

流域视角下CA模型在国土空间规划中的应用*

——以河南省黄河流域国土空间规划为例

Application of the Cellular Automata Model in the Territory Spatial Planning on the Perspective of Basin: A Case Study of Henan Province Yellow River Basin Territory Spatial Planning

林文棋 刘丽 吴纳维 周亦恒 陈会宴 李绍辉 LIN Wenqi, LIU Li, WU Nawei, ZHOU Yiheng, CHEN Huiyan, LI Shaohui

摘要 基于省、市级国土空间规划编制指南,以河南省黄河流域国土空间规划为例,进行流域尺度的城镇空间扩展模拟,并为城镇开发边界划示、差异化制定城镇发展策略及城镇“双宜区”判定提供科学支撑。采用实证分析法、元胞自动机(CA)与Logistic回归模型算法进行分析,结果表明:(1) CA与Logistic回归模型算法结合进行城镇空间扩展多情景模拟,为城镇开发边界划定提供科学支撑;(2) 根据对比分析结果进行不同发展动力与限制要素驱动下的区县扩展特征与规律研究,为差异化制定流域发展对策提供科学支撑;(3) 基于城镇开发边界划示方案,进行“双评价”结果的农业生产与城镇建设双适宜区判定、基本农田调整建议,为科学统筹生态、农业与城镇空间提供支撑。结论显示,基于机器学习和CA模拟技术构建的多情景模型可为次区域向市县城镇建设用地指标传导和城镇开发边界划示提供科学支撑,有效指导流域尺度的国土空间规划的编制。

Abstract The purpose of this paper is based on the provincial and municipal territory spatial planning guidelines, taking the territory spatial planning of the Yellow River Basin in Henan Province as an example, to study how to use the cellular automata (CA) simulation model to simulate the urban spatial expansion at the basin scale. It uses the simulation results to provide scientific support for urban development boundary delineation, differentiated formulation of urban development strategies, and identification of urban "dual suitable areas". The research methods include empirical analysis, the cellular automaton model, and the logistic regression model algorithm. (1) This paper uses the combination of the cellular automata (CA) and the logistic regression model algorithm to perform multi-scenario simulation of urban spatial expansion, providing scientific support for the delimitation of urban development. (2) Based on the results of comparative analysis, this paper researches the expansion characteristics and laws of districts and counties driven by different development motives and restrictive factors, providing scientific support for the differentiated formulation of development strategies for the basin. (3) Based on the urban development boundary delineation plan, this paper carries out the "double-evaluation" result to determine the "dual suitable areas" for agricultural production and urban construction and puts forward suggestions for basic farmland adjustment, providing support for the scientific overall planning of ecology, agriculture, and urban space. In conclusion, the multi-scenario model based on machine learning and the cellular automata (CA) simulation model can provide scientific support for the transmission of urban construction land indicators and the delineation of urban development boundaries. It will effectively guide the compilation of territory spatial planning at the basin scale.

关键词 流域;城镇建设用地;多情景模拟;元胞自动机(CA)

Key words basin; urban construction land; multi-scenario simulation; cellular automata

文章编号 1673-8985 (2021) 03-0034-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20210305

作者简介

林文棋
清华大学建筑学院
副教授,博士
北京清华同衡规划设计研究院
总规划师,技术创新中心执行主任
linwq@mail.tsinghua.edu.cn

刘丽
北京清华同衡规划设计研究院 规划师
吴纳维
北京清华同衡规划设计研究院 规划师,博士
周亦恒
北京清华同衡规划设计研究院
规划师,硕士

陈会宴
北京清华同衡规划设计研究院
算法工程师,硕士
李绍辉
北京清华同衡规划设计研究院
算法工程师,硕士

*基金项目:国家重点研发计划(National Key R&D Program of China)“县城村镇空间发展智能化管控与功能提升规划技术研发”(编号2018YFD1100800)、“村镇发展模拟系统和智能决策管控平台关键技术”(编号2018YFD1100805)资助。

《中共中央 国务院关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》提出“五级三类”规划体系,并明确国土空间总体规划的相关要求。国土空间规划是一项系统性工程,为保证规划的可操作性,需注重建立规划纵横向传导体系,强化约束性指标和刚性管控要求的纵向协同与横向联通,引导重大要素分级配置。如何分解落实上层级规划确定的城镇建设用地约束性指标、分区及控制线要求,有效指导下层级规划编制、引导同层级相关规划符合发展和约束要求,成为国土空间规划的重点内容。

城镇开发边界作为国土空间规划的重要控制线之一,在现阶段的相关研究中尚未出现明确的划定方法。在众多的划定方法中,元胞自动机(Celluar Automata,以下简称“CA”)模拟作为计算机学习推演复杂地理空间系统动态演化特征的方法,目前已得到广泛的认可。而国内外学者针对CA模拟的研究主要聚焦于技术的实验性研究和方向判断,鲜有基于空间管控的规划实践模拟,以及以模拟结果指导相关用地指标向下级分解传导的研究。本文立足国土空间规划实践,依托资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价(以下简称“双评价”),基于流域尺度的地方现状本底条件、未来发展驱动力及限制条件等多方面影响要素分析,对分区县城镇空间发展变化、未来发展趋势进行动态跟踪及多情景模拟,以期为国土空间总体规划编制中的城镇建设用地指标传导及城镇开发边界划定提供科学支撑。

1 城镇建设用地增长模型研究综述

1.1 城镇建设用地动态跟踪方法

在现有的相关研究中,常利用Landsat TM/ETM遥感数据对研究区域内的城镇建设用地实施动态追踪,计算城市用地扩张强度指数,分析城市用地空间扩张模式,为新增建设用地指标分解和城镇开发边界的划定提供理论基础^[1],并在此基础上,通过城市模型对城镇建设用地增长进行模拟。

1.2 城镇建设用地增长模型

从时间维度看,城市模型可分为静态城市

模型和动态城市模型两大类,静态模型涵盖传统统计模型和空间相互作用模型等^{[2]59};而动态模型则随着计算机技术的发展形成两种类型:“自上而下”基于微分方程的动力学模型和“自下而上”基于元胞自动机、智能体等概念的离散动力学模型^{[2]60}。其中系统动力学模型(system dynamics modeling)、CA模型和智能体模型(agent-based modeling)为3大代表性动态城市模型发展方向^{[3]7-8}。

1.3 CA模型

CA模型因其强大的空间计算能力,被广泛应用于城市系统空间复杂性模拟过程中^[4]。随着近年来技术手段的进步,CA的应用方向也在逐渐丰富,根据国内最新的研究成果,CA在疾病传播研究^[5]、交通规划分析^[6]、生态环境模拟^[7]等方面均有应用。在城市增长、土地利用演变等领域,CA相较其他模型的优势在于其能够有效反映微观格局下的土地利用演化复杂特性^[8]。但同时,CA模型重点在于单元的局部相互作用,难以有效反映社会、经济等宏观问题所产生的影响^[9]。为解决这一问题,学者们通过CA与其他多种模型相互耦合的方式进行模型优化^[10-12],并衍生出多种结合遗传算法^[13]、神经网络^[14]、粗集^[15]等的改进方法。

随着城镇开发边界的划定与精细化管控需求的逐渐落实,CA模型由于其独特性正在逐渐成为城镇开发边界划定的常用方法以及城镇空间决策的有效工具。

2 CA模型支撑流域多目标协同发展需求

流域作为城市发展的重要依托^[16],具有整体性和系统性特征,使流域内城市间存在相互制约、依存关系。流域国土空间规划具有跨行政单元、相对灵活、目标导向比较具体^[17]等特点,涉及多利益主体、多层次关系、多目标诉求的协调,需要跨区域、跨部门及跨学科的创新方法支撑纵横协调等重大空间问题的决策。

2.1 流域规划的多目标协调属性

流域是一个以水为组带的集水循环、生

态、社会经济系统于一体的复杂系统^[18]。流域内各空间单元在水资源利用、环境保护、产业发展与城市布局等方面存在相互制约、依存关系,必须作为一个整体进行统筹考虑,系统性地资源禀赋的差异性与互补性研究。流域的系统性特征决定了土地配置方式必须立足全局,考虑上下游、左右岸、干支流等流域多层次、区域多行政单元的关系,满足城市发展与生态保护的二元空间协调需求,实现城市与流域的良性互动发展(见图1)。而传统的土地资源配置方式通常依据地区GDP、固定资产投资等反映经济发展水平的指标进行建设用地的分解下达^[19],仅考虑社会经济发展水平,不考虑资源禀赋的区域差异^[20-21],致使经济发达地区出现开发强度大、经济密度低、负外部性强等粗放利用特征^[22],经济欠发达地区的用地需求则难以保障^[23],无法满足流域尺度的协同发展需求。

国土空间规划作为空间治理体系的重要工具,具有明显的空间层级和空间尺度效应^[24]。而流域的整体性与系统性特征,决定了流域尺度的国土空间规划一方面需协调发展与保护的关系,满足城市发展与生态保护的二元空间协调需求,另一方面需协调多利益主体的发展关系,满足流域多目标协同发展诉求。城镇开发边界作为国土空间中的重要一级控制线,其划定、实施与管控需发挥上级政府的发展战略及自然资源行政主管部门“定标准、下指标、留弹性”的职责^[25],明确协商规则和分配下发指



图1 保护与发展诉求下的流域空间与行政主体关系图

Fig.1 The relationship between watershed space and administrative subjects under the demands of protection and development

资料来源:笔者自绘。

标的权限,充分体现县市级政府在实施和管控方面的主体作用。在此过程中,由于涉及“自上而下”的指标分解、传导,以及“自下而上”的实施反馈,亟待科学合理的分配方法促进边界“上下联动”更为密切与顺畅。

2.2 CA模型支撑空间发展多目标协调

CA模型因其能够通过简单的转换规则设置,模拟复杂的时空演化过程而被广泛应用于模拟城镇建设用地动态增长。CA模型的基本原理是通过周边地块的建设状况计算某地块(元胞)被开发的概率,其中转化规则是其核心^{[3]8}。本文采用Logistic回归算法挖掘转化规则,将约束条件与动力因素加入到模型中参与计算,其公式如下:

$$P(\text{cell}_{ij} = \text{develop}) = \frac{1}{1 + \exp(-v_{ij})} \cdot \text{con}(\text{cell}_{ij}) \cdot \text{neighbor}_{ij} \quad (1)$$

式中:P为最终的发展概率, v_{ij} 是在ij位置元胞的所有自变量的开发特征向量, $\text{con}(\text{cell}_{ij})$ 是ij位置元胞的所有约束条件与动力因素, neighbor_{ij} 是邻域的开发情况。

在CA模型中加入约束条件与动力因素参与模型计算,可有效反映城镇发展的非均质性与空间扩散的差异性特征,满足城市发展与生态保护的二元空间协调需求、协调多利益主体的发展诉求。该模型由于有效结合了地理空间知识与地块属性条件数据,具有强大的空间运算能力,可助力流域城镇发展多情景模拟,进行城市多目标导向的空间拓展模拟及建设用地动态跟踪,支撑城镇开发边界的科学划示^①(见图2)。



图2 研究方法路径图
Fig.2 Research method path

资料来源:笔者自绘。

3 河南省黄河流域城镇建设用地增长模拟

通过CA模型与Logistic回归模型结合的方法,挖掘城镇空间规律、识别潜力与限制要素,进行多情景下的多目标组合城镇建设用地增长模拟,从而支撑流域规划决策(见图3)。

建设用地增长模拟主要涉及以下6类数据:(1) 土地利用数据。2005年、2010年、2015年3个年度的TM影像解译数据;土地利用类型分为6大类、25种类,在模型应用中,将城镇建设用地之外的5类用地合并为非城镇建设用地。(2) 国土空间限制要素数据。包括基本农田保护区、生态保护红线、生态脆弱性、灾害危险性和生态系统服务功能重要性数据;其中生态脆弱性、灾害危险性和生态系统服务功能重要性数据来自“双评价”结果。(3) 国土空间开发潜力要素数据。包括城镇建设适宜性、区位优势度和人口潜力数据,其中城镇建设适宜性和区位优势度数据来自“双评价”结果;人口数据来源于统计年鉴。(4) 各地市生产总值数据。包括各地市、各区县第一、第二、第三产业在2005年、2010年、2015年3个年度的生产总值数据,数据来源是各地市的统计年

鉴以及河南省统计年鉴。(5) 黄河流域河南段地理信息数据。包括流域地形图和流域水域数据,数据来源为地理空间数据云。(6) 行政区划数据。主要包括各区县行政边界、城镇中心点数据。

3.1 城市运行逻辑研判

3.1.1 城镇建设用地空间分布

河南省黄河流域城镇空间集中布局特征明显,且多呈增长趋势;城镇空间主要分布于东西向沿黄河南岸、南北向沿太行山东麓一线,占流域总城镇空间比例达79%。各时期建成区扩展大致围绕原建成区的外围呈圈层状分布,具有一定的蔓延性特征(见图4)。

3.1.2 城镇建设用地变化规律

从3期(2010年、2015年、2015年)城镇空间数量变化来看,城镇空间一直处于扩张状态,高速扩展区位于郑州、鹤壁、濮阳等城市周边区域。其中,郑州城镇空间面积稳居第1位,洛阳作为中原城市群副中心城市在空间规模及扩展强度方面优势不明显(见图5)。

3.1.3 城镇建设用地变化影响要素



图3 基于CA模拟的城镇开发边界划示流程图
Fig.3 Flow chart of urban development boundary delineation based on cellular automata

资料来源:笔者自绘。

注释: ①城镇开发边界划示:根据中共中央办公厅、国务院办公厅印发《关于在国土空间规划中统筹划定落实三条控制线的指导意见》要求,省(自治区、直辖市)确定本行政区域内3条控制线总体格局和重点区域,市、县组织统一划定3条控制线和乡村建设等各类空间实体边界,因此在流域次区域国土空间规划可进行城镇开发边界的划示,为省级总体格局和重点区域确定及市县级边界划定提供支撑。



图4 河南省黄河流域3期城镇建设空间分布图
Fig.4 Spatial distribution of the third phase urban construction of the Yellow River Basin in Henan Province

资料来源:笔者根据TM影像解译数据绘制。

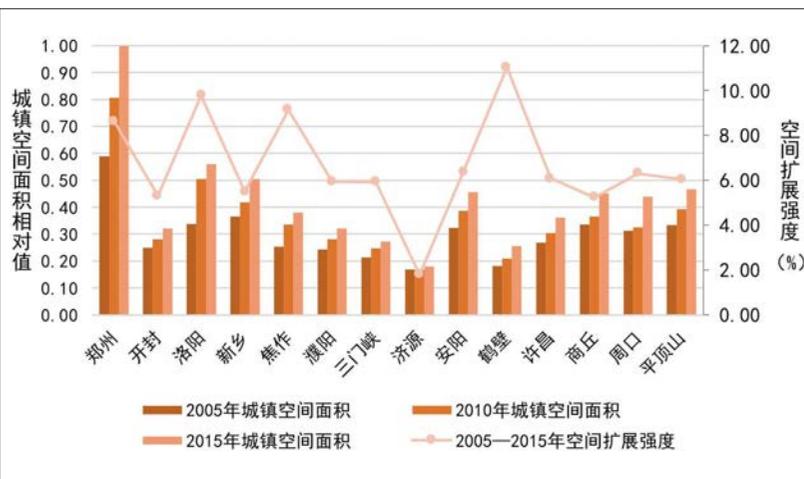


图5 河南省黄河流域14地市3期城镇空间面积
Fig.5 The area of the third phase urban construction of the 14 cities in the Yellow River Basin of Henan Province (the data in the chart are relative values)

资料来源:笔者根据TM影像解译数据绘制。

本文利用脱钩理论,通过构建两个系统不同年度的变化关系指数来评价两系统的耦合协调性。

整体而言,相对总人口增长速度,城镇建设用地增长速度过快,用地发展欠合理;相对生产总值增长速度,城镇建设用地增长速度较慢,用地发展趋于合理。分区县而言,超过八成以上的区县表现为与整体一致的人地关系,即相较于总人口增长速度用地发展较为粗放(见图6a),相较于生产总值增长速度用地发展呈现高效合理的协调发展状态(见图6b)。根据多期城镇建设用地及其与人口、经济的耦合关系分析,发现河南省黄河流域在较快的生产总值增长、一定程度的建设用地扩张态势下,还存在一定程度的人口增长空间。

基于以上城市运行逻辑的研判,应用Logistic回归算法,对第一、第二期用地进行城镇建设用地转换规则挖掘;再应用CA模型,纳入转化规则,以第二期城镇建设用地为基础进行第三期城镇建设用地模拟,并将模拟结果与第三期用地做kappa系数检验, kappa系数达到0.8以上即可将Logistic回归运算过程中得到的转换规则作为城市建设用地增长的影响因子纳入城镇建设用地多情景模型中(见图7)。

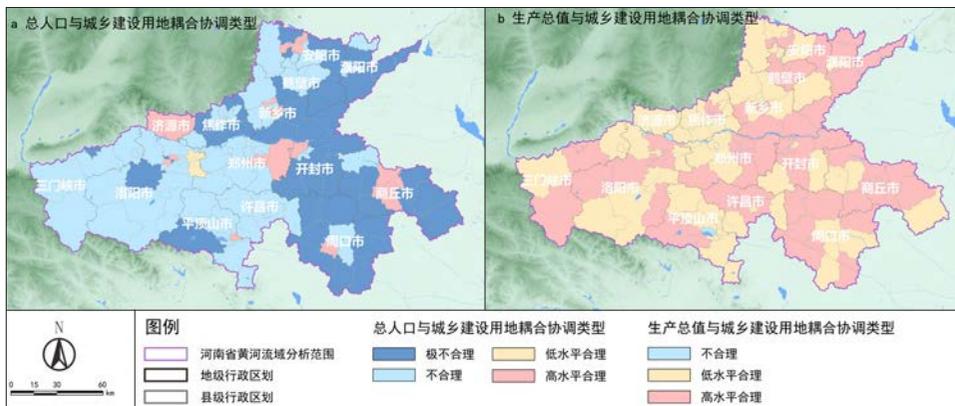


图6 2010—2018年总人口/第二产业、第三产业增加值与城镇建设用地变化关系耦合协调类型格局
Fig.6 The change relationship coupling and coordination type pattern of 2010-2018 total population/secondary and tertiary industry added value and urban construction land

资料来源:笔者根据统计年鉴和TM影像解译数据绘制。

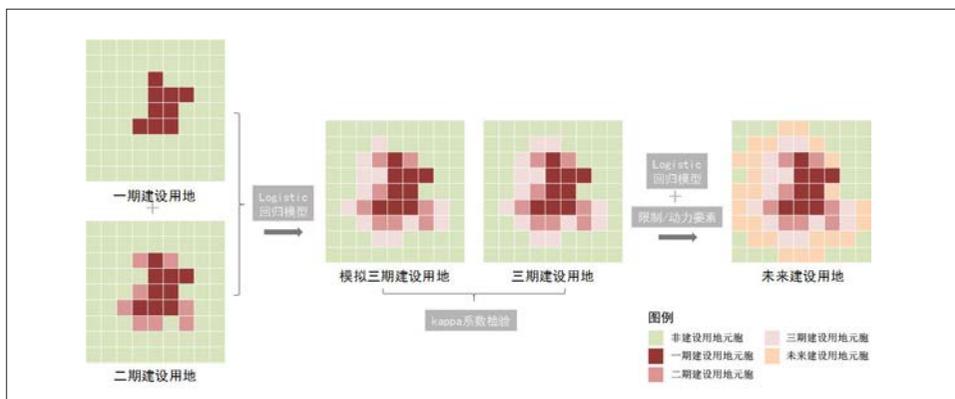


图7 CA模型运行逻辑示意图
Fig.7 Logic diagram of cellular automata model

资料来源:笔者自绘。

3.2 保护与开发潜力格局识别

3.2.1 保护格局识别

基于“双评价”成果(见图8a-图8c)、基本农田保护区(见图8d)、生态保护红线(见图8e)等限制条件,对流域空间进行国土空间保护格局分析。总体来看,流域内的伏牛山、太行山、黄河干流沿岸等山水系统性特征明显及灾害危险性高的区域识别为开发强限制区域,灾害危险性低的东南部平原地区识别为开发弱限制区域,流域东部的大部分平原地区由于受基本农田保护影响,识别为开发较强、较弱限制区域(见图8f)。

3.2.2 开发潜力格局识别

基于“双评价”成果的城镇建设适宜性(见图9a)、区位优势度(见图9b)及人口潜力(见图9c)要素综合分析,识别国土空间开发潜力格局:东西向沿黄河中游—中下游转换段,南北向以京广铁路为轴,形成以洛阳、郑州、焦作、新乡、许昌为核心的强动力发展区域,较强动力发展区域则散布于强动力发展区域及流域东南部的商丘、周口,西南、西北部山区则大部分为弱动力发展区域(见图9d)。

基于多源数据融合的保护与开发利用耦合分析,对潜力空间与限制要素进行叠加分析,将河南省黄河流域分为4类空间,形成强动力—弱限制、弱动力—弱限制、强动力—强限制、弱动力—强限制4类空间格局分区(见图10)。①强动力—弱限制区域:此区域为重点开发区,可根据城镇发展动力进行城镇开发。②弱动力—弱限制区域:此区域为限制开发区。③强动力—强限制区域:此区域需重点进行开发分类管控。④弱动力—强限制区域:此区域为禁止开发区,需严格进行空间管控。

基于以上底图数据,以CA模型常规保护底图下的城市惯性扩张模型为基础,精准识别城镇发展驱动力,制定差异化的流域城市发展动力模型,可实现驱动强动力地区优先快速发展,抑制弱动力地区精明增长。

3.3 CA模型支撑多情景模拟

3.3.1 多目标导向下的多情景设定

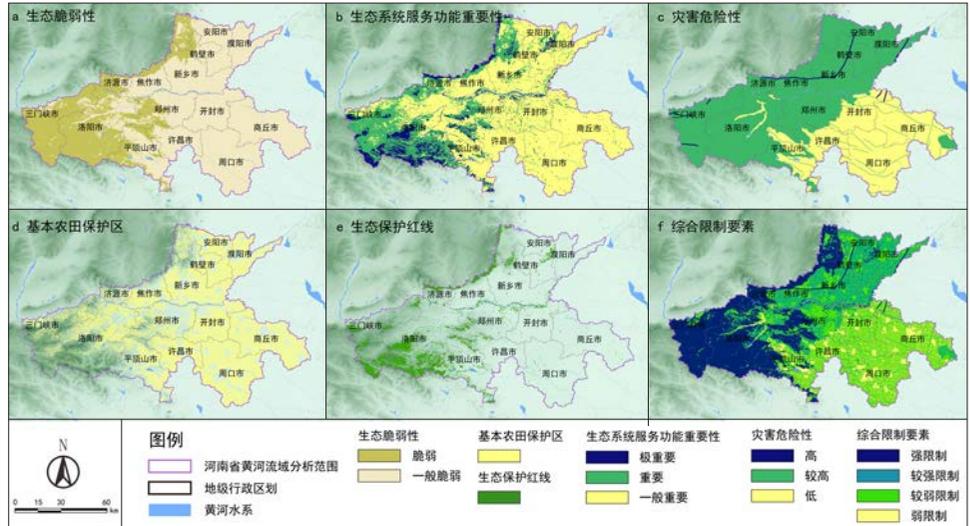


图8 国土空间开发限制要素分析图

Fig.8 Restrictive elements of territory development

资料来源:笔者根据黄河流域国土空间“双评价”结果绘制。

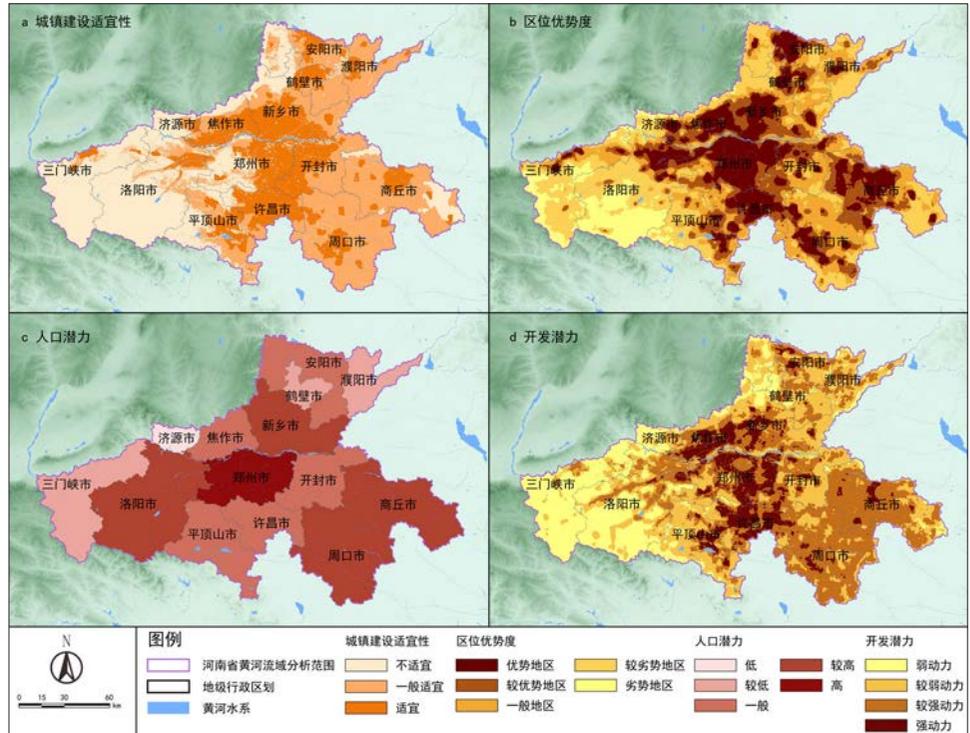


图9 国土空间开发潜力要素分析图

Fig.9 Potential factors for territory development

资料来源:笔者根据黄河流域国土空间“双评价”结果和统计年鉴数据绘制。

城镇发展从以往的规模拓展型向效率增进型转变^[26]。基于黄河流域高质量发展要求,需要协调好上中下游、各城市之间的发展与保护关系,满足多利益主体、多目标情境下的发展诉求,实现黄河流域生态环境建设与环境保护、产业发展与布局、

城乡发展与城乡统筹一体化发展。基于此,进行本次城镇建设用地多情景模拟的情景设定:路径依赖情景、高质量发展情景(见表1)。

路径依赖情景:作为对照情景模拟现有发展路径下流域城镇建设用地的扩展情况,即对流域

的城镇建设用地总量不作约束,以第一期至第二期的城镇建设用地年均增长速度作为未来的用地增长速度并模拟迭代到规划期末,形成规划期末(2035年)城镇建设用地的模拟结果。此情景下的城镇建设用地增长不添加任何驱动力条件,可与高质量发展情景作增速与增量的对比分析。

高质量发展情景:作为规划干预程度不同的两种情景,基于城镇规模预测结果,设置总量限定下的总量约束情景与分区县建设用地限定下的分区县约束情景,研判基于城镇规模预测与多目标协调下的流域增量分配模型结果的差异性。

3.3.2 模拟结果多维比对

基于3个情景模拟结果(见图11)进行城镇用地增量与增率分析(见图12)发现,各地市因发展基础、动力及限制条件不同,导致增长态势存在差异。本文重点分析路径依赖情景与高质量发展情景的差异,以及两个高质量发展情景之间的差异,以发现规划干预对城镇空间拓展的影响和干预方式对城镇空间拓展的影响强度。

通过对比分析发现不同区县在3种情景中呈现不同的空间扩展特征,路径依赖情景与总量约束情景空间扩展的增率趋势大体一致,而受规划干预较多的分区县约束情景则存在明显的抑制与促进发展区域。大致可分为3种:(1)原空间增长较为明显的京广铁路沿线的安阳—郑州、黄河北岸的焦作—新乡—濮阳一线城市,具有先发优势,在路径依赖发展情景中仍处于快速增长趋势,在高质量发展情景中受生态保护等多种发展限制条件的作用会使发展速度趋缓。(2)大部分平原农业城市(如周口市、商丘市等),或受大城市虹吸作用影响较大的城市(如开封市),以及产业基础好、上升潜力较大的城市(如济源市),在高质量发展情景下,由于城市自身发展空间较大或人口吸引力较强,具备了较好的后发优势。(3)还有一类城市因高质量发展情景下的限制条件与潜力因素对城镇空间扩展影响较小或正负影响相互抵消,使城镇空间扩展速度没有发生明显变化,但城镇发展路径及空间格局将会受到影响(如平顶山市、三门峡市等)。

通过以上对模拟结果的对比分析发现,规划干预对都市圈地区城市的极化与扩散发展起到积极作

表1 多情景模拟指标体系表
Tab.1 Multi-scenario simulation index system

类别	指标项	计算方法	模拟情景		
			路径依赖情景 总量不约束情景	高质量发展情景 总量约束情景 分区县约束情景	
扩展 规律	人口潜力	3期人口总量 (2005年/2010年/2015年)	✓	✓	✓
	经济活力	3期GDP总量 (2005年/2010年/2015年)	✓	✓	✓
	城镇建设 用地	3期城镇建设用地 (2005年/2010年/2015年)	✓	✓	✓
开发 潜力	交通优势度	道路网密度	—	✓	✓
	城镇建设 适宜性	双评价城镇建设适宜性分级	—	✓	✓
	人口潜力	人口总量表征	—	—	✓
开发 限制	生态系统 服务功能 重要性	双评价生态重要性分级	✓	✓	✓
	生态脆弱性	双评价生态脆弱性分级	✓	✓	✓
	生态红线	是否位于生态红线内	✓	✓	✓
	基本农田	基本农田作为限制要素或禁 建要素	✓	✓	✓
	安全风险	有洪涝、地质、地震等灾害风 险性程度共同表征	✓	✓	✓

注:表中“✓”表示此项指标参与此情景模拟,“—”表示此项指标未参与此情景模拟。

资料来源:笔者自制。

用,改善原都市圈集中连片发展的格局,促进中心城市对都市圈内中小城市的扩散带动作用;同时规划干预满足“大中小城市协调发展”的政策要求,改善了原大城市集中大量发展资源无序扩张的情况,使部分资源本底条件较好的中小城市得以同步发展。

4 结语与展望

基于CA与Logistic回归模型算法技术,利用国土空间规划“双评价”研究成果,综合考量流域各个区县的空间发展规律、保护与发展异质性特点,构建空间上相互作用和时间上因果关联的多情景模型,为流域城镇建设用地指标传导和城镇开发边界划示提供科学支撑,有效指导市县级国土空间规划的编制。

4.1 支撑规划决策

通过以上模拟与对比分析,发掘不同区县间的城镇空间扩展特征及规律,可制定差异化的流域发展对策。

控制城市无序蔓延:通过规划手段控制大城市以路径依赖城市扩展方式进行的无序蔓延,如郑州市、安阳市等城市。

促进大都市区周边、建设条件较好的城市发展:(1)促进郑州市周边城市发展,形成大都市区发展格局,如开封市、许昌市等城市;(2)促进城市建设条件较好的城市,如周口市、商丘市等以农业为基础的城市发展。

引导部分城市高质量发展:(1)城镇连绵带城市,如新乡市、鹤壁市、平顶山市等城市,现状建设用地较少,增长潜力较好,但是需要防范环境风险及对农业、生态空间的消耗;(2)黄河中上游城市,如三门峡市、济源市等,受生态敏感性地区影响,发展速度受限制。

同时,可根据城镇用地扩展模拟结果,从流域尺度进行城镇开发边界划示,从而促进流域城镇空间合理布局、引导大中小城市协同发展。基于城镇开发边界划示方案,可以进行“双评价”结果中的农业生产与城镇建设双适宜区判断、基本农田调整建议等工作,从而形成由现状分析、发展情景模拟、决策支撑组成的规划分析链条,为科学统筹生态、农业与城镇空间划定提供支撑。

4.2 存在不足与未来展望

目前研究尚存在以下不足之处:(1)由于

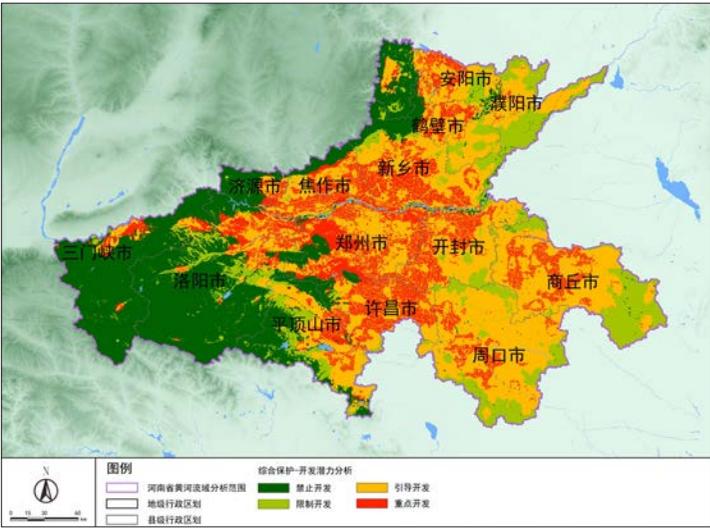


图10 国土空间综合保护—开发潜力分析图
Fig.10 Analysis diagram of comprehensive protection and development potential for territory development

资料来源:笔者根据黄河流域国土空间“双评价”结果和统计年鉴数据绘制。

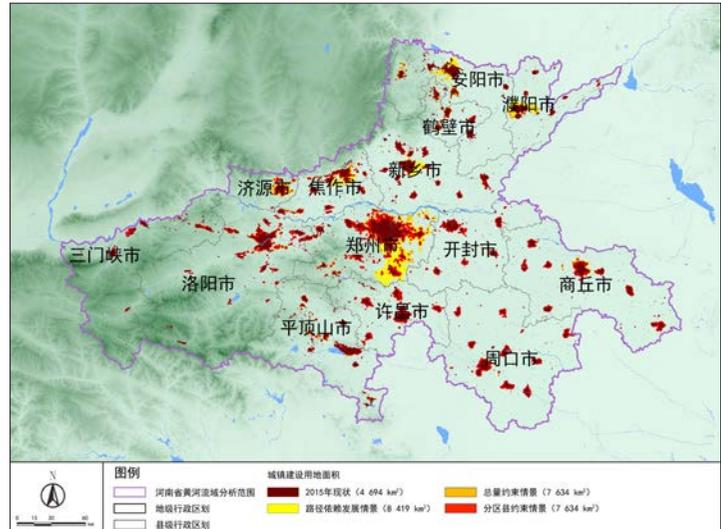


图11 城镇空间扩展多情景模拟结果
Fig.11 Multi-scenario simulation results of urban space expansion

资料来源:笔者根据黄河流域国土空间“双评价”结果、统计年鉴和TM影像解译数据绘制。

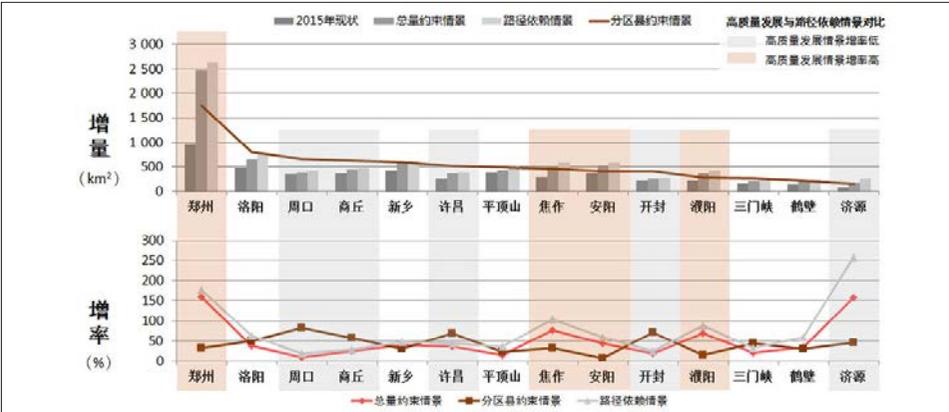


图12 河南省黄河流域城镇建设用地多情景模拟结果增量与增率分析
Fig.12 Analysis of increment and rate of multi-scenario simulation results of urban construction land in the Yellow River Basin of Henan Province

资料来源:笔者根据黄河流域城镇空间拓展多情景模拟结果绘制。

部分数据无法获取或数据精度存在瑕疵,导致模拟结果的准确性有所欠缺。(2) CA模型需要进行大量数据的处理,尤其是流域尺度数据数量及精度都对计算机的计算能力提出了更高要求,导致部分模拟不得不降低元胞精度。(3) CA模型在空间决策过程中对人类主观影响因素的模拟存在局限性^[27],需要更多的地理空间知识的解读与加入,以增加模拟结果的精准度。

基于本轮国土空间规划的《城镇开发边界划定指南(试行)》要求,为便于规划技术人员操作,本文所述城镇开发边界划示模型已经实现平台化

操作,并将根据后续国土空间规划项目及相关研究需求的推进,不断完善相关模型架构、源代码及平台界面,以提高平台的用户友好性,助力国土空间规划工作的数字化方向转变与科学化编制。

(在此感谢河南省国土资源调查规划院总规划师张红方、主任汪慧芳、高级工程师柴世界、尚良有、工程师穆利娟提供《河南省黄河流域资源环境承载能力与国土空间开发适宜性评价》成果,作为基础数据支撑本文顺利完成;同时感谢北京清华同衡规划设计研究院副院长郑筱津、副总规划师汪淳、总体研究中心总工程师欧阳鹏在论文编撰过程中给予的帮助。)

参考文献 References

- [1] 欧阳晓,朱翔. 中国城市群城市用地扩张时空动态特征[J]. 地理学报, 2020, 75 (3): 571-588. OUYANG Xiao, ZHU Xiang. Spatio-temporal characteristics of urban land expansion in Chinese urban agglomerations[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(3): 571-588.
- [2] 陈干,闫国年,王红. 城市模型的发展及其存在问题[J]. 经济地理, 2000 (5): 59-62, 71. CHEN Gan, LYU Guonian, WANG Hong. The development and problems of urban model[J]. Economic Geography, 2000(5): 59-62, 71.
- [3] 张媛媛,孟斌,朱海勇. 城市增长模拟模型研究综述[J]. 北京联合大学学报, 2014, 28 (1): 6-12. ZHANG Yuanyuan, MENG Bin, ZHU Haiyong. Review of urban growth simulation model[J]. Journal of Beijing Union University, 2014, 28(1): 6-12.
- [4] 周成虎,孙战利,谢一春. 地理元胞自动机研究[M]. 北京: 科学出版社, 1999. ZHOU Chenghu, SUN Zhanli, XIE Yichun. Study of geographical cellular automata[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [5] 程万港,陈万铭,陈焯丽,等. 基于非线性时变SEIR模型的新型冠状病毒肺炎传播机制[J]. 台州学院学报, 2020, 42 (6): 24-31. CHENG Wangang, CHEN Wanming, CHEN Yeli, et al. Modeling of COVID-19 transmission mechanism based on nonlinear SEIR model with time-varying delays[J]. Journal of Taizhou University, 2020, 42(6): 24-31.
- [6] 赵雅辉. 基于强化学习的城市道路突发事件拥

- 堵疏导决策方法研究[D]. 金华: 浙江师范大学, 2020.
- ZHAO Yahui. Research on decision-making method of urban traffic congestion dispersal under emergency based on reinforcement learning[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2020.
- [7] 易雨君, 谢泓毅, 宋劼, 等. 黄河口盐沼湿地植被群落适宜生境模拟 I: 理论[J]. 水利学报, 2021, 52(3): 255-264.
- YI Yujun, XIE Hongyi, SONG Jie, et al. Simulation of salt marsh vegetation community's suitable habitat in Yellow River Estuary I: theory[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(3): 255-264.
- [8] 黎夏, 叶嘉安. 主成分分析与 Cellular Automata 在空间决策与城市模拟中的应用[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2001, 31(8): 683-690.
- LI Xia, YE Jia'an. Application of principal component analysis and cellular automata in spatial decision and urban simulation[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2001, 31(8): 683-690.
- [9] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 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[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2005, 35(5): 464-473.
- HE Chunyang, SHI Peijun, CHEN Jin, et al. Land use scenario model based on system dynamics model and cellular automata model[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2005, 35(5): 464-473.
- [10] WU F, WEBSTER C J. Simulating artificial cities in a GIS environment: urban growth under alternative regulation regimes[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2000, 14(7): 625-648.
- [11] WHITE R, ENGELEN G. High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional system[J]. Computer, Environment and Urban System, 2000, 24: 383-400.
- [12] 邱炳文, 陈崇成. 基于多目标决策和 CA 模型的土地利用变化预测模型及其应用[J]. 地理学报, 2008, 63(2): 165-174.
- QIU Bingwen, CHEN Chongcheng. Land use change simulation model based on MCDM and CA and its application[J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(2): 165-174.
- [13] 杨青生, 黎夏. 基于遗传算法自动获取 CA 模型的参数——以东莞市城市发展模拟为例[J]. 地理研究, 2007, 26(2): 229-237.
- YANG Qingsheng, LI Xia. Calibrating urban cellular automata using genetic algorithms[J]. Geographical Research, 2007, 26(2): 229-237.
- [14] 黎夏, 叶嘉安. 基于神经网络的单元自动机 CA 及真实和优化的城市模拟[J]. 地理学报, 2002, 57(2): 159-166.
- LI Xia, YE Jia'an. Neural-network-based cellular automata for realistic and idealized urban simulation[J]. Acta Geographica Sinica, 2002, 57(2): 159-166.
- [15] 刘小平, 黎夏, 叶嘉安. 基于多智能体系统的空间决策行为及土地利用格局演变的模拟[J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 2006, 36(11): 1027-1036.
- LIU Xiaoping, LI Xia, YE Jia'an. Simulation of spatial decision-making behavior and land use pattern evolution based on multi-agent system[J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2006, 36(11): 1027-1036.
- [16] 黄清明. 流域规划的体系构建与规划思维方法初探[C]//活力城乡, 美好人居——人居——中国城市规划年会论文集 (12 城乡治理与政策研究). 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 11.
- HUANG Qingming. A preliminary study on the system build and planning methodologies of river basin planning[C]//Vigorous city and countryside, beautiful human settlements: the proceedings of Annual National Planning Conference in 2019. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 11.
- [17] 郭锐, 陈东, 樊杰. 国土空间规划体系与不同层级规划间的衔接[J]. 地理研究, 2019, 38(10): 2518-2526.
- GUO Rui, CHEN Dong, FAN Jie. Territory spatial planning system and the convergence between different levels[J]. Geographical Research, 2019, 38(10): 2518-2526.
- [18] 水利科学发展必须处理好八个关系系列述评[J]. 河南水利与南水北调, 2011(23): 1-2, 8.
- A series of comments on the eight relations about the scientific development of water conservation[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2011(23): 1-2, 8.
- [19] 郭杰, 包倩, 欧名豪. 基于资源禀赋和经济发展区域分异的中国新增建设用地指标分配研究[J]. 中国土地科学, 2016, 30(6): 71-80.
- GUO Jie, BAO Qian, OU Minghao. Study on incremental construction land quotas allocation in China based on resource endowments and economic development regional differences[J]. China Land Science, 2016, 30(6): 71-80.
- [20] 范祚军, 关伟. 差别化区域金融调控的一个分区方法——基于系统聚类分析方法的应用[J]. 管理世界, 2008(4): 36-47.
- FAN Zuojun, GUAN Wei. A division method of differentiated regional financial regulation: based on the application of systematic clustering analysis method[J]. Management World, 2008(4): 36-47.
- [21] 王琪. 实施差别化财政政策推进主体功能区建设[J]. 宏观经济管理, 2008(7): 42-43.
- WANG Qi. Implement differentiated fiscal policy and promote the major function-oriented zoning[J]. Macroeconomic Management, 2008(7): 42-43.
- [22] 邵子南, 杨皓然, 吴群. 省级政府新增建设用地指标空间配置的偏好研究——以江苏省为例[J]. 安徽行政学院学报, 2019(3): 44-52.
- SHAO Zinan, YANG Haoran, WU Qun. The provincial preferences in the newly added construction land quotas spatial distribution: a case study in Jiangsu Province[J]. Journal of Anhui Administration Institute, 2019(3): 44-52.
- [23] 叶玉瑶, 李小彬, 张虹鸥. 珠江三角洲建设用地开发利用极限研究[J]. 资源科学, 2008, 30(5): 683-687.
- YE Yuyao, LI Xiaobin, ZHANG Hong'ou. Limits on construction land use in the Pearl River Delta[J]. Resources Science, 2008, 30(5): 683-687.
- [24] 王蓓, 黄晓春, 孙道胜, 等. 国土空间规划量化研究框架体系构建思考[J]. 城乡规划, 2019(6): 28-36.
- WANG Bei, HUANG Xiaochun, SUN Daosheng, et al. Thoughts on the construction of a quantitative research framework system for territorial spatial planning[J]. Urban and Rural Planning, 2019(6): 28-36.
- [25] 位欣. 基于省—市县两级事权的城镇开发边界划定与管控[J]. 城乡建设, 2019(23): 23-25.
- WEI Xin. Delineation and management of urban growth boundaries based on the provincial-city-county two-level authority[J]. Urban and Rural Development, 2019(23): 23-25.
- [26] 杨兰桥. 推进我国城市群高质量发展研究[J]. 中州学刊, 2018(7): 21-25.
- YANG Lanqiao. Research on promoting the high quality development of urban agglomeration in China[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2018(7): 21-25.
- [27] 柯长青, 欧阳晓莹. 基于元胞自动机模型的城市空间变化模拟研究进展[J]. 南京大学学报 (自然科学版), 2006(1): 103-110.
- KE Changqing, OUYANG Xiaoying. The advances in modeling urban spatial change based on cellular automata[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2006(1): 103-110.