

城市扩张生态效应预测对输入数据的敏感性研究

蔡凌雁, 王丽妍, 伍 阳, 李飞雪, 陈 东

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023; 2. 南京大学 江苏省地理信息技术重点实验室, 南京 210023)

摘 要:城市扩张模型被广泛应用于多种生态保护情景下的城市扩张预测,然而不同的输入数据会导致模型预测的不确定性,从而影响城市的规划管理和生态保护决策。以常州市市区为研究区,通过土地利用变更数据和遥感影像数据获取两种城市用地图层作为 SLEUTH 模型的输入数据,对比研究了城市范围的差异对生态效应预测结果的影响。结果表明:(1)两种城市输入层得到的模型校准精度不同。(2)不同城市输入图层对城市扩张预测结果产生影响,城市扩张数量和年平均增长率存在明显差异。(3)生态效应预测结果对城市输入图层的敏感性较强,两种城市图层包含的土地利用类型和最小制图单元不同,建模者应根据具体研究目标和要求,选择合适的模型输入数据,以获取相对准确的生态保护结论。

关键词:城市扩张模型;生态效应;输入数据;敏感性;常州市

中图分类号:F293.2; F301.2; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)01-0272-07

Research on the Sensitivity of Forecasting Ecological Effect of Urban Growth to Input Data

CAI Lingyan, WANG Liyan, WU Yang, LI Feixue, CHEN Dong

(1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The urban growth model is widely used in urban expansion prediction in many kinds of ecological protection scenarios. However, different input data will lead to the uncertainty of the model, which will affect the city planning management and ecological protection decision. In this study, Changzhou downtown was taken as the research example, and two kinds of urban layers were selected as the input data of SLEUTH model. Through the contrast experiment, we examined the influence of different urban ranges on the ecological effect prediction. The results show that: (1) two urban input layers lead to different model calibration accuracies; (2) urban expansion prediction results differ from each other, urban expansion quantity and average annual growth rate are diverse; (3) prediction results of ecological effect are sensitive to the urban input layers, two kinds of urban layers contain different land use types and the smallest mapping units; the model developer should select the appropriate model input data according to the specific research objectives and requirements in order to obtain relatively accurate conclusions of the ecological protection.

Keywords: urban growth model; ecological effect; input data; sensitivity; Changzhou City

当前城市的生态环境正受到威胁,破碎化增加、连通性降低、环境质量下降,这与城市扩张紧密相关。城市化过程会伴随自然景观、土地利用方式的变化,会影响到各种生态过程、生物栖息地,从而造成对生态系统结构和功能的改变^[1],进而威胁可持续发展和居民生活质量^[2]。因此,城市扩张与生态效应的研究逐渐受到重视。城市扩张模型如马尔科夫模型、逻辑回归模型、元胞自动机模型和多智能体模型等,被广泛应用于

城市扩张预测与生态效应分析,相关研究通常应用城市扩张模型对城市土地利用变化进行模拟和预测,评价和分析由此带来的生态效应,并为生态规划和城市发展提供决策依据^[3-6]。随着城市扩张模型的发展和完善,模型复杂度不断增加,使得模型中不确定因素的研究越来越重要^[7],相关学者对模型校准方法、数据时序差异、粒度效应等方面都开展了相应研究^[8-11]。

模型空间输入数据的差异是模型的一个不确定因

收稿日期:2016-03-07

修回日期:2016-03-31

资助项目:国家自然科学基金(40901184);国土资源部公益性行业科研专项(201411014-3)

第一作者:蔡凌雁(1991—),女,江苏丹阳人,硕士,研究方向为城市扩张与 GIS。E-mail:lingyan_0825@163.com

通信作者:李飞雪(1983—),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事地理信息系统应用研究。E-mail:njulifexue@163.com

素,合适的输入数据可以提高模型的模拟准确性^[12]。其中,不同的数据源得到的城市范围输入图层在时间分辨率、空间分辨率和分类体系等方面有所不同,但数据获取的有限性导致建模者不能根据应用目标选取合适的数据来源来确定城市范围,影响了以模型预测结果为参考依据的城市管理和生态保护决策^[13]。从已有研究来看,少有学者探索不同来源的城市输入图层对城市扩张模型预测结果产生的影响。为此,本文以常州市为研究区,以 SLEUTH 城市扩张模型为例,通过土地利用变更数据和遥感影像数据这两种数据源获取城市图层,作为模型输入数据,进行对比试验,探索城市扩张引起的生态效应预测对输入数据的敏感性。

1 研究区概况

常州市(31°09′—32°04′N,119°08′—120°12′E)位于江苏省南部、长江三角洲中心地带,是长江三角洲新型城镇化最快的地区之一,包括溧阳、金坛 2 个县级市和武进、新北、天宁、钟楼、戚墅堰 5 个市辖区,总面积约 4 372 km²。2014 年,常州市总人口约 470 万人(其中城镇人口约 323 万人,约占 69%),人口密度约 1 075 人/km²,远高于同时期中国平均人口密度(143 人/km²)。2014 年,常州市人均 GDP 达 104 423 元,远高于同时期中国人均 GDP(46 531 元)。本研究区为常州市市辖区,面积约 1 862 km²,约占常州市总面积的 43%,是常州市政治、经济和文化中心。随着常州市城镇化和现代化进程的加速推进,土地供需矛盾突出、生态问题凸显,在一定程度上影响了常州市的可持续发展。因此,亟需探索城市扩张带来的生态效应问题,准确为常州市城市发展和生态保护提供对策。

2 研究方法与数据准备

2.1 城市扩张模型

本文采用的城市扩张模拟模型为 SLEUTH 模型,该模型可以结合大型空间数据库和不同分辨率的遥感数据,在不同时空尺度上模拟预测城市土地利用的变化^[14],且模型具有开放式存取、源代码的可用性以及操作简单等特性,从而使其在全球范围得到广泛应用。除此之外,SLEUTH 模型在景观变化模拟及预测、区域开发政策与城市规划方案评估以及环境影响评价方面表现出重要的应用价值^[15]。SLEUTH 模型由 5 个增长控制系数(扩散系数、繁殖系数、传播系数、坡度阻抗系数、道路引力系数)决定了 4 种增长方式(自发增长、新扩展中心增长、边缘增长、道路影响增长),根据校准过程获得的最佳系数值对未来城市扩张进行预测。

2.1.1 空间输入数据 模型所需的空间输入数据包括城市图层(Urban)、交通图层(Transportation)、排除层(Excluded)、坡度层(Slope)和山体阴影层(Hill-shade),见图 1。

(1) 城市图层。城市图层的两个数据源为:土地利用变更数据(U₁)和遥感影像数据(U₂)。其中,土地利用变更数据来源于常州市国土资源局,比例尺为 1:50 000,选取 2004 年、2009 年、2011 年和 2013 年 4 个年份,将城镇用地转换为栅格图层,如图 1A—1D 所示;经统计,2013 年最小城市图斑面积为 1 hm²,平均城市图斑面积为 25 hm²。另一个数据集来自遥感影像解译,遥感影像分辨率为 30 m,为与第 1 个数据集形成对比,根据遥感影像的实际可获取情况,选择时间间隔与跨度较为接近的 2004 年、2008 年、2010 年和 2013 年,通过改进的建设用地指数^[16]提取建设用地,并采用平滑和去除小图斑操作进行后处理得到城镇用地,如图 1F—1I 所示;经检验,总体精度满足要求(均大于 80%),统计得 2013 年最小城市图斑面积为 10 hm²,平均为 198 hm²,2013 年城镇面积占比约 36%(土地利用变更数据约 25%)。

(2) 其他图层。对比试验中的其他图层均相同,包括交通图层、排除图层、坡度层和山体阴影层。其中,交通图层为 2004 年和 2013 年的主要交通道路,见图 1E,1J;排除层包含水域、生态保护区和基本农田(体现保护政策),见图 1K;坡度层和山体阴影层来自 DEM 数据,分辨率为 50 m,见图 1L,1M。所有输入图层转换为像元大小为 100 m 的栅格数据,输入模型时需转换成灰度图。

2.1.2 模型校准和预测 模型校准包括粗校准、精校准、终校准和预测参数获取。在校准过程中,模型借助蒙特卡洛迭代方法逐渐缩小增长控制系数的范围,根据获得的最佳系数值对未来城市扩张进行预测。在校准阶段用于确定模型的最佳拟合优度指标为 OSM_NS (Optimal SLEUTH Metric, No Slope)^[17],即:

$$OSM_NS = Compare \cdot Pop \cdot Edges \cdot Clusters \cdot X_{mean} \cdot Y_{mean} \quad (1)$$

OSM_NS 指标测定了模型增长数量的准确度(Compare 和 Pop)、增长位置的准确度(X_{mean} 和 Y_{mean})、大小和形状(Clusters 和 Edges),OSM_NS 值越大,表示模拟结果越接近真实情况^[17]。

2.2 生态效应分析方法

2.2.1 景观格局指数 为研究预测结果的范围和空间格局差异,计算两个数据集 2013—2030 年预测结果的景观格局指数,具体见表 1。

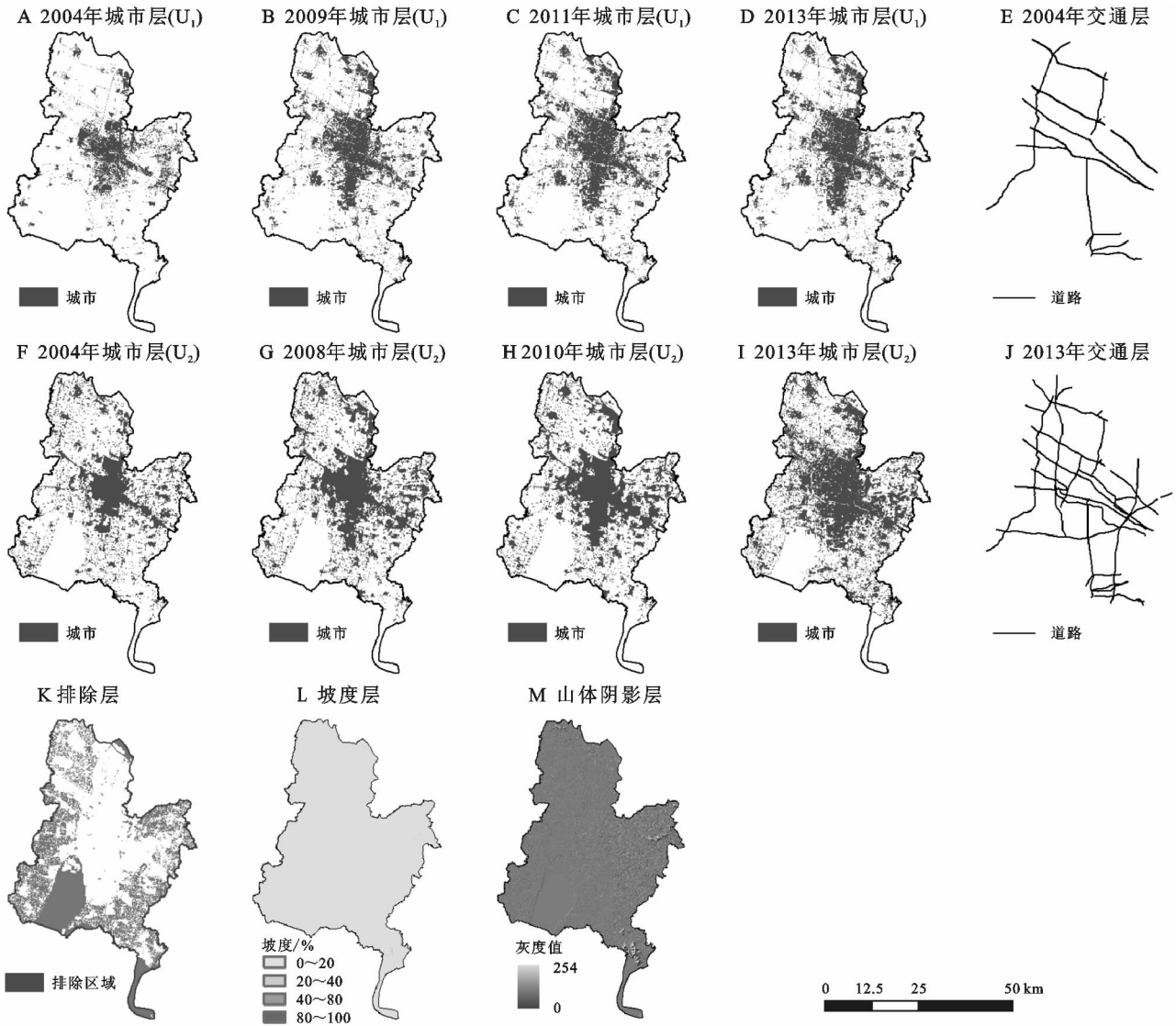


图 1 输入图层

表 1 景观格局指数

景观格局指数公式	释义
(1) 城市斑块数量 (Number of Patches, NP) $NP=N$, N 为斑块总数	城市斑块在研究区内的个数,当城市面积一定时,斑块数越大表明城市在研究区内的空间分布越分散
(2) 城市最大斑块指数 (Largest Patch Index, LPI) $LPI=\frac{MAXa_{ij}}{A}\times 100\%$, a_{ij} 表示斑块 ij 的面积, A 表示景观总面积	城市类型中的最大斑块占整体区域面积的比例,值越大表明城市的主导现象越明显
(3) 景观形状指数 (Landscape Shape Index, LSI) $LSI=\frac{0.25E}{\sqrt{A}}$, E 表示斑块边缘总长度, A 表示景观总面积	用以度量斑块形状的复杂性,形状越不规则,边缘长度越长,值越大。形状指数降低,表明景观中斑块形状趋于规则
(4) 城市蔓延度指数 (Contagion Index, CONTAG) $CONTAG=\left\{1+\frac{\sum_{i=1}^m\sum_{k=1}^m[P_i(g_{ik}/\sum_{k=1}^mg_{ik})][\ln P_i(g_{ik}/\sum_{k=1}mg_{ik})]}{2\ln m}\right\}\times 100\%$ P_i 表示第 i 类斑块所占比例, g_{ik} 表示第 ik 类斑块的邻接性, m 表示斑块总数	描述城市斑块的团聚程度或延展趋势。高蔓延度值说明研究区内的城市斑块类型形成了良好的连接性;反之则表明景观是具有多种要素的密集格局,城市景观的破碎化程度较高

2.2.2 生境质量评价方法 为确定不同城市输入图层对生态效应的影响,本文采用生态系统服务评估工具 InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Model)计算生境质量。该模型能够将遥感与 GIS 的优势相结合,可根据土地利用/覆被图的时空变化来模拟生态系统服务功能的动态变化,其直观可视的评价结果可为决策者权衡人类活动的影响提供科学依据^[18]。研究采用模型的生境

质量评价模块,生境质量的高低取决于人类对生境周边土地的利用方式和利用强度,一般而言,生境质量随着周边土地利用强度的提高而退化^[19]。土地覆盖类型 j 中栅格单元 x 的生境质量 Q_{xj} 计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j (1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}) \tag{2}$$

式中: H_j 为土地覆盖类型 j 的生境适合性; D_{xj} 为土地覆盖类型 j 中栅格单元 x 的生境退化程度; z 为系统固有的换算系数,其值为 2.5; k 为半饱和系数。

3 结果与分析

3.1 模型校准结果

根据研究区内历史数据对模型进行校准,在每个校准阶段结束后,根据 OSM_NS 对参数组合进行排名,并根据拟合指标判定,模拟城市用地的增长数量、增长位置、大小和形状比较理想,模拟精度均符合要求。最终得到两个数据集的最佳增长控制系数,差异较大: U_1 中扩散系数 95,繁殖系数 27,传播系数 28,坡度阻抗系数 10,道路引力系数 65; U_2 中扩散系数 63,繁殖系数 2,传播系数 99,坡度阻抗系数 25,道路引力系数 41。图 2 显示了两种方案下各校准阶段得到的最优 OSM_NS 值,数据集 U_1 在粗校准、精校准和终校准的最优 OSM_NS 值均比 U_2 高,在终校准阶段, U_1 为 0.780 5, U_2 为 0.570 7, U_1 比 U_2 高出 36.76%。

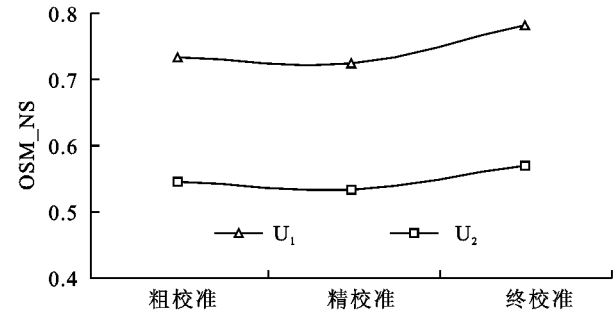


图 2 各校准阶段 OSM_NS 值

3.2 预测结果规模与空间差异分析

根据获取的最佳增长控制系数,通过预测参数获取过程得到适用于未来城市扩张预测的控制系数: U_1 中扩散系数 100,繁殖系数 29,传播系数 30,坡度阻抗系数 1,道路引力系数 68; U_2 中扩散系数 68,繁殖系数 2,传播系数 100,坡度阻抗系数 1,道路引力系数 45。分析两组控制系数发现:两种方案的扩散系数和道路引力系数相对较高,说明近期的城市扩张趋向于自发增长和道路影响增长; U_1 的扩散系数、繁殖系数和道路引力系数均比 U_2 高,传播系数比 U_1 低,说明 U_1 方案自发增长、新扩展中心增长和道路影响增长的增长现象比 U_2 更明显,而 U_2 更偏向于边缘增长;两种方案下的坡度阻抗系数均为 1,表明坡度不是阻

碍研究区内城市发展的因素。根据获取的预测参数,预测研究区 2020 年和 2030 年的城市扩张情况。

为量化 U_1 和 U_2 预测的城市扩张数量差异,将 SLEUTH 模型输出的预测概率图分为高概率扩张区(90%~100%)、中低概率扩张区(50%~90%),并转换为 GIS 栅格数据进行统计,统计结果见图 3。为更准确地分析 U_1 和 U_2 高概率扩张区的空间分布情况,将两个数据集 2030 年预测图的高概率扩张区域进行叠加分析,叠加效果见图 4。

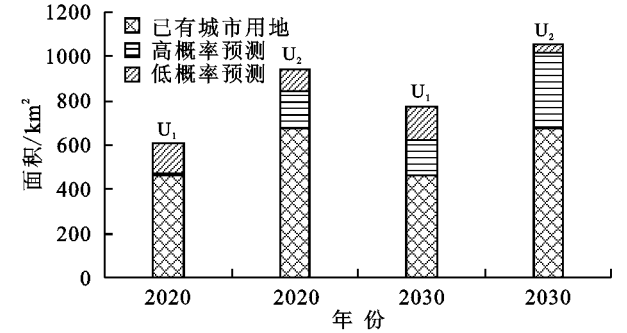


图 3 城市扩张预测规模统计

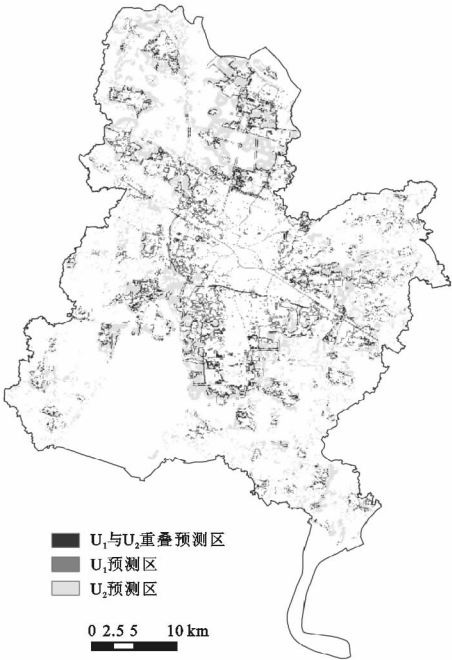


图 4 2030 年高概率扩张区空间叠加

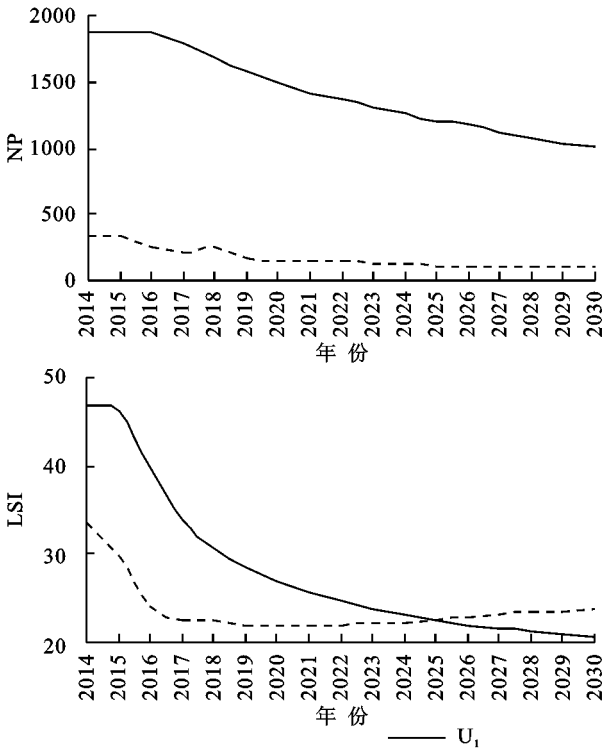
如图 3 所示:(1) 2013 年内已有城市用地面积: U_1 为 466.43 km², U_2 为 678.31 km², U_2 比 U_1 多 45.43%。(2) 相比 2013 年, U_1 预测 2020 年增加城市用地面积共 141.53 km²,几乎全部(98.78%)为中低概率扩张区域; U_2 预测 2020 年增加 263.76 km²,大部分(63.11%)为高概率扩张区域,少部分(36.89%)为中低概率扩张区域。(3) 相比 2013 年, U_1 预测 2030 年增加城市用地面积共 306.18 km²,约一半(51.68%)为高概率扩张区域; U_2 预测 2030 年增加 378.98 km²,绝大部分(88.93%)为高概率扩张区域。(4) 从近期预测

情况来看,从 2013—2020 年, U_2 的总体预测年平均增长率高于 U_1 ,分别为 5.55%和 4.33%;从远期预测情况来看,从预测初始年至 2030 年, U_1 的总体预测年平均增长率高于 U_2 ,分别为 9.38%和 7.98%;若单从高概率扩张区的年平均增长率来看,无论是近期还是远期预测, U_2 均远高于 U_1 。

从图 4 可以看出, U_1 与 U_2 均为高概率预测区域的面积仅为 51.39 km²;仅 U_1 为高概率预测区域的面积为 106.83 km²,图斑相对细碎,分布较为分散,大部分位于研究区的中部、已有建成区周边;仅 U_2 为高概率预测区域的面积为 285.65 km²,与 U_1 相比图斑较大,主要分布在研究区北部和建成区南部边缘。

3.3 生态效应分析

3.3.1 城市扩张景观格局分析 利用 Fragstats 4.2



计算预测年份各项景观格局指数,统计结果见图 5。随着预测年份的增加,LPI 有明显上升,而 NP 和 LSI 均呈现下降趋势,CONTAG 无明显变化。说明随着城市用地的不断扩张,城市斑块逐渐融合成面积更大的斑块,城市的主导现象越来越明显,城市越来越紧凑,城市斑块形状趋于规则,破碎度降低,连通性增加,这与两个方案将基本农田纳入排除层的保护措施有关。与 U_2 相比, U_1 城镇用地数据更加精细,其 NP 和 LSI 值高、下降速度快,有明显的从破碎向集中的变化趋势, U_2 的 NP 和 LSI 值整体变化不大,尤其是后 5 年基本呈现平稳的低值;预测期间 U_2 比 U_1 的 LPI 值高,表明 U_2 中城市主导现象更明显,这与 U_2 预测城镇用地主要分布在中心城区边缘有关; U_2 的 CONTAG 值比 U_1 低,且呈现出一定的波动性,而 U_1 的城市延展趋势较为稳定。

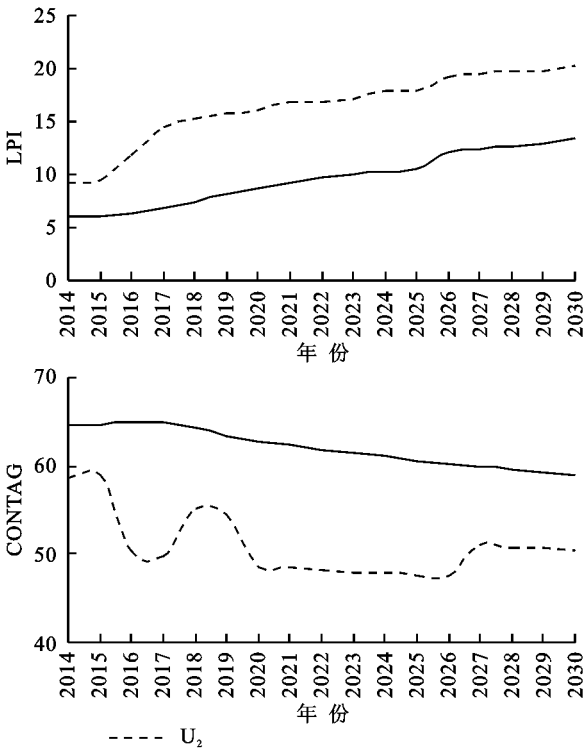


图 5 预测年份景观格局指数统计

3.3.2 生境质量评价分析 结合研究区土地利用/土地覆被的实际情况,参考 InVEST 模型使用指南和前人已有的研究成果^[3],设定城镇用地、道路、高概率扩张区和中低概率扩张区为威胁因子,并对威胁因子参数、各生境类型对各威胁因子的敏感性设置(表 2—3),获取生境质量和生境退化水平评价结果,采用自然断裂法对评价结果分级,并对不同级别的用地面积进行统计,分级结果和统计结果见图 6(5 级代表生境质量/退化水平最高)。

(1) 由 6 来看,新北区北部、武进区东部和南部的生境质量较高,高级别区域主要为水域和林地,中心城区及其周边地区的生境质量较低,主要受到人类活动的

影响。从 2013—2030 年, U_1 和 U_2 的 1 级生境质量区域面积迅速增加,同时伴随着 2 级区域面积的减少, U_2 的这一趋势更加显著,这与模型预测 2030 年城市用地扩张面积较大有关,大范围的城市用地对周围的生态用地造成破坏,导致生境质量不断下降;水域等高级别生境质量区域受到一定的保护,面积基本稳定。

(2) 分析生境退化水平,生境质量整体呈现下降的趋势,生境退化水平较高(5 级最高)的区域主要分布在建设用地周边,并且生境退化水平以建设用地为中心逐渐降低。 U_1 生境退化水平集中在 1 级,说明大部分区域的生境退化水平较低,并且 U_1 出现生境质量变好的零星图斑,这与模型预测的 2030 年城市用地范围和空间

分布有关,与 U_2 相比,模型中 U_1 的城市扩张受到一定限制,部分耕地受到保护;与 U_1 相比, U_2 各个生境退化水平级别的面积相对均匀,无生境质量好转区域。

表 2 威胁因子属性

威胁因子	最大影响距离	权重	衰退线性相关性
城镇用地	5.0	1.0	0.2
道路	2.0	0.8	0.5
高概率扩张区	5.0	0.9	0.2
中低概率扩张区	5.0	0.8	0.2

注:表中数据设置遵循 InVEST 生境质量模块对威胁因子参数设置的基本要求。

表 3 生境类型及对各威胁因子的敏感性

地类代码	地类名称	生境适合性	城镇用地	道路	高概率扩张区	中低概率扩张区
1	耕地	0.4	0.5	0.2	0.4	0.3
2	林地	0.8	0.6	0.4	0.5	0.4
3	草地	0.6	0.6	0.3	0.5	0.4
4	水域	0.9	0.9	0.6	0.8	0.7
5	建设用地	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	其他	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

注:表中数据设置遵循 InVEST 生境质量模块对敏感性参数设置的基本要求。

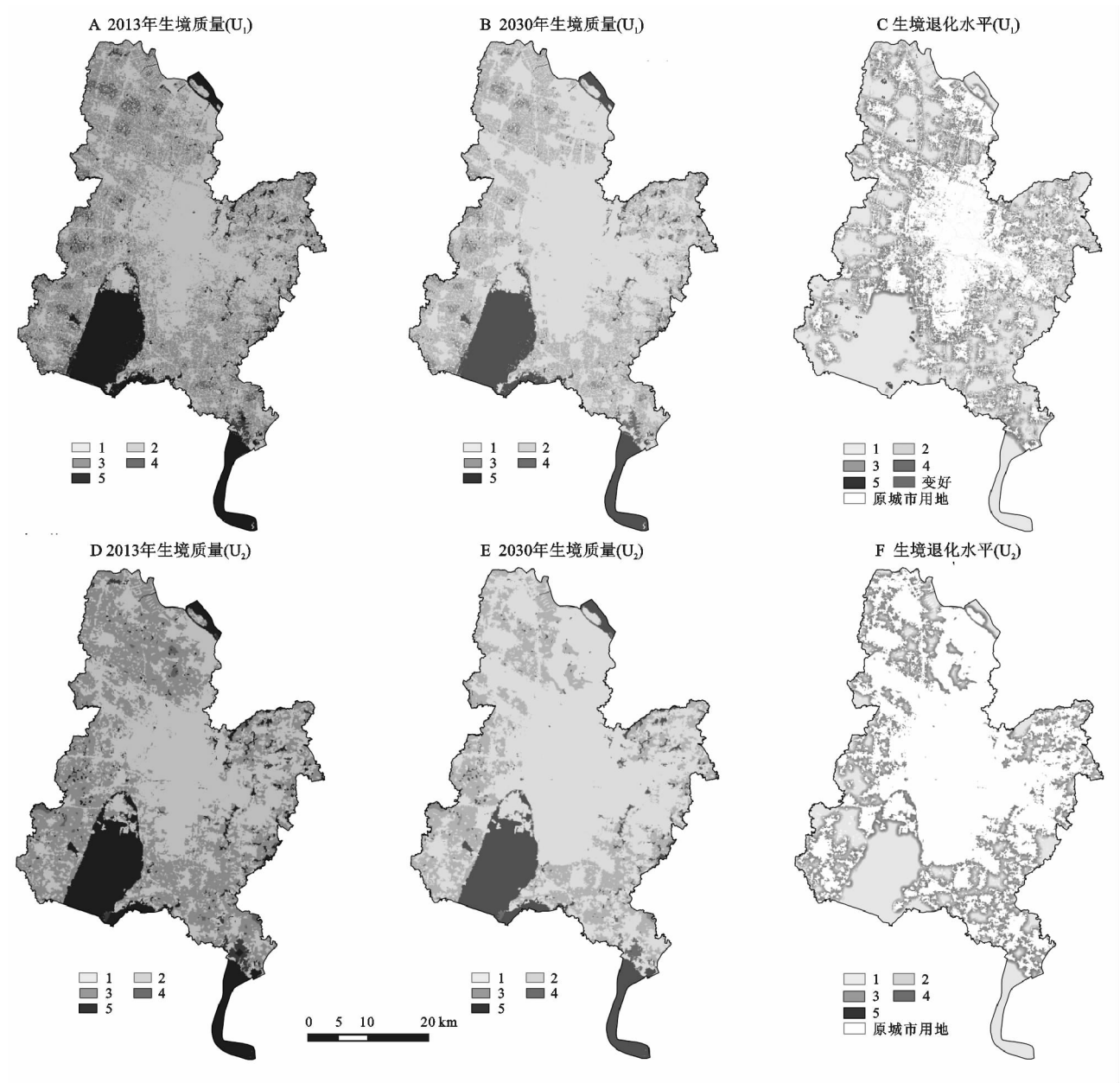


图 6 生境质量评价结果

4 结论

(1) 不同城市输入图层得到的模型校准精度不

同。本文中 U_1 在 3 个校准阶段的校准精度均比 U_2 高,在校准结束后, U_1 比 U_2 高出 36.76%。

(2) 不同城市输入图层对城市扩张预测结果影响

不同。从近、远期预测角度和高、中低概率预测角度分析, U_1 和 U_2 预测的城市扩张数量和年平均增长率均存在明显差异;根据高概率扩张区的空间对比,两个方案预测图斑体现出不同的形态和空间分布规律。

(3) 城市扩张引起的生态效应预测对输入数据具有较强的敏感性。景观格局指数虽总体变化趋势一致,但由于 U_1 城镇用地数据更加精细,其 NP 和 LSI 值下降速度快、预测图斑从破碎向集中的变化趋势更明显。由于 U_1 和 U_2 预测的城市面积与空间分布存在较大差异,而生态用地的质量受到城市用地的影响,使得生境质量评价结果不同, U_1 生境质量下降的趋势更明显,但是低生境退化水平区域比重较大,且存在部分生态用地生境质量好转的现象。

本研究表明,不同来源的输入数据会对城市扩张模型预测结果产生影响,建模者应综合考虑具体的研究目标和要求,选择合适的模型输入数据,提高模型模拟精度,改善以模型预测结果为参考依据的城市管理和生态保护决策。当前国家新型城镇化规划强调生态文明理念,生态红线、永久性基本农田和城市开发边界的科学划定成为热点,生态效应预测结果可为三线划定和各类生态保护政策的制定提供研究基础。本文仍存在不足之处,在今后的研究中应重点关注。由于可获取的土地利用变更数据有限,且遥感数据的年份需与土地利用变更数据保持一致,导致模型模拟的历史年份跨度与间隔没有达到理想状态,因此需进一步寻求更完善的数据,以获取更精确的研究结果;本文采用的遥感影像数据为 30 m 分辨率,应增加高分影像等数据源,获取更准确、多源化的输入图层,开展丰富的对比试验;研究采用了较为成熟的城市扩张和生境质量评价模型,部分参数的设置参考了模型指南和前人已有的研究成果,下一步研究应根据研究的实际需求和相关规划政策进行调整与完善。

参考文献:

- [1] Alberti M. Maintaining ecological integrity and sustaining ecosystem function in urban areas[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2010,2(3):178-184.
- [2] 俞孔坚,王思思,李迪华,等. 北京城市扩张的生态底线:基本生态系统服务及其安全格局[J]. *城市规划*, 2010(2):19-24.
- [3] 吴健生,冯喆,高阳,等. 基于 DLS 模型的城市土地政策生态效应研究:以深圳市为例[J]. *地理学报*, 2014,69(11):1673-1682.
- [4] 杨俊,单灵芝,席建超,等. 南四湖湿地土地利用格局演变与生态效应[J]. *资源科学*, 2014,36(4):856-864.
- [5] Liang Y, Liu L. Modeling urban growth in the middle basin of the Heihe River, northwest China[J]. *Landscape Ecology*, 2014,29(10):1725-1739.
- [6] Song W, Pijanowski B C, Tayyebi A. Urban expansion and its consumption of high-quality farmland in Beijing, China[J]. *Ecological Indicators*, 2015,54:60-70.
- [7] Paegelow M, Camacho M T O. Advances in geomatic simulations for environmental dynamics[M]//Paegelow M, Camacho M T O. *Modelling Environmental Dynamics*. Heidelberg:Springer, 2008.
- [8] 黎夏,叶嘉安,刘涛,等. 元胞自动机在城市模拟中的误差传递与不确定性的特征分析[J]. *地理研究*, 2007,26(3):443-451.
- [9] Clarke K C. Mapping and modelling land use change:an application of the SLEUTH model[M]//Pettit C, Cartwright W, Bishop I, et al. *Landscape Analysis and Visualisation*. Heidelberg:Springer, 2008.
- [10] Chaudhuri G, Clarke K C. Temporal accuracy in urban growth forecasting:A study using the SLEUTH model [J]. *Transactions in GIS*, 2014,18(2):302-320.
- [11] 秦鹏,董玉祥. 广州市土地利用空间分布影响因素的粒度效应分析[J]. *资源科学*, 2013,35(11):2239-2247.
- [12] 王丽妍,李飞雪,李满春,等. 基本农田信息对 SLEUTH 模型模拟准确性的影响:以常州市中心城区为例[J]. *地理与地理信息科学*, 2015,31(3):48-53.
- [13] Syphard A D, Clarke K C, Franklin J, et al. Forecasts of habitat loss and fragmentation due to urban growth are sensitive to source of input data[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011,92(7):1882-1893.
- [14] 冯微微,刘慧平,周彬学,等. SLEUTH 模型的参数行为研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2012,28(6):39-43.
- [15] 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[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004,31(2):251-271.
- [16] 陈洁丽. 基于遥感技术的苏南地区城镇用地空间分异研究[D]. 南京:南京大学,2011.
- [17] Onsted J A, Chowdhury R R. Does zoning matter? A comparative analysis of landscape change in Redland, Florida using cellular automata[J]. *Landscape&Urban Planning*, 2014,121(1):1-18.
- [18] 杨园园,戴尔阜,付华. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架[J]. *首都师范大学学报:自然科学版*, 2012,33(3):41-47.
- [19] McKinney M L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation[J]. *BioScience*, 2002,52(10):883-890.