

DOI: 10.5846/stxb202110152905

李海萍, 王语萌, 杜佳琪. 基于保护生态服务价值的县域城市扩展情景分析——以浙江省安吉县为例. 生态学报, 2022, 42(19): 7858-7870.

Li H P, Wang Y M, Du J Q. Scenario analysis of county expansion based on the value of ecological services: Taking Anji County in Zhejiang Province as an example. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7858-7870.

基于保护生态服务价值的县域城市扩展情景分析 ——以浙江省安吉县为例

李海萍^{1,*}, 王语萌¹, 杜佳琪²

1 中国人民大学环境学院, 北京 100872

2 中国人民银行西安分行, 西安 710075

摘要: 县域城市的可持续发展是推动生态文明建设、实现特色新型城镇化战略目标的重要基础, 以保护生态服务价值为目标的县域城市扩展研究具有重要理论和现实意义。运用 SLEUTH 模型, 以两山理论发源地安吉县为例, 并与毗邻的广德市进行对比, 预置了两县市现有发展模式和生态保护模式两种不同的发展情景, 并基于生态服务价值进一步将生态保护情景分为保护调节服务、供给服务、支持服务和娱乐服务 4 种情景。对不同情景下的 2030 年建设用地扩展进行模拟和对比分析, 以探究生态保护情景下的建设用地扩展对县域经济的影响。结果显示: (1) 现有发展模式下, 两县市仍围绕当前建设用地向周围蔓延, 在明显的外延式增长下还伴随着内部填充, 集中扩张区均围绕县城及各镇政府所在地并呈现集中连片趋势, 这种模式势必对生态环境产生负面影响; (2) 生态保护情景下, 两县市均在一定程度上抑制了建设用地的扩张, 安吉县扩张面积最低减少 1.43%, 广德市扩张面积最低减少 7.57%。 (3) 相比于现有发展模式, 两县市对林地的占用量显著降低, 安吉县对林地的占用减少了 1.79km², 广德市减少了 2.44km²; (4) 安吉县相较广德市的建设用地扩展更多依赖耕地转换, 因安吉县最先走生态保护道路, 故生态保护情景对建设用地扩展的影响已明显小于广德市。

关键词: 县域城市; SLEUTH 模型; 建设用地扩展; 生态服务价值

Scenario analysis of county expansion based on the value of ecological services: Taking Anji County in Zhejiang Province as an example

LI Haiping^{1,*}, WANG Yumeng¹, DU Jiaqi²

1 School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China

2 The People's Bank of China Xian Branch, Xi'an 710075, China

Abstract: County cities' sustainable development is one of the most important foundations to both the promotion of ecological civilization and the realization of the strategic goal of new urbanization. Researches on urban expansions aimed to the protection of the values of ecological service functions are also of paramount importance to theoretical and practical domain. The birthplace of "Two Mountains Theory" of Anji County in Zhejiang province had been taken as the study area and its adjacent city of Guangde was chosen as a contrast. Two different development scenarios were set based on the SLEUTH model, one was the continuing of the current development mode and the other was largely considered the protection of ecological service functions. Four ecological service functions were further distinguished based on their ecological values which were regulation service, supply service, support service, and entertainment service. Expansion of construction land in the year of 2030 was simulated under the two different scenarios. Then a detailed comparative analysis was conducted to

基金项目: 中国人民大学中央高校建设世界一流大学(学科)和特色发展引导专项资金项目

收稿日期: 2021-10-15; **网络出版日期:** 2022-05-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lhp@ruc.edu.cn

reveal the differential impacts on county economy in Anji County and Guangde City based on spatial statistics. The results show that: (1) under the scenario of continuing the current development mode, both counties were sprawl around the existed construction land. Outwards spreading were dominant and accompanied by small inner fillings. Main and large expansion areas were those that around the county towns and shown a tendency of contiguous. Such patterns might have some negative impacts on ecological environment; (2) under the protection scenarios of ecological service functions, expansion of construction land in both counties were restrained to some extent. The lowest expansion area of Anji County would be decreased at least by 1.43% and by 7.57% in Guangde City; (3) Compared with the current development scenario, the amount of forestland occupied by construction land in both counties were decreased significantly. It was decreased by 1.79km² in Anji County and by 2.44km² in Guangde City respectively; (4) Compared with the city of Guangde, the expansion of construction land in Anji County was more relied on the conversion of farmland. Since Anji County is the first one to take ecological protection road and has already adjusted its development mode, the impacts of construction land expansion on ecosystem services and county economy were smaller than that in Guangde City.

Key Words: county cities; SLEUTH model; construction land expansion; ecological service value

经济发展、人口增长及城市化导致城市建设用地不断扩张,超大规模城市用地紧缺和资源供给不足的矛盾日益凸显。国家新型城镇化规划(2014—2020年)中已明确提出优化城镇规模结构,增强中心城市辐射带动功能,加快发展中小城市,有重点地发展小城镇,促进大中小城市和小城镇协调发展。不合理的城市扩张对生态环境造成威胁,如何协调城市发展和生态保护之间的关系,在保护生态的前提下实现社会经济的可持续发展,不仅是学者们关注的焦点,也是城镇化发展急需解决的问题。

由于城市扩展和演化过程十分复杂,国内外学者往往通过模型进行模拟,代表性的有美国社会学家提出的伯吉斯同心圆模型、霍伊特提出的扇形模型,1945年提出的多核模型还考虑了城市的多元结构。德国城市地理学家提出了著名的中心地理论,描述了影响中心地的市场、交通和行政3个原则^[1]。根据是否具有时间维度将城市扩展分为静态和动态两种类型。静态模型以数理统计和相互作用为基础,统计模型通常无法反映城市形成和发展中的变化过程,以空间相互作用为基础的引力模型由地理学家 Ira S. Lowry 于 1964 年建立,1966 年 R.A. Grain 对其进行了重写,增加了经济方法,之后发展为格瑞—劳利模型,被认为是一个通用的城市扩展模型^[2]。随着计算机技术的进步,城市动态模型分化出两种代表性方向,一是基于微分方程的系统动力学模型,具有仿真功能及“自上而下”的特点;二是离散动力学模型,以分形、主体及元胞自动机等为基础^[3]。元胞自动机(CA)最初由 Ulan 和 Von Neumann 提出^[4],Clarke 等又据此提出了 SLEUTH 模型,并对华盛顿进行了模拟^[5];此后,Waddell 还提出了 UrbanSim 模型^[6],以居民、开发商、当局等为研究对象,基于城市规划、交通需求和政策等综合条件进行城市扩展模拟。国内学者将引入的动态模型进行改进,不仅从局部、区域及全局约束上对 CA 模型及其影响进行分析,还将灰度分级引进 CA 模型,作为连续变化的反应方式,以纠正传统 CA 模型的不足^[7],其他研究结果也证明了 CA 模型适用于我国的城市发展特点^[8-11]。

SLEUTH 模型基于 CA 模型对城市演变进行模拟,并对未来发展趋势进行解释和预测^[5],被 Silva 和 Clarke 证明适用于里斯本和波尔图,北美以外的应用也证明了其普适性^[12]。Dietzel 和 Clarke 还采用 OSM 优化指数进行模型校正^[13]。目前已应用于多个不同经济发展水平的城市^[14-16]。国内学者也将其用于不同城市的扩展预测^[17-21]并探讨了模型参数对模拟结果的影响^[22]。

SLEUTH 模型目前主要用于大中城市模拟,对县域城市的借鉴意义有限。因此,本研究将以县域这一中国基本行政单元为空间尺度,以 2000—2030 年为时间尺度,选取两山理论的发源地浙江省安吉县为研究区,以与之毗邻的安徽省广德市为对照,预置两县市现有发展模式 and 生态保护情景,对比两县市建设用地扩展对经济的影响,探索平衡城镇化和生态保护、引导生态优先的县域城镇化发展道路,为实现中国特色新型城镇化战略目标和生态文明建设提供理论参考。

1 数据与方法

安吉县早在 2000 年前后就意识到城镇扩张对生态环境的负面影响并率先走上生态治县道路,“绿水青山就是金山银山”就是习近平考察该县时提出的。广德市位于苏浙皖交界处,与安吉县相邻,具有相似的自然、社会和基础条件上的可比性^[23],传统的发展道路使工业一直是其支柱产业。

1.1 数据

本研究涉及的数据有土地利用、DEM、遥感影像、统计年鉴和规划报告等。2002 年我国提出了走中国特色的城镇化道路,2012 年进一步明确了走中国特色新型城镇化道路,本文据此确定了五年时间间隔,选取的 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 5 期土地利用数据均来自于地理国情监测云平台,2020 年数据基于 2018 年更新得到。土地利用分类参考中科院资源环境科学数据中心的土地利用遥感监测分类体系中的 6 个一级类,25 个二级类。30m 分辨率 DEM 及 Landsat-5(TM)、Landsat-8(OLI)数据来源于 USGS Earth Explorer,其中,SRTM 的 DEM 为经过处理后的产品,遥感影像的云量均低于 10%。矢量道路数据主要来源于开源数据库网站 Open Street Map,部分道路基于 2000—2015 年中国交通地图集进行了数字化更新。矢量行政边界来源于自然资源部标准地图中浙江和安徽省的地理信息中心。统计指标采用反映社会经济发展的人口、GDP、三个产业的增加值及社会消费品零售总额等,来源于统计年鉴和统计公报。

1.2 SLEUTH 模型方法

SLEUTH 是 CA 模型中最经典的模型之一,由 Keith C. Clarke 于 1997 年用 C++ 语言开发,由于集成了 GIS 功能,不仅可进行多时空尺度模拟,精度也高于 CLUE-S 等方法^[24]。通过调用城市发展历史数据并调整排除图层和模型参数,可设置不同政策和发展条件下建设用地的未来发展情景,其中的增长模式和土地利用模式既可独立运行亦可相互结合,尽管对经济和人口等因素的考虑有所欠缺,但本研究重点关注生态约束,因此仍可利用模型优势解释和预测城镇未来发展。

SLEUTH 模型以增长环为单位进行模拟,运行原理可看成一系列增长环的叠加,将研究区分为一个一个的元胞,分别定义为城市或非城市,模拟时需对增长环内的增长系数进行初始化,之后在自发增长、边缘增长、新扩展中心增长和道路影响增长 4 种规则的综合作用下,元胞种子开始发展,模拟过程中城市增长率若超出上下临界值,则需根据所设规则重新调整增长系数,并将最终模拟结果输入模型,用于后续扩展模拟。扩展系数、繁殖系数、蔓延系数、道路重力系数和坡度阻抗系数是影响增长的五个参数,可根据不同的增长规则调整。

1.2.1 输入数据集的建立

将地形、坡度及交通作为约束条件,以范围和分辨率一致的五期图层作为输入数据,因模型要求 GIF 或 8bit-unsigned 二值化图层,故对各图层栅格化后建立输入数据集。

(1) 坡度图:坡度作为影响建设用地扩展的重要因素都会被纳入模型。安吉县地形复杂,地貌类型多样,东、西和南部都以山地为主,仅中部为低缓盆地。广德市南部为低海拔山地,北部为丘陵,中部较平缓,以岗台地和平原为主。因此坡度也是影响两县市建设用地扩展的重要因素,从 30m DEM 中派生出以百分比表示的坡度图,取整后的值域为 0—100。

(2) 道路交通图:基于量化的道路交通图制作相应年份的 5 期栅格图层,并将所有道路赋值为 1,非道路为 0。

(3) 排除图层:将现实中无法进行建设的区域设置为排除图层。灰度值介于 0—100,越接近 0,能进行建设的概率越大,反之则不易建设。以 50 为模型界限,大于 50 的区域不鼓励进行城市建设,小于 50 的可进行一定程度的建设。水域通常不适于建设,设为 100。

(4) 县域范围及城市建设用地:将 5 期土地利用中的城镇用地及其他建设用地合并为城镇建设用地并赋值为 1,其余地类为 0,得到二值化的建设用地图层。

(5) 地貌晕渲图:根据 DEM 生成地貌晕渲图以突出山体阴影,此图层既不参与模型计算也不影响模拟结

果,仅用作地形参照。

处理后的各输入数据层见图 1。

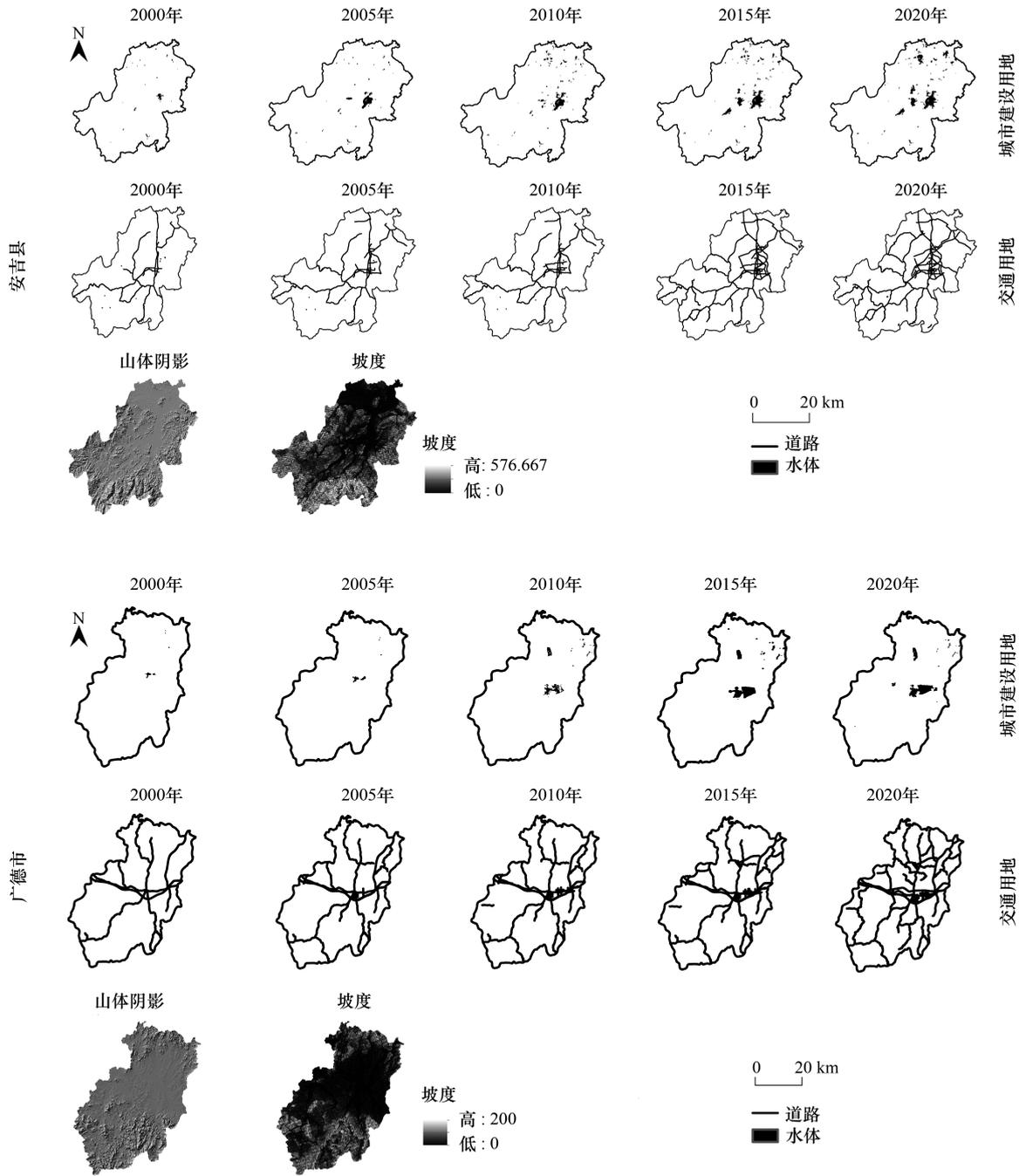


图 1 安吉县和广德市各期的输入图层
Fig.1 Input layers of Anji and Guangde

统一各图层坐标系和空间参考,经掩膜提取使范围一致。综合考虑各图层的分辨率、县域总面积及城市景观的平均斑块面积,最终选取 30m×30m 栅格大小作为研究的空间尺度。

1.2.2 模型校正

SLEUTH 3.0 要求 Linux 运行环境,通过 Cygwin 软件在 Windows 中虚拟出 Linux 环境,以保证模型的高效、稳定和安全运行。此外,30m 分辨率对计算机的运算能力要求较高,因此采用云服务器完成运算。

模型校准目的是确定各参数的最佳数值^[25],模型包括测试、校正和预测三部分,测试模块验证模型能否正常运行。包含粗校正、精校正和终校正的校正模块耗时最长,各级校正均要求次数不等的蒙特卡洛迭代,迭代次数的取值为[0—100],校正时可逐步缩小,对校正结果进行计算和排序可确定最终参数。

校正时的可选指标有 compare 面积系数、Lee-Sallee 形状系数和优化指数 OSM(Optimal SLEUTH Metric)等,系数越大拟合结果越符合实际情况。不同研究区适用的校正指标不同,为选取最合适的指标,经反复对比后发现 Lee-Sallee 形状系数的效果优于 OSM 指数,故将其作为参数选取的指标。选取 Lee-Sallee 系数排序前五的结果,继续缩小下一步的参数范围,将终校正的最大值作为最优系数带入参数获取步骤,从而得到最佳增长参数值及最优参数集。

1.2.3 模型参数设置

以地形、坡度和交通为约束,将研究区分为若干元胞并定义为城市或非城市,分别选择自发增长、边缘增长、新扩展中心增长和道路影响增长 4 种规则并计算元胞变化结果。影响增长的参数为扩展系数、繁殖系数、蔓延系数、道路重力系数和坡度阻抗系数,通过设置不同规则进行参数调整。

Lee-Sallee 形状指数 S ^[26] 计算如下:

$$S = (A \cap B) / (A \cup B)$$

式中, A 为模拟的城市面积, B 为真实城市面积。 S 取值为 0—1,值越大匹配度越高。相关模型研究显示^[14], S 值很少大于 0.6,0.35 以上即说明模拟结果可接受,安吉县和广德市的 S 平均值分别为 0.393 和 0.388。

由于两县市以山地为主,因此将坡度阈值调整为 25,即坡度大于 25%的元胞不能转变为城市,其余参数设置见表 1:

表 1 模型参数设置
Table 1 Model parameter settings

名称 Name	参数 Parameter
模拟期 Simulation period	2000—2030 年
分辨率 Resolution ratio	30m
交通道路图 Transportation	2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年
城市范围图 Urban	2000 年、2005 年、2010 年、2015 年、2020 年
坡度图 Slope	基于 DEM 派生的百分比坡度(%)
排除图 Exclusion	排除水体(校正过程)
阴影图 Hillshade	基于 DEM 派生的阴影图层
蒙特卡洛迭代次数 Monte Carlo	粗校正:5;精校正:7;参数获取:9;模拟:100
自修改规则 Self-modification rules	CRITICAL_SLOPE(临界坡度)=25;BOOM=1.01;BUST=0.09

经粗校正、精校正、终校正及参数获取后,得到 5 个增长系数的最佳组合,见表 2。

表 2 安吉县和广德市模型增长系数的最佳组合
Table 2 The best combination of model growth coefficients in Anji and Guangde

地区 District	增长系数 Growth factor				
	扩散系数 Diffusion	繁殖系数 Breed	蔓延系数 Spread	坡度系数 Slope	道路引力系数 Road gravity
安吉县	2	1	97	84	36
广德市	1	2	100	22	4

城市扩展受多因素共同作用,不同城市的固有发展特征也存在差异,因此扩散系数的排列也有所不同。表 2 的扩散系数一定程度上反映了两县市扩展的基本特征,因扩散系数和繁殖系数都不大,说明既不属于飞地型增长,也不易发展为新的增长极。蔓延系数接近表明均为外延性增长,安吉县道路引力系数大于广德市,说明其道路沿线的城镇建设用地增长概率更大。

1.2.4 模拟结果检验

将相应年份的模拟结果与实际情况进行对比,以检验两者的一致性。因最终模拟年份为 2030 年,故将 2010 年模拟结果用于精度评价,预测精度用 Kappa 系数分类评价法,安吉和广德的 Kappa 系数分别为 0.6968 和 0.6192,一致性显著,说明模拟精度可接受。同时采用用户精度(UA)和总体精度(OA)进行验证,安吉和广德的总体精度分别为 85.49%和 77.72%,见表 3。

表 3 安吉县和广德市土地利用分类精度
Table 3 Land use classification accuracy in Anji and Guangde

类别名称 Category	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grass land	建设用地 Construction land	水体 Water area	裸地 Bare land	OA/%	Kappa 系数 Kappa coefficient
UA/%								
安吉	73.20	91.02	60.60	93.88	95.07	76.15	85.49	0.6968
广德	67.31	89.69	62.30	66.24	73.30	63.44	77.72	0.6192

UA:用户精度 User's Accuracy;OA:总体精度 Overall Accuracy

1.3 情景预设

情景分析旨在描述和分析事物发展的各种可能性,对比不同发展路径下的状态,从而为决策提供依据^[27]。模型预测时通过修改增长系数、调整排除图层来设置不同情景,模拟未来土地利用变化^[28]。SLEUTH 的多情景模拟主要有三种方式,一是通过调整排除图层引导模拟方向;二是改变自修改规则中的参数以增减扩展速度;三是修改增长系数改变扩展方式。本研究通过调整排除图层预设了现有发展和生态保护两个情景,分别融入城镇建设用地扩展导向并持续至未来时间。基于最优系数及预设条件,运行预测模块并得到 2020–2030 年两县市的城镇建设用地扩展概率分布。

1.3.1 现有发展模式

此模式遵照历史发展规律,认为过去的发展是连续的,城市扩展不受生态环境、规划政策等约束,基于当前模式继续扩展。仅将河流和湖泊等作为排除图层并将其值设为完全不能被城市化的 100,见图 2,其他地类将不受限制且都有可能被城市化。

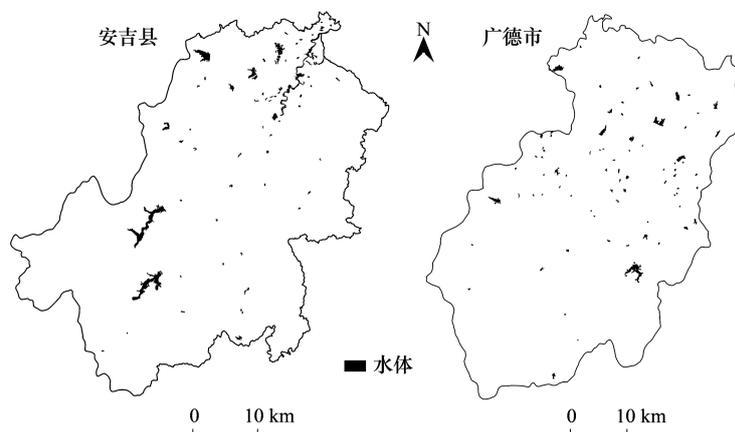


图 2 现有发展模式下的排除图层

Fig.2 Exclusion layer in the existing development mode

1.3.2 生态保护情景

城市扩展无疑对生态系统的结构和功能产生影响,两者不仅关系复杂,也相互影响。对生态服务价值进行评估可量化人类对生态环境的影响,当量修正法是最常用的方法。本研究主要考虑供给、调节、支持和娱乐四项服务价值,并分别模拟城镇建设用地扩张对其影响,以便差别化地保护生态系统的服务功能。

当量法以粮食平均产量为依据,在区分不同生态服务功能的基础上,量化单位面积的生态服务价值,从而计算不同用地类型的生态服务价值。本研究以谢高地改进后的中国生态系统单位面积生态产品和服务价值当量表为基础^[29],并参照胡赛和蒋茜等的方法^[30-31],通过分析研究区的实际情况,调整并确定了生态服务的价值当量。将平均粮食单产价格的 1/7 作为当量因子的经济价值,计算出安吉县和广德市的单因子经济价值分别为 2319.64 元/hm²和 1984.68 元/hm²,再计算生态服务价值和不同生态功能的服务价值,公式如下:

$$V_{ES} = \sum_{i=1}^n (A_i \times V_{c,i})$$

$$V_{ES,f} = \sum A_i \times V_{c,f,i}$$

式中, V_{ES} 为生态系统服务价值(元); A_i 为 i 地类的面积(hm²); $V_{c,i}$ 为 i 地类单位面积的生态服务总价值(元 hm⁻² a⁻¹); $V_{ES,f}$ 为第 f 项生态服务价值(元); $V_{c,f,i}$ 为 i 地类单位面积 f 项生态服务总价值(元 hm⁻² a⁻¹)。结果见表 4。

表 4 安吉县与广德市不同土地类型不同生态功能的服务价值/(万元/hm²)

Table 4 Service value of different ecological functions of different land types in Anji and Guangle

功能 Function	地区 District	类别 Category	森林 Forest	草地 Grass land	耕地 Cultivated land	水域 Water area	未利用地 Unused land	建设用地 Construction land	总服务 价值 Service value	价值 占比 Ratio
供给服务 Supply service	安吉	食物生产	0.054	0.142	0.286	0.078	0.004	0.002	2.042	2.72%
		原料生产	1.407	0.024	0.029	0.016	0	0		
	广德	食物生产	0.058	0.075	0.219	0.159	0	0.002	0.849	1.13%
		原料生产	0.131	0.111	0.049	0.046	0	0		
调节服务 Regulation service	安吉	气体调节	1.894	0.378	0.143	0.351	0	-0.561	25.708	34.25%
		气候调节	1.461	0.426	0.255	3.428	0	0		
		水文调节	1.732	0.378	0.172	7.005	0.012	0		
		废物处理	0.709	0.619	0.203	7.099	0.004	0		
	广德	气体调节	0.431	0.391	0.177	0.153	0.004	-0.480	25.959	34.58%
		气候调节	1.290	1.034	0.092	0.454	0	0		
		水文调节	0.941	0.758	0.297	20.291	0.006	0		
		废物处理	0.040	0.036	0.031	0.014	0	0		
支持服务 Support service	安吉	土壤保持	2.111	0.922	0.418	7.099	0.008	0.005	14.232	18.96%
		生物多样性	1.764	0.515	0.203	0.976	0.133	0.079		
	广德	土壤保持	0.526	0.476	0.103	0.185	0.004	0.004	2.820	3.76%
		生物多样性	0.478	0.433	0.034	0.506	0.004	0.067		
娱乐服务 Entertainment service	安吉	美学景观	0.693	0.019	0.003	1.933	0.004	0.002	2.653	3.54%
	广德	美学景观	0.210	0.191	0.015	0.375	0.002	0.002	0.795	
总服务价值 Total			15.929	6.929	2.727	50.168	0.184	-0.878	75.059	100.00%

对结果进行 z-score 标准化并作为排除图层的赋值依据,5 个等级的分级标准为:1 级(0—10)、2 级(10—40)、3 级(40—60)、4 级(60—90)、5 级(90—100),等级越大,生态保护价值越高,越需要限制城镇建设用地的扩张。不同保护情景下的排除图层见图 3。

结合表 4 和图 3,两县市的调节服务价值差距较小,且占比最高,在调节服务方面的发展均较好,阻力等级较低;两县市的供给服务阻力等级都较高,说明保护粮食和原料生产的生态功能要优先于城镇建设用地的扩展需求;安吉县的支持和娱乐服务价值占比明显高于广德市,说明安吉县最早走生态优先道路的成效显著,后续发展中生态服务功能对其城镇建设用地的扩展约束较小,而广德的生态发展相对滞后,未来发展的约束力也较大。

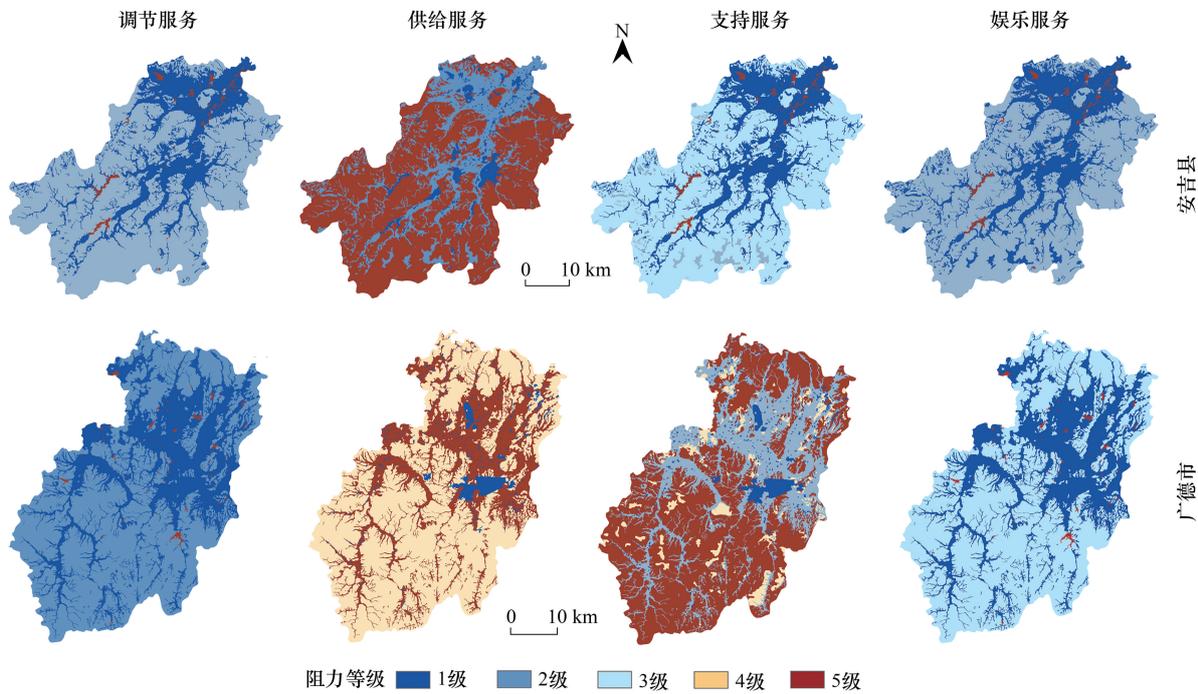


图 3 保护不同生态服务功能时的城市扩展阻力等级

Fig.3 Urban extension resistance level when protecting different ecological service functions

2 结果与讨论

在预测模块中输入所需数据和校正所得参数,以 2020 年为起始年,预测 2030 年城镇建设用地的扩展结果。

2.1 现有发展模式下的模拟结果

现有发展模式是与其他情景对比的基础,延续现有发展模式并按城镇建设用地增加的最大量模拟,安吉县和广德市 2030 年城镇建设用地分别增加 39.23km²和 21.54km²。因水域为不可占用的唯一限制因素,故城市扩张较明显。广德市城镇建设用地增长面积少于安吉县,与其原有城镇建设用地面积少且较为集中有关。现有模式下城镇建设用地的扩展概率分布见图 4。

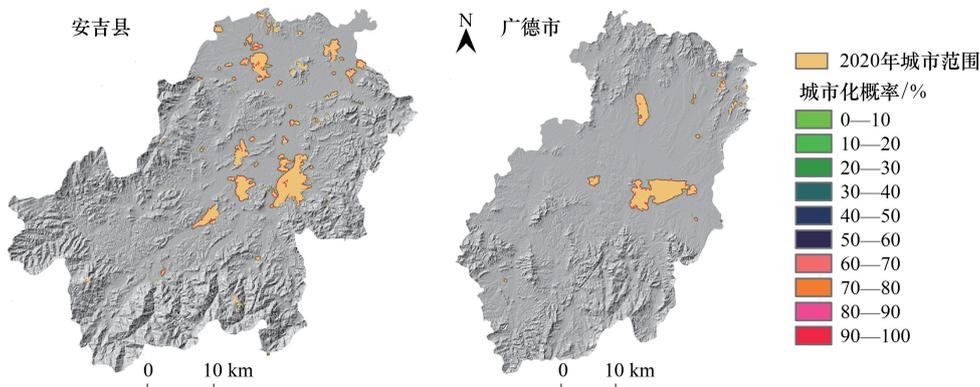


图 4 现有发展模式下城镇建设用地扩展概率分布

Fig.4 Probability distribution of construction land expansion under existing development model

图 4 显示,两县市城镇建设用地扩展依旧围绕现有城镇建设用地向周围蔓延,集中扩张区均为县城及各镇政府所在地,体现了县城作为县域内部增长极带动整体增长的传统模式。

安吉县山地丘陵占比较大,原有城镇建设用地基本为相对平坦区域,坡度扩展系数为 88,说明地形是主要限制因素。广德市坡度扩展系数仅为 22,城镇建设用地集中区大多较为平坦,地形影响略小。

空间上,安吉县中部和西北部递铺街道、天子湖镇和梅溪镇扩展较明显,递铺街道是政府所在地,天子湖镇主要承接转移工业,到 2030 年人口都有较大增长,新增公共设施是城镇建设用地扩张的主导因素。广德市桃州、邱村和新杭三镇扩张较显著,东北部因与江苏省毗邻而扩张更明显,体现了地理位置的影响。

为探究城镇建设用地扩张对生态环境的影响,基于模拟结果计算城镇建设用地来源,见表 5。

表 5 现有模式下城镇建设用地扩展的用地来源及面积/km²

Table 5 Land source and area of construction land expansion in the existing mode

地区 District	耕地 Cultivated land	林地 Forest	草地 Grassland	水域 Water area	农村居民用地 Rural land	总计 Aggregate
安吉县	24.67	13.57	0.85	0.14	1.46	39.23
广德市	10.86	7.27	2.38	0.24	0.79	21.54

表 5 显示,城镇建设用地主要来源于耕地,其次是林地,草地、水域和农村居民地的转移面积相差不大。水域因受排除图层的阻力影响而转变较少。

2.2 生态保护情景下的模拟结果

为探究不同生态用地向城镇建设用地的转化情况,统计 4 种生态保护情景下的城镇建设用地扩展规模,结果见表 6。

表 6 保护不同生态服务功能时的城镇建设用地扩展规模/km²

Table 6 The expansion scale of construction land when protecting different ecological service functions

地区 District	调节服务 Regulation service	供给服务 Supply service	支持服务 Support service	娱乐服务 Entertainment service
安吉县	37.88	28.49	36.88	38.67
广德市	19.91	3.28	12.42	17.30

总体上,4 种保护情景对城镇建设用地的扩展都有不同程度的抑制,安吉县和广德市的扩展面积均小于情景一的 39.23km²和 21.54km²,安吉县减少的程度和比例均小于广德市的同种情况,主要原因是安吉县作为两山理论的发源地,2000 年就开始走生态发展道路,所以城镇建设用地扩展对生态服务价值的影响已不明显。广德市因生态发展滞后,实施生态保护对城镇建设用地扩展的抑制更显著,保护供给服务时城镇建设用地扩展最小,保护调节服务时为 19.91km²,接近于现有发展模式。4 种生态保护情景下城镇建设用地扩展概率的空间分布见图 5、图 6。

图 5 显示,安吉县 4 种生态保护情景存在空间差异,西北部为明显扩张区,保护调节和娱乐服务功能时的扩张明显大于其他两种情景,对比该县未来规划,此区域主要为产业转移承接地,转成的城镇建设用地将以工业用地为主。在保护调节和供给服务功能时,不仅可抑制工业规模增长,对粮食供给和土壤养分的保护意义也更大。此外,城镇内部的填充式增长也有利于集约用地和高效发展。

结合图 6,广德市在保护供给服务功能时对城镇建设用地的抑制更明显,几乎没有扩展概率高于 50% 的区域,有效保护了生态服务功能。

进一步比较不同情景下城镇建设用地对其他地类的影响,将模拟的城镇建设用地扩展范围与 2020 年土地利用图叠加,统计其他地类被占用的比例,结果见图 7、图 8。

图 7 显示,不同情景下安吉县的城镇建设用地扩展不尽相同,土地来源的结构百分比差异也不明显,因林地供给服务价值高于耕地,且耕地位置较林地平坦,在保护供给服务时对林地的占用少于耕地占用,相差

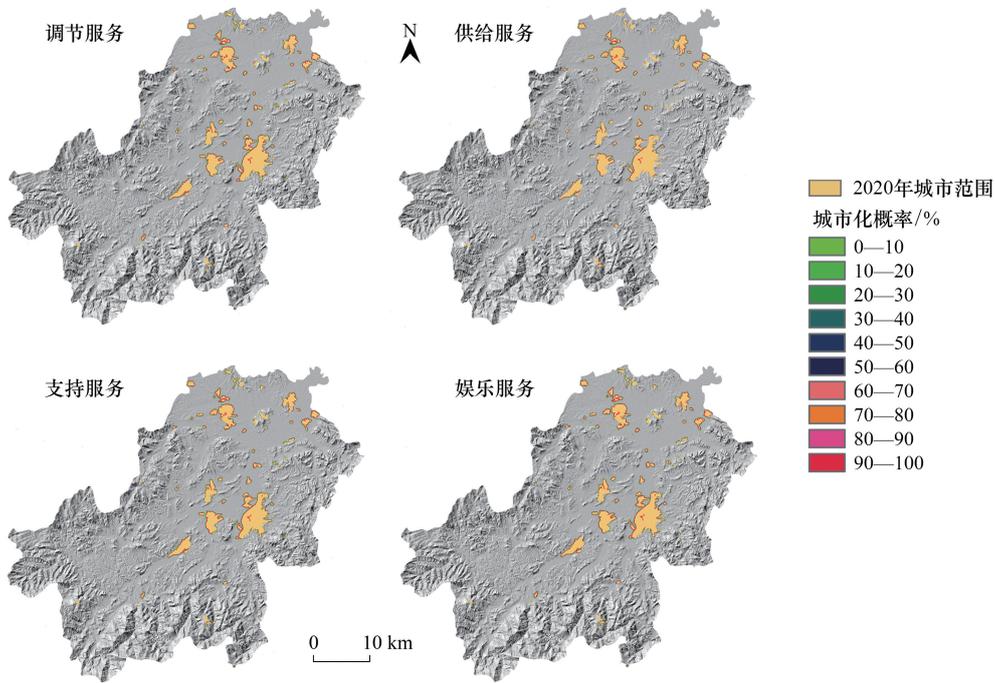


图 5 安吉县不同生态保护情景下城镇建设用地扩展概率的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of construction land expansion probability under different ecological protection scenarios in Anji

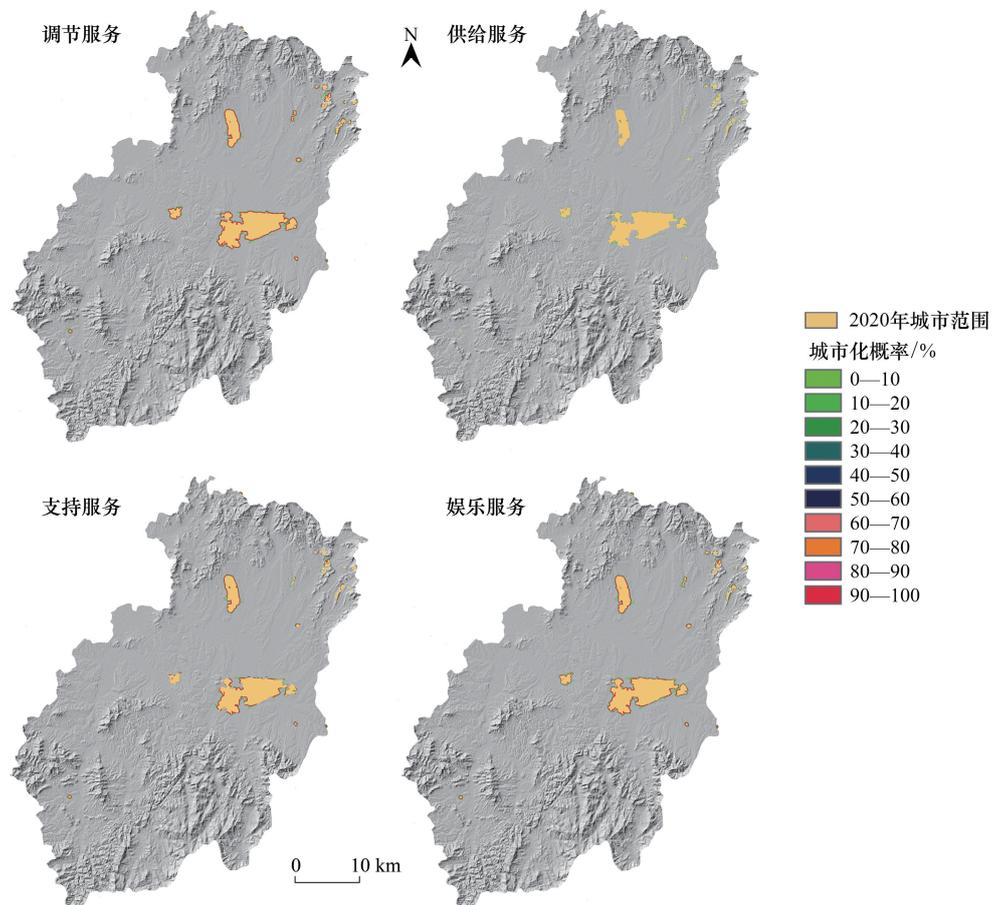


图 6 广德市不同生态保护情景下城镇建设用地扩展概率空间分布

Fig.6 Spatial distribution of construction land expansion probability under different ecological protection scenarios in Guangde

10%左右。水体占比增加是因整体城市化区域减少所致的相对增加,各种情景下基本都未被占用。保护娱乐服务时对林地的占用比例降低较少,仅比现有模式下降 1.79km²,这与林地所提供的丰富旅游资源有关。

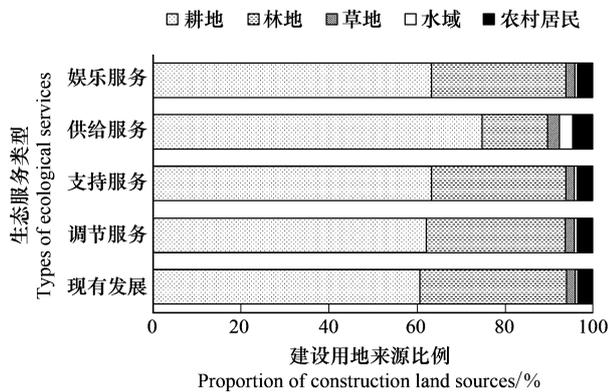


图 7 安吉县不同情景下新增城镇建设用地来源及占比

Fig.7 The source and proportion of new construction land under different scenarios in Anji

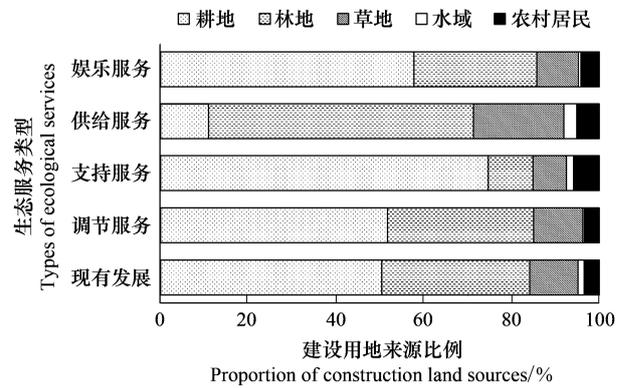


图 8 广德市不同情景下新增城镇建设用地来源及占比

Fig.8 source and proportion of new construction land under different scenarios in Guangde

广德市不同情景下新增城镇建设用地的土地来源差异较大,保护调节服务与现有模式的用地来源几乎一致,但生态保护使总量得到有效控制。保护供给服务时对耕地保护更有效,保护娱乐服务时,林地的占用比例有所上升,但数量仅比现有模式低 2.44km²。

对比不同情景下城镇建设用地扩张的倾向性,可看出现有发展情景倾向于充分满足城市发展的土地需求,而不同生态保护情景则倾向于满足土壤保持、原料生产和水文调节等需要。进一步探究城镇建设用地扩张对生态价值的影响,计算土地转移所产生的生态服务价值损益,结果见表 7。

表 7 不同保护情景下城镇建设用地扩张的生态服务价值损益/万元

Table 7 Profit and loss of ecological service value of construction land expansion under different protection scenarios

地区 District	现有模式 Existing model	供给服务 Supply service	支持服务 Support service	娱乐服务 Entertainment service	调节服务 Regulation service
安吉县	-228.24	-125.17	-195.17	-204.97	-205.37
广德市	-62.88	-14.20	-26.94	-43.57	-53.82

可见,生态保护情景下的生态服务价值损失均小于现有模式,保护供给功能时生态价值损失最小。

2.3 讨论

2.3.1 情景对比

尽管 4 种生态保护的模拟结果略有差异,但相比现有发展模式均能减少城镇建设用地对其他地类的侵占,一定程度上保护了生态系统的服务功能,降低了生态服务价值的损失,说明生态保护措施并未对城市经济增长造成显著影响。走生态立县道路既有利于生态保护,也可实现较高的经济增长。

2.3.2 数据及精度

为考虑城市扩张的所有可能,本研究将城镇化的所有像元都纳入计算,一定程度上放大了城镇建设用地的新增面积,但能更准确地对两县市的同种情景及同一地区不同情景的发展进行对比。

县域城镇的时空发展受多种因素共同作用,县域尺度的城镇建设用地扩展模拟对数据精度及其完整性要求较高,而基于栅格结构的 SLEUTH 模型对分辨率十分敏感,一些学者为减少校正时间而采用分辨率较粗的数据,本研究为保证模拟精度,虽然采用了计算能力较高的云服务器,但受限于原始数据的精度和可得性,30m分辨率仍有局限,尽管 Kappa 系数的显著一致性能满足准确度要求,但尚未达到最佳一致性。

2.3.3 模拟结果的解释

本研究主要分析城镇建设用地扩展,预设的生态保护情景仅针对生态服务功能,并对生态服务价值进行分析,而政策对城市扩展具有重要影响,目前尚无量化政府决策和城市突发状况的有效途径,也无将这些因素与城市扩展模型进行耦合的可行方法,因此本研究未涉及政策分析。未来城市发展应秉持生态服务价值与城市规划相结合的科学观,才能实现“既要金山银山,也要绿水青山”的发展目标。

本研究仅对两山理论发源地安吉县及其毗邻的广德市进行研究,结果对中西部及其他具有不同自然地理条件的县域的参考和借鉴意义有限,要全面推动小城镇健康发展,应充分考虑不同区域的小城镇演变规律,以更大视角看待中小城市发展。

2.3.4 模型选择

不同模型具有不同优势和局限性,本研究仅根据已有文献及成果评述,选取适于县域研究的 SLEUTH 模型,并未在运行其他模型的基础上进行比较研究,无法合理评价其他模型的准确性和适用性。

3 结论

生态保护情景下的城镇建设用地扩展模拟,为未来的县域城市发展提供了生态保护的科学依据和路径参考,能够有效避免和预防对生态服务功能的破坏。

延续现有的发展模式不仅没有摆脱县域内部增长极带动区域整体增长的传统模式,城镇建设用地的增加数量和城市扩张也更加明显,既没有实现城镇规模和结构的优化,也无法增强县城的辐射带动功能,因此应及时调整未来的发展模式以适应新型城镇化的要求。

在保护生态服务价值的前提下进行城镇化,并未造成生态服务价值的损失,反而体现出生态保护的经济价值。此外,以外延式为主、伴有城镇建设用地的填充式增长的扩展模式,有效抑制了未来城镇建设用地的集中连片扩展,是一种合理的发展模式。

参考文献 (References):

- [1] Brush JE. Walter Christaller. Central Places in Southern Germany. Translated by Carlisle W. Baskin. Pp. 230. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1966. \$ 9.95. The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science, 1966, 368(1): 187-187.
- [2] Alon W, Mills E S, Gaffney M, Walker R A. Teil stadtstruktur und Grundrente//Barnbrock, J. Materialien zur Ökonomie der Stadtplanung. Berlin: Birkhäuser, 1975.
- [3] 闫梅, 黄金川. 国内外城市空间扩展研究评析. 地理科学进展, 2013, 32(7): 1039-1050.
- [4] 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] Clarke K C, Gaydos L J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. International Journal of Geographical Information Science, 1998, 12(7): 699-714.
- [6] Waddell P. UrbanSim: modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning. Journal of the American Planning Association, 2002, 68(3): 297-314.
- [7] 黎夏, 叶嘉安. 约束性单元自动演化 CA 模型及可持续城市发展形态的模拟. 地理学报, 1999, 54(4): 289-298.
- [8] 黎夏, 刘小平. 基于案例推理的元胞自动机及大区域城市演变模拟. 地理学报, 2007, 62(10): 1097-1109.
- [9] 张奇, 胡石元, 朱彦刚, 施秧秧. 基于元胞自动机和 GIS 的城市建设用地扩展模拟预测研究. 国土资源科技管理, 2008, 25(3): 94-98.
- [10] 杨青生, 乔纪纲, 艾彬. 基于元胞自动机的城市生态安全格局模拟——以东莞市为例. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2599-2607.
- [11] 焦利民, 杨璐迪, 刘稼丰, 张博恩, 许刚. 顾及城市空间结构信息的元胞自动机模型构建及其应用. 地理科学, 2019, 39(8): 1276-1283.
- [12] Silva E A, Clarke K C. Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. Computers, Environment and Urban Systems, 2002, 26(6): 525-552.
- [13] Dietzel C, Clarke K C. Toward optimal calibration of the SLEUTH land use change model. Transactions in GIS, 2007, 11(1): 29-45.
- [14] Jantz C A, Goetz S J, Shelley M K. Using the SLEUTH urban growth model to simulate the impacts of future policy scenarios on urban land use in the Baltimore-Washington metropolitan area. Environment and Planning B: Planning and Design, 2004, 31(2): 251-271.
- [15] Al-Shalabi M, Billa L, Pradhan B, Mansor S, Al-Sharif A A A. Modelling urban growth evolution and land-use changes using GIS based cellular automata and SLEUTH models: the case of Sana'a metropolitan city, Yemen. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(1): 425-437.

- [16] Bihanta N, Soffianian A, Fakheran S, Gholamalifard M. Using the SLEUTH urban growth model to simulate future urban expansion of the Isfahan metropolitan area, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 2015, 43(2): 407-414.
- [17] 陈学刚. 基于细胞自动机的城市增长模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005.
- [18] 刘勇, 吴次芳, 岳文泽, 黄经南. 基于 SLEUTH 模型的杭州市城市扩展研究. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 797-807.
- [19] 张岩, 李京, 陈云浩. 利用 SLEUTH 模型进行北京城市扩展模拟研究. *遥感信息*, 2007, (2): 50-54.
- [20] 朱飞鸽, 胡瀚文, 沈兴华, 李俊祥. 基于 SLEUTH 模型的上海城市增长预测. *生态学杂志*, 2011, 30(9): 2107-2114.
- [21] 盛成香. SLEUTH 模型支持下的太原城区建设用地扩展分析与预测[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- [22] 冯徽徽, 刘慧平, 周彬学, 毛小岗, 赵小锋. SLEUTH 模型的参数行为研究. *地理与地理信息科学*, 2012, 28(6): 39-43.
- [23] 朱阿兴, 闫国年, 周成虎, 秦承志. 地理相似性: 地理学的第三定律? *地球信息科学学报*, 2020, 22(4): 673-679.
- [24] Xiaoping Liu, Xun Liang, Xia Li, Xiacong Xu, Jinpei Ou, Yimin Chen, Shaoying Li, Shaojian Wang, Fengsong Pei. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017: 94-116.
- [25] Giudici M. Development, calibration, and validation of physical models//Clarke K, Parks B, Crane M, eds. *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002: 100-121.
- [26] Lee D R, Sallee T. A method of measuring shape. *Geographical Review*, 1970, 60(4): 555-563.
- [27] 高星, 杨刘婉青, 李晨曦, 宋昭颖, 王杰. 模拟多情景下白洋淀流域土地利用变化及生态系统服务价值的空间响应. *生态学报*, 2021, 41(20): 7974-7988.
- [28] 李蹇国, 王录仓, 严翠霞, 刘海洋. 基于生境质量的绿洲城镇空间扩展模拟研究——以黑河中游地区为例. *生态学报*, 2020, 40(9): 2920-2931.
- [29] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [30] 胡赛. 基于土地利用变化的生态系统服务价值及生态补偿标准研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [31] 蒋茜. 基于土地利用变化的潮州市生态系统服务价值评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.