of Zhongyuan urban agglomeration under SSP1 scenario from 2015 to 2035

模式 Patterns	土地利用功能转型 Land use function transformation	转换面积 Area conversion /km ²	生态环境质量 Ecological environment quality	生态贡献率 Ecological environment quality of contribution/%
生态环境改善 Ecological environment improvement	农村生活→农业生产	11611	0.004268674	35.67
	农业生产→林地生态	2815	0.003414309	28.53
	农业生产→牧草生态	2712	0.001860573	15.55
	牧草生态→林地生态	2193	0.001155374	9.65
	农业生产→水域生态	509	0.000449666	3.76
	工矿生产→农业生产	471	0.000255874	2.14
	总计	20311	0.01140447	95.29
生态环境恶化 Ecological environment deterioration	农业生产→城镇生活	5568	-0.002047022	19.78
	农业生产→农村生活	5552	-0.00204114	19.72
	林地生态→农业生产	1543	-0.001871502	18.08
	牧草生态→农业生产	2378	-0.001631432	15.76
	水域生态→农业生产	1280	-0.00113079	10.92
	林地生态→牧草生态	1515	-0.000798172	7.71
	总计	17836	-0.009520059	91.97

表 4 2015—2035 年 SSP2 情景下影响中原城市群生态环境质量的主要用地转型及其生态贡献率

Table 4 Main land use transformation and ecological contribution rate affecting the eco-environmental quality of Zhongyuan urban agglomeration under SSP2 scenario from 2015 to 2035

模式 Patterns	土地利用功能转型 Land use function transformation	转换面积 Area conversion/km ²	生态环境质量 Ecological environment quality	生态贡献率 Ecological environment quality of contribution/%
生态环境改善 Ecological environment improvement	农村生活→农业生产	11514	0.019737002	67.19
	农业生产→林地生态	3820	0.004637291	15.79
	农业生产→牧草生态	2597	0.00178441	6.08
	牧草生态→林地生态	3090	0.001627955	5.54
	农业生产→水域生态	395	0.000349021	1.19
	总计	21416	0.02813568	95.79
	农业生产→农村生活	5521	-0.009463956	53.86
生态环境恶化 Ecological environment deterioration	农业生产→城镇生活	5273	-0.001933021	11.00
	林地生态→农业生产	1488	-0.001806358	10.28
	牧草生态→农业生产	2330	-0.001600953	9.11
	水域生态→农业生产	1285	-0.001135422	6.46
	林地生态→牧草生态	1336	-0.000703867	4.01
	总计	17233	-0.016643577	94.72

表 5 2015—2035 年 SSP3 情景下影响中原城市群生态环境质量的主要用地转型及其生态贡献率

Table 5 Main land use transformation and ecological contribution rate affecting the eco-environmental quality of Zhongyuan urban agglomeration under SSP3 scenario from 2015 to 2035

模式 Patterns	土地利用功能转型 Land use function transformation	转换面积 Area conversion/ km ²	生态环境质量 Ecological environment quality	生态贡献率 Ecological environment quality of contribution/%
生态环境改善 Ecological environment improvement	农村生活→农业生产	11559	0.004250431	35.91
	农业生产→林地生态	2741	0.003324348	28.09
	农业生产→牧草生态	2667	0.001829499	15.46
	牧草生态→林地生态	2160	0.001137988	9.62
	农业生产→水域生态	502	0.00044255	3.74
	工矿生产→农业生产	494	0.000268406	2.27
	总计	20123	0.011253221	95.08
生态环境恶化 Ecological environment deterioration	农业生产→农村生活	5595	-0.002057372	20.68
	林地生态→农业生产	1521	-0.001844704	18.54
	牧草生态→农业生产	2463	-0.00168956	16.98
	农业生产→城镇生活	4476	-0.001645897	16.54
	水域生态→农业生产	1318	-0.001161914	11.68
	林地生态→牧草生态	1518	-0.000799753	8.04
	总计	16891	-0.0091992	92.46

表 6 2015—2035 年 SSP4 情景下影响中原城市群生态环境质量的主要用地转型及其生态贡献率

Table 6 Main land use transformation and ecological contribution rate affecting the eco-environmental quality of Zhongyuan urban agglomeration under SSP4 scenario from 2015 to 2035

模式 Patterns	土地利用功能转型 Land use function transformation	转换面积 Area conversion/ km ²	生态环境质量 Ecological environment quality	生态贡献率 Ecological environment quality of contribution/%
生态环境改善 Ecological environment improvement	农村生活→农业生产	11370	0.004170421	35.68
	农业生产→林地生态	2828	0.003432478	29.36
	农业生产→牧草生态	2627	0.001804489	15.44
	牧草生态→林地生态	2169	0.00114273	9.78
	农业生产→水域生态	398	0.00035216	3.01
	工矿生产→农业生产	428	0.00023215	1.99
	总计	19820	0.011134427	95.25
生态环境恶化 Ecological environment deterioration	农业生产→农村生活	5661	-0.002076407	20.21
	农业生产→城镇生活	5280	-0.00193666	18.85
	林地生态→农业生产	1549	-0.001880095	18.30
	牧草生态→农业生产	2290	-0.001573003	15.31
	水域生态→农业生产	1249	-0.001105145	10.75
	林地生态→牧草生态	1553	-0.000818192	7.96
	总计	17582	-0.009389503	91.37

为 0.029372804。此外,还发现 2015—2035 年中原城市群生态环境质量改善的主要原因是农村生活向农业生产的转变,农业生产向林地生态和水域生态的转变以及牧草生态向林地生态的转变。不同情景下主要用地类型转变中对生态质量的改善的比重不同,分别为 95.29% (SSP1)、95.79% (SSP2)、95.08% (SSP3)、94.54% (SSP4)和 95.17% (SSP5)。反之,导致生态环境恶化的主要原因是农业生产向城镇和农村生活的转变,林地、牧草和水域生态向农业生产的转变和林地生态向牧草生态的转变。其中不同情景下导致生态环境质量恶化的主要用地类型转变的比重分别为 91.97% (SSP1)、94.72% (SSP2)、92.46% (SSP3)、91.37% (SSP4)和

91.84% (SSP5)。总体上中原城市群存在生态改善和恶化的两种趋势,在 5 种情景下生态环境改善的程度都略大于环境恶化的程度,故整体上来看 2035 年的生态环境质量较 2015 年略微提高。在 SSP2 情景下生态环境改善的程度最大,同时恶化的程度也最大;在 SSP3 情景下生态环境改善的程度最小,同时恶化的程度也最小。

表 7 2015—2035 年 SSP5 情景下影响中原城市群生态环境质量的主要用地转型及其生态贡献率

Table 7 Main land use transformation and ecological contribution rate affecting the eco-environmental quality of Zhongyuan urban agglomeration under SSP5 scenario from 2015 to 2035

模式 Patterns	土地利用功能转型 Land use function transformation	转换面积 Area conversion/ km ²	生态环境质量 Ecological environment quality	生态贡献率 Ecological environment quality of contribution/%
生态环境改善 Ecological environment improvement	农村生活→农业生产	11518	0.004222816	35.62
	农业生产→林地生态	2825	0.0034293	28.92
	农业生产→牧草生态	2716	0.001866069	15.74
	牧草生态→林地生态	2277	0.001199629	10.12
	农业生产→水域生态	361	0.000318648	2.69
	工矿生产→农业生产	455	0.000246721	2.08
	总计	20152	0.011283182	95.17
生态环境恶化 Ecological environment deterioration	农业生产→农村生活	5650	-0.002071446	19.92
	农业生产→城镇生活	5552	-0.002035516	19.58
	林地生态→农业生产	1591	-0.001931333	18.57
	牧草生态→农业生产	2335	-0.001604297	15.43
	水域生态→农业生产	1233	-0.001088346	10.4
	林地生态→牧草生态	1554	-0.000818719	7.87
	总计	17915	-0.009549657	91.84

4 讨论与结论

4.1 讨论

以往土地利用变化模拟研究^[27,35—36,46,49,55],未来情景通常设置为自然发展情景、耕地保护情景和生态保护情景。通过设置 Markov 转移概率矩阵参数,来表征未来不同发展情景,其参数的设置存在较大的主观性。本文采用 FLUS 模型,将土地利用变化和 5 种 SSPs 情景相耦合,定量客观的设置 FLUS 模型的参数(如人口、GDP 和土地需求),得到不同情景下的模拟结果,为多情景土地利用变化模拟提供一种新思路。

本文发现,中原城市群生态环境质量改善的主要原因可能是农村生活用地向农业生产用地的转移和农业生产用地向林地和牧草生态用地的转移。造成生态环境质量恶化的主要原因可能是农业生产用地向城镇和农村生活用地的转移以及林地和牧草生态用地向农业生产用地的转移。2035 年各情景相较于 2015 年生态环境质量指数均有所提高,生态环境改善趋势大于恶化趋势。表明在 2015 至 2035 年间中原城市群土地利用变化对生态环境产生的是正向影响,生态环境有所好转,这与 2035 年远景规划目标相一致。建议相关部门科学划定中原城市群生态保护红线、永久性基本农田和城镇发展边界。此外,SSP2 情景下研究区的生态环境质量指数最大,SSP5 的生态环境质量指数最小。SSP2 是中间发展情景,在该情景下大多数经济体在政治体系上是稳定的,遵循历史开发模式。SSP5 是一种以大量化石燃料为代价的高速发展模式。警示在保证国家政治体系和经济体稳定的前提下,减少使用化石燃料,不断探索新能源、推动能源高质量发展,力争完成“双碳”目标,防止生态环境恶化。本文对 2035 年中原城市群各情景下生态环境效应的评估,可以为该区域生态保护政策的制定提供参考依据。

本文借鉴已有的研究对土地类型进行“三生”空间分类,但仍存在土地功能交叉重叠的问题。本文采用

的是分辨率为 1 km 的土地利用数据和社会经济数据,未来可采用精度更高的数据并不断完善模拟方法,从而提高在共享社会经济路径下的土地利用变化模拟精度。“三生”空间格局的变化和潜在生态效应的反馈是一个非常复杂的过程,本文只是从生态环境质量指数和生态贡献率的角度对中原城市群未来不同情景下的生态效应进行分析,并未涉及水土流失、生物多样性、水资源等过程的研究,还需进一步研究。

4.2 结论

本文在城市群尺度上,模拟了 2025—2100 年在 5 种 SSPs 情境下研究区“三生”空间土地利用变化的时空分布格局,并对中原城市群 2035 年潜在的生态效应进行了分析。主要结论如下:

(1)在面积大小上,从 2025 年到 2100 年除了 SSP4 情景的其余 4 种情景,生产空间面积持续缩减、生活空间面积明显扩张、生态空间面积略有起伏总体缩减。

(2)在空间分布上,2025—2100 年研究区“三生”空间的分布在 5 种 SSPs 情景下大致相同。城镇生活用地大部分呈片状分布在研究区中北部,农村生活用地呈点状零散状分布在各处,农业生产用地大面积覆盖研究区,林地和牧草生态用地主要分布在西部和南部,水域生态用地呈东西向带状分布在中原城市群中北部。

(3)5 种 SSPs 情景下,2035 年研究区的生态环境质量指数在空间分布均为“西南高,中低,东中”。总体上,导致环境改善的贡献率大于导致环境恶化的贡献率,说明 2035 年中原城市群改善趋势大于生态环境恶化趋势。此外,SSP2 情景下的生态环境质量略高于其他情景,说明在社会、经济和技术趋势没有明显偏离历史模式的情况下生态环境质量最高。

参考文献(References):

- [1] 王昕,张杏梅.中原城市群生态足迹与生态承载力时空变化分析.陕西理工大学学报(自然科学版),2022,38(4):39-46.
- [2] 张莉萍.中原城市群产业集聚与城市化的耦合效应研究.现代城市研究,2015(7):52-57.
- [3] 熊丽.中部地区开创高质量发展新局面.经济日报,2021-10-27(8).
- [4] Zhang Y, Wu T, Song C S, Hein L, Shi F Q, Han M C, Ouyang Z Y. Influences of climate change and land use change on the interactions of ecosystem services in China's Xijiang River Basin. Ecosystem Services,2022,58:101489.
- [5] Yang Y Y, Bao W K, Li Y H, Wang Y S, Chen Z F. Land Use Transition and Its Eco-Environmental Effects in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration: A Production-Living-Ecological Perspective. Land,2020,9(9):285.
- [6] 黄金川,林浩曦,漆潇潇.面向国土空间优化的三生空间研究进展.地理科学进展,2017,36(3):378-391.
- [7] 张红旗,许尔琪,朱会义.中国“三生用地”分类及其空间格局.资源科学,2015,37(7):1332-1338.
- [8] 李广东,方创琳.城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析.地理学报,2016,71(1):49-65.
- [9] 李明薇,鄢雨早,陈伟强,马月红,郭蕊蕊.河南省“三生空间”分类与时空格局分析.中国农业资源与区划,2018,39(9):13-20.
- [10] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析.地理学报,2017,72(7):1290-1304.
- [11] 袁刚,陈文波,于少康,黄森林.县域三生空间多尺度划定与功能主导性研究.江西农业大学学报,2021,43(4):931-941.
- [12] 崔树强,朱佩娟,周国华,张鸿辉,邓新忠.“三生”视角下的城市空间功能变化及调控路径——以长沙市为例.长江流域资源与环境,2020,29(8):1733-1745.
- [13] 沈思考,卢远,华瑾,覃冬.南流江流域“三生空间”功能定量评估研究.中国农业资源与区划,2020,41(10):147-155.
- [14] Zou L L, Liu Y S, Wang J Y, Yang Y Y. An analysis of land use conflict potentials based on ecological-production-living function in the southeast coastal area of China. Ecological Indicators,2021,122:107297.
- [15] 赵强,李家会,李小云.基于 MSS 模型的“三生空间”识别与优化——以衡阳市为例.国土资源导刊,2022,19(3):70-75.
- [16] 周昱辰,尹丹,黄庆旭,张玲,白岩松.基于生态系统服务参与式制图的“三生”空间优化建议——以白洋淀流域为例.自然资源学报,2022,37(8):1988-2003.
- [17] 付晶莹,郜强,江东,林刚.黑土保护与粮食安全背景下齐齐哈尔市国土空间优化调控路径.地理学报,2022,77(7):1662-1680.
- [18] 韦江伟,赵锐锋,李玲慧,贾志斌.干旱区三生用地时空演变特征及空间冲突研究——以黑河中游地区为例.水土保持研究,2021,28(4):284-292+419.
- [19] 黄天能,张云兰.基于“三生空间”的土地利用功能演变及生态环境响应——以桂西资源富集区为例.生态学报,2021,41(1):348-359.
- [20] 郭彦君,郭文炯.“三生空间”视角下山西中部盆地城市群景观生态风险分析.生态学报,2022,41(9):1813-1824.
- [21] Yang Y Y, Bao W K, Liu Y S. Coupling coordination analysis of rural production-living-ecological space in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Ecological Indicators, 2020, 117: 106512.
- [22] 张雄,王芳,张俊峰,梁睿,鞠登平.长江中游城市群三生功能的空间关联性.中国人口·资源与环境,2021,31(11):110-122.

- [23] 孔冬艳,陈会广,吴孔森.中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素.自然资源学报,2021,36(5):1116-1135.
- [24] 杨清可,段学军,王磊,金志丰.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应——以长江三角洲核心区为例.地理科学,2018,38(1):97-106.
- [25] 高星,刘泽伟,李晨曦,查理思,宋昭颖,张学儒.基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究.生态学报,2020,40(20):7113-7122.
- [26] 司晓君.中原城市群“三生”用地转型及其生态环境效应研究.哈尔滨师范大学,2022.
- [27] 林沛锋,郑荣宝,洪晓,郑雪,郑沃林.基于 FLUS 模型的土地利用空间布局多情景模拟研究——以广州市花都区为例.国土与自然资源研究,2019(2):7-13.
- [28] Wang X, Che L, Zhou L, Xu J G. Spatio-temporal Dynamic Simulation of Land use and Ecological Risk in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China. Chinese Geographical Science, 2021, 31:829-847.
- [29] 汤琦,余珮珩,陈泽怡,白少云,陈奕云.共享社会经济路径下土地利用变化模拟.水土保持研究,2022,29(1):301-310.
- [30] Jiang X T, Zhai S Y, Liu H, Chen J, Zhu Y Y, Wang Z. Multi-scenario simulation of production-living-ecological space and ecological effects based on shared socioeconomic pathways in Zhengzhou, China. Ecological Indicators, 2022, 137:108750.
- [31] 王佳炜,韩美,孔祥伦,孔凡彪,魏帆,孙金欣.基于系统动力学模型的黄河三角洲“三生”用水配置模拟与调控.西安理工大学学报,1-12 [2022-11-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20221027.1505.002.html>.
- [32] 谢君洋,简季.基于 GeoSOS 模型的大范围城市扩张模拟分析——以四川省为例.物探化探计算技术,2022,44(3):381-391.
- [33] 李媛洁,叶长盛,黄小兰.基于 CLUE-S 模型的南昌市“三生”空间时空演变及情景模拟研究.水土保持研究,2021,28(5):325-332.
- [34] 赵明松,徐少杰,邓良,刘斌寅,王世航,吴运金.基于 CLUE-S 模型的煤矿城市土地利用变化模拟.农业机械学报,2022,53(5):158-168.
- [35] 王旭,马伯文,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.
- [36] 杨伟青,张会兰.基于 GeoSOS-FLUS 的涪江流域生态系统服务价值评估及多情景模拟.水土保持研究,2022,29(5):253-262.
- [37] 陈泽怡,余珮珩,陈奕云,江颂,白少云,顾世祥.共享社会经济路径下汉江流域产水和水质净化服务时空演变.中国生态农业学报(中英文),2021,29(10):1800-1814.
- [38] Zhao Y Q, Cheng J H, Zhu Y G, Zhao Y P. Spatiotemporal Evolution and Regional Differences in the Production-Living-Ecological Space of the Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(23):12497.
- [39] 林永然.中原城市群一体化发展水平的测度与推进路径研究.统计理论与实践,2020(4):51-59.
- [40] 王云娜.基于多角度的中原城市群城市规模结构研究.河南城建学院学报,2021,30(4):63-69.
- [41] Song S X, Liu Z F, He C Y, Lu W L. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model. Ecological Indicators, 2020, 112:106071.
- [42] 万慧琳,王赛鸽,陈彬,夏楚瑜,苏锐.三江平原湿地生态风险评价及空间阈值分析.生态学报,2022,42(16):6595-6606.
- [43] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析.地理学报,2020,75(1):160-178.
- [44] 王军,严有龙,王金满,应凌霄,唐倩.闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究.生态学报,2021,41(14):5837-5848.
- [45] Zhang Y X, Zhang C Y, Zhang X D, Wang X G, Liu T, Li Z, Lin Q Y, Jing Z H, Wang X Y, Huang Q Y, Sun W X, Zhai J, Tan L, Wang J Q, Zhou G Y, Tian Y S, Hao J L, Song Y, Ma F. Habitat Quality Assessment and Ecological Risks Prediction: An Analysis in the Beijing-Hangzhou Grand Canal (Suzhou Section). Water, 2022, 14(17):2602.
- [46] 张亦清,韩念龙,张伟璇,黎兴强.三亚市土地利用变化多情景模拟研究.生态科学,2022,41(6):52-62.
- [47] 李晓文,方创琳,黄金川,毛汉英.西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应——以甘肃河西地区为例.第四纪研究,2003(3):280-290+348-349.
- [48] 丁慧敏,杨朝现,李鑫,吕兆群,左钰瑶.高原传统农区土地利用功能演变及其生态环境效应.水土保持研究,2022,29(6):399-407.
- [49] 陈理庭,蔡海生,张婷,张学玲,曾珩.基于 Markov-FLUS 模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析.生态学报,2022,42(10):3947-3958.
- [50] 白如山,姜玉培,江进德.江淮城市群“三生”空间结构的多尺度分析.中国名城,2016(10):21-28.
- [51] 范泽孟.基于 SSP-RCP 不同情景的京津冀地区土地覆被变化模拟.地理学报,2022,77(1):228-244.
- [52] Jiang L W, O'Neill B C. Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. Global Environmental Change, 2017, 42:193-199.
- [53] 翁宇威,蔡闻佳,王灿.共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望.气候变化研究进展,2020,16(2):215-222.
- [54] Chen G Z, Li X, Liu X P, Chen Y M, Liang X, Leng J Y, Xu X C, Liao W L, Qiu Y A, Wu Q L, Huang K N. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways. Nature communications, 2020, 11(1):537.
- [55] Lou Y Y, Yang D, Zhang P Y, Zhang Y, Song M L, Huang Y C, Jing W L. Multi-Scenario Simulation of Land Use Changes with Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin. Land, 2022, 11(7):992.