

DOI: 10.5846/stxb201303160434

李平星, 樊杰. 区域尺度城镇扩张的情景模拟与生态效应——以广西西江经济带为例. 生态学报, 2014, 34(24): 7376-7384.

Li P X, Fan J. Region-level scenario simulation of urban expansion and the ecological effects: the case of Guangxi Xijiang River Economic Belt, Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7376-7384.

区域尺度城镇扩张的情景模拟与生态效应 ——以广西西江经济带为例

李平星^{1,*}, 樊杰²

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:以快速城镇化的广西西江经济带为案例区,以生态重要性和开发建设适宜性为情景,利用最小累积阻力模型对城镇扩张进行模拟,进而从区域生态系统服务功能变化角度定量分析两种情景的生态效应差异。结果表明,经济带东西两翼地区生态重要性较高,中部地区开发建设适宜性较高。中小城镇在生态重要性情景中获得了较大的发展机遇,而大城市在开发建设适宜性情景下扩张更快。相同扩张强度下,生态重要性情景的区域生态系统服务功能总量下降较少,除食物生产功能外的其他各项服务功能呈现类似格局。随着扩张强度增加,两种情景下生态系统服务功能下降量之间的差异逐渐增大,从 0.5% 强度下的 1.09 亿元增大到 10.0% 强度下的 4.05 亿元。基于生态重要性的扩张情景对于保护生态环境、维持开发与保护之间的平衡更加有利,是一种相对合理的扩张方式。为开展区域层面城镇扩张情景模拟分析提供了参考,也为未来调控城镇扩展格局提供了优化情景和科学依据。

关键词:城镇扩张;生态重要性;开发建设适宜性;最小累积阻力模型;广西西江经济带

Region-level scenario simulation of urban expansion and the ecological effects: the case of Guangxi Xijiang River Economic Belt, Southwest China

LI Pingxing^{1,*}, FAN Jie²

1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Urban expansion has been the focus of researchers from various research fields for a long time, and the process, affecting factors, effects and simulation of urban expansion are the most interested aspects. Aim at enriching research on multi-scenarios simulations of urban expansion at the regional level, taking Guangxi Xijiang River Economic Belt (GXEB for short) as the case area, we carried out ecological importance (EI for short) and development suitability (DS for short) assessment and the results were used to design resistance surfaces of the minimum cumulative resistance model (MCR model for short) for simulating urban expansion of major cities and towns of GXEB. The current urban lands were regarded as the sources of MCR model for modelling urban expansion. In addition, the effects on regional ecosystem service were analyzed accordingly. Results of EI assessment indicated that the western and eastern parts were relatively more important than the middle parts, and formed the ecological barrier of GXEB with higher significance for biodiversity protection, water & soil conservation, gas & climate regulation, etc. However, the middle part of GXEB was relatively more suitable than two wings from the aspect of DS assessment. The results of urban expansion modelling indicated that the surrounding areas were facing the destination of being occupied by urban expansion firstly. With the increasing of MCR, the amount of cumulative

基金项目:中国科学院南京地理与湖泊研究所青年人才项目(NIGLAS2011QD03)

收稿日期:2013-03-16; 网络出版日期:2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pxli@niglas.ac.cn

construction lands increased accordingly. Expansion of urban lands and related ecological space occupation caused the decrease of regional ecosystem service and changes of its structure, and the amount became bigger and bigger with the increasing of expanding intensities. However, the reductions of total amount of *DS* scenario were higher because of the differences of two scenarios in terms of urban expanding intensity and style. *EI* scenario gave more expanding opportunities to medium-sized cities and towns, while bigger cities were the priority of *DS* scenario. Moreover, *DS* scenario made more “pie-type” cities and towns, while *EI* scenario provided cities and towns sprawl along certain development directions or axis. Therefore, the decreasing of ecosystem services of *EI* scenario were smaller than that of *DS* scenario for the occupation on ecological spaces of more importance at *DS* scenario. With the increasing intensity of urban expansion, the difference between two expanding scenarios increased from 1.09×10^8 yuan at 0.5% intensity to 4.05×10^8 yuan at 10.0% intensity gradually. Considering the sub-items of ecosystem services, most showed similar trends with the regional ecosystem service except food production function. With the increase of urban expansion, the difference between *EI* and *DS* scenarios trended to be more significant. It was concluded that *EI* scenario limited the uncontrolled expansion of big cities, gave more opportunities to medium-sized and small cities and towns, and reduced the occupation on important ecological spaces and the degradation of regional ecosystem service. From above aspects, *EI* scenario lightened the contradiction between urban expansion and ecological protection, was of higher advantages for protecting environment and keeping the balance of development and protection, and was of significance for regional sustainable development.

Key Words: urban expansion; ecological importance; development suitability; minimum cumulative resistance model; Guangxi Xijiang River Economic Belt

世界银行的数据表明,2010 年全球城镇化率超过了 50%,超过 34.7 亿人住在不同规模的城镇之中。预测表明,城市居民将持续增加,到 2030 年,全球超过 2/3 的人口将居住在城镇中^[1]。随着城市人口急剧膨胀,城市扩张和蔓延已成为过去几十年中全球城镇发展的显著特征,并将在未来持续发生^[2]。城镇空间的生长和伴随发生的土地利用变化对生态系统的结构、生态系统服务功能、环境质量、城镇形态和城镇居民的生活方式等产生了诸多影响^[3]。因此,城镇扩张一直是地理学、生态学、3S 科学等学科研究的重点,在我国尤其受到关注^[4-6]。目前,城市扩张过程和影响因素是国内研究关注的焦点。研究者以国内大城市或特大城市为研究区,分析了城市扩张的历史过程,并从地形地貌、经济发展、人口集聚和区位条件等方面深入分析了影响城市扩张时空格局的因素,从经济增长、生产生活空间增多、居住方式改变、生态环境变化等方面分析了城市扩张的影响^[5, 7-9]。在城市扩张过程、格局及效应研究的基础上,近年来城市扩张模拟受到研究者关注,对未来城市发展方向进行了模拟和预测,为调控和优化城市发展格局提供了科学依据。彭晋福模拟了江苏省扬中市城市扩张趋势,并指出城镇扩张的主要阻力

来自于土地表面景观元素的变化^[10]。何春阳等综合分析城市扩张的影响因素,构建了大都市区城市扩张模型,预测了不同情景下北京市 2015 年的城市扩张状况^[11]。Wu 等以历史土地利用数据为基础,对 2005 到 2030 年沈阳市的城市扩张趋势进行多情景模拟,并揭示了不同情景的生态效应^[4]。徐昔保等通过高分辨率遥感影像数据、Landsat TM 影像数据和土地利用现状图构建了兰州市 1949—2005 年的 GIS 空间数据库,并模拟了不同情景下未来城市扩张的趋势^[12]。全泉等建立了城市扩张的动态模型,预测了上海市 2010 年和 2020 年的城市扩张趋势^[13]。

总体看来,目前针对城市扩张的模拟研究大多集中在单体城市或都市区。区域层面的城市扩张研究对于协调城市关系、推动区域可持续发展具有重要作用,但已有研究主要关注区域层面城市扩张的历史格局及影响因素^[14-15],对未来区域城镇扩张的模拟及可能产生的效应研究仍然较少。针对区域层面城镇扩张研究的相对缺乏和开展相关研究对于促进经济发展与生态保护平衡、指导未来区域政策制定等方面的重要意义,本研究以快速城市化的广西西江经济带为例,以生态重要性和土地开发建设适

宜性为约束条件,采用最小累积阻力模型对城市扩张进行了情景模拟,并以生态系统服务功能变化为出发点揭示了不同情景城市扩张对生态效应的影响,以期丰富城市扩张研究内涵、并为调控优化区域城市格局提供思路和指引

1 研究区概况

广西西江经济带位于我国西南部,广西壮族自治区中部,包括南宁、柳州、贵港、梧州、来宾、崇左和百色等 7 个地级市、59 个县市区(图 1);总面积约为 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,占广西壮族自治区面积的 55.26%,全国总面积的 1.36%;属于云贵高原向南方沿海地区的过渡地带,71%的地区在海拔 400m 以下,主要分布在南宁、贵港、来宾以及柳州和梧州的南部,400m 以上的地区主要分布在西部的百色、崇左和中部来宾

的部分山区;整体为典型盆地地貌,平原占比较少,山地和丘陵占比较高;地处珠三角都市区上游,水源涵养、生物多样性保护等重要突出,但地势陡峭、喀斯特地貌分布广泛,生态系统较为脆弱。

经济带地处我国欠发达地区,2010 年,人均地区生产总值约为 2.25 万元,占全国平均水平的 3/4;城市化率为 41%,低于广西和全国水平;城镇主要分布于中部盆地以及沿江河谷地区。近年来,城市化进程加快推进,城市化率从 1990 年的 25%增长到 2010 年的 41%,进入快速城市化阶段。在西部大开发继续推进和中国-东盟自贸区建设的机遇下,区域经济发展和城市化有加快推进的趋势。在生态保护与经济发展的双重压力下,协调开发和保护之间的关系、从而推动区域可持续发展的任务艰巨;同时,区域自然和经济格局相对独立,为本研究提供了有利条件。

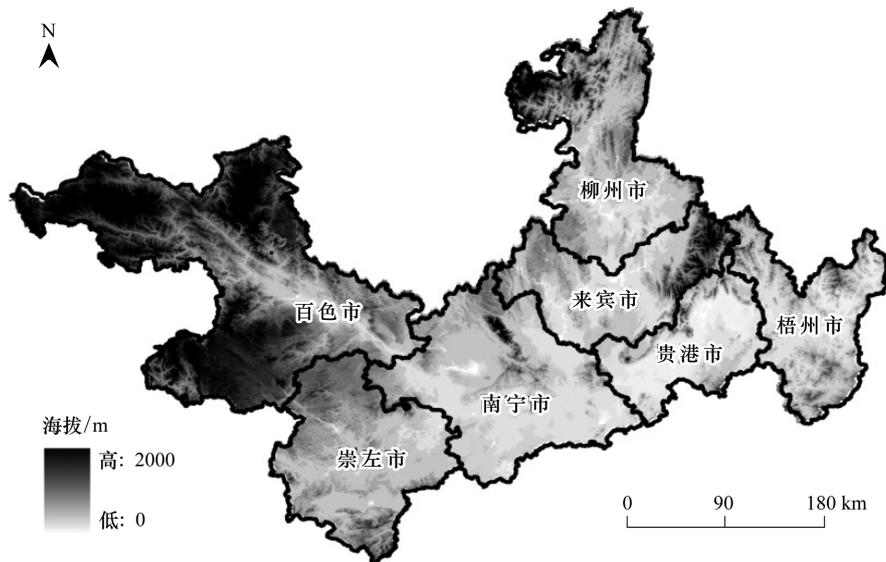


图 1 广西西江经济带组成和地形
Fig.1 Division and location of GXEB

2 研究方法与数据来源

2.1 城镇扩张模拟

本研究采用最小累积阻力模型(简称 MCR 模型)进行城镇扩张模拟。MCR 模型最常用于保护生物学领域,用来模拟物种迁移的最优路径;后来在其他领域被广泛应用,用于生态空间识别、建设空间扩展等研究^[10, 16-18]。最小累积阻力模型可表达为:

$$\text{MCR} = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \quad (1)$$

式中, MCR 是最小累积阻力值, D_{ij} 表示物种从地块 i 到源区 j 的空间距离, R_i 表示地块 i 对建设空间扩张的阻力值, Σ 表示从地块 i 到源区 j 累积阻力计算, \min 表示最小累积阻力值, f 表示扩张过程与最小累积阻力值之间的函数关系,是一个单调递增函数。

本研究以模拟不同情景下城镇扩张为目标,选择城镇建设用地作为源;生态重要性和开发建设适宜性分别作为两种情景下阻力值确定的依据。在基于生态重要性(简称 EI)的扩张情景下,重要性越高,越不利于城镇扩张,对城镇扩张的阻力越大^[16];

在基于开发建设适宜性(简称 DS)的扩张情景下,适宜性越高,越利于城镇扩张,阻力值越小。地块阻力评价单元为 90m×90m 的栅格,最小累积阻力计算利用 ArcGIS 空间分析软件中的 Cost distance 分析模块实现。

2.2 生态重要性评价

生态重要性是表征生态系统维持区域生态平衡、避免生态系统退化的指标^[19]。本研究采用从生态因子适宜性和生态区位重要性角度出发进行生态重要性评价的思路。生态因子适宜性反映了景观单元对于物种繁育和生态系统发育的适宜程度,主要考虑光合有效辐射、年均温、水源条件、生态系统净初级生产力、湿润度和物种多样性等因素;生态区位重要性考虑对生态过程有控制作用的重要节点,主要选取自然保护区、饮用水源地、石漠化敏感区、水源涵养区、生物多样性保护区、湖泊水库及岸线、河流岸线等七类区域。在生态因子适宜性和生态区位重要性评价的基础上,进行生态重要性综合评价。生态重要性评价参照已有研究成果^[20],评价所得的极重要区、很重要区、重要区、一般区和不重要区分别赋阻力值为 9,7,5,3 和 1。

2.3 土地开发建设适宜性评价

土地开发建设适宜性反映了特定区域对于城镇扩张的适宜程度,一般采用“指标选择-单指标评价-权重确定-适宜性评价”的思路。综合已有研究成果^[16,21-22],选择坡度、高程、交通通达性、取水便利性、单位面积 GDP 和人口密度等 6 个指标进行评价。坡度小、高程低、交通便捷、取水便利、单位面积 GDP、人口密度较高的地区,土地开发建设适宜性较高。借助德尔菲法分析确定 6 个指标的权重,分别为:坡度(0.19)、高程(0.19)、交通通达性(0.21)、取水便利性(0.11)、地均 GDP 和人口密度(分别为 0.15)。每个指标采取 9 级分类进行标准化处理,综合形成开发建设适宜性评价结果。对应于 1—9 适宜性等级,分别赋以 9—1 的阻力值。

2.4 生态效应分析

本研究采用生态系统服务功能变化表征城市扩张的生态效应。综合已有研究^[23-24],结合广西西江经济带生态系统结构、植被类型和土地利用/土地覆被特征,构建了经济带不同类型生态系统服务功能的计算标准,进而针对不同情景、不同强度的城镇扩

张,计算区域生态系统服务功能总量和结构变化。

2.5 数据来源

土地利用空间数据来自“中国科学院资源环境科学数据中心”的 1:10 万土地利用遥感影像数据(2005 年),植被类型数据来自“中国科学院地球系统科学数据共享中心”的 1:100 万植被类型数据库,坡度、高程、光合有效辐射、年均温、水源条件、生态系统净初级生产力、湿润度等数据通过上述两个数据库获得。交通通达性、单位面积 GDP 和人口密度等以 2008 年统计数据为基础,通过 ArcGIS 软件进行空间评价或插值得到。重要生态区位以《全国生态功能区划》、《广西壮族自治区生态功能区划》等为基础,直接采用其数据或采用其方法进行评价。

3 结果

3.1 生态重要性与开发建设适宜性评价结果

从生态重要性看,西部地区是重要性高值区,整体生态重要性最高,东部地区次之,中部地区最低;东西部集中分布的重要生态区域构成了经济带的生态屏障,承担了生物多样性保护、水土保持、气体调节、气候调节等重要生态功能。从土地开发建设适宜性来看,中部地区适宜性最高,而东西两翼地区相对较低;城镇主要分布在河谷和盆地地区,土地开发建设适宜性普遍较高(图 2)。

3.2 城镇扩张模拟结果

依据城市扩张的一般规律,城镇周边区域都是城镇扩张的首选区域。本研究结果与此类似,城镇扩张首先占用原有建成区的临近空间,所受最小累积阻力值较小;随着城镇扩张强度和面积的增大,向外围空间扩散,最小累积阻力值增加。但是,由于两种情景阻力表面的差异,城镇扩张的过程不同。考虑到经济带地处处于欠发达地区,且作为我国三大城市群之一——珠江三角洲城市群的上游地区,生态脆弱性较高,生态重要性价值突出,土地开发利用强度不宜过高。对比参考东部发达地区开发强度和本地实际情况,假设近期建设用地扩张量不超过区域总面积的 10.0%,并选取不同扩张强度(分别为 0.5%、1%、2%、3%、5%和 10.0%)进行定量研究,比较两种扩张情景差异,以变异系数 $C.V$ 表征两种情景、不同强度下城镇斑块面积的离散程度,以紧凑度指数 c 表示城镇斑块形态的紧凑度。结果表明,新

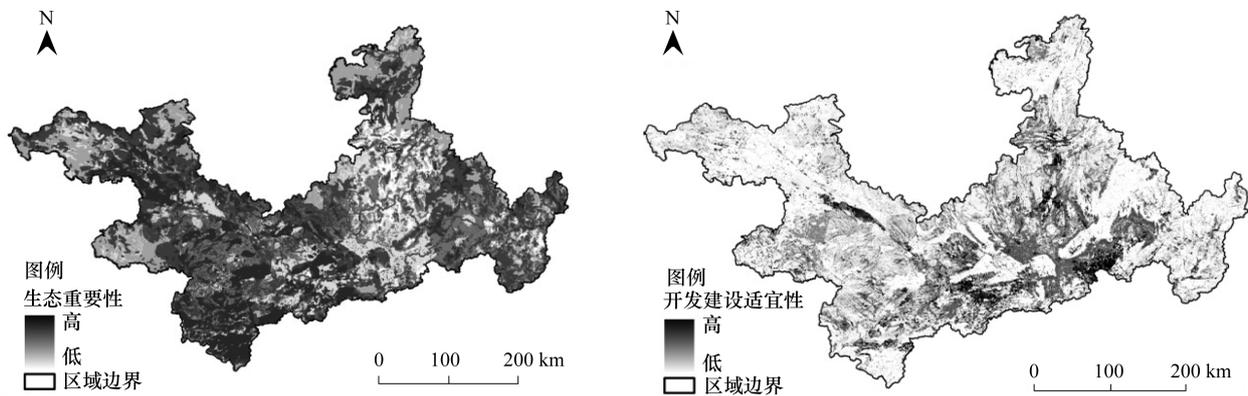


图2 生态重要性与开发建设适宜性评价结果

Fig.2 Results of ecological importance and development suitability assessments

表1 两种扩张情景的城镇形态对比

Table 1 Comparison of urban form under two scenarios

扩张强度/ Expanding intensities	变异系数 Coefficients of variation		紧凑度 Compactness	
	生态重要性情景 Scenario of ecological importance	开发建设适宜性情景 Scenario of development suitability	生态重要性情景 Scenario of ecological importance	开发建设适宜性情景 Scenario of development suitability
	0.0	34.29		0.53
0.5	27.40	30.23	0.72	0.76
1.0	24.20	27.46	0.79	0.83
2.0	21.05	24.29	0.82	0.89
3.0	19.70	22.54	0.80	0.90
5.0	18.51	20.74	0.81	0.91
10.0	16.95	18.84	0.79	0.90

变异系数 $C.V = \frac{S}{MN}$ (S 为标准差, MN 为均值), 紧凑度 $c = 2\sqrt{\pi A}/P$ (A 为面积, P 为周长)

增城镇用地的空间分布不同,生态重要性情景下, $C.V$ 值相对较小,表明城镇建设用地比较均匀,新增建设用地的分配相对均衡,除大中城市外,中小城镇也获得了较大的扩张份额;土地开发建设适宜性情景下, $C.V$ 值较大,表明城镇两极分化现象严重,大中城市获得了大部分的新增建设用地,中小城镇获得的新增建设用地相对较少(表1)。此外,城市扩张模式存在差异,生态重要性情景下,城镇以蔓延式扩张为主,城市形状不规则,以复杂的带状为主,紧凑度较低;土地开发建设适宜性情景下,城镇以“摊大饼式”的外围扩充为主,城市形状以相对规则、紧凑(表1,图3)。

3.3 城镇扩张的生态效应分析

生态重要性和开发建设适宜性情境下新增建设

用地分布格局的差异,导致生态空间格局和区域生态系统服务功能的变化量的不同。总的看来,区域生态系统服务功能的改变表现为总量下降和内部组成差异。从总量看,虽然两种情景下均表现为随扩张强度的增加而下降,但土地开发建设适宜性情景下的下降量更大,而且这种差异随着扩张强度的增加而变大,从0.5%强度下的1.09亿元增大到10.0%强度下的4.05亿元(表2)。从区域生态系统服务功能下降部分的具体组成看,大部分功能类型表现出了与总量一致的变化特征,其中包括气体调节、气候调节、水土保持、废物处理、生物多样性保护、原材料供应和休闲与文化(图4)。食物生产功能是例外,表现为生态重要性情景下的食物生产功能下降量更大,并且随着扩张强度的增加而出现更大的差异(图4)。

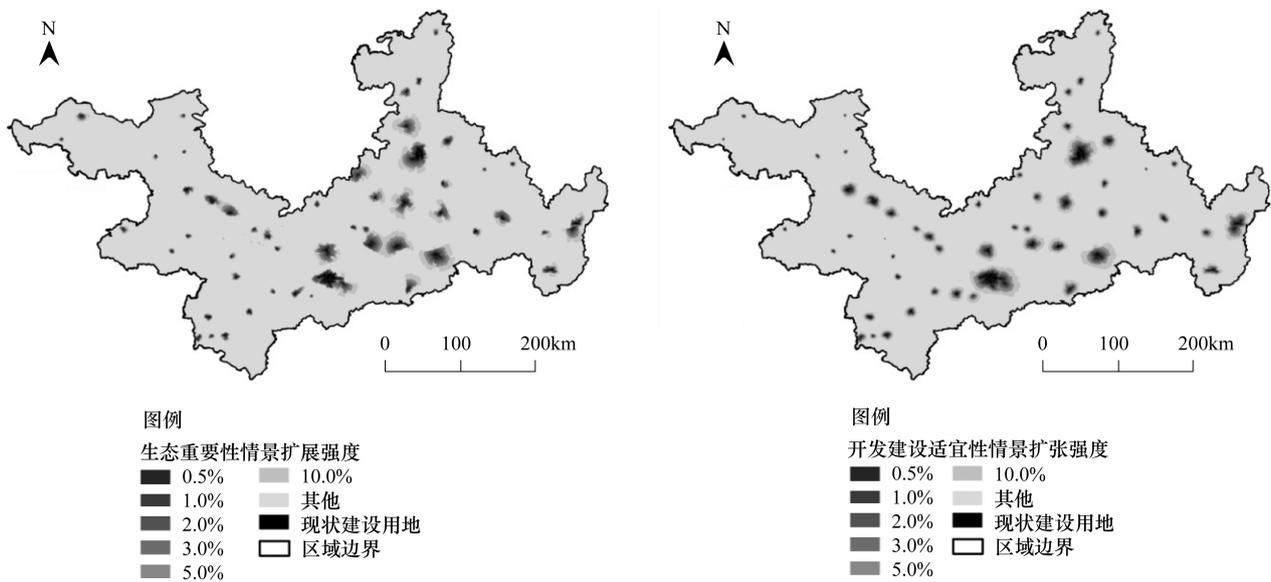


图3 生态重要性和开发建设适宜性情景的城镇扩张

Fig.3 Urban expansion of ecological importance and development suitability scenarios

表2 两种情景区域生态系统服务功能下降量对比

Table 2 Differences of ecosystem service degradation of ecological importance and development suitability scenarios

扩张强度/% Expanding intensities	生态系统服务功能下降量/(亿元) Degradation of ecosystem services / (RMB 10 ⁸ Yuan)		
	生态重要性情景 Scenario of ecological importance	开发建设适宜性情景 Scenario of development suitability	两种情景差值 Differences of two scenarios
0.5	6.37	7.46	1.09
1.0	12.00	13.88	1.88
2.0	23.80	26.07	2.26
3.0	35.80	38.23	2.43
5.0	60.59	64.45	3.86
10.0	128.96	133.01	4.05

4 讨论与结论

通过区域层面城镇扩张的情景模拟及生态效应分析,本研究揭示了两种情境下城市扩张的格局及生态效应的差异。结果表明,两种情景下,城镇扩张在新增建设用地份额分配和扩张方向选择上具有明显的差异,进而对区域生态系统服务功能的下降产生不同的影响。在土地开发建设适宜性背景下,城镇扩张的总量与原有城镇的规模呈现明显的正相关关系,大城市获得了较大的扩张份额,而小城镇获得的扩张份额较少。这与已有研究所揭示的现实情况相同^[25],表明城市发展过程中,新增建设用地的选择首先考虑了开发建设适宜性因素,以期通过较少开发投入获取较高开发收益。但是,在生态重要性

情景下,各类城镇获得的扩张份额与原有规模的关联性相对较弱,城镇所处区域及周围地区的生态重要性起到较大影响。中小城镇,尤其是在生态重要性相对较低地区的中小城镇,因获得较大扩张份额而迅速扩张。

在扩张方式上,土地开发建设适宜性背景下,大部分城镇以“摊大饼”式扩张为主。对小城镇讲,饼状形态紧凑度更高,可提升城市运行效率、降低基础设施建设投入和提高土地资源集约利用度^[3]。对大城市而言,过度的“摊大饼”式扩张导致了城市病出现并趋于严重,产生了人口超载、交通拥堵、污染物排放增加、大气污染、热岛效应、开放空间减少等问题^[3, 26, 27]。相反,生态重要性情景下,城镇扩张模式更加多样,“摊大饼”式扩张、内部填充式扩张、蔓延

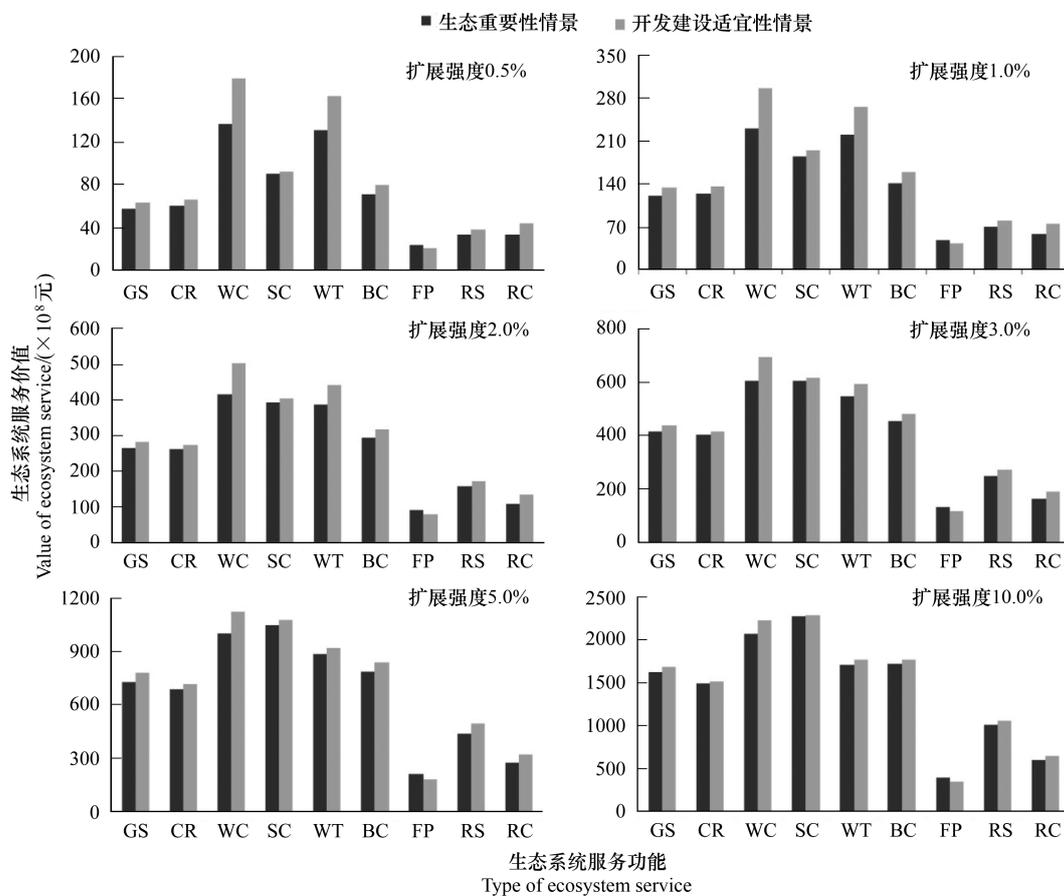


图4 两种情景、不同扩张强度的生态系统服务功能下降量

Fig.4 Changes of ecosystem service at different expanding intensities of ecological importance and development suitability scenarios

GR: 气体调节 Gas Regulation, CR: 气候调节 Climate Regulation, WC: 水源涵养 Water Conservation, SC: 土壤保持 Soil Conservation, WT: 废物处理 Waste Treatment, BC: 生物多样性保护 Biodiversity Conservation, FP: 食物生产 Food Supply, RS: 原材料供应 Raw material Supply, RC: 休闲与文化 Recreation & Culture

式扩张等均有发生。对于大城市,蔓延式扩张有效增大了与外界环境的接触面,对于城市生态系统的开放发展意义突出;而中小城镇由于规模较小,扩张方式不同导致的负面效应有限。此外,区域新增城镇建设用地总量的分配受到原有规模和所处地区生态系统重要性的影响,被相对均匀地分配到不同规模的城镇上,对于限制大城市无序扩张和鼓励小城镇发展具有积极意义。对经济带而言,地形条件复杂,盆地和河谷是城镇分布的主要区域,大城市以蔓延式扩张为主,更加符合区域自然地理条件,有利于减少对重要生态空间的占用、维护城市生态系统健康、缓解空间开发与生态保护间的矛盾^[26]。可见,生态重要性情景是一种更加合理的扩张方案。

城市扩张生态效应评价结果进一步充分证实了上述结论。由于经济带地处生态重要性较高的珠江上游,城市扩张势必引起对重要生态空间的占用和

区域生态系统服务功能的下降。在不同扩张情景下,被占用生态空间类型不同,生态系统服务功能下降量存在差异。生态重要性情景以生态重要性评价结果设定阻力表面,重要性高值区对城市扩张的阻力大,有利于对重要生态空间的保护。土地开发建设适宜性情景从开发建设的适宜性出发,某些生态价值突出、开发适宜性较高的空间被占用,导致生态服务功能损失较多。因此,生态重要性情境下,除粮食生产功能外,区域生态系统服务功能总量和各项功能的下降量均较小。由于生态重要性评价并未突出粮食生产功能的重要性,城市扩张以牺牲耕地为成本,换取对重要生态空间的保护,因此导致了更大的粮食生产功能下降量。这与已有研究结果类似,鉴于空间接近性和开发建设条件的适宜性,城镇周围的耕地建设成本低、开发收益高,是城镇扩张主要和优先占用的对象^[22,27-28]。

总体看来,本研究对比分析了生态重要性和开发建设适宜性背景下广西西江经济带城镇扩张的格局及对区域生态系统服务功能的影响,认为生态重要性情景对于减少生态破坏、避免生态系统服务功能的过快下降具有积极意义。长期以来,城市管理者习惯于通过城镇自身的发展机遇和开发建设适宜性来确定城市扩张的规模和方向,国家和区域层面的宏观环境和生态保护的需求往往被忽视。大城市的快速发展既导致了自身“城市病”问题不断加剧,也在一定程度上剥夺了中小城市的发展机遇。对于生态环境保护而言,人类对于生产、生活空间的需求被过分强调,而维持区域生态系统正常功能的空间需求被忽略,使得区域生态空间过度占用和生态退化问题趋于加剧。因此,对于研究者和城市管理者而言,寻找一种新模式来调控城镇扩张是十分必要的。本研究所提出的基于生态重要性的城镇扩张提供了相对理想的方案。但是,本研究只是采用某个年份的数据对未来城镇扩张的过程进行情景模拟,未对情景模拟结果与现实情况之间的差别进行分析,对模拟结果与现实格局间生态效应的差异也未开展比较分析,是未来需要深入研究的内容。

致谢:中国科学院资源环境科学数据中心、生态系统研究网络数据共享系统、地球系统科学数据共享系统提供数据支撑。

References:

- [1] United Nations Population Division. World Urbanization Prospects: The 2009 Revision. New York: United Nations Population Division, 2009.
- [2] Warren P S, Ryan R L, Lerman S B, Tooke K A. Social and institutional factors associated with land use and forest conservation along two urban gradients in Massachusetts. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 102(2): 82-92.
- [3] Chen H Y, Jia B S, Lau S S Y. Sustainable urban form for Chinese compact cities: challenges of a rapid urbanized economy. *Habitat International*, 2008, 32(1): 28-40.
- [4] Wu X Q, Hu Y M, He H S, Bu R C, Onsted J, Xi F M. Performance evaluation of the SLEUTH model in the Shenyang metropolitan area of northeastern China. *Environmental Modelling and Assessment*, 2009, 14(2): 221-230.
- [5] Han S S. Urban expansion in contemporary China: what can we learn from a small town? *Land Use Policy*, 2010, 27(3): 780-787.
- [6] Tian G J, Jiang J, Yang Z F, Zhang Y Q. The urban growth, size distribution and spatio-temporal dynamic pattern of the Yangtze River Delta megalopolitan region, China. *Ecological Modelling*, 2011, 222(3): 865-878.
- [7] Yin J, Yin Z E, Zhong H D, Xu S Y, Hu X M, Wang J, Wu J P. Monitoring urban expansion and land use/land cover changes of Shanghai metropolitan area during the transitional economy (1979-2009) in China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011, 177(1-4): 609-621.
- [8] Zhao K, Zhang A L, Li P. Driving forces of urban construction land expansion: an empirical analysis based on panel data of provinces. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(8): 1323-1332.
- [9] Li X H, Lin T, Zhang G Q, Xiao L S, Zhao Q J, Cui S H. Dynamic analysis of urban spatial expansion and its determinants in Xiamen Island. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(3): 503-520.
- [10] Peng J F. Simulation of Landuse Changes Using Minimal Cumulative Resistance Model: a Case Study of Yangzhong, Jiangsu Province[D]. Beijing: Peking University, 2000.
- [11] He C Y, Chen J, Shi P J, Fan Y D. City expansion model of metropolitan area in China: a case study of Beijing. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(2): 294-304.
- [12] Xu X B, Yang G S, Zhang J M. Simulation and prediction of urban spatial expansion of Lanzhou City. *Arid Zone Research*, 2009, 26(5): 763-769.
- [13] Quan Q, Tian G J, Sha M Q. Dynamic simulation of Shanghai urban expansion based on multi-agent system and cellular automata models. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2875-2887.
- [14] Li T, Sun W, Hu L, Chen Y J, Zhang H N. Rank-size, expansion and form characteristics of urban built-up areas in Pearl River Delta during 1930s and 1960s. *Journal of South China Normal University: Natural Science Edition*, 2009, (3): 114-120.
- [15] Che Q J, Duan X J, Guo Y, Wang L, Cao Y H. Urban spatial expansion process, pattern and mechanism in Yangtze River delta. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(4): 446-456.
- [16] Liu X F, Shu J M, Zhang L B. Research on applying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: as an example of Xiamen City. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(2): 421-428.
- [17] Yu K J. Landscape ecological security patterns in biological conservation. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 8-15.
- [18] Chen L D, Fu B J, Xu J Y, Gong J. Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on "Source-Sink" ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [19] Ma K M, Fu B J, Li X Y, Guan W B. The regional pattern for ecological security (RPES): the concept and theoretical basis.

- Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 761-768.
- [20] Li P X. Ecological importance zoning and its spatial overlay relationships with construction lands in Xijiang River Economic Belt of Guangxi, South China. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(10): 2651-2656.
- [21] Chen W, Sun W, Duan X J, Chen J L. Regionalization of regional potential development in Suzhou City. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(8): 839-846.
- [22] Wang J Y, Liu Y S, Zhang F G. GIS-based ecological suitability evaluation of industrial land use: a case study of Hainan Island. Journal of Mountain Science, 2007, 25(3): 290-294.
- [23] Costanza R, D'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Nature, 1997, 386(6630): 253-260.
- [24] Xie G D, Lu C X, Leng Y F, Zheng D, Li S C. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau. Journal of Natural Resources, 2003, 18(2): 189-196.
- [25] Piao Y, Ma K M. The influence of exchanging on the city expanding process: a case study in Beijing. Journal of Arid Land Resources and Environments, 2007, 21(12): 27-31.
- [26] de Roo G. Environmental conflicts in compact cities: complexity, decisionmaking, and policy approaches. Environment and Planning B: Planning and Design, 2000, 27(1): 151-162.
- [27] Lu D D, Yao S M, Liu H, Gao X L, Li G P, Duan J J. 2006 of China's Regional Development Report: Urbanization and Spatial Expansion (Chinese Edition). Beijing: Commercial Press, 2007.
- [28] Jia W C, Jia X Y, Li F Y, Wang J L. Dynamic changes of land use fractal characteristic in Weihai, China. Progress in Geography, 2009, 28(2): 193-198.
- [11] 何春阳, 陈晋, 史培军, 范一大. 大都市区城市扩展模型——以北京城市扩展模拟为例. 地理学报, 2003, 58(2): 294-304.
- [12] 徐昔保, 杨桂山, 张建明. 近 50 年兰州城市空间扩展模拟及其未来预测. 干旱区研究, 2009, 26(5): 763-769.
- [13] 全泉, 田光进, 沙默泉. 基于多智能体与元胞自动机的上海城市扩展动态模拟. 生态学报, 2011, 31(10): 2875-2887.
- [14] 李涛, 孙武, 胡莉, 陈颖嘉, 张惠娜. 1930s 和 1960s 珠江三角洲城镇建成区位序——规模、扩展及其形态特征. 华南师范大学学报: 自然科学版, 2009, (3): 114-120.
- [15] 车前进, 段学军, 郭垚, 王磊, 曹有挥. 长江三角洲地区城镇空间扩展特征及机制. 地理学报, 2011, 66(4): 446-456.
- [16] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428.
- [17] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [18] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 巩杰. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法——景观空间负荷对比指数. 生态学报, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [19] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [20] 李平星. 广西西江经济带生态重要性分区及其与建设用地的空间叠置关系. 生态学杂志, 2012, 31(10): 2651-2656.
- [21] 陈雯, 孙伟, 段学军, 陈江龙. 苏州地域开发适宜性分区. 地理学报, 2006, 61(8): 839-846.
- [22] 王介勇, 刘彦随, 张富刚. 海南岛土地生态适宜性评价. 山地学报, 2007, 25(3): 290-294.
- [24] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [25] 朴妍, 马克明. 交流强度对城镇扩展过程的影响——以北京为例. 干旱区资源与环境, 2007, 21(12): 27-31.
- [27] 陆大道, 姚士谋, 刘慧, 高晓路, 李国平, 段进军. 2006 年中国区域发展报告: 城镇化进程及空间扩张. 北京: 商务印书馆, 2007.
- [28] 贾文臣, 贾香云, 李福印, 王卷乐. 威海市土地利用分形特征动态变化. 地理科学进展, 2009, 28(2): 193-198.

参考文献:

- [8] 赵可, 张安录, 李平. 城市建设用地扩张的驱动力——基于省级面板数据的分析. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1323-1332.
- [10] 彭晋福. 应用最小累积阻力模型模拟土地利用变化——以江苏省扬州市为例[D]. 北京: 北京大学, 2000.