

DOI: 10.5846/stxb201905150988

李骞国,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.

Li Q G, Wang L C, Yan C X, Liu H Y. Simulation of urban spatial expansion in oasis towns based on habitat quality: a case study of the middle reaches of Heihe River. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(9): 2920-2931.

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

李骞国,王录仓*,严翠霞,刘海洋

西北师范大学,地理与环境科学学院,兰州 730070

摘要:绿洲是生态环境极为脆弱的区域。实现绿洲城镇化与生态安全的双赢,是干旱区面临的重大问题。传统城镇空间扩展模拟研究,只是单向考虑了城镇发展趋势,而较少兼顾区域生境质量的约束。利用 1992、2000、2008、2015 年四期 Landsat TM、ETM+、OLI 遥感影像数据,以黑河中游地区为例。从城镇空间扩展与生态环境协调发展的角度出发,通过 InVEST 模型与 SLEUTH 模型的结合,将生境质量的评估结果融入到城镇扩展模型中,对研究区 2015—2030 年城镇扩展的土地利用变化格局进行模拟。研究表明:①生境质量整体较低,质量阶序和退化程度分异明显。高、中等级生境质量区域主要分布在黑河干流沿线和绿洲核心区,分别占 5.69%、32.77%,生境退化程度高;低等级生境质量区域主要分布在戈壁荒漠区和城镇建设区,占 61.54%,生境退化程度低。②生境质量对城镇空间扩展的约束作用显著。相比较无生境质量约束,2030 年城镇建设用地面积和占用生态用地面积分别减少了 27.08%、63.61%,并且,城镇斑块间连接性较好、集聚程度高,以“填充式”扩展为主。③城镇空间扩展总体体现了生境质量的要求。2030 年新增城镇建设用地主要占用中、低等级生境质量区域,分别为 34.88%、63.36%。绿洲平原区和山前洪积扇区生境质量约束较强,较 2015 年仅增长了 51.53%、48.31%;绿洲边缘区生境质量约束性低,较 2015 年增长了 110.18%,是未来城镇发展的潜力区。研究结果为绿洲城镇与生态环境协调发展提供科学依据。

关键词:城镇空间扩展模拟;绿洲城镇;生境质量;InVEST 模型;SLEUTH 模型;黑河中游地区

Simulation of urban spatial expansion in oasis towns based on habitat quality: a case study of the middle reaches of Heihe River

LI Qianguo, WANG Lucang*, YAN Cuixia, LIU Haiyang

Geography and Environmental College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The oasis is a region with extremely fragile ecological environment. It is a major problem for arid areas to realize the win-win situation of urbanization and ecological security in oasis. The traditional simulation of urban spatial expansion only considers the urban development trend unilaterally, but less think about the constraints of regional habitat quality. Based on the Landsat TM, ETM+, OLI remote sensing image data of 1992, 2000, 2008 and 2015, we took the middle reaches of Heihe River as an example. From the perspective of coordinated development of urban spatial expansion and ecological environment and through the combination of InVEST model and SLEUTH model, the assessment results of habitat quality were integrated into the urban expansion model to simulate the land use change pattern of urban expansion in the study area from 2015 to 2030. The results showed that: 1) the overall quality of habitat in the study area was low, and the order of quality and the degree of degradation were obviously different. The high and middle grade habitat quality areas were mainly distributed along the main stream of Heihe River and the core area of oasis, accounting for 5.69% and 32.77%,

基金项目:国家自然科学基金项目(41261042,41771130, 41861034)

收稿日期:2019-05-15; 网络出版日期:2020-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wanglc007@nwnu.edu.cn

respectively, but with a high degree of habitat degradation. The low-grade habitat quality areas were mainly distributed in Gobi desert area and urban construction area, accounting for 61.54%, with a low degree of habitat degradation. 2) The restriction effect of habitat quality on urban spatial expansion was significant. Compared with the non-habitat quality constraints, the area of urban construction land and the area of ecological land occupied decreased by 27.08% and 63.61% in 2030, respectively. Moreover, the connectivity between urban patches was better and the degree of agglomeration was higher, and the “filling” expansion was the main type. 3) Urban spatial expansion generally reflects the requirements of habitat quality. In 2030, the newly added urban construction land mainly would occupy the middle and low grade habitat quality areas, accounting for 34.88% and 63.36%, respectively. The habitat quality of oasis plain and piedmont alluvial sector would be strongly constrained, which only increased by 51.53% and 48.31% compared with 2015. The constraint of habitat quality in oasis marginal area would be low, which increased by 110.18% compared with 2015. It would be the potential area of urban development in the future. The results of study provides scientific basis for the coordinated development of oasis towns and ecological environment.

Key Words: simulation of urban spatial expansion; oasis town; habitat quality; InVEST model; SLEUTH model; middle reaches of the Heihe River

改革开放以来,快速城镇化已成为我国经济社会发展的重要特征。城镇化水平由 1978 年 17.9% 提高到 2015 年的 56.1%, 预测至 2030 年, 中国的城镇化水平将达到 70%^[1]。城镇空间扩展是城镇化作用于地理空间的直接表现形式, 其引起的城镇用地增长及土地利用变化是土地利用/覆被变化 (Land Use and Land Cover Change, LUCC) 的重要研究内容^[2]。然而, 伴随着城镇化进程的持续推进, 城镇用地面积大幅增加, 导致城镇周边大量具有重要生态功能用地 (如耕地、林地等) 被侵占^[3], 由此带来生境退化、湿地减少、生态系统服务价值损失、生物多样性降低等一系列生态环境安全问题^[4-5], 已经严重影响到人类社会经济的可持续发展。因此, 如何实现城镇化和区域生态安全的“双赢”? 一直以来是地理学研究者关注的热点话题。

生境质量是指生态系统提供给个体或种群持续发展生存条件的能力, 被视为区域生物多样性和生态服务水平的重要表征^[6]。城镇化过程形成的土地利用剧烈变化, 通过改变生境结构与组成要素, 使生境的生产能力和服务功能逐渐下降, 进而影响区域气候、植被和生物栖息地等生态环境^[7]。近年来, 国内外学者围绕城镇发展与生态环境之间的关系, 主要开展了以下几个方面研究: (1) 城镇空间扩展对某种生态环境要素的影响研究, 包括对气候^[8]、水文^[9]、土壤性质的影响^[10]等。(2) 城镇空间扩展对生态环境的响应研究, 如对自然生境的作用^[11]、生态系统服务价值的变化^[12-13]、生态环境质量的评价^[14]等。(3) 通过对影响生态敏感性、生态适宜性和生态风险性等因子进行评价^[15-16], 构建生态安全格局, 来倒逼城镇空间增长界限, 优化城镇空间布局^[17]。(4) 采用城市演化动态模型对城镇土地利用变化过程进行模拟, 预测城镇空间扩展过程中的生态环境效应^[18-19]。总体来看, 已有研究对城镇空间扩展与生态环境影响的单向评价较多, 而将城镇发展与生态环境保护有机结合起来, 对生态环境质量约束下的城镇自组织增长规律研究较少, 缺乏将生境质量融入到城镇空间扩展中的前置性应用研究。

黑河流域是我国西北干旱区典型的内陆河流域, 地处河西走廊中部, 即是国家“一带一路”战略布局的重要节点, 也是甘肃省祁连山内陆河生态安全屏障的关键区域。黑河中游地区是全流域绿洲分布最为集中、开发条件较好的区域。随着水土资源利用和城镇化进程的快速推进, 不断加剧的人类活动导致流域生态环境质量持续退化^[20]。如何在推进城镇化进程中, 确保绿洲生态系统的稳定性, 是干旱区内陆河流域面临的重大问题。本文以黑河中游地区为研究区, 以该地区绿洲城镇为研究对象。在对研究区生境质量及其退化状况进行评估的基础上, 将其评估结果融入到城镇扩展模型中, 来模拟适宜生境阈值下的城镇规模, 并从城镇扩展占用土地类和景观格局指数两方面深入探讨有 (无) 生境质量约束下的城镇扩展差异性, 进而揭示不同等级城镇空间扩展的基本规律和格局特征, 为绿洲城镇发展与生态环境保护提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黑河中游是指从莺落峡至正义峡之间的河段,长约 185 km,地理位置介于 $98^{\circ}57'E$ — $100^{\circ}52'E$ 和 $38^{\circ}39'N$ — $39^{\circ}59'N$,南临祁连山,北依合黎山。行政边界包括甘州区、临泽县和高台县,总面积为 10737.71 km^2 。黑河贯穿全境,兰新铁路、G30 连霍高速、G312 等主要交通干线经过。属温带大陆性干旱气候,年降雨量为 50—250 mm,年蒸发量为 2000—3500 mm。土壤类型以灰棕漠土和灰漠土为主,植被为小灌木、半灌木等荒漠植被。地势南高北低,东高西低,自南向北分为山前洪积扇区、绿洲平原区和戈壁荒漠区。该地区现有 36 个城镇(图 1),主要分布在黑河沿岸和绿洲核心区,且沿黑河干流和交通道路呈串珠状展布,表现出典型的“亲水性”和“亲路性”特征。1992—2015 年城镇建设用地面积从 22.33 km^2 增加至 82.53 km^2 ,年均增长率为 5.85%。

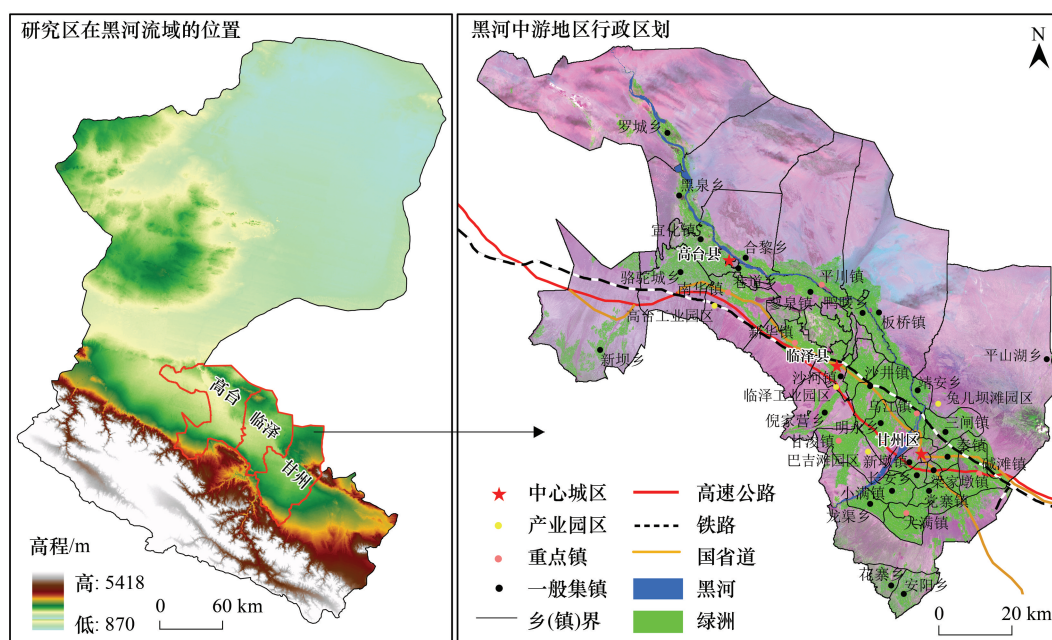


图 1 研究区区位图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源

研究数据主要来源于 1992 年和 2000 年 Landsat5 TM、2008 年 Landsat7 ETM+、2015 年 Landsat8 OLI 影像(行带号 33/133、33/134)、ASTER GDEM(30 m 分辨率),下载自地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)。应用 ENVI 4.7 和 ArcGIS 10.2 软件对影像进行几何校正、波段融合、图像增强、拼接等处理。解译时以研究区 2015 年土地利用变更调查数据为基准,首先对 2015 年遥感影像进行人工目视解译,再参照 2015 年解译结果对 1992 年、2000 年和 2008 年遥感影像进行解译,统一采用 WGS_1984 坐标系,最后通过野外抽样验证和谷歌地球高清影像验证,四期分类数据判读精度高于 92%。根据研究需要,参考土地利用现状分类标准(GB/T21010—2007)及研究区土地利用特点,建立二级土地利用类型分类体系(表 1)。

2 研究方法

2.1 生境质量评估模型

InVEST 模型的生境质量模块(Habitat Quality)常被用于区域生境质量的定量评估^[21-22]。该模型将土地利用/覆被类型与威胁源建立联系,通过对各威胁因子的敏感性和外界威胁强度来模拟评估生境质量。其建

模思路是基于人类活动影响因子进行评价,通过生境适应度、生境对各威胁因子的敏感性、威胁因子的影响距离和权重、土地受法律保护的程度四个因素来计算生境退化度和生境质量。首先计算生境退化度:

表 1 土地利用分类体系

Table 1 Land use classification system

一级地类 Class1	二级地类 Class2	一级地类 Class1	二级地类 Class2
耕地 Cultivated land	水田	水域 Water area	水库坑塘
	水浇地		内陆滩涂
	旱地		河流、沟渠、湖泊
林地 Wood land	有林地	建设用地 Construction land	城镇
	灌木林地		农村居民点
	其他林地		交通用地
未利用地 Unutilized land	盐碱地	草地 Grass land	采矿用地
	沼泽地		天然草地
	沙地		人工草地
	裸地		其他草地

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(w_r / \sum_{r=1}^R w_r \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (2)$$

$$i_{rxy} = \exp \left(\frac{-2.99d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{指数衰减}) \quad (3)$$

式中, D_{xj} 为土地利用/覆被类型 j 中 x 栅格的生境退化度; R 为威胁源个数; w_r 为威胁源 r 的权重; Y_r 为威胁源的栅格数; r_y 为栅格 y 的胁迫值; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫水平; β_x 为威胁源对栅格 x 的可达性(受法律保护的区域为 0,其余区域为 1); S_{jr} 为土地利用/覆被类型 j 对威胁源 r 的敏感度; d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 的直线距离; d_{rmax} 为威胁源 r 的最大胁迫距离。

在此基础上计算生境质量,其计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (4)$$

式中, Q_{xj} 为土地利用/覆被类型 j 中 x 栅格的生境质量指数; H_j 为土地利用/覆被类型 j 的生境适宜度,值为 $[0,1]$; D_{xj} 为土地利用/覆被类型 j 中 x 栅格的生境退化度; k 为半饱和常数,取 D_{xj} 最大值的一半; z 为归一化常量,通常设为 2.5。

本文以 2015 年土地利用/覆被数据为基础,假定土地的法律保护处于有效状态,将耕地、林地、草地和水域等作为生境,选取人类活动较强的城镇、农村居民点、交通用地和耕地作为生境威胁源。参考模型说明^[23]和研究区实际情况,对威胁源的最大影响距离及权重、不同类型生境的适宜度及各生境对威胁因子的敏感性进行设置(表 2、表 3)。

2.2 城镇扩展模拟模型

SLEUTH 模型能从中观到宏观尺度上模拟城市增长,且可以考虑政策规划、生态保护等不同城市发展理念,具有较强的普适性和兼容性,在国内外一些城市广泛应用^[24-26]。该模型假设历史增长趋势是持续的,未来的现象可以由过去真实演变数据模拟得到,通过对历史时期城市范围数据反复训练得到的五个系数(散布系数、繁殖系数、扩展系数、坡度系数、道路引力系数)模拟城市的 4 种增长方式(自发增长、新扩展中心增长、边缘增长与道路引力增长)。模型的运行分为数据准备阶段、校准阶段、预测阶段。

表 2 威胁源及其最大威胁距离、权重及衰减类型

Table 2 Threat and its maximum effect distance, weight and spatial decay type

威胁源 Threats	最大威胁距离/km Maximum distance of influence	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial decay type
城镇 Town	8	1	指数
农村居民点 Rural residential land	3	0.8	指数
采矿用地 Mining land	4	0.7	指数
交通用地 Transportation land	3	0.4	线性
耕地 Cultivated land	1	0.2	线性

表 3 生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度

Table 3 Habitat suitability degree and its relative sensitivity to each threat

生境类型 Habitat type	生境适宜度 Habitat suitability	城镇 Town	农村居民点 Rural residential land	采矿用地 Mining land	交通用地 Transportation land	耕地 Cultivated land
有林地 Arbor forest land	1	0.7	0.6	0.8	0.5	0.45
灌木林地 Shrub land	1	0.8	0.6	0.8	0.5	0.5
其他林地 Other forest land	0.8	0.7	0.55	0.7	0.5	0.4
天然草地 Nature grassland	0.9	0.7	0.6	0.7	0.6	0.5
人工草地 Artificial grassland	0.8	0.6	0.45	0.7	0.4	0.5
其他草地 Other grassland	0.3	0.6	0.5	0.65	0.5	0.5
河流、沟渠、湖泊 River, Canal, Lake	1	0.8	0.5	0.7	0.6	0.6
水库坑塘 Reservoir and pond	1	0.65	0.55	0.6	0.55	0.45
内陆滩涂 Inland beach	0.7	0.75	0.45	0.7	0.4	0.6
沼泽地 Marsh land	0.9	0.7	0.5	0.7	0.5	0.5
水田 Paddy land	0.6	0.65	0.45	0.7	0.5	0.5
水浇地 Irrigable land	0.4	0.6	0.5	0.7	0.45	0.4
旱地 Dry land	0.3	0.7	0.5	0.6	0.5	0.5
其他 Other	0	0	0	0	0	0

模型数据准备阶段要求至少一个坡度层 (slope)、两个土地利用层 (landuse)、一个排除层 (exclude)、四个城市范围层 (urban)、两个交通道路层 (transport) 和一个山体阴影层 (hillshade)。坡度层和阴影层通过对研究区 DEM 边界裁剪后,在 ArcGIS 10.2 中经空间分析后所得;土地利用层采用 1992 年和 2015 土地利用现状;从 1992、2000、2008、2015 年土地利用中提取城镇建设用地作为城镇范围层;根据遥感影像和张掖市综合交通现状图,经几何校正后数字化,提取高速公路、铁路、国省道、县乡道路以及城镇主干道、次干道形成 1992、2015 年交通道路层;将保护区和河流、水库等禁止城市化区域作为排除层。所有数据均转换为模型需要的 GIF 格式栅格数据,栅格大小 30 m×30 m,且保持相同的空间范围和统一的投影坐标系(图 2)。

模型校准阶段是模拟历史年份城市增长过程,得到一套反映城市演变规律的最优参数。模型采用蒙特卡罗迭代方法,分粗校准、精校准、终校准和预测参数获取四个阶段进行。在校准的每个阶段,通过计算 Lee-Salee 指数或 OSM 指数对系数组合进行排序,逐步缩小 5 个增长系数的取值范围。最后取步长为 1,进行 100 次蒙特卡罗迭代,得到研究区最佳增长系数组合,模型校准的具体参数设置见表 4。本文通过加载土地利用层同时校准 UGM 模型和 LCD 模型,将 1992 年数据图层作为模型校准的初始图层,以 2000、2008、2015 年 3 个时期的数据图层作为校准图层,导入模型进行参数校准,并选用 OSM 指数^[23]作为参数区间缩小的主要依据,经过四个阶段校准后,最终得到 5 个最佳系数值(表 4)。利用最佳系数初始化模型的预测模块,反演研究区 1992—2015 年城镇土地利用变化过程,运用 ROC 曲线对 2015 年模拟图与实际图的一致性进行精度验证。ROC 曲线根据其下方面积 (Area Under Curve, AUC) 来判断各用地类型的拟合度, AUC 的取值范围在 0.5—1 之间,值大于 0.7 时,模型拟合效果较好^[27]。

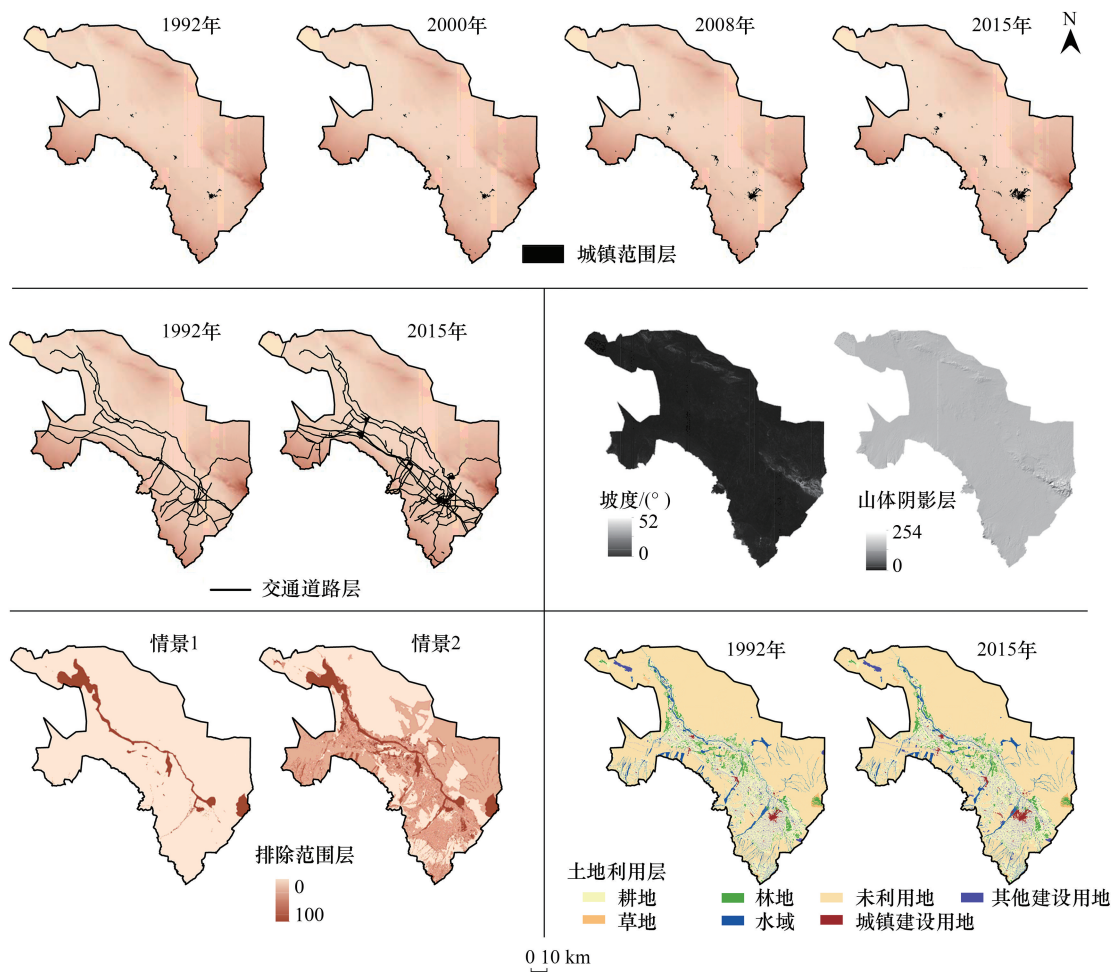


图 2 SLEUTH 模型需要的输入图层数据

Fig.2 Input layer data used for the SLEUTH model

表 4 SLEUTH 模型校准参数设置表

Table 4 Calibration parameter settings of the SLEUTH model

模型控制参数 Model control parameter	粗校准 Coarse calibration		精校准 Fine calibration		终校准 Final calibration		最佳参数获取 Optimum parameter acquisition		最佳增长系数 Optimal growth coefficient
	蒙特卡洛迭代 次数=4 Monte_carlo=4 OSM=0.624		蒙特卡洛迭代 次数=8 Monte_carlo=8 OSM=0.735		蒙特卡洛迭代 次数=12 Monte_carlo=12 OSM=0.812		蒙特卡洛迭代 次数=100 Monte_carlo=100		
	范围	步长	范围	步长	范围	步长	范围	步长	
	Range	Step	Range	Step	Range	Step	Range	Step	
散步系数 Dispersion_coefficient	0—100	25	0—25	5	3—10	1	1—1	1	55
繁殖系数 Breed_coefficient	0—100	25	0—75	10	15—60	7	15—15	1	47
扩展系数 Spread_coefficient	0—100	25	35—85	5	55—90	3	55—55	1	81
坡度系数 Slop_coefficient	0—100	25	25—70	5	30—55	1	35—35	1	5
道路引力系数 Road_coefficient	0—100	25	20—100	10	55—90	4	90—90	1	75

模型预测阶段通过修改增长系数、调整排除图层来设置不同情景方案,模拟未来城镇土地利用变化。为探究生境质量对城镇空间扩展的影响,通过修改排除层分别设置有(无)生境质量约束两种情景(图 2),来模

拟 2015—2030 年城镇扩展的土地利用变化格局。排除层取值在 0—100 之间,值越大,城市化概率越小。在不考虑城镇扩展中的生境质量约束情景下(情景一),仅将河流、水库、黑河湿地保护区和东大山自然保护区等禁止建设区域值设为 100 形成排除层;在考虑城镇扩展中的生境质量约束情景下(情景二),借助 ArcGIS 10.2 空间分析的栅格计算器工具,将 InVEST 模型输出的生境质量图中各地块单元生境值(0—1)转化为 0—100 之间,并叠加黑河湿地保护区和东大山自然保护区(值设为 100)形成排除层,重叠区域取像元最大值。

2.3 景观格局指数

景观格局指数通过高度浓缩景观格局信息,来定量描述斑块、斑块类别间以及整个景观的空间特征和异质性^[28]。研究以体现景观空间的破碎度、连接性与复杂性为依据来选择景观格局指数,从景观类型和景观水平两方面对比分析有(无)生境质量约束情景下城镇扩展特征。选择的景观格局指数有斑块数目、斑块密度、平均斑块面积、面积加权平均分维数、平均邻近指数、聚集度。具体计算由 Fragstats4.2 软件完成。各指数含义如表 5 所示。

表 5 景观格局指数及其含义
Table 5 Landscape index and meaning

景观指数 Landscape index	取值范围 Value range	含义 Implication
斑块数目 NP/个	$NP \geq 1$	斑块的数量越多,破碎化程度越高。
边界密度 ED/(m/hm ²)	$ED \geq 0$	景观被边界分割的程度,值越大,破碎化程度越高。
平均邻近度 MPI	$MPI \geq 0$	斑块间邻近程度,值越大,邻近度越高,景观连接性越好。
聚集度指数 AI	$0 < AI \leq 100$	同一类型斑块的聚集程度,值越大,斑块集聚度越高。
平均斑块面积 AREA_MN/hm ²	$AREA_MN > 0$	景观总面积与斑块数量的比值,值越大,破碎程度越低。
面积加权平均分维数 FRAC_AM	$1 \leq FRAC_AM \leq 2$	斑块形状的复杂程度,值越接近 1,斑块形状越规则

NP:斑块数目 Number of Patches;ED:边界密度 Edge Density;MPI:平均邻近度 Mean Proximity Index;AI:聚集度指数 Aggregation Index;AREA_MN:平均斑块面积 Mean of Patch Area;FRAC_AM:面积加权平均分维数 Area-Weighted Patch Fractal Dimension

3 结果分析

3.1 生境质量整体较低,质量阶序和退化程度分异明显

运行 InVEST 模型,输出黑河中游地区 2015 年生境质量和生境退化度图(图 3),通过计算,平均生境质量指数为 0.32,整体生境质量值较低。为便于比较生境质量空间分布状况,采用 ArcGIS 10.2 软件的自然断裂法将研究区生境质量划分为高[0.8—1.0]、中[0.4—0.8]、低[0—0.4]3 个等级。发现绿洲平原区和山前洪积扇生境质量存在明显的空间分异,且生境退化程度由绿洲边缘区向核心区递增。高等级生境质量集中分布在黑河干流沿线和植被较好的区域,以水域和林地、草地为主,仅占总面积的 5.69%,但出现了一定程度的退化;而在绿洲核心区,受长期农业活动和城镇村建设等威胁源干扰,生境出现了较为严重的退化,尤其是在绿洲腹地的耕作区和城镇周边,生境质量值为中等,占总面积的 32.77%;低等级生境质量区域主要分布在城镇建设区和绿洲外围的戈壁荒漠区,占总面积的 61.54%,以裸地、荒草地和沙地为主,其退化程度低。由此可见,研究区生境质量和退化程度在空间上不匹配,城镇发育区域生境质量较好,但退化程度也高,城镇发展对生境产生了较强的胁迫性。因此,为了保证绿洲区域生境质量状况,必须扼制城镇建设用地的无序蔓延。

3.2 有(无)生境质量约束情景下,城镇扩展差异很大

3.2.1 SLEUTH 模型校准结果与精度验证

由表 4 可见,模型校准最终得到的 5 个最佳系数值中,扩展系数(81)和道路引力系数(75)较大,说明城镇主要以边缘扩展和道路引力扩展为主,受已有城镇斑块及交通牵引带动作用较强;坡度系数仅为 5,说明城镇扩展较少受地形、坡度因素的制约,这与多数城镇位于绿洲平原区有关;散步系数控制着城镇的自发增长程度,其值为 55,表明出现新的城镇斑块的随机性较大;繁殖系数为 47,说明自发增长形成的城镇斑块有可能成

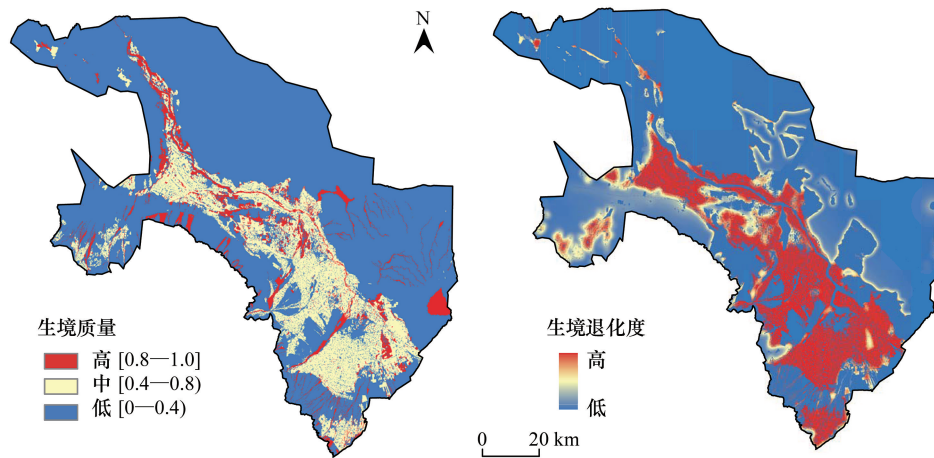


图3 研究区生境质量和退化度空间分布

Fig.3 Spatial distribution of habitat quality and habitat degradation in the study area

为新的城镇增长中心。使用 ROC 曲线对 2015 年土地利用模拟图与现状图进行验证,结果显示,不同土地利用类型的 AUC 值中,林地(0.88)>未利用地(0.86)>城镇建设用地(0.83)>水域(0.80)>耕地(0.80)>其他建设用地(0.75)>草地(0.74),除其他建设用地和草地的 AUC 值较低外,其他用地类型均达到 0.8 以上,说明该模型能较好地用于模拟研究区城镇土地利用变化过程。

3.2.2 城镇扩展占用地类差异

以 2015 年土地利用现状图为基础,输入各数据图层及最佳增长系数,调用 SLEUTH 模型预测模块,得到 2030 年城镇扩展的土地利用变化模拟图(图 4),可见,有生境质量约束情景下,城镇扩展规模较小,空间形态较为紧凑,有效地抑制了城镇建设用地增长。统计两种情景下城镇扩展占用地类情况(表 6),发现无生境质量约束情景下,城镇建设用地面积为 181.82 km²,年均增长率为 5.41%,与历史时期基本持平,其中占用耕地、林地、草地和水域面积分别为 47.53 km²、3.62 km²、2.64 km²和 1.83 km²,使具有生态功能的用地被较多侵占;有生境质量约束情景下,城镇建设用地面积为 132.58 km²,年均增长率为 3.21%,较历史时期降低了 2.64%,相比较无生境质量约束情景,占用了较少的生态用地,分别减少了 61.58%、68.89%、95.83%和 57.38%。由此可见,生境质量约束情景下,能够有效地控制城镇建设用地扩展的数量与速度,避免了对绿洲生态用地的大量占用,有利于研究区生态环境保护。

表 6 2030 年不同情景下城镇扩展占用地类面积/km²

Table 6 Area of different kinds of land occupied by urban expansion under different scenarios in 2030

土地利用类型 Land use type	耕地 Cultivated land	林地 Wood land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用地 Unutilized land	总计 Total
无生境质量约束 Non-habitat quality constraint	47.53	3.62	2.64	1.83	6.65	37.02	99.29
有生境质量约束 Habitat quality constraint	18.26	1.09	0.11	0.78	3.95	25.86	50.05

3.2.3 城镇建设用地扩展模式差异

采用景观格局指数对预测年份城镇斑块进行分析,定量对比有(无)生境质量约束情景下的城镇建设用地扩展特征(表 7)。无生境质量约束情景的斑块数目 NP 是有生境质量约束情景的 1.3 倍,但平均斑块面积 AREA_MN 仅为有生境质量约束情景的 0.6 倍,且边界密度 ED 是有生境质量约束情景的 1.4 倍,表明无生境质量约束情景下的城镇斑块增长速度较快,具有一定程度的破碎性。比较两种情景下的平均邻近度 MPI 和

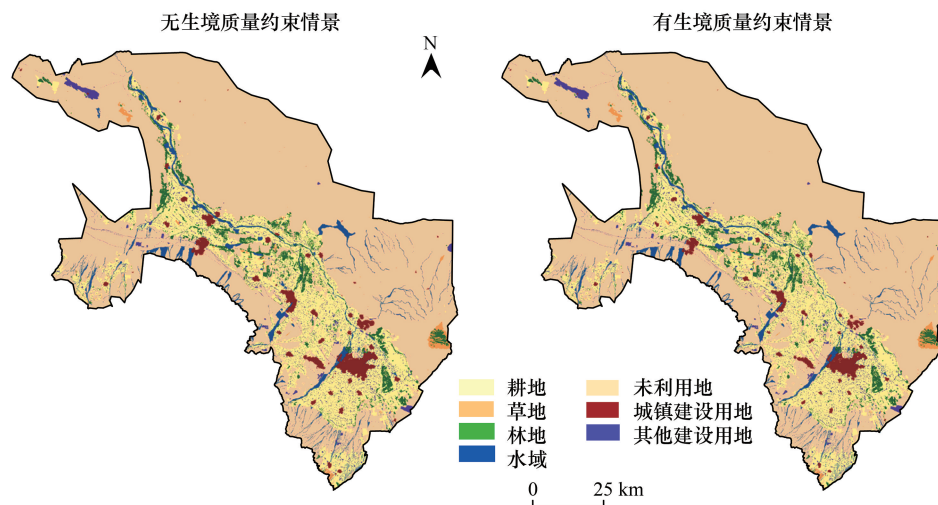


图 4 2030 年不同情景下城镇土地利用变化模拟图

Fig.4 Simulation map of urban land use change under different scenarios in 2030

聚集度 AI,发现有生境质量约束情景的值都要大于无生境质量约束情景,说明其相邻城镇斑块之间距离较近,斑块间的连接性较好,新增城镇建设用地集聚程度较高,以“填充式”扩展为主,有利于保护绿洲生态空间;无生境质量约束情景的 FRAC_AM 值也较大,说明城镇斑块形状更加复杂与不规则,新增城镇建设用地的随机性较强,以“蔓延式”扩展为主,对绿洲生境质量产生较强的胁迫性,是一种不可持续的扩展方式。

表 7 2030 年不同情景下城镇建设用地景观格局指数

Table7 Landscape index of urban construction land under different scenarios in 2030

景观格局指数 Landscape pattern index	NP	ED	AREA_MN	FRAC_AM	MPI	AI
无生境质量约束 Non-habitat quality constraint	3364	0.23	2.2	1.53	1227.93	55.6
有生境质量约束 Habitat quality constraint	2587	0.16	1.32	1.29	1613.57	86.8

3.3 生境质量对研究区城镇扩展的影响

以有生境质量约束情景下的 2030 年城镇土地利用模拟图为对象,统计不同等级城镇新增城镇建设用地面积(表 8)。发现预测年份一级城镇新增面积为 30.86 km²,较 2015 年增长了 59.47%;二级城镇新增面积为 14.66 km²,较 2015 年增长了 77.40%;重点镇新增面积为 1.01 km²,较 2015 年增长了 24.4%;一般集镇新增面积为 3.52 km²,较 2015 年增长了 46.56%。将不同等级城镇新增城镇建设用地与生境质量分布图进行叠置分析,发现占用高等级生境质量面积为 0.88 km²,仅占新增城镇建设用地的 1.76%,而占用中、低等级生境质量面积为 17.46 km²、31.71 km²,分别占新增城镇建设用地的 34.88%、63.36%(表 9)。具体来看,一级城镇主要占用中(33.54%)、低(65.68%)等级生境质量;二级城镇主要占用低等级生境质量(74.56%);重点镇(71.29%)和一般集镇(84.38%)主要占用中等级生境质量,但是增长面积有限,仅占研究区新增城镇建设用地总面积的 7.37%。由此可见,城镇空间扩展总体体现了生境质量的要求,预测年份新增城镇建设用地以占用中、低等级生境质量为主,并且低等级生境质量是城镇空间扩展的主要区域。

从新增城镇建设用地空间分布来看(表 8),绿洲平原区生境质量约束性较强,城镇空间扩展速度缓慢,其中:绿洲核心区新增城镇建设用地面积为 30.55 km²,较 2015 年增长了 52.01%,黑河干流沿岸新增城镇建设用地面积为 4.89 km²,较 2015 年仅增长了 48.8%;而位于荒漠-绿洲过渡带的绿洲边缘区,生境质量约束性较

低,且受过境交通牵引力作用,城镇空间扩展速度较快,主要体现在城镇产业园区的增长,新增城镇建设用地面积为 14.18 km²,较 2015 年增长了 110.18%;山前洪积扇区城镇距绿洲核心区较远,且并未处于主要交通沿线,城镇发展相对孤立,在局地生境约束下,新增城镇建设用地面积仅为 0.43 km²,较 2015 年增长了 48.31%。

表 8 2030 年不同等级城镇新增城镇建设用地面积和增长率
Table 8 New urban construction land area and growth rate of different grade towns in 2030

城镇等级 Town grade	城镇名称 Town name		绿洲核心区 Oasis core area		黑河干流沿岸 The Main Stream of Heihe River		绿洲边缘区 Oasis margin		山前洪积扇 Piedmont alluvial fan		总计 Total		
			面积 Area/ km ²	增长率 Growth rate/%	面积 Area/ km ²	增长率 Growth rate/%	面积 Area/ km ²	增长率 Growth rate/%	面积 Area/ km ²	增长率 Growth rate/%	面积 Area/ km ²	增长率 Growth rate/%	
一级城镇 Fist-class town	甘州城区	中心城区	24.08	52.85	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	30.86	59.47	
(>10 万)		兔儿坝滩园区	0.0	0.0	0.0	0.0	2.06	68.44	0.0	0.0			
		巴吉滩园区	0.0	0.0	0.0	0.0	4.72	142.17	0.0	0.0			
二级城镇 Secondary town	临泽城区	中心城区	4.51	73.81	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	14.66	77.40	
(5—10 万)		临泽工业园区	0.0	0.0	0.0	0.0	3.32	111.04	0.0	0.0			
		高台城区	中心城区	0.0	0.0	2.75	43.72	0.0	0.0	0.0	0.0		
		高台工业园区	0.0	0.0	0.0	0.0	4.08	114.93	0.0	0.0			
重点镇 Major town	甘俊镇、大满镇、碱滩镇、新华镇、南华镇		0.69	18.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.01	24.40	
(0.2—1 万)	乌江镇、平川镇		0.0	0.0	0.32	68.09	0.0	0.0	0.0	0.0			
一般集镇 General town	上秦镇、三闸镇、新墩镇、沙井镇、党寨镇、梁家墩镇、小满镇、长安乡、龙渠乡、明永乡、蓼泉镇、倪家营乡、骆驼城乡		1.27	37.24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.52	46.56	
(<0.2 万)	靖安乡、板桥镇、蓼泉镇、鸭暖乡、宣化镇、罗城乡、合黎乡、巷道乡、黑泉乡		0.0	0.0	1.82	55.83	0.0	0.0	0.0	0.0			
	安阳乡、花寨乡、新坝乡		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.43	48.31			
	总计 Total		30.55	52.01	4.89	48.8	14.18	110.18	0.43	48.31	50.05	60.64	

括号内的数据为城镇人口/万,来源于张掖市城市总体规划(2012—2020 年)

表 9 2030 年不同等级城镇新增城镇建设用地占地类生境质量
Table 9 Habitat quality of land occupied by newly added urban construction land of different grade towns in 2030

生境质量等级 Habitat quality grade	一级城镇 Fist-class town		二级城镇 Secondary town		重点镇 Major town		一般集镇 General town		总计 Total	
	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%	面积 Area/km ²	%
高 High[0.8—1.0]	0.24	0.78	0.31	2.11	0.15	14.85	0.18	5.11	0.88	1.76
中 Medium[0.4—0.8)	10.35	33.54	3.42	23.33	0.72	71.29	2.97	84.38	17.46	34.88
低 Low[0—0.4)	20.27	65.68	10.93	74.56	0.14	13.86	0.37	10.51	31.71	63.36

4 讨论

研究采用 InVEST 模型的生境质量模块,定量评估了受人类活动影响的生境质量状况,突破了以往对区域生态空间质量的传统经验主义认识。同时,在设置城镇空间扩展的情景模拟时将其转化为 SLEUTH 模型排除层的概率值,改变了以往人为主观设置的随意性,也提高了模拟结果的准确性。研究所得的生境质量评估值及不同等级城镇空间扩展特征,将为研究区生态环境保护政策和城镇发展路径提供重要依据。

干旱区水资源短缺决定了绿洲脆弱的生态环境状况,为解决绿洲城镇发展过程中的生态环境问题,可通过整合区域性的生产、生活和生态空间,实施差异化的空间管制策略,以寻求可持续的绿洲城镇发展模式。即引导大规模、高强度的生产性活动向生境质量约束力较低的区域转移,降低高、中等级生境质量区域的城镇开发强度,使其主要承担生活服务功能和生态保育功能。研究区的绿洲边缘地带,有生境质量相对较低的戈壁、

荒滩等未利用地,引导城镇产业优先向满足建设条件的该区域布局,既可以解决城镇发展中的用地问题,也可以将其对生态环境的负面影响降到最低。而在绿洲平原区应充分发挥城镇集聚效应,促进区域人口、经济和服务等生活性要素向城镇聚集,以减轻人类活动对区域生态环境造成的压力。同时,必须实施集约化的城镇扩展模式,避免低效率的零散式扩展,引导城镇空间形态呈团聚状分布,减少其对绿洲生境的影响。

5 结论

本文以典型的干旱区内陆河流域黑河中游地区为例,采用 InVEST 模型对研究区生境质量及其退化状况进行定量评估,并将评估结果融入到 SLEUTH 模型中,对未来城镇空间扩展的土地利用变化格局进行模拟,分析生境质量对绿洲城镇空间扩展的影响。主要结论如下:

(1) 根据生境质量评估结果,研究区整体生境质量较低,高等级生境质量仅占 5.69%,主要分布在黑河干流和植被较好的区域;中等级生境质量占 32.77%,主要分布在绿洲核心区,退化程度严重;低等级生境质量占 61.54%,主要分布在城镇建设区和绿洲外围的戈壁荒漠区。

(2) 对比两种情景下城镇空间扩展模拟结果,发现无生境质量约束,城镇扩展速度较快,斑块破碎化显著,以“蔓延式”为主。而在有生境质量约束下,城镇扩展速度减缓,城镇建设用地面积和占用生态用地总面积分别减少了 27.08%、63.61%,并且,城镇空间形态紧凑,城镇斑块间连接性较好、以“填充式”扩展为主。

(3) 城镇空间扩展总体体现了生境质量的要求,新增城镇建设用地占用中、低等级生境质量。绿洲平原区和山前洪积扇区生境质量约束性强,城镇扩展速度缓慢,新增城镇建设用地面积分别为 35.44 km²、0.43 km²;绿洲边缘区生境质量约束性较低,城镇扩展速度较快,新增城镇建设用地面积为 14.18 km²。

快速城镇化进程中,社会经济发展往往会凌驾于生态环境保护之上,城镇空间扩展愈发强烈。后续研究中需要进一步探究生境质量的演化过程及其影响机制,以不断调整和优化生境结构与组成要素,科学判断生态环境所能承载的最大城镇规模,划定城镇空间增长边界,有效地控制城镇扩展规模。此外,本文是基于“生态优先”理念,将生境质量结果融入到城镇扩展模拟模型中,来研究未来城镇空间自组织增长规律。但是,城镇空间扩展受社会、经济、政策等多因素和多微观主体博弈的综合作用过程,存在许多不确定性。因此,综合考虑影响城镇发展各类因子,建立融合多因子的地理模拟系统,模拟未来城镇发展趋势,将是未来研究的重要议题。

参考文献(References):

- [1] 中国社会科学院城市发展与环境研究所. 2013 中国人类发展报告: 可持续与宜居城市——迈向生态文明. 北京: 中国对外翻译出版有限公司, 2013.
- [2] 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 张增祥, 邓祥征. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学(D 辑), 2002, 32(12): 1031-1040.
- [3] Deng X Z, Huang J K, Rozelle S, Zhang J P, Li Z H. Impact of urbanization on cultivated land changes in China. Land Use Policy, 2015, 45: 1-7.
- [4] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [5] 赵丹, 李锋, 王如松. 城市土地利用变化对生态系统服务的影响——以淮北市为例. 生态学报, 2013, 33(8): 2343-2349.
- [6] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例. 生态学报, 2018, 38(20): 7300-7311.
- [7] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [8] Wang X M, Liao J B, Zhang J, Shen C, Chen W H, Xia B C, Wang T J. A numeric study of regional climate change induced by urban expansion in the Pearl River Delta, China. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(2): 346-362.
- [9] Alberti M, Booth D, Hill K, Coburn B, Avolio C, Coe S, Spirandelli D. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: an empirical analysis in Puget lowland sub-basins. Landscape and Urban Planning, 2007, 80(4): 345-361.
- [10] 黄辉. 城市化背景下城市边缘带土壤资源数量及质量变化研究. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [11] 宋世雄, 刘志锋, 何春阳, 赵瑞, 任强. 城市扩展过程对自然生境影响评价的研究进展. 地球科学进展, 2018, 33(10): 1094-1104.
- [12] Xie W X, Huang Q X, He C Y, Zhao X. Projecting the impacts of urban expansion on simultaneous losses of ecosystem services: A case study in Beijing, China. Ecological Indicators, 2018, 84: 183-193.

- [13] 孙泽祥, 刘志锋, 何春阳, 邬建国. 中国北方干燥地城市扩展过程对生态系统服务的影响——以呼和浩特-包头-鄂尔多斯城市群地区为例. 自然资源学报, 2017, 32(10): 1691-1704.
- [14] 杨山, 汤君友. 无锡市空间扩展的生态环境质量综合评价研究. 中国人口·资源与环境, 2003, 13(1): 65-69.
- [15] 李广娣, 冯长春, 曹敏政. 基于土地生态敏感性评价的城市空间增长策略研究——以铜陵市为例. 城市发展研究, 2013, 20(11): 69-74.
- [16] 刘焱序, 彭建, 孙茂龙, 杨旸. 基于生态适宜与风险控制的城市新区增长边界划定——以济宁市太白湖新区为例. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2605-2613.
- [17] 丛佃敏, 赵书河, 于涛, 陈诚, 王小标. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定——以天水市规划区(2015—2030年)为例. 自然资源学报, 2018, 33(1): 14-26.
- [18] Tang Z, Engel B A, Pijanowski B C, Lim K J. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*, 2005, 76(1): 35-45.
- [19] 郑凯迪. 中国典型城市时空扩展模拟及其生态环境影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [20] 王新华, 张志强. 黑河流域土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 生态环境, 2004, 13(4): 608-611.
- [21] 刘智方, 唐立娜, 邱全毅, 肖黎娜, 许通, 杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. 生态学报, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [22] 冯舒, 孙然好, 陈利顶. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究. 生态学报, 2018, 38(12): 4167-4179.
- [23] Tallis H, Ricketts T, Guerry A, Wood S, Sharp R, Chaplin-Kramer R. InVEST 3.3.0 User's guide: integrated valuation of environmental services and tradeoffs. 2015. [2017-10-10]. http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/3_0_0/.
- [24] Clarke K C, Hoppen S, Gaydos L. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay Area. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1997, 24(2): 247-261.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 薛贝, 张红旗, 刘长星, 许尔琪, 蔺小虎. 贵州六盘水市土地利用动态模拟研究. 山地学报, 2018, 36(1): 132-142.
- [28] 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.