

DOI: 10.5846/stxb202107071810

姜昕彤, 翟石艳, 王铮, 刘欢, 陈静, 朱悦悦. 基于未来土地利用模拟模型的郑州市“三生空间”模拟及生态环境效应分析. 生态学报, 2023, 43(15): 6225-6242.

Jiang X T, Zhai S Y, Wang Z, Liu H, Chen J, Zhu Y Y. Simulating the Production-Living-Ecological space and analyzing eco-environmental effects based on FLUS model in Zhengzhou, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6225-6242.

基于未来土地利用模拟模型的郑州市“三生空间”模拟及生态环境效应分析

姜昕彤^{1, 2}, 翟石艳^{1, 2, *}, 王 铮^{1, 3}, 刘 欢^{1, 2}, 陈 静^{1, 2}, 朱悦悦^{1, 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 475004

2 河南大学地理与环境学院, 开封 475004

3 华东师范大学地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200441

摘要: 本文选取郑州市为研究区, 基于 2010、2015 和 2020 年土地利用数据, 采用土地利用转移矩阵和生态环境效应评估方法, 分析 2010—2020 年“三生空间”格局变化和生态环境质量时空演变。采用未来土地利用模拟(FLUS)模型, 以 2015 年土地利用数据为基准, 结合自然发展情景、生产优先情景和生态保护情景三种情景, 模拟 2035 年“三生空间”格局发展, 并计算区域生态环境质量指数及生态贡献率。结果表明: ①2010—2020 年, 郑州市生产空间占地面积持续下降, 生活空间不断增加, 生态空间先增加后减少。②2010—2020 年, 生态环境质量指数从 0.3097 持续降至 0.3058, 低质量区域不断扩张。农业生产用地的缩小, 以及其他和水域生态用地被占用是导致生态环境质量恶化的主要因素。③自然发展情景下, 生活空间存在扩张趋势, 而生产和生态空间却不断下降, 而生产优先情景和生态保护情景下, 生活空间缩减, 生产和生态空间不断上升。④三种情景中, 生态保护情景下郑州市 2035 年的生态环境质量指数最高, 且在该情景下郑州市生态环境质量水平也在不断提升。研究模拟未来土地利用格局变化及其引起的生态环境效应, 将有利于优化现有土地利用空间格局, 促进城市可持续发展。

关键词: 三生空间; 未来土地利用模拟(FLUS)模型; 生态环境效应; 郑州市

Simulating the Production-Living-Ecological space and analyzing eco-environmental effects based on FLUS model in Zhengzhou, China

JIANG Xintong^{1, 2}, ZHAI Shiyao^{1, 2, *}, WANG Zheng^{1, 3}, LIU Huan^{1, 2}, CHEN Jing^{1, 2}, ZHU Yueyue^{1, 2}

1 Key Laboratory of Geospatial Technology for the Middle and Lower Yellow River Regions, Ministry of Education, Henan University, Kaifeng 475004, China

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

3 Key Laboratory of Geographic Information Science, Ministry of Education of China, East China Normal University, Shanghai 200441, China

Abstract: Based on the land use data from 2010, 2015 and 2020, this study takes Zhengzhou as the research area and analyzes the spatiotemporal changes patterns of Production-Living-Ecological and eco-environmental quality from 2010 to 2020, using land use transfer matrix and eco-environmental effect methods. In addition, based on the data of land use in 2015, the Future Land Use Simulation (FLUS) model was adopted to simulate the pattern development of Production-Living-Ecological space in 2035 by combining three scenarios of natural development, production space priority, and ecological protection. The regionally eco-environmental quality index and ecological contribution rate were calculated under the three scenarios. The results showed that: ① from 2010 to 2020, the production space area in Zhengzhou showed a

基金项目: 国家自然科学基金(42171294); 河南省高等学校重点科研项目(21A170007); 河南省科技发展计划项目(222102320397)

收稿日期: 2021-07-07; **采用日期:** 2022-12-02

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

decreasing trend, while the living space kept going up, and the ecological space firstly increased and then decreased. ②The eco-environmental quality index continuously declined from 0.3097 to 0.3065 from 2010 to 2020. The low-quality areas gradually increased. The reduction of agricultural production land, other ecological land and water ecological land were the main factors leading to the deterioration of eco-environment quality in Zhengzhou. Under the natural development scenario, the living space shows the expanding trend, while the production and ecological space gradually declined. In the production priority scenario and ecological protection scenario, the living space reduced, while the production and ecological space continuously increased. Among the three scenarios, the eco-environmental quality index of Zhengzhou in 2035 under the ecological protection scenario will be the highest, and its eco-environmental quality level under this scenario will be also constantly improving. Simulating future land use pattern change and its eco-environmental effects will be helpful for optimizing the existing land use spatial pattern and promoting the sustainable urban development.

Key Words: Production-Living-Ecological space; Future Land Use Simulation (FLUS) model; eco-environmental effect; Zhengzhou

生产、生活、生态空间(简称“三生空间”)的概念缘于党的十八大会议,此次会议明确提出了“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”的总目标^[1]。十九大中也提出了科学划定生态保护红线、永久性基本农田和城市发展边界,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^[2]。然而在经济高速发展的状态下,城乡建设用地不断扩张,使得农业、生态空间受到挤压,造成了一系列生态环境问题^[3]。以“三生空间”格局变化为切入点,分析其所引起的生态环境效应成为当前学术研究的热点之一^[4-5]。

目前,“三生空间”相关的研究,主要包括“三生空间”的功能识别^[6-7]、时空格局演变^[8-9]、空间优化^[10-11]及生态效应分析^[12-13]等方面。土地具有多功能属性,其功能识别方法通常分为两种^[4,14],其中确定“三生空间”土地利用类型主导功能的识别方法为目前学术界较为主流的方法,它是根据土地的主导功能,对网格或斑块的土地利用类型进行合并和重新分类,从而确定“三生空间”的划分^[15]。现有模拟“三生空间”的主流研究方法包括 CLUS-S 模型^[16]、CA 模型^[17]等,其中 FLUS 模型包含了基于轮盘赌选择的自适应惯性竞争机制,能够很好的解决不同用地类型间相互转换问题^[18],利用不同情景的土地利用数量进行空间格局模拟^[14]。此外,关于“三生空间”的研究也从多角度、多维度逐步展开,其中分析土地类型转换引起的潜在生态效应是当前学术研究的热点^[9,19]。

生态环境问题一直是学术界关注的热点问题。相关文献多围绕在胶东半岛^[19]、石羊河流域^[20]等生态脆弱区,对其生态环境质量时空变化特征进行分析。而仅有部分研究从“三生空间”的视角,利用生态环境质量指数测度土地利用转型的生态环境效应^[21]。如董建红等人研究了 1980—2018 年甘肃省土地利用转型对生态环境效应的影响^[22],吕立刚等人利用土地利用转移矩阵、重心转移等方法,对江苏省 1985—2008 年生态环境质量时空演变进行了分析^[23]。但将“三生空间”预测与生态环境效应结合,从而对未来空间格局及生态环境质量进行模拟的研究需要多加关注。

对比现有研究发现,首先,目前“三生空间”相关的研究多聚焦区域、流域、省域等空间尺度,而在城市尺度的研究较少;其次,城市的生态环境变化与土地利用格局变化息息相关,已有生态环境研究多聚焦于生态脆弱区域,仅有部分研究从城市尺度出发,利用“三生空间”的视角,定量描述土地利用变化所引起的生态环境变化。FLUS 模型作为当前土地利用模拟研究的重点模型,能够更高精度的模拟未来城市土地利用格局变化,能够与生态环境效应评估方法相结合,进一步模拟未来城市生态环境效应变化,为城市可持续发展和生态文明建设提供可靠依据。因此,本文以郑州市为案例区,选取 FLUS 模型作为“三生空间”的模拟工具,结合生态环境效应模型,以 2010 年、2015 年和 2020 年郑州市土地利用数据为基准数据,研究郑州市“三生空间”现状格局以及土地利用功能转型下的生态环境动态趋势变化。郑州市作为未来国家中心城市,空间规划和生态建

文因素包括郑州市水系数据;气候因素包括郑州市年降水、年平均温度数据,以上三种因素均来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。社会因素包括铁路、高速公路、主干道、郑州市各县区的行政区划数据,该数据来源于 OpenStreetMap 数据网。同时通过欧氏距离计算,到水系的距离、到铁路的距离、到高速公路的距离、到主干道距离以及到区县中心和乡镇中心的距离。

本文参考李晓文、杨清可^[26-28]等人通过专家打分法计算用地类型生态环境质量指数的研究,利用面积加权法对郑州市“三生空间”所具有的用地类型的生态环境质量指数进行赋值,结果如表 1 所示。

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^[24-28]

Table 1 Land use dominant function classification of “Production-Living-Ecological” space and eco-environmental quality index			
“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分类 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、水田	0.2514
	工矿生产用地	其他建设用地	0.1500
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	0.7937
	草地生态用地	高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地	0.6220
	水域生态用地	河渠、水库坑塘	0.5500
	其他生态用地	滩地、沼泽地	0.5530
生活空间 Living land	城镇生活用地	城镇用地	0.2000
	农村生活用地	农村居民点	0.2000

1.3 研究方法

1.3.1 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、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^[29]。利用 ArcGIS10.3 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,从而得到郑州市 2010—2015 年、2015—2020 年和 2010—2020 年三期的土地利用转移矩阵。转移矩阵的数学形式为:

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

式中: 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。

1.3.2 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^[30]。该模型主要分为两部分,一是基于神经网络的出现概率计算模块,二是基于自适应惯性机制的元胞自动机计算模块。本文以 2015 年郑州市土地利用数据作为基准数据,2020 年郑州市土地利用数据作为精度检验数据,来模拟郑州市 2035 年“三生空间”格局分布情况。

(1) 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:

$$sp(p, i, t) = \sum_j w_{j,i} \times 1/(1 + e^{-net_j(p, t)}) \quad (5)$$

$$\sum_i sp(p, i, t) = 1 \quad (6)$$

其中, 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; 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。

(2) 自适应惯性竞争模型

自适应惯性竞争模型(Self Adaptive Inertia and Competition Mechanism CA)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领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:

$$TP_{p,t}^t = sp(p, i, t) \times Inertia_i^t (1 - sc_{c \rightarrow i}) \times \frac{\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = i)}{N \times (N - 1)} \times w_i \quad (7)$$

式中, $TP_{p,t}^t$ 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; $Inertia$ 表示自适应惯性系数; $sc_{c \rightarrow i}$ 表示空间类型转换成本; $\sum_{N \times N} con(c_p^{t-1} = i)$ 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。

其中转换矩阵表示各用地类型间相互转化的限制规则,同时也反映了多种情景的设置^[31]。本文共设置了 3 种情景:自然发展情景、生产优先情景和生态保护情景。自然发展情景延续了 2010—2020 年郑州市“三生空间”中用地类型的发展规则;生产优先情景考虑到水田和旱地的未来发展情况,即农业生产空间的发展,设置除城镇、农村生活用地外,其他各用地类型都可以向农业生产用地转化;生态保护情景,从生态保护的角度出发,设置水域、草地、其他生态用地不能转化为其他用地类型^[32—33]。具体设置如表 2。

表 2 情景转换矩阵设置

Table 2 Scenario transition matrix setting

2015—2035 年	自然发展情景								生产优先情景								生态保护情景							
	Natural development scenario								Production priority scenario								Ecological protection scenario							
	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h
a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
b	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
c	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
d	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0
e	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0
f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
g	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
h	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1

a、b、c、d、e、f、g、h 依次代表草地生态用地、城镇生活用地、林地生态用地、农村生活用地、农业生产用地、工矿生产用地、其他生态用地和水域生态用地

1.3.3 生态环境效应模型

(1) 生态环境质量指数

综合考虑研究区域内各土地利用类型的面积和所赋值的生态质量指数,从生态环境的角度出发,定量研究郑州市 2010 年、2015 年和 2020 年三个不同时期内的生态环境质量的总体情况。其表达式为:

$$EV_t = \sum_{i=1}^n \frac{A_{ki}}{A_k} R_i \quad (2)$$

其中, EV_t 表示郑州市 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) 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, 通过 2010 年、2015 年和 2020 年郑州市某区域的生态环境质量指数, 计算三个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^[34-35]。其表达式为:

$$LEI = (LE_{t+1} - LE_t) LA / TA \quad (3)$$

其中, 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 表示该土地利用功能变化的面积; TA 表示该研究区域的总面积。生态贡献率既有正值, 也有负值, 正值表示某地区生态环境质量有所改善; 负值则表示某地区生态环境质量有所恶化。

2 结果分析

2.1 2010—2020 年“三生空间”趋势分析

2010—2020 年间, 郑州市生产空间在“三生空间”中分布最为广泛, 生产空间包括农业生产用地和工矿生产用地, 农业生产用地占生产用地的 95.08%, 大面积覆盖郑州市, 而工矿生产用地零星分布在郑州市中东部地区; 生活空间分为城镇生活用地和农村生活用地, 农村生活用地呈零散状分布在郑州市, 而城镇生活用地大部分呈片状集中分布在郑州市中部; 而生态空间占地面积最小, 主要包括水域、草地、林地以及其他生态用地, 其中部分水域和其他生态用地呈东西向带状环绕在郑州市北部地区, 见图 2。

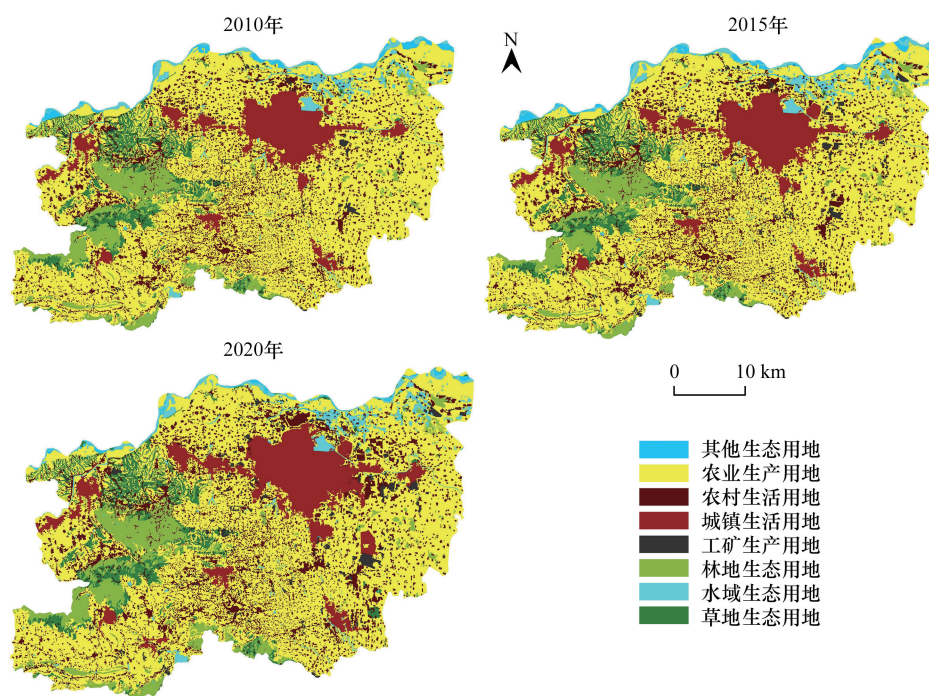


图 2 郑州市 2010—2018 年“三生空间”分布图

Fig.2 The distribution map of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2010 to 2018

郑州市“三生空间”的趋势变化不尽相同, 如图 3 所示, 生活空间的占地面积在 2010 年到 2020 年间呈持续上升趋势, 面积从 2010 年的 1582.55km² 上升至 2020 年的 1806.17km², 生活空间的面积占比从 21.06% 增长

至 24.03%。2015 年到 2020 年比 2010 年到 2015 年的增加了 8.27%,随着人们对生活质量的要求越来越高,生活空间的需求也在不断增加,但同时也带来了土地需求量增加的问题。郑州市生态空间的占地面积从 2010 年到 2015 年有小幅度的增加,仅增长了 1.66%,之后 2015 年的生态空间占地面积从 1252.48km²减少到 2020 年的 1201.56km²,面积共减少了 50.92km²。而生产空间与生活空间呈现相反的发展趋势,生产空间的占地面积持续下降,从 2010 年到 2020 年的下降了 4.11%,2020 年郑州市生产空间占地面积为 4507.70km²,相比 2010 年降低了 193.31km²,面积总占比为 59.98%,在空间分布上,生产空间占比仍较大。从整体上看,生活空间占地面积有所提高,但受政策、经济、交通等因素的影响,生态问题仍亟需解决,以维持郑州市“三生空间”空间公平性。

2.2 2010—2020 年生态环境质量时空演变

2.2.1 三生空间结构变化

基于郑州市 3 期土地利用数据,通过 ArcGIS 的空间叠加分析功能,得到了其 2010—2015 年、2015—2020 年以及 2010—2020 年共 3 期的土地利用类型转移矩阵,明确其相互转化的方向和数量,如表 3—5 所示。从二级用地类型分类的角度上来看,结果显示,城镇生活用地和农村生活用地面积有所增加,农业生产用地和水域生态用地面积有所减少。

2010—2015 年郑州市二级用地类型有不同程度的转移,其中农业生产用地、农村生活用地、其他和水域生态用地转出面积较大。农业生产用地向工矿生产用地转移面积最大,有 41.31km²,转移率为 0.90%,其次是向城镇生活用地转移了 27.32km²,向农村生活用地和水域生态用地转移的面积分别为 27.14km²,27.15km²,转移率一致,为 0.59%。农业生产用地总共转出面积 130.24km²,为所有用地类型转出面积最多的。农村生活用地主要向农业生产用地转移,转移面积分别为 10.48km²。而其他生态用地向农业生产用地和水域生态用地转移最为显著,转移率为 23.94%,且在 2010—2015 年间没有向城镇生活、农村生活和林地生态用地转移。水域生态用地主要向其他生态用地转移,转移面积为 19.37km²,转移率为 9.14%。

表 3 2010—2015 年郑州市土地利用转移矩阵/km²

Table 3 Land use transfer matrix of Zhengzhou from 2010 to 2015

2010 年	2015 年							
	草地生态用地	城镇生活用地	林地生态用地	农村生活用地	农业生产用地	工矿生产用地	其他生态用地	水域生态用地
草地生态用地 Meadow ecological land	388.97	0.01	0.77	0.99	2.360	0.48	0.002	0.82
城镇生活用地 Urban living land	0.01	629.63	0.00	0.004	1.06	0.001	0.00	0.03
林地生态用地 Forest ecological land	0.85	0.004	556.17	0.50	1.37	0.38	0.00	0.10
农村生活用地 Rural living land	0.67	3.19	0.53	936.65	10.48	0.13	0.002	0.16
农业生产用地 Agricultural productive land	2.27	27.32	1.98	27.14	4459.28	41.31	3.07	27.15
工矿生产用地 Industrial and mining land	0.07	0.01	0.04	0.06	0.95	110.33	0.001	0.02
其他生态用地 Other ecological land	0.02	0.00	0.00	0.00	5.56	0.001	44.87	15.88
水域生态用地 Water ecological land	0.04	0.89	0.04	0.09	2.08	0.81	19.37	188.56

2015—2020 年间郑州市生产空间转移面积最多,共转移 424.84km²,而生活空间的转入面积最多,共转入

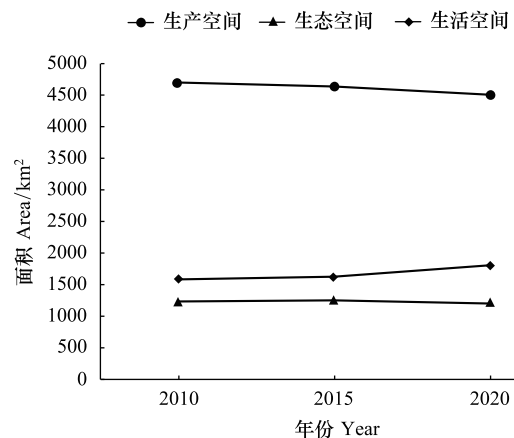


图 3 郑州市 2010—2020 年“三生空间”趋势图

Fig.3 The trend chart of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2010 to 2020

323.38km²。二级用地类型向生产空间转移中,农村生活用地向农业生产用地转移的面积最多,为 78.67km²,转移率为 8.15%。生态空间整体上向农业生产用地转移了 84.49km²,工矿生产用地也有向农业生产用地发生转移,共转移了 11.93km²。农业生产用地向生活空间面积转入最为显著,共转入了 230.97km²,转移率为 5.15%。其次是工矿生产用地向城镇生活用地和农村生活用地分别转入了 9.76km²、22.17km²。经分析,2015 到 2020 年间郑州市生态空间面积有所减少,其主要原因是其他和水域生态用地向农业生产用地的转移。虽然生产空间转入数量明显,但比生活空间转入数量少,所以郑州市生活空间占地面积在三年间有所增加。

表 4 2015—2020 年郑州市土地利用转移矩阵/km²

Table 4 Land use transfer matrix of Zhengzhou from 2015 to 2020

2015 年	2020 年							
	草地生态用地	城镇生活用地	林地生态用地	农村生活用地	农业生产用地	工矿生产用地	其他生态用地	水域生态用地
草地生态用地 Meadow ecological land	363.65	0.17	3.81	4.06	17.39	3.50	0.006	0.14
城镇生活用地 Urban living land	0.05	652.31	0.003	0.51	7.72	0.33	0.00	0.14
林地生态用地 Forest ecological land	4.69	0.003	541.02	3.93	7.97	1.40	0.00	0.27
农村生活用地 Rural living land	4.46	34.56	3.86	830.41	78.67	12.44	0.008	0.97
农业生产用地 Agricultural productive land	22.80	80.33	8.91	150.64	4102.96	93.14	0.98	22.49
工矿生产用地 Industrial and mining land	0.48	9.76	0.70	22.17	11.93	107.87	0.001	0.51
其他生态用地 Other ecological land	3.50	0.00	0.00	0.001	37.51	0.10	12.86	13.14
水域生态用地 Water ecological land	2.39	15.35	0.27	1.90	21.61	2.16	18.44	207.84

从总体上而言,2010—2020 年,郑州市“三生空间”中二级用地类型转移较为显著。农业生产用地主要向农村生活用地、城镇生活用地以及工矿生产用地转移,分别转移了 175.88km²、117.74km²、117.22km²,相应的转移率分别为 3.83%、2.57%和 2.55%。草地、林地、水域生态用地向农业生产用地转移面积最多,相应转移了 18.97km²、8.71km²、28.22km²。而其他生态用地并无向城镇、农村生活用地和林地生态用地转移,但向农业生产用地转移面积最多,且多于向自身转移面积,为 33.75km²,转移率为 50.97%。农村生活用地较城镇生活用地转移明显,其向草地、林地、水域生态用地转移面积较少,转移率分别为 0.01%、0.0004%以及 0.02%,主要集中在向农业生产用地转移,同时向城镇生活用地和工矿生产用地也有不同程度的转移。

表 5 2010—2020 年郑州市土地利用转移矩阵/km²

Table 5 Land use transfer matrix of Zhengzhou from 2010 to 2020

2010 年	2020 年							
	草地生态用地	城镇生活用地	林地生态用地	农村生活用地	农业生产用地	工矿生产用地	其他生态用地	水域生态用地
草地生态用地 Meadow ecological land	361.34	0.18	4.22	4.70	18.97	3.94	0.006	0.88
城镇生活用地 Urban living land	0.05	622.03	0.002	0.12	8.03	0.334	0.00	0.15
林地生态用地 Forest ecological land	5.17	0.005	538.94	4.24	8.71	1.71	0.00	0.35
农村生活用地 Rural living land	4.86	28.56	4.21	817.95	84.18	10.91	0.01	1.09
农业生产用地 Agricultural productive land	24.37	117.74	10.66	175.88	4094.35	117.22	2.94	45.47
工矿生产用地 Industrial and mining land	0.45	7.77	0.27	8.80	9.53	84.38	0.001	0.26
其他生态用地 Other ecological land	2.83	0.00	0.00	0.00	33.75	0.10	12.33	17.20
水域生态用地 Water ecological land	2.95	16.20	0.28	1.92	28.22	2.34	17.01	142.44

2.2.2 生态环境质量分析

通过公式(2)计算得出郑州市 2010 年、2015 年以及 2020 年二级用地类型的生态环境质量指数,将质量指数利用 ArcGIS 自然断点法分为 5 级,即低质量区($EV \leq 0.02$)、较低质量区($0.2 < EV \leq 0.35$)、中等质量区($0.35 < EV \leq 0.50$)、较高质量区($0.50 < EV \leq 0.65$)、高质量区($EV > 0.65$),从而得出郑州市 3 期生态环境质量空

间分布图,如图4所示。从时间上来看,郑州市生态环境质量指数从2010年的0.3097持续降至2020年的0.3058,其整体生态环境质量处于中等水平。从图5中可以看到,2010到2015年郑州市高质量区域没有明显变化,但低质量区域却有显著的扩张,尤其是2015到2020年,2020年低质量区的面积为2027.13km²,比2015年增加247.21km²。从空间上来看,2010到2020年郑州市生态环境质量空间分布相对一致,低质量区主要分布在郑州市中心区域,并逐渐向外扩张,其余各地区也有少量低质量分布,较低质量区平均分布,郑州市2010到2020年没有中质量区域,较高质量区以带状环绕分布在郑州市北部,部分较高质量区域分布在郑州市西北部,而高质量区主要分布在郑州市西部地区,少量高质量区域分布在郑州市西南地区,其余零星分布在东部以及东北部地区。高质量区主要是以林地生态用地为主,而低质量区域主要是以城镇生活用地和农村生活用地为主。

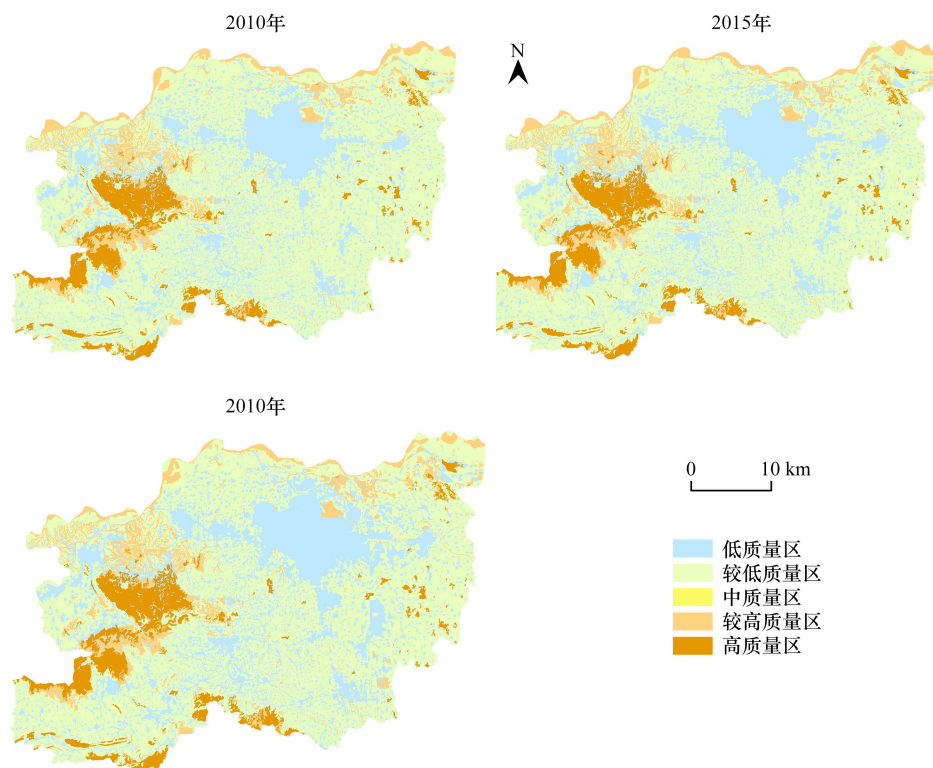


图4 2010—2020年郑州市生态环境质量空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of ecological environment quality in Zhengzhou from 2010 to 2020

生态环境质量指数只能单一地表示该区域在某个时间段内的生态环境质量情况,因此根据公式(3),计算郑州市2010—2020年二级用地类型相互转化所引起的生态贡献率的变化,以此来分析郑州市二级用地类型的转化给生态环境带来的影响,贡献率表示的正负则意味着该区域内生态环境是否发生改善或者恶化,一般情况下,区域内生态环境的改善和恶化是维持在相对稳定的状态,但区域内的稳定并不表示该区域生态环境没有发生变化,表6给出了郑州市2010—2020年时间段内主要土地利用变化类型和生态贡献率。

从表中可以得出,2010—2020年间导致郑州市生态环境质量改善的主要因素是农业生产用地和农村生活用地的转化。农业生产用地转化为水域、草地和林地生态用地,占环境质量改善的66.04%,同时,农村生活用地向农业生产、林地生态和草地生态用地的转化占郑州市生态环境质量改善的20.66%,其次是工矿生产用地的转化,前6种用地类型的转化在生态环境质量改善中的占比为86.70%。与此相反,农业生产用地转化为工矿生产和农村、城镇生活用地,以及其他和水域生态用地转化为农业生产用地则是导致郑州市生态环境质量恶化的重要因素。前4项用地类型转化的占比相对均衡,共占到生态环境质量恶化的53.63%,是生态环境

质量恶化总占比的近五分之三。

综上所述,2010—2020 年郑州市生态环境质量水平整体上表现为相对平衡,且其生态环境质量改善趋势要较好于生态环境质量恶化趋势。根据郑州市 2010—2020 年总体规划等相关政策文件,对郑州市从整体到局部进行了详细的部署改进,从现有郑州市土地利用功能结构变化及生态环境质量变化中可以看出,在政策等其他因素的共同影响下,郑州市国土空间和生态环境存在着不同程度的改变。但是随着郑州市城市化速度加快,大量耕地被占用,水域生态用地持续减少,未来郑州市生态环境水平可能会出现下降趋势,因此及时响应国家政策,统筹土地利用格局,以此促进其生态环境的进一步改善。

表 6 2010—2020 年郑州市“三生空间”土地利用变化转型及其生态贡献率

Table 6 Land use change transformation and ecological contribution rate of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2010 to 2020

生态环境效应 Effect of ecological environment	土地利用变化类型 Land use transformation types	转换面积/km ² Conversion area	生态贡献率 Ecological environment quality	占贡献率的百分比/% Ecological environment quality of contribution
环境质量改善 Environmental quality improvement	农业生产用地-水域生态用地	45.47	0.00181	31.58
	农业生产用地-草地生态用地	24.37	0.00120	21.01
	农业生产用地-林地生态用地	10.66	0.00077	13.45
	农村生活用地-农业生产用地	84.18	0.00058	10.07
	农村生活用地-林地生态用地	4.21	0.00033	5.81
	农村生活用地-草地生态用地	4.86	0.00027	4.77
	工矿生产用地-农业生产用地	9.53	0.00013	2.25
	农业生产用地-其他生态用地	2.94	0.00012	2.06
	草地生态用地-林地生态用地	4.22	0.00010	1.73
	工矿生产用地-农村生活用地	8.80	0.00006	1.02
	总计 Total	199.25	0.00536	93.77
环境质量恶化 Environmental quality deterioration	农业生产用地-工矿生产用地	117.22	-0.00158	16.17
	其他生态用地-农业生产用地	33.75	-0.00134	13.70
	农业生产用地-农村生活用地	175.88	-0.00121	12.31
	水域生态用地-农业生产用地	28.22	-0.00112	11.45
	草地生态用地-农业生产用地	18.97	-0.00092	9.43
	农业生产空间-城镇生活空间	117.74	-0.00081	8.24
	水域生态用地-城镇生产用地	16.20	-0.00075	7.70
	林地生态用地-农业生产用地	8.71	-0.00063	6.41
	林地生态用地-农村生活用地	4.24	-0.00033	3.41
	草地生态用地-农村生活用地	4.70	-0.00026	2.66
	总计 Total	525.637	-0.00896	91.50

2.3 多情景下 2035 年“三生空间”预测及生态环境质量分析

2.3.1 模型精度验证

通过 FLUS 模型,以 2015 年郑州市土地利用数据作为基准数据,2020 年郑州市土地利用数据作为检验数据,首先采用均匀采样法,设置隐藏层为 12,利用 GDP、年均温、年降水、到铁路的距离等数据作为驱动因子,共 10 种驱动因子,如图 5 所示。考虑到郑州市地势平坦,地形因素不作为驱动因子计算。通过神经网络模型得出数据转换的适宜性概率,与 Markov 模型预测的数量变化相结合。同时设置邻域参数,邻域参数的范围在 0—1 之间,参数值越接近 1,表明该类型土地的扩张能力越强。结合以往研究和实际经验^[36],在多次试验后将城镇生活用地和农村生活用地的参数设为 1,农业、工矿生产用地和草地生态用地设为 0.8,林地和其他生态用地设为 0.5,水域生态用地设为 0.1,如表 7 所示。经运算后得出检验结果,与 2020 年实际数据相比较,研究表明,总体精度和 Kappa 参数值越接近于 1,模拟精度效果越好^[37],结果显示,总体精度为 0.78,Kappa 参数为 0.76,实验模拟精度达到较高的水平,FLUS 模型具有较好的适用性,可适用于未来 2035 年郑州市“三生空间”模拟。

表 7 邻域参数设置

Table 7 Neighborhood parameters Settings

用地类型 The type of land use	农业生产用地 Agricultural productive land	工矿生产用地 Industrial and mining land	林地生态用地 Forest ecological land	草地生态用地 Meadow ecological land	水域生态用地 Water ecological land	其他生态用地 Other ecological land	城镇生活用地 Urban living land	农村生活用地 Rural living land
邻域参数 Neighborhood parameter	0.8	0.8	0.5	0.8	0.1	0.5	1	1

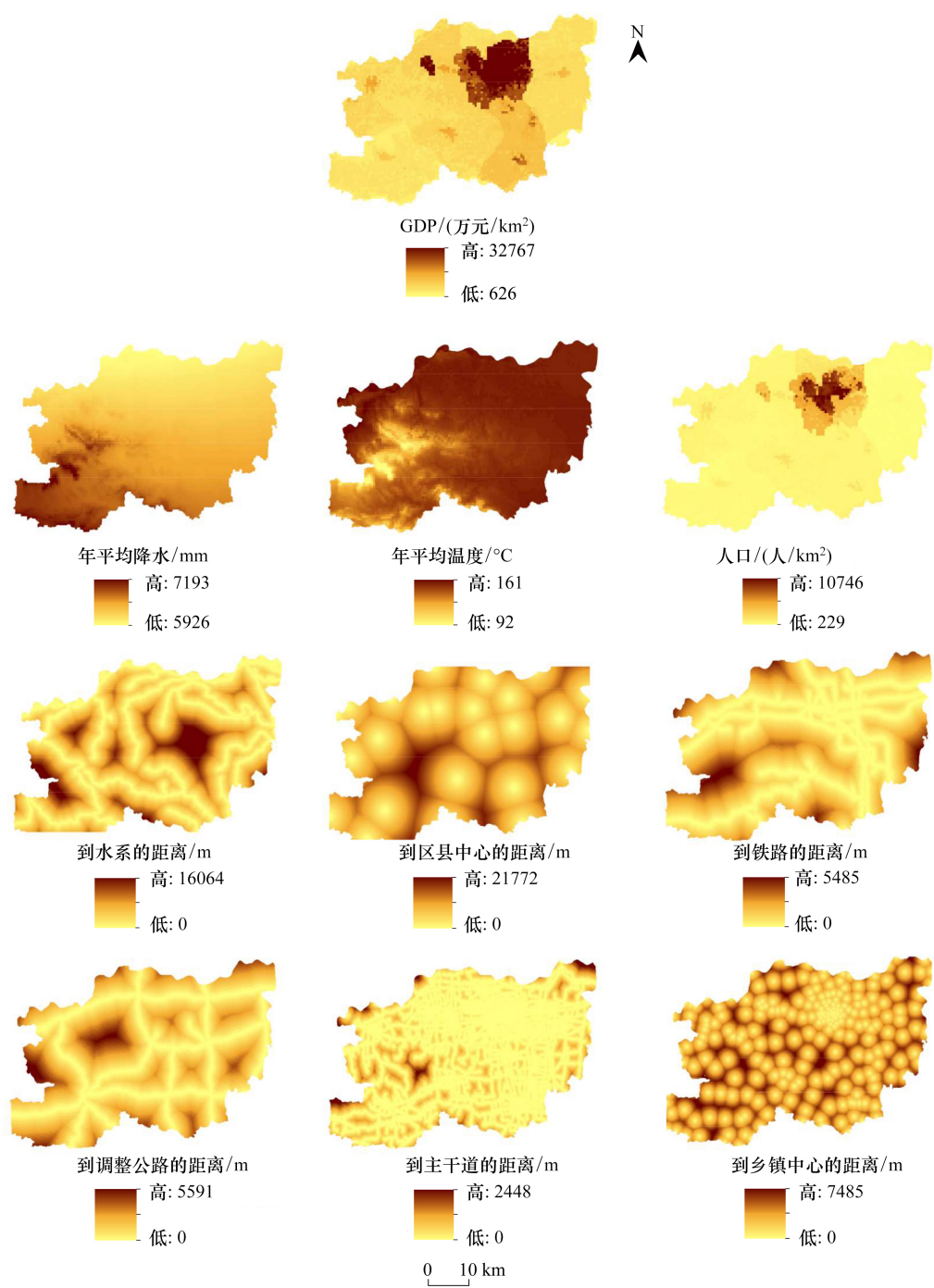


图 5 多种驱动因子图

Fig.5 Diagrams of various driving factors

2.3.2 “三生空间”模拟结果分析

根据不同情景设置,利用 FLUS 模型模拟 2035 年郑州市“三生空间”用地类型变化,结果如图 6 所示。不同情景下郑州市 2035 年“三生空间”的模拟结果也有着显著的差异,自然发展情景下,与 2020 年相比,郑州市生活空间占地面积自 2020 年的 1806.17km²上升至 2228.66km²,增长了 23.39%,存在明显的扩张趋势,其中城镇生活用地的扩张趋势最为明显,增长了 37.00%;但同时生产空间的占地面积却持续下降,从 2020 年的 4507.70km²下降至 2035 年的 4082.57km²,下降了 9.43%,农业生产用地的占地面积缩减了 514.79km²,工矿生产用地却在不断增加;生态空间占地面积也在不断下降,但下降幅度较小,仅下降了 4.43%,其中只有草地生态用地的占地面积增加了,而林地、水域和其他生态用地都有着不同程度的减少。从格局变化上来看,自然发展情景下 2035 年郑州市“三生空间”分布基本不变,生活空间集中在郑州市中北部,生产空间大面积覆盖郑州市,生态空间集中分布在西部和北部地区。

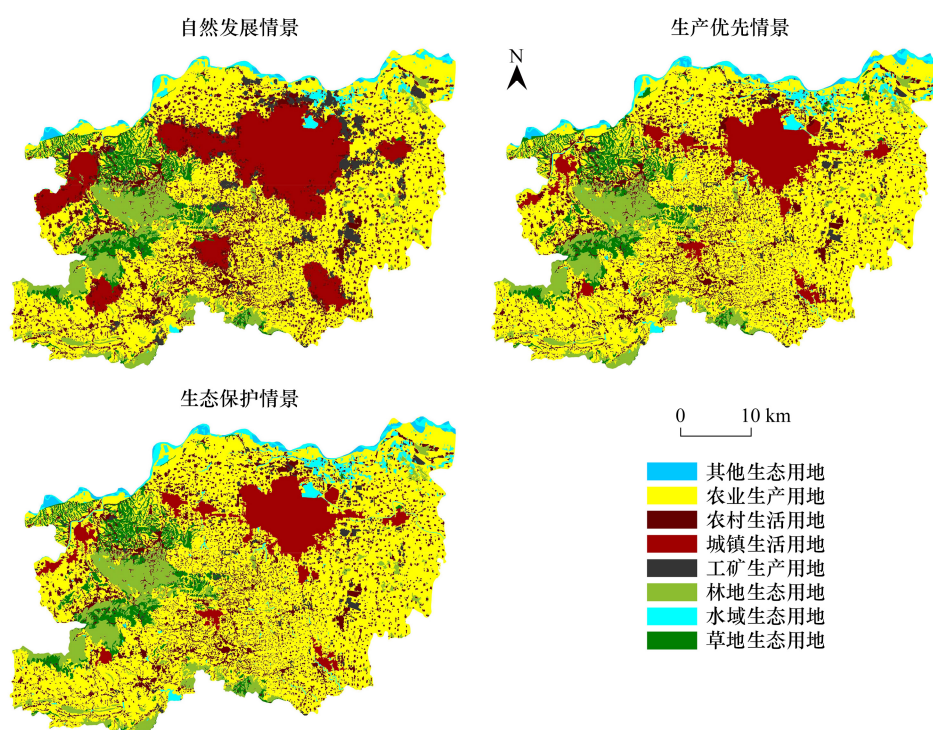


图 6 2035 年郑州市“三生空间”多情景模拟图

Fig.6 Multi-scenario simulation of Production-living-ecological space in Zhengzhou in 2035

生产优先情景下,旱地和水田受到保护,所以 2035 年郑州市“三生空间”中除生活空间外,生产和生态空间的占地面积都保持上升趋势。该情景下,郑州市生活空间占地面积降至 1606.44km²,城镇生活用地和农村生活用地占地面积都在缩减,但下降幅度较小,仅减少了 199.73km²;生产空间占地面积在增加,从 2020 年的 4507.70km²增加至 2035 年的 4671.95km²,增加幅度虽然较小,但也达到了该情景下生产优先的目标,其中农业生产用地增加最多,增长了 5.67%;生态空间在该情景下也出现了小幅度的面积增长,除林地生态用地外,草地、水域和其他生态用地占地面积都出现了增加,分别增加了 14.33km²、5.33km²和 22.28km²。

而生态保护情景则以生态环境优化为目标,该情景下 2035 年郑州市“三生空间”中生态空间占地面积出现增加,且与实际 2010—2020 年郑州市生态空间面积相比为最高,达到 1285.40km²,林地、草地、水域和其他生态用地都在增加,且其他生态用地的占地面积增加最多,增长了 102.00%;与 2020 年相比,生产空间的占地面积也是在增加的,增加了 143.29km²,其中农业生产用地增加了 223.31km²,而工矿生产用地却减少了 80.03km²;生活空间降为 1579.00km²,与 2010—2020 年相比为最低,城镇生活用地下降了 19.87%,而农村生

活用地下降了 6.87%。

2.3.3 生态环境质量分析

通过公式(2)计算多情景下 2035 年郑州市区域生态环境质量指数,同时根据生态环境质量指数分级,做出生态环境质量指数空间分布图,如图 7 所示。自然发展情景下,郑州市生态环境质量指数为 0.3004,空间分布上无明显结构变化,但低质量区的分布有显著的扩张。低质量区连片分布在郑州市中心偏北部地区,有少部分分布在西部和南部,面积由 2020 年的 2027.13km^2 增加至 2035 年的 2539.28km^2 ,增加了 512.15km^2 ;随着低质量区的扩张,其他等级区域相应减少,尤其是较低质量区,从 2020 年到 2035 年,较低质量区面积减少了 623.37km^2 ;较高质量区主要分布在郑州市西北和北部边缘地区,从空间结构上分析,较高质量区无明显扩张或缩减,而从区域面积上分析,较高质量区域面积有所下降,2035 年较高质量区域面积为 591.09km^2 ;高质量区域空间结构大部分分布在郑州市西部,少量零星区域分布在郑州市东部以及东部偏北方向,2035 年高质量区域面积为 557.24km^2 。

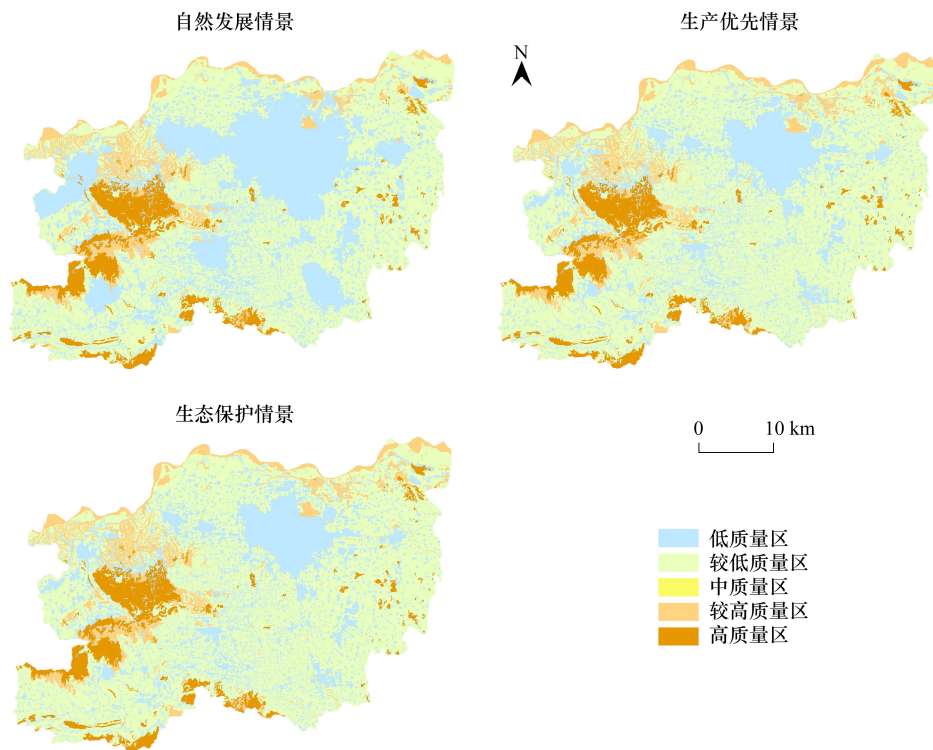


图 7 2035 年郑州市多情景下生态环境质量空间分布图

Fig.7 Spatial distribution of eco-environmental quality under multiple scenarios in Zhengzhou in 2035

生产优先情景下,郑州市 2035 年生态环境质量指数为 0.3105。与 2020 年相比,较低质量区域面积扩张,增加了 243.17km^2 ,较高质量区域的面积也在扩张,由 642.73km^2 增长至 684.68km^2 ,低质量区域和高质量区域却在减少,尤其是低质量区域,面积减少了 278.64km^2 ,但高质量区域的占地面积仅减少了 2.95km^2 。根据生态环境质量指数与相应等级占地面积中可以看出,生产优先的情景下,高生态环境质量指数区域无明显变化,但低生态环境质量指数区域面积出现了减少,说明在此发展情景下,郑州市生态环境质量水平是向较好的态势发展的。

生态保护情景下,郑州市 2035 年生态环境质量指数为 0.3121,为三种情景中生态环境质量指数最高。其较高质量区域与高质量区域的占地面积与 2010—2020 年实际占地面积相比也为最高,共增加了 44.84km^2 ,低质量区域占地面积也在减小,该情景下其面积为 1719.93km^2 ,与 2020 年相比减少了 307.20km^2 ,而较低质量区域的占地面积却在增加,但增幅不大,仅增长了 5.21%。由此可见,该情景下郑州市生态环境质量水平为三种

情景中最高。

在自然发展情景的驱动下,郑州市 2020—2035 年生态环境质量变化结果如表 8 所示。2020—2035 年间农业生产用地转化为草地、其他生态用地以及农村生活用地和工矿生产用地转化为农业生产用地是生态环境质量改善的主导因素,占比为 44.98%。而水域生态用地转化为农业生产用地以及农业生产用地转化为城镇生活、农村生活和工矿生产用地是导致生态环境质量恶化的重要因素,其中农业生产用地转化为城镇、农村生活和工矿生产用地的贡献率占比为 46.59%。生产优先情景中,郑州市 2020—2035 年生态环境质量变化结果如表 9 所示,工矿生产用地和农村生活用地转化为农业生产用地以及农业生产用地转化为草地、其他生态用地是郑州市生态环境质量改善的重要原因,其占比为 51.98%,而水域、草地及林地生态用地转化为农业生产用地是导致郑州市生态环境质量恶化的主要原因,其占比为 64.97%。而生态保护情景中,郑州市 2020—2035 年生态环境质量变化结果如表 10 所示,农业生产用地转化为草地、其他生态用地以及农村生活用地和工矿生产用地转化为农业生产用地依旧是郑州市生态环境质量改善的主导因素,但其占比变为 55.40%,稍高于自然发展情景,而水域、草地及林地生态用地转化为农业生产用地也仍旧是导致郑州市生态环境质量恶化的主要原因,其占比为 58.64%,要低于生产优先情景。

综上所述,通过对比生态环境质量指数和生态贡献率发现,生态保护情景下郑州市的生态环境质量水平发展较好,而自然发展情景下,郑州市的生态环境质量水平偏低,进一步说明了随着人们对生活质量的要求越来越高,生活空间的需求也在不断增加,但同时也带来了土地需求量增加的问题,生态用地逐渐被占用,未来郑州市生态环境保护也将成为重难点问题,因此应该结合郑州市实际情况与各项影响因素,合理规划空间布局,为生态文明建设提供保障。

表 8 自然发展情景下 2020—2035 年郑州市“三生空间”空间变化转型及其生态贡献率

Table 8 Land use change transformation and ecological contribution rate of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2020 to 2035 under natural development scenario

生态环境效应 Effect of ecological environment	土地利用变化类型 Land use transformation types	转换面积/km ² Conversion area	生态贡献率 Ecological environment quality	占贡献率的 百分比/% Ecological environment quality of contribution
环境质量改善 Environmental quality improvement	农业生产用地-草地生态用地	28.99	0.00148	19.34
	工矿生产用地-农业生产用地	73.24	0.00099	13.01
	农村生活用地-农业生产用地	140.51	0.00096	12.62
	农业生产用地-其他生态用地	17.60	0.00070	9.24
	农业生产用地-水域生态用地	16.71	0.00067	8.77
	农业生产用地-林地生态用地	7.56	0.00055	7.21
	城镇生活用地-水域生态用地	10.24	0.00040	6.30
	农村生活用地-草地生态用地	6.90	0.00048	5.23
	总计 Total	301.75	0.00623	81.72
环境质量恶化 Environmental quality deterioration	水域生态用地-农业生产用地	84.28	-0.00338	23.34
	农业生产用地-城镇生活用地	406.19	-0.00280	19.35
	农业生产用地-工矿生产用地	151.48	-0.00211	14.23
	农业生产用地-农村生活用地	272.99	-0.00188	13.00
	草地生态用地-农业生产用地	19.16	-0.00095	6.58
	林地生态用地-农业生产用地	9.31	-0.00068	4.68
	水域生态用地-城镇生活用地	11.14	-0.00052	3.61
	水域生态用地-工矿生产用地	8.22	-0.00044	3.05
	总计 Total	962.77	-0.01271	87.85

表 9 生产优先情景下 2020—2035 年郑州市“三生空间”空间变化转型及其生态贡献率

Table 9 Land use change transformation and ecological contribution rate of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2020 to 2035 under production priority scenior

生态环境效应 Effect of ecological environment	土地利用变化类型 Land use transformation types	转换面积/km ² Conversion area	生态贡献率 Ecological environment quality	占贡献率的百分比/% Ecological environment quality of contribution
环境质量改善 Environmental quality improvement	工矿生产用地-农业生产用地	98.73	0.00133	15.05
	农业生产用地-其他生态用地	32.93	0.00131	14.75
	农村生活用地-农业生产用地	157.30	0.00108	12.17
	农业生产用地-草地生态用地	17.59	0.00089	10.01
	农业生产用地-水域生态用地	20.29	0.00081	9.09
	城镇生活用地-水域生态用地	15.26	0.00071	8.01
	城镇生活用地-农业生产用地	80.19	0.00055	6.20
	农业生产用地-林地生态用地	6.53	0.00047	5.33
	总计 Total	428.82	0.00715	80.61
环境质量恶化 Environmental quality deterioration	水域生态用地-农业生产用地	30.20	-0.00120	25.01
	草地生态用地-农业生产用地	24.05	-0.00118	24.72
	林地生态用地-农业生产用地	10.13	-0.00073	15.24
	农业生产用地-农村生活用地	66.33	-0.00045	9.46
	林地生态用地-农村生活用地	3.52	-0.00028	5.80
	草地生态用地-农村生活用地	4.22	-0.00024	4.94
	农村生活用地-工矿生产用地	21.32	-0.00014	2.96
	农业生产用地-工矿生产用地	8.69	-0.00012	2.45
	总计 Total	168.47	-0.00434	90.58

表 10 生态保护情景下 2020—2035 年郑州市“三生空间”空间变化转型及其生态贡献率

Table 10 Land use change transformation and ecological contribution rate of “Production-Living-Ecological” space in Zhengzhou from 2020 to 2035 under ecological protection scenario

生态环境效应 Effect of ecological environment	土地利用变化类型 Land use transformation types	转换面积/km ² Conversion area	生态贡献率 Ecological environment quality	占贡献率的百分比/% Ecological environment quality of contribution
环境质量改善 Environmental quality improvement	农业生产用地-草地生态用地	30.03	0.00150	15.40
	农业生产用地-其他生态用地	37.02	0.00147	15.18
	工矿生产用地-农业生产用地	98.60	0.00133	13.73
	农村生活用地-农业生产用地	157.04	0.00107	11.08
	农业生产用地-水域生态用地	21.46	0.00085	8.80
	城镇生活用地-农业生产用地	106.86	0.00073	7.54
	城镇生活用地-水域生态用地	15.32	0.00071	7.37
	农业生产用地-林地生态用地	8.44	0.00061	6.27
	总计 Total	474.76	0.00827	85.37
环境质量恶化 Environmental quality deterioration	水域生态用地-农业生产用地	21.99	-0.00087	22.74
	草地生态用地-农业生产用地	16.54	-0.00082	21.24
	林地生态用地-农业生产用地	7.80	-0.00056	14.66
	农业生产用地-农村生活用地	66.06	-0.00045	11.77
	林地生态用地-农村生活用地	3.17	-0.00025	6.51
	草地生态用地-农村生活用地	3.72	-0.00019	4.93
	农村生活用地-工矿生产用地	21.33	-0.00014	3.69
	农业生产用地-工矿生产用地	8.64	-0.00012	3.03
	总计 Total	148.90	-0.00340	88.57

4 结论和讨论

4.1 结论

本文将 FLUS 模型与生态环境效应模型相结合,对郑州市 2010—2020 年“三生空间”趋势变化进行分析研究,利用生态贡献率对郑州市生态环境质量变化进行定量分析,同时模拟自然发展、生产优先、生态保护三种情景下 2035 年郑州市“三生空间”格局分布,探索多情景下 2035 年郑州市土地利用功能转型对生态环境产生的影响,得出的结论如下:

(1) 郑州市 2010—2020 年“三生空间”中,生产空间分布最为广泛,覆盖面积最大,主要为耕地、水田和其他建设用地等,但其占地面积却在不断下降;生活空间中,城镇生活用地主要分布在郑州市中心城区,而农村生活用地则分散分布在各个区域,整体上生活空间的占地面积呈现不断上升的趋势;生态空间在“三生空间”中占比最小,且集中分布于郑州市西南部和西部。从用地类型结构转化上来看,各用地类型主要向农业生产用地转化,但其总转化面积要小于农业生产用地向城镇、农村生活用地的转化面积,因此,生活空间正在朝着不断扩张的趋势发展。

(2) 郑州市生态环境质量指数从 2010 年的 0.3097 持续降至 2020 年的 0.3058,变化幅度不大,整体上其生态环境质量水平中等。2010—2020 年郑州市生态环境质量改善的主要原因是农业生产用地向生态用地的转化。而导致郑州市生态环境质量恶化的重要原因却是农业生产用地转化为工矿生产和农村、城镇生活用地。由此可以看出,生态空间的扩张将有助于城市生态环境质量的改善。

(3) 三种模拟情景中,2035 年郑州市“三生空间”格局分布基本保持一致,其中自然发展情景下,郑州市生活空间占地面积增长了 23.39%,生产和生态空间却在下降,而生产优先和生态保护情景中,郑州市生产和生态空间的占地面积逐渐扩张,生活空间面积逐渐缩减,分别下降了 11.06%、12.58%。

(4) 三种情景对比发现,生态保护情景下 2035 年郑州市生态环境质量指数最高,其生态环境质量水平也要高于其他两种情景。不同情景下导致郑州市生态环境质量改善或恶化的原因也不相同,自然发展情景下,生活空间扩张速度加快,生态安全也将受到一定威胁,不利于“三生空间”的均衡发展;生产优先情景下,农业生产用地得到增长,生活空间增长速率受到限制,有利于耕地发展;生态保护情景下,水域、林地、草地和其他生态用地增长速率增加,为城市生态环境发展提供条件。

4.2 讨论

根据本文研究结果显示,郑州市现有“三生空间”格局中生活空间突出,生态空间势力微弱,生产空间受到挤压。中心城区城镇化较为明显,产业蓬勃发展,人口集聚,经济发展迅速,形成由内向外不断外延的空间格局,农村生活用地围绕城镇生活用地呈点状分散分布,集聚现象并不明显。受自然地形的影响,巩义市、登封市等西部地区生态环境较好,生态绿地连片分布,北部黄河作为跨界屏障,以带状环绕,其中伊洛河、颍河等交错分布,生态空间部分靠近生产和生活空间的地区,形态受其影响而零散破碎。生产空间中农业生产用地,即耕地和水田占地面积最大,但由于近年来城市化加剧,耕地和水田也被大量占用。

自然发展情景下 2035 年郑州市生态环境质量出现了明显的恶化趋势,主要原因是城市生活用地占用农业生产用地和水源,这与王慧丽的研究一致^[38]。当前的研究结果显示,经济的快速增长将导致城市扩张的加剧,这将扰乱“三生空间”的均衡分布,降低生态环境质量。因此,减缓经济增长速度,控制城乡之间的土地转换,可以改善城市生态环境质量,改善“三生空间”规划模式。此外,城市人口的扩张将改变生态环境,因此有必要合理控制人口增长速度,确保生态空间。并且,仍有许多因素将影响未来的城市“三生空间”和生态环境质量,如政策^[13]和交通^[39],应在未来展开深入的研究^[40]。

本研究从土地利用类型相互转化的角度分析了生态效应,而影响生态变化的因素还有很多,如地图斑块大小和景观生态指数。在这些因素的影响下,生态环境将如何变化还有待研究。同时驱动因子包括的范围甚广,文中只考虑重要的驱动因素,政策、土壤等因素也属于驱动因子的范畴,在今后的研究中可将其加入研究

以进一步提高模拟精度。

结合本文的模拟结果和郑州市实际空间规划,提出相应建议,为推动实现郑州市作为黄河流域生态保护和高质量发展、建设国家中心城市的总目标,应对其国土空间总规划建设进行科学设计,充分认识自身优势,弥补现有缺陷。同时加强人们对生态文明建设的思考,不断提高城市生态环境质量,从各个方面优化城市生态环境格局,以此打造生态良好、生活适宜、生产集约高效的健康城市。

参考文献 (References):

- [1] 江曼琦,刘勇.“三生”空间内涵与空间范围的辨析.城市发展研究,2020,27(4):43-48,61-61.
- [2] Cetin M. Sustainability of urban coastal area management; a case study on Cide. Journal of Sustainable Forestry, 2016, 35(7): 527-541.
- [3] 樊杰.我国主体功能区划的科学基础.地理学报,2007,62(4):339-350.
- [4] 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.
- [5] 江东,林刚,付晶莹.“三生空间”统筹的科学基础与优化途径探析.自然资源学报,2021,36(5):1085-1101.
- [6] 陈婧,史培军.土地利用功能分类探讨.北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):536-540.
- [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] Kilicoglu C, Cetin M, Aricak B, Sevik H. Integrating multicriteria decision-making analysis for a GIS-based settlement area in the district of Atakum, Samsun, Turkey. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 143(1/2): 379-388.
- [9] 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.
- [10] Shi H, Li X, Yang Z Z, Li T H, Ren Y, Liu T T, Yang N D, Zhang H, Chen G Z, Liang X. Tourism land use simulation for regional tourism planning using POIs and cellular automata. Transactions in GIS, 2020, 24(4): 1119-1138.
- [11] 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.
- [12] Cetin M, Agacsapan B, Cabuk S N, Senyel Kurkuoglu M A, Isik Pekkan O, Baran Argun E, Dabanlı A, Kucukpehlivan T, Yilmazel B, Cabuk A. Assessment of the ecological footprint of eskisehir technical university - iki eylul campus. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2021, 49(10): 2311-2327.
- [13] 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.
- [14] 黄安,许月卿,卢龙辉,刘超,张益宾,郝晋珉,王惠.“生产-生活-生态”空间识别与优化研究进展.地理科学进展,2020,39(3):503-518.
- [15] 樊杰.中国主体功能区划方案.地理学报,2015,70(2):186-201.
- [16] 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.
- [17] 詹云军,朱捷缘,严岩.基于元胞自动机的城市空间动态模拟.生态学报,2017,37(14):4864-4872.
- [18] 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.
- [19] Kang J M, Zhang X, Zhu X W, Zhang B L. Ecological security pattern: a new idea for balancing regional development and ecological protection. A case study of the Jiaodong Peninsula, China. Global Ecology and Conservation, 2021, 26: e01472.
- [20] 杨亮洁,王晶,魏伟,杨永春,郭泽呈.干旱内陆河流域生态安全格局的构建及优化——以石羊河流域为例.生态学报,2020,40(17):5915-5927.
- [21] 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.
- [22] 董建红,张志斌,笄晓军,张文斌,冯雪丽.“三生”空间视角下土地利用转型的生态环境效应及驱动力——以甘肃省为例.生态学报,2021,41(15):5919-5928.
- [23] 吕立刚,周生路,周兵兵,戴靓,昌亭,鲍桂叶,周华,李志.区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究——以江苏省为例.地理科学,2013,33(12):1442-1449.
- [24] 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.
- [25] 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.

- [26] 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, 23(3): 280-290.
- [27] 崔佳, 臧淑英. 哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应. 地理研究, 2013, 32(5): 848-856.
- [28] 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.
- [29] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.
- [30] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: computing and modelling variograms and kriging. CATENA, 2014, 113: 56-69.
- [31] 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.
- [32] 张晓瑶, 张潇, 李冬花, 陆林, 虞虎. 城市土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟——以深圳市为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2086-2097.
- [33] 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.
- [34] 殷格兰, 邵景安, 郭跃, 党永峰, 徐新良. 南水北调中线核心区土地利用变化及其生态环境响应研究. 地球信息科学学报, 2017, 19(1): 59-69.
- [35] 黎夏, 李丹, 刘小平. 地理模拟优化系统(GeoSOS)及其在地理国情分析中的应用. 测绘学报, 2017, 46(10): 1598-1608.
- [36] 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.
- [37] Lin W B, Sun Y M, Nijhuis S, Wang Z L. Scenario-based flood risk assessment for urbanizing deltas using future land-use simulation (FLUS): Guangzhou Metropolitan Area as a case study. Science of the Total Environment, 2020, 739: 139899.
- [38] 王慧丽. 郑州市城市化中土地利用变化及其驱动力研究[D]. 开封: 河南大学, 2017.
- [39] 胡一川. 郑州市生态空间环境质量评价研究[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- [40] Kalayci Onac A, Cetin M, Sevik H, Orman P, Karci A, Gonullu Sutcuoglu G. Rethinking the campus transportation network in the scope of ecological design principles: case study of Izmir Katip Çelebi University Çiğli Campus. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(36): 50847-50866.