

DOI: 10.5846/stxb201912042638

冯琰玮,甄江红,马晨阳.城市用地扩展对生态风险影响的多情景模拟——以内蒙古呼和浩特市为例.生态学报,2021,41(3):1199-1208.

Feng Y W, Zhen J H, Ma C Y. Multi-scenario simulation of the impact of urban expansion on ecological risk: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(3): 1199-1208.

## 城市用地扩展对生态风险影响的多情景模拟 ——以内蒙古呼和浩特市为例

冯琰玮,甄江红\*,马晨阳

内蒙古师范大学地理科学学院,呼和浩特 010022

**摘要:**城市用地扩展对生态环境的负面效应日益显著。以呼和浩特市为研究区,在分析城市用地扩展时空特征的基础上,调整优化 CA 模型,对近景年城市用地扩展进行多情景模拟。从城市扩展、生态景观、粮食安全、生态退化等角度构建生态风险压力评价体系,对各情景下城市用地扩展所致的生态风险压力进行评估,得到的主要结论有:1990—2017 年,呼和浩特市城市扩展强度指数不断下降,扩展速率经历了“上升—下降”的波动阶段,空间扩展阶段性特征明显;运用 CA 模型预测 2025 年、2030 年城市用地扩展,只有耕地保护型、生态经济型方案下建设用地扩展速率处于下降态势,扩展强度指数进一步下降;研究时段内,研究区城市扩建压力上升 2.2%,景观生态压力增加 1.9%,粮食储备压力提高 1.4%,生态退化压力抬高 11%,生态风险压力提升 15%,生态风险预警达到中警水平;到 2030 年,趋势外推和耕地保护情景下生态风险压力等级由 III 过渡到 IV,城市化发展情景下生态风险压力等级由 III 跃升至 V,只有生态经济情景下生态风险压力等级由 III 回落到 II。

**关键词:**城市扩展;生态风险;CA 模型;多情景模拟;呼和浩特市

## Multi-scenario simulation of the impact of urban expansion on ecological risk: A case study of Hohhot City, Inner Mongolia

FENG Yanwei, ZHEN Jianghong\*, MA Chenyang

College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China

**Abstract:** The negative effects of urban land expansion on ecological environment are increasingly becoming significant. Taking Hohhot City as the study area, this paper aims to adjust and optimize the Cellular model with multi-scenario simulation of urban land expansion based upon the analysis of the spatial and temporal characteristics of urban land expansion in recent years. In this paper, an evaluating system for ecological risk pressure is established to assess the ecological risk pressure resulted from urban land expansion under different circumstances. The evaluating system consists of four dimensions, namely, urban expansion, ecological landscape, grain security, and ecological degradation. Four conclusions are reported as follows. First of all, from 1990 to 2017, the urbanization expansion index of Hohhot was uninterrupted downward, and the expansion rate has seen a stage marked by an up-to-down fluctuation. We argue that the urban land expansion has manifested a strong periodical characteristic. Second, after making predictions for the expansion degree of urban land in 2025 and 2030 through the CA model, we conclude that only under the scenarios of agrarian protection and ecological economy, the expansion rate of construction land will manifest as a downward trend, and the index of expansion intensity will be in further decline. Third, during the study period, the pressures from urban expansion, landscape ecosystem, grain reserves, ecological degradation, and ecological risk have increased by 2.2%, 1.9%, 1.4%,

基金项目:国家自然科学基金项目(41261109,41761032);内蒙古自然科学基金项目(2016MS0410,2020MS04003)

收稿日期:2019-04-26; 网络出版日期:2020-12-14

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenjianghong@sina.com

11% and 15%, respectively. These pressures lead to the intermediate level of the ecological risk forewarning. Last but not the least, by the end of 2030, the ecological risk pressure level, will upgrade from III to IV under the scenarios of trend extrapolation and agrarian protection, and to V under the scenario of urbanization development. However, it will degrade from III to II under the scenario of ecological economy.

**Key Words:** urban expansion; ecological risk; CA model; multi-scenario simulation; Hohhot City

城市用地扩展是城市化最直观的表现<sup>[1]</sup>。2017年,我国城市化水平已达到58.52%,根据城市发展阶段理论,我国正处于城市化加速发展时期<sup>[2]</sup>。2007—2017年,我国城市建设用地面积由36352 km<sup>2</sup>增至55155.5 km<sup>2</sup>,年均增速5.2%,远大于同期人口城市化3.8%的年均增速。建设用地需求增长,导致用地结构不合理,引发了资源趋紧、生态系统恶化等一系列生态问题<sup>[3-4]</sup>,生态系统修复与重建难度增加,继而提高生态灾害发生的概率<sup>[5]</sup>。国际防灾减灾经验表明,人类很难通过改变自然灾害的发生概率或者强度来降低灾害风险,但通过城市规划等手段减少城市系统的暴露度和脆弱性来达到降低灾害风险的途径却是切实可行的<sup>[6]</sup>,而通过规划等手段降低灾害风险的前提是必须预测并分析未来城市用地扩展及其生态效应。

城市用地扩展所致的生态风险研究主要包括:①研究方法论与研究综述<sup>[7]</sup>;②城市用地扩展的生态效应研究,内容涵盖水文效应、热岛效应、环境污染效应等方面<sup>[8-11]</sup>;③城市用地扩展对区域生态系统的影响,主要包括对景观生态安全、城市生态系统功能影响的分析<sup>[12-13]</sup>;④基于城市用地扩展的生态风险评价,主要包括对数理统计模型的应用及GIS技术手段下的空间图层叠加<sup>[14-15]</sup>;⑤城市用地扩展与生态风险演变的共轭交互研究,常见耦合协调分析<sup>[16]</sup>;⑥基于城市用地扩展的区域生态安全格局构建,常见最小累积阻力面模型<sup>[17-18]</sup>;⑦生态约束下对城市用地扩展的模拟预测,常用模型有CA、CLUE-S等<sup>[19]</sup>。如何减缓城市用地扩展对生态环境的负面效应,成为地理学、生态学等学科领域关注的热点<sup>[20-21]</sup>。然而,区域的生态风险往往受到经济发展、人口集聚、交通扩展、城市规划等多种要素交织影响。因此,只评价历史趋势下城市用地扩展对生态风险造成的压力将难以为生态保护提供有效策略,而多情景模拟可以分析不同情景下城市用地扩展对生态风险的影响,其结果可为区域可持续发展提供参考。

近年来,呼和浩特市城市用地扩展迅速,是导致区域生态用地减少、环境污染加剧、雨季内涝严重、热岛效应显著、生态质量下降的原因之一<sup>[22]</sup>。有关呼和浩特市生态问题的研究集中在城市用地扩展的生态效应、城市增长边界划定<sup>[23]</sup>等方面。2019年底,呼和浩特市纳入北京三小时交通圈,城市发展迎来重大机遇,必将掀起建设用地开发的浪潮。对呼和浩特市城市用地扩展进行多情景模拟,并对各情景下城市用地扩展所致的生态风险进行评价是必要的。由此,在分析呼和浩特市城市用地扩展时空特征的基础上,调整优化CA模型,对近景年城市用地扩展进行多情景模拟,对各情景下城市用地扩展所致的生态风险压力进行评估,充分认识保护生态环境对城市可持续发展的重要意义。以呼和浩特市为研究区,对于探讨生态脆弱区快速城镇化背景下城市用地扩展的生态风险效应也具有一定的代表性和典型性。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

呼和浩特市地处内蒙古自治区的中西部,其市区位于蒙古高原南部边缘地带的土默川平原东北部,北依阴山,南面黄河。其气候属典型中温带大陆性季风气候,降水主要集中在夏季。由于地处西北干旱区,全市水资源十分有限,2016年市区人均水资源占有量仅为465 m<sup>3</sup>/a,是全国平均水平的六分之一,属生态严重失衡的地区之一。以呼和浩特市4个市辖区(赛罕区、新城区、回民区、玉泉区)及下属6个乡镇(榆林镇、金河镇、黄合少镇、保合少镇、攸攸板镇、小黑河镇)为研究区,总面积为2083.68 km<sup>2</sup>。

### 1.2 数据来源

采用1990、2001、2010、2017年4期Landsat遥感影像作为水土、植被等资源提取的基础数据;DEM数字高

程数据、遥感影像数据均来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。采用人机交互目视解译法对土地利用类型进行分类,参照《土地利用现状分类》国家标准(GB/T21010—2017),分为林地、耕地、草地、建设用地、水域和未利用地等六大类型。经实地抽样调查检验解译精度,Kappa 系数达到 0.85 以上,满足研究需求。道路交通数据来自国家基础地理信息系统库 2017 版。经济统计数据主要来自《呼和浩特市经济统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》。其他空间数据主要运用 ArcGIS、Fragstats、IDRISI 软件进行处理。

## 2 研究方法

### 2.1 城市用地扩展的时空表征

采用建设用地扩展速率(UER)、扩展强度(UEI)表征城市用地扩展的时序变化特征,以便从不同时期比较城市用地扩展的快慢、强弱和趋势<sup>[24-25]</sup>,计算方式如下:

$$UER = \Delta U_{ij} / \Delta t_{ij}; UEI = \frac{\Delta U_{ij}}{\Delta t_{ij} \times A_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中,UER、UEI 为城市用地扩展速率与扩展强度指数; $\Delta U_{ij}$ 为从  $i$  到  $j$  时刻的建设用地面积的变化数量; $\Delta t_{ij}$ 为  $i$  到  $j$  的时间步长; $A_i$ 为初始时刻建设用地的面积。

采用标准差椭圆(SDE)表征城市用地扩展的空间特征,用以测评空间发展的均衡性,其基本元素包括中心点、长半轴、短半轴、方位角等,具体计算方式见参考文献<sup>[26]</sup>。

### 2.2 CA 模型对城市用地扩展的模拟

城市用地扩展与自然、人口、经济、交通等因素密不可分。选择高程、坡度、城市人口、人均 GDP、距市中心距离、交通可达性等因子作为城市用地扩展的驱动因子。对驱动因子的说明:①高程及坡度因子:地形是城市扩展的客观基础,根据《城市用地竖向规划规范》,建设用地最大坡度不宜超过 25°;②人口、经济因子:以城市人口和人均 GDP 为自变量,建设用地面积为因变量,采用线性回归模拟 2025 年、2030 年城市用地扩展需求。回归方程式为: $A = 0.732 \times P + 0.886 \times G_{ave}$  ( $P < 0.01, R^2 = 0.91$ ),其中  $A$  为建设用地面积; $P$  为城市人口数(万人); $G_{ave}$  为人均地区生产总值(元);③距市中心距离:城市中心因其频繁的经济活动往往具有很强的集聚与辐射能力,以呼和浩特市中山西路与锡林郭勒南路的交汇处为市中心进行缓冲区分析。④交通可达性因子:城市用地扩展大多沿交通线进行定向推进,城市交通的发展对城市结构的内部调整也具有决定性意义。故以高速及国道、铁路、地铁站等矢量数据进行缓冲区分析。

各因子权重的选择采用 Monte-Carlo 分析法进行修正,模拟次数为 500 次,以 Kappa 系数模拟结果最佳的一组作为最终权重,根据土地利用转移概率矩阵调整转换规则并设置迭代次数。IDRISI 软件可通过对各土地利用类型适应性图集的制作,结合土地利用转移概率对未来土地利用做出预测。其中,各地类的适宜性图集经过 Logistic 分析获取。最终执行 CA 操作对城市用地扩展进行模拟。

### 2.3 近景年城市用地扩展的多情景设置

城市用地扩展多情景模拟共设置趋势外推、城市化发展、耕地保护、生态经济四种情景模式:

①趋势外推型(情景 1):在转换规则设置中,不对任何地类转换进行限制。在该情景下,各用地类型变化速率与 2010—2017 年保持一致。2000 年以来,研究区人口与 GDP 年均增长率分别为 1.63%、8.1%。故设置 2017—2025 年、2025—2030 年人口与经济发展增长速率与前期一致。

②城市化发展型(情景 2):在建设用地转换规则设置中,强调人口、经济规模的增长,在 OWA 法中采用单调规则递增设定人口增长、经济发展的乐观程度幂指数接近 1,以确保建设用地扩展适应经济快速发展的需要。按照呼和浩特市城市总体规划,2020 年 GDP 要在 2010 年基础上翻两番,城镇人口上限为 288.4 万人,计算后设置 2017—2025 年、2025—2030 年人口与经济发展增长速率分别为 1.7%、8.5%。

③耕地保护型(情景 3):参照研究区耕地保有规划方案,在土地利用变化转换规则设置中,限制耕地向其他地类进行转化,确保农业用地规模有增无减,以保障研究区的粮食供应。该情景下人口、经济影响较小,故

设置 2017—2025 年、2025—2030 年人口与经济发展增长速率与情景 1 一致。

④生态经济型(情景 4):严格实行耕地占补平衡政策;禁止建设用地向林地、水体等生态价值较高的土地类型进行转化;同时又要保障研究区社会经济发展的需要,发挥各类用地的发展潜力。参照情景 2,并考虑经济放缓等因素,设置 2017—2025 年、2025—2030 年人口与经济发展增长速率分别为 1.65%、8.3%。

## 2.4 生态风险压力计算方法

以城市生态系统为风险受体,建立生态风险压力评价体系,将多情景模拟的城市用地扩展结果一并纳入评价体系,从而甄别最佳用地调控模式。生态风险压力评价指标体系由城市扩建压力、景观生态压力、粮食储备压力、生态退化压力四部分组成,二级指标共 9 个。其中城市扩建压力指标及权重:城市用地扩展强度<sup>[27]</sup>(0.053)、建设用地占比<sup>[27]</sup>(0.049)、土地利用综合指数<sup>[28]</sup>(0.07);景观生态压力指标及权重:香浓多样性指数<sup>[29]</sup>(0.063)、景观干扰指数<sup>[29]</sup>(0.088);粮食储备压力指标及权重:农业用地占比<sup>[30]</sup>(0.043)、耕地减少率<sup>[30]</sup>(0.054);生态退化压力指标及权重:生态质量指数<sup>[31]</sup>(0.317)、生态服务价值指数<sup>[32]</sup>(0.263)。其中,只有农业用地占比、生态质量指数、生态服务价值指数为负向指标。采用主、客观权重集成的方法确定指标权重,即线性合成熵权法、AHP 层次分析法的计算结果。最终通过线性加权计算生态风险压力,具体计算方式如下。对结果进行等间距分级,包括 I 级低风险(0—0.2)、II 级较低风险[0.2—0.4)、III 级中等风险[0.4—0.6)、IV 级较高风险[0.6—0.8)、V 级高风险[0.8—1)。最后以 2 km 为单位将研究区分成 592 个风险小区,将各因子图层插值进行空间叠加,采用自然断裂法将结果分成低、较低、中、较高、高生态风险区。

$$P = \sum_{i=1}^n \delta_{ei} X_{ei} + \sum_{i=1}^n \delta_{li} X_{li} + \sum_{i=1}^n \delta_{gi} X_{gi} + \sum_{i=1}^n \delta_{ri} X_{ri} \quad (2)$$

式中, $P$  是生态风险压力指数, $\delta_{ei}$ 、 $\delta_{li}$ 、 $\delta_{gi}$ 、 $\delta_{ri}$  分别是城市扩建压力、景观生态压力、粮食储备压力、生态退化压力要素层各指标的权重值, $X_{ei}$ 、 $X_{li}$ 、 $X_{gi}$ 、 $X_{ri}$  分别是各指标的极差标准化值。

## 3 研究结果

### 3.1 城市用地扩展的时空演变特征

根据公式(1)得到各时期城市用地扩展结果,整体来看,城市扩展强度指数不断下降,而扩展速率经历了形如抛物线“上升-下降”的波动阶段,各时段扩展水平并不均衡。具体来看,1990—2001 年城市扩展强度为 9.73%,呈现高强度向外扩张的态势,扩展速率处于居中水平,为 11.23 km<sup>2</sup>/a;2001—2010 年,城市扩展强度水平下降近 3 个百分点,为 6.66%,反观该阶段扩展速率居于高位,为 15.9 km<sup>2</sup>/a,扩展速率与强度的趋势反差说明研究区开始重视城市内部填充,不断加大城市内部改造;2010—2017 年,城市扩展速率与强度处于最低水平,扩展速率回落到 10.83 km<sup>2</sup>/a,扩展强度则跌至 2.83%,城市扩展有所放缓。

从城市用地扩展空间演变特征来看(表 1),重心迁移经历了“东北-东南-东南”的移动轨迹,城市重心向东偏南迁移 1819 米,偏移角度为 20.12°,迁移速率先升后降。究其原因,研究区在西部大开发的政策扶持下,城市结构基本定形,重心迁移速率随之放缓。从方位角变化来看,转角变化范围为 51.26°到 61.50°。2001 年后,西南-东北扩展格局有所弱化,西北-东南趋势不断加强。2010 年后,重心迁移趋势基本成形,城市空间演变格局以西北-东南扩展为主导。其结果可为城市用地扩展模拟作方向指导。

### 3.2 城市用地扩展多情景模拟结果

先用 2001、2010 年基础数据对 2017 年城市用地扩展进行模拟,与城市用地扩展现状做检验,结果显示正确栅格比率为 94.64%,Kappa 指数为 0.936,说明模拟效果极佳。再用训练好的 CA 模型预测 2025 年、2030 年城市用地扩展,迭代次数分别为 8、13,模拟结果如图 1 所示。

相较于 1990—2017 年,只有耕地保护型、生态经济型方案建设用地扩展速率处于下降态势,扩展强度进一步下降。城市化发展型下的建设用地扩展面积最大,面积分别达到 605.74 km<sup>2</sup>、685.66 km<sup>2</sup>,扩展速率为 18.47 km<sup>2</sup>/a、17.52 km<sup>2</sup>/a,扩展强度为 4%。在该情景下,大量耕地被建设用地侵占,水体面积最少,黄合少镇

的部分天然林地变更为建设用地;自然增长型下的建设用地面积达到 571.01 km<sup>2</sup>、642.93 km<sup>2</sup>,扩展强度为 3%;耕地保护型情景下建设用地面积为 543.73 km<sup>2</sup>、596.58 km<sup>2</sup>,扩展速率为 10.72 km<sup>2</sup>/a、10.66 km<sup>2</sup>/a,扩展强度为 2%;生态经济型方案下的建设用地面积最小,分别为 516.68 km<sup>2</sup>、550.06 km<sup>2</sup>,扩展速率为 7.34 km<sup>2</sup>/a、7.09 km<sup>2</sup>/a,扩展强度为 1%。此外,该情景下的林地、水体面积达到历史最高点。

表 1 城市用地扩展空间演变特征  
Table 1 Spatial change of urban expansion

年份 Year	长轴标准差/km Standard deviation of long axis	短轴标准差/km Standard deviation of short axis	方位角/(°) Azimuth	重心坐标 Barycenter coordinates		重心迁移 Barycenter displacement		
				经度 Longitude	纬度 Latitude	方向 Direction	距离/m Distance	速率/(m/a) Rate
1990	16.991	11.962	51.26	111°39'41"	40°49'08"	—	—	—
2001	17.925	10.522	61.50	111°40'26"	40°49'37"	东北	1211	110.09
2010	19.429	10.181	56.17	111°40'21"	40°48'49"	东南	1186	131.78
2017	19.857	9.733	52.65	111°40'57"	40°48'43"	东南	512.5	73.21

### 3.3 多情景模拟下的生态风险压力分析

1990—2017 年,城市用地扩展致使生态风险压力不断加剧(图 2)。城市扩建压力上升 2.2%;景观生态压力增加 1.9%;粮食储备压力提高 1.4%;生态退化压力抬高 11%;生态风险压力提升 15%,生态风险压力等级由 II 过渡到 III。根据城市用地扩展多情景模拟结果,各情景生态风险压力评价表明除生态经济型(情景 4)方案外,其他情景下的生态风险压力水平均呈现出显著的指数增长趋势( $P < 0.01$ ,  $R^2 \geq 0.91$ ),最终生成各情景的生态风险压力空间分布(图 3)及分区统计雷达图(图 4)。

(1)趋势外推情景下(情景 1),相较于 2017 年,2030 年城市扩建压力提高 11%;景观生态压力基本持平;粮食储备压力上升 1.3%;生态退化压力升高 32.9%;生态风险压力等级由 III 过渡到 IV,压力水平增加 30.6%,生态风险压力预警达到较高水平,判定系数  $R^2$  为 0.95。从生态风险压力空间分布来看(图 3),2025 年低等级生态风险压力占比为 41.94%,2030 年萎缩至 27.01%;而高等级生态风险压力占比由 29.29% 上升至 49.34%。其空间表现形式为东部低等级生态风险压力连片区被高等级压力区分割。

(2)城市化发展情景下(情景 2),相较于 2017 年,2030 年城市扩建压力陡增,水平提高 14.7%;景观生态压力趋势与情景 1 趋同;粮食储备压力上升 7.8%;生态退化压力攀升 40%;生态风险压力等级由 III 跨等级跃升至 V,水平增高 45.8%,判定系数  $R^2$  为 0.91。生态恢复与重建困难,生态风险预警达到重警水平,生态环境问题最大常常演变成生态灾害。从生态风险压力空间分布来看(图 3),2025 年低等级生态风险压力占比为 36.15%,2030 年萎缩至 23.55%;而高等级生态风险压力占比则由 39.87% 上升至 54.63%。其空间表现形式为低生态风险压力区的大面积萎缩和高生态风险压力区的摊饼式蔓延。

(3)耕地保护情景下(情景 3),相较于 2017 年,2030 年城市扩建压力与景观生态压力长势保持同步,城市扩建压力提高 6.1%,景观生态压力上升 7.1%;粮食储备压力则呈下降态势,跌幅为 2.9%;生态退化压力升高 29.3%;生态风险压力等级由 III 过渡到 IV,压力水平增加 30.1%,判定系数  $R^2$  达到 0.97。生态风险压力预警同样达到较高水平。从生态风险压力空间分布来看(图 3),2025 年低等级生态风险压力占比为 48.76%,2030 年降至 32.76%;而高等级生态风险压力占比则由 28.13% 上升至 43.03%。其空间表现形式与情景 1 趋同,但低等级生态风险压力区向高等级转化的速率不及情景 1。

(4)生态经济情景下(情景 4),相较于 2017 年,2030 年城市扩展压力下降 5%;生态退化压力下降 20.6%;景观生态压力与粮食储备压力稍有提高,景观生态压力提升 8.5%;粮食储备压力提高 6.7%;生态风险压力出现下降态势,幅度达到 7.8%,压力等级由 III 回落到 II 阶段,判定系数  $R^2$  约为 0.91。生态风险压力较低,一般干扰下可恢复,生态问题较小。从生态风险压力空间分布来看(图 3),2025 年低等级生态风险压力占比为 54.17%,2030 年降至 43.81%;而高等级生态风险压力占比则由 25.43% 上升至 35.55%。其空间表现形式基本

稳定,生态风险压力等级改变主要集中在金河镇、小黑河镇。

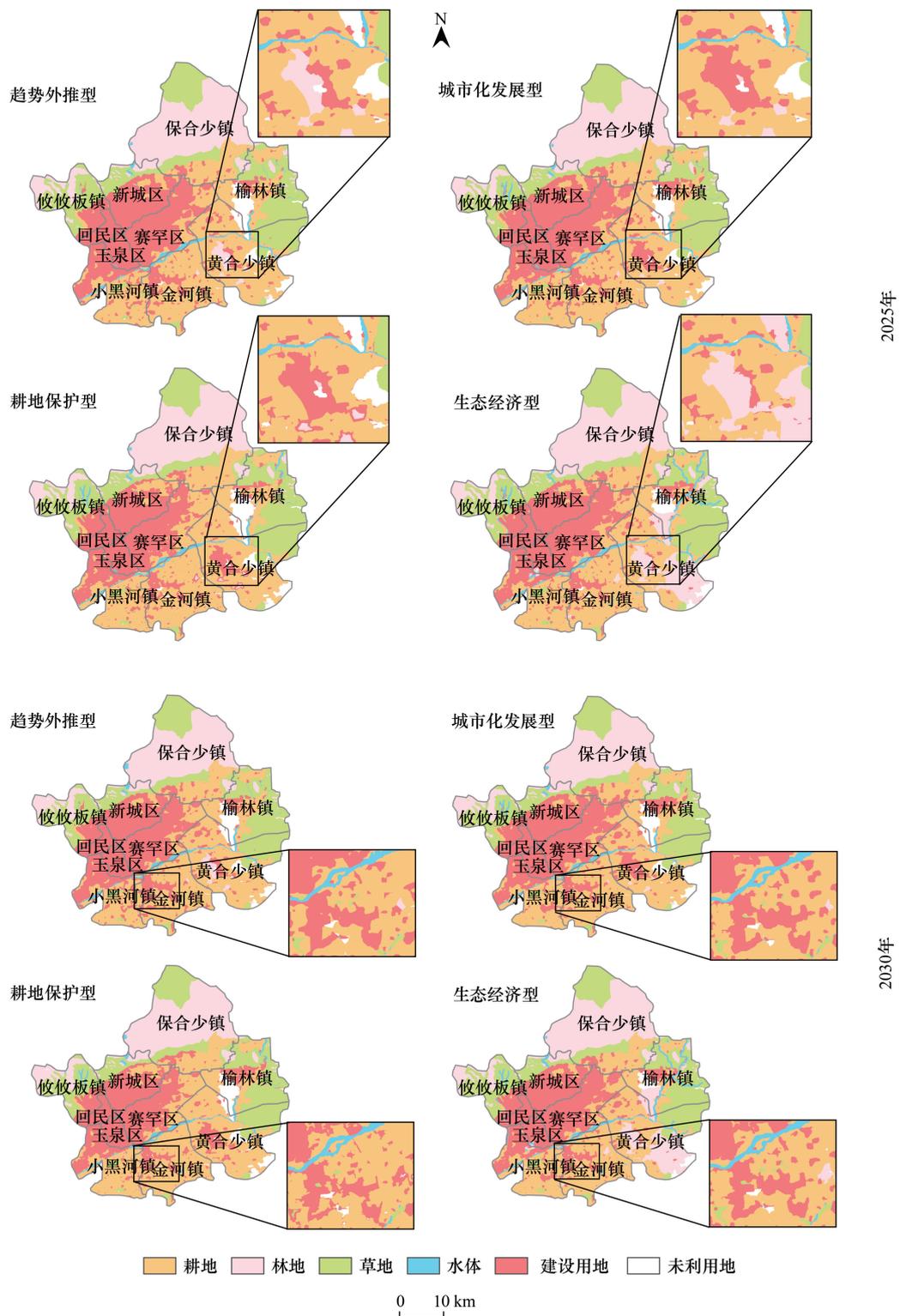


图 1 2025、2030 年城市用地扩展多情景模拟结果

Fig.1 Results of scenario simulation for urban expansion in 2025 and 2030

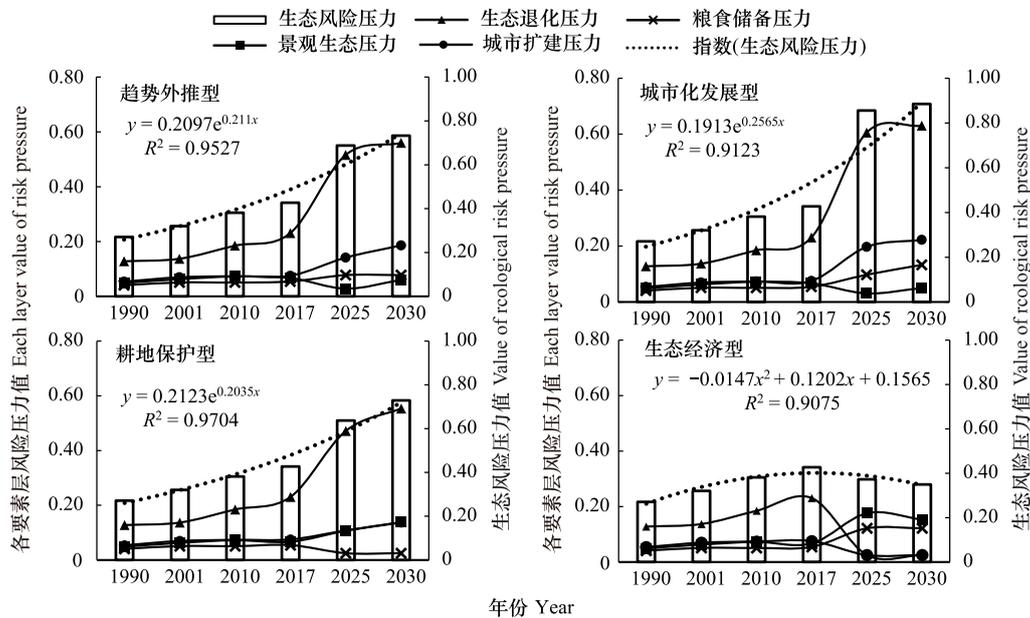


图 2 各情景模式下的生态风险压力值

Fig.2 Value of pressure of ecological risk for scenario simulation

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

城市用地扩展的生态效应研究向来备受关注。在分析城市用地扩展时空特征的基础上,参照城市总体规划和土地利用总体规划,综合考虑自然、人口、经济、交通等因素反复训练 CA 模型模拟 2025 年、2030 年城市用地扩展。在此基础上构建生态风险压力评价体系,对 1990—2017 年及各情景下的生态风险压力进行评价,从评价结果来看,“摊饼式”的城市用地扩展对生态环境的胁迫效应十分显著。内蒙古资源环境承载力试评价结果显示呼和浩特市各市辖区承载力皆达到临界超载水平,从一定程度上也说明本文研究结果符合研究区实际。根据各情景生态风险分级统计结果(图 4),生态经济型方案下较高生态风险等级占比始终为最低,故对研究区而言,生态经济型方案为近景年最佳用地调控模式。耕地保护方案仅次于生态经济方案,但若一味强调对耕地的保护而缺乏对生态用地的足够重视,生态风险压力会不减反增,需予以重视。趋势外推型、城市化发展型模式都不利于推动区域可持续发展。此外,CA 模型相较于其他土地预测模型,可操作性较强,预测结果经过 Kappa 指数检验,模拟结果也达到预期效果。诚然,若能与其他模型预测结果相比较,会使研究结果更具说服力。此外,城市用地扩展极易受政策导向影响,驱动因子的全面性值得商榷,情景设置的不断完善也是今后努力的方向。

不合理的城市用地扩展是导致区域生态用地减少、景观格局破碎、生态功能下降、生态风险加剧等生态环境问题的原因之一。根据城市发展趋势及相关政策规划,研究区城市用地扩展仍会以东南方向为主,针对研究区生态风险防控,建议:(1)生态风险等级居高的回民区、玉泉区:两区人口分布较为集中,应着力改善旧城建设用地布局分散的现状,提高土地利用集约度,增加城市绿化面积,优化人居环境,防范生态风险加剧。(2)生态风险等级较高的新城区、赛罕区、小黑河镇与金河镇:赛罕区与新城区是经济发展最活跃的地区,应提高城市空间利用率、优化产业空间结构、抑制建设用地无序扩展;小黑河镇和金河镇是未来城市发展的主要方向,应规避建设用地扩展引发的水源污染、耕地锐减等生态问题。(3)生态风险等级居中的黄合少镇:该镇耕地分布最广,应增加林草面积,加强农业现代化发展。(4)生态风险等级较低的攸攸板镇和榆林镇:两镇应对生态用地进行修复,以增强生态景观整体性、连通性,促进生态物质循环。(5)生态风险最低的保合少镇:

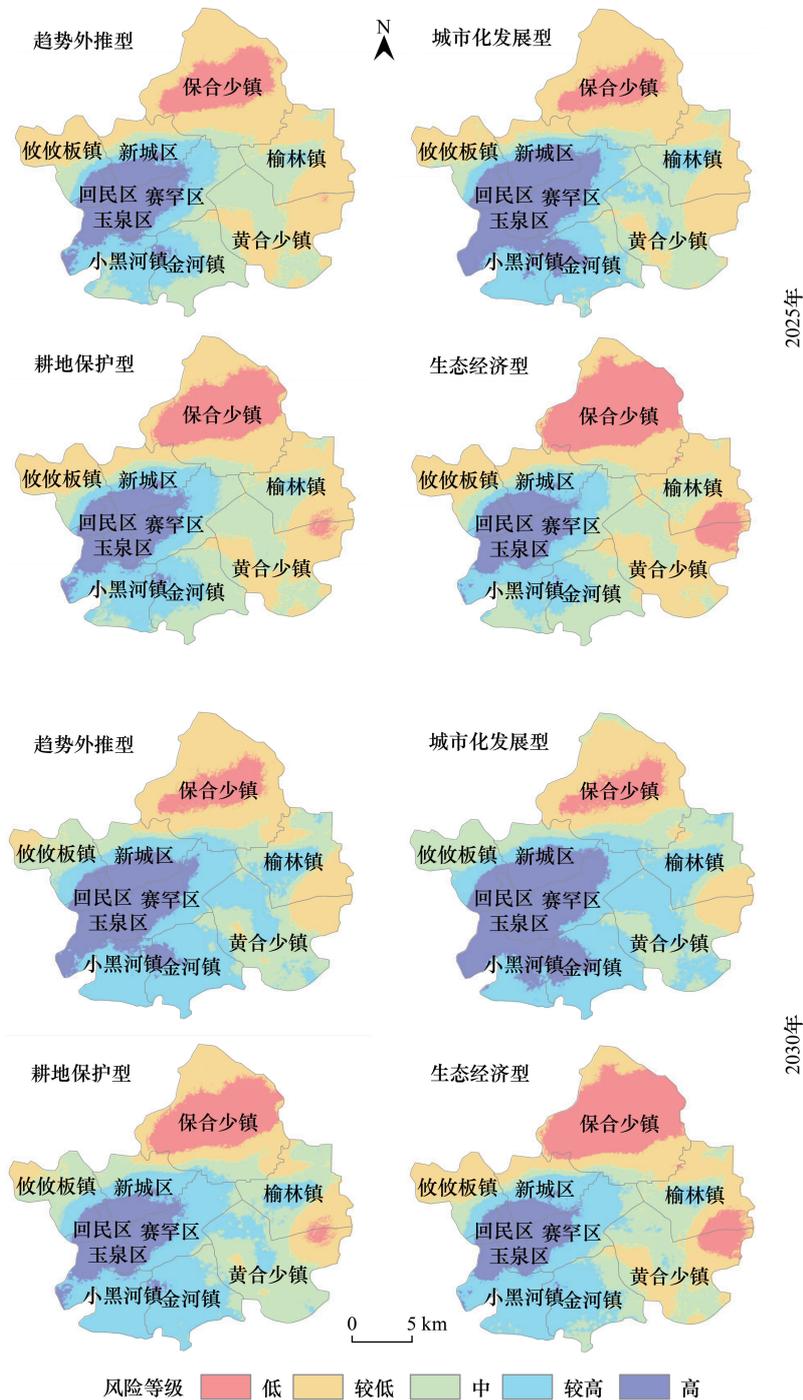


图 3 2025、2030 年多情景模拟下的生态风险压力空间分区

Fig.3 Spatial sub-region of ecological risk for scenario simulation in 2025 and 2030

应对阴山实施生态治理工程,发挥生态屏障作用,禁止一切经济开发活动。

### 4.2 结论

在分析研究区城市用地扩展时空特征的基础上,优化 CA 模型对近景年城市用地扩展进行多情景模拟。构建生态风险压力评价体系,对各情景下城市用地扩展所致的生态风险压力进行评估,主要结论有:

(1)1990—2017 年,研究区城市扩展强度指数不断下降,扩展速率阶段性特征明显。从城市用地扩展空间特征来看,重心迁移经历了“东北-东南-东南”的移动轨迹,城市重心整体向东偏南迁移 1819 米,偏移角度

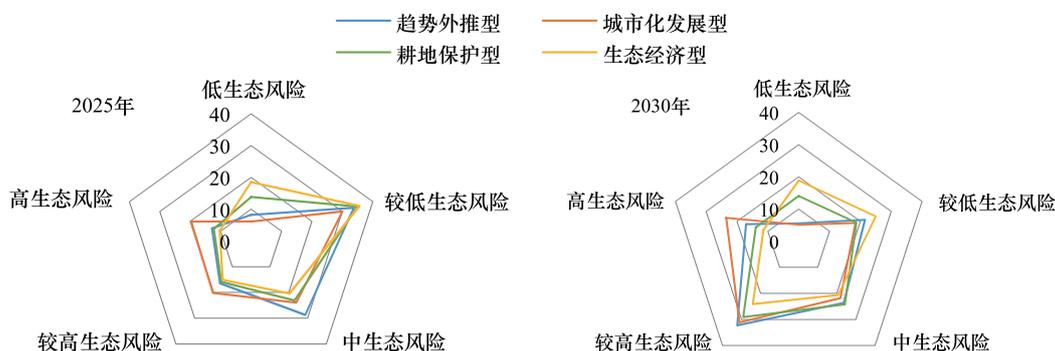


图4 不同模拟情景下生态风险分级统计

Fig.4 Zonal statistics of ecological risk for scenario simulation

为  $20.12^\circ$ , 迁移速率先升后降。

(2) 运用 CA 模型模拟 2025 年、2030 年城市用地扩展, 相较于 1990—2017 年, 只有耕地保护型、生态经济型方案建设用地扩展速率处于下降态势, 扩展强度指数进一步下降。城市化发展型下的建设用地扩展面积最大, 而生态经济型方案下的建设用地面积最小, 该情景下的林地、水体面积达到最大。

(3) 1990—2017 年, 城市用地扩展致使生态风险压力不断加剧, 城市扩建压力上升 2.2%; 景观生态压力增加 1.9%; 粮食储备压力提高 1.4%; 生态退化压力抬高 11%; 生态风险压力提升 15%, 生态风险压力等级由 II 过渡到 III, 生态问题开始显著。

(4) 2030 年, 趋势外推和耕地保护情景下生态风险压力等级由 III 过渡到 IV; 城市化发展情景下生态风险压力等级由 III 跨等级跃升至 V; 只有生态经济情景下生态风险压力等级由 III 回落到 II。

(5) 综合考虑各情景方案, 生态经济型方案为研究区近景年最佳用地调控模式。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 谭术魁, 韩思雨, 周敏. 土地城市化背景下武汉市资源环境承载力仿真研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(11): 1824-1830.
- [ 2 ] 李恕洲. 基于耦合协调度的新型城镇化发展水平综合评价[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.
- [ 3 ] 张衍春, 向乔玉, 张宇, 胡国华. 中国城市蔓延研究回顾与展望. 规划师, 2014, 30(9): 76-81.
- [ 4 ] 张衍春, 李长风. 基于国内外比较视角下城市蔓延概念与动力机制研究述评. 现代城市研究, 2013, (10): 29-35.
- [ 5 ] 何新, 姜广辉, 张瑞娟, 马雯秋, 周涛. 基于 PSR 模型的土地生态系统健康时空变化分析——以北京市平谷区为例. 自然资源学报, 2015, 30(12): 2057-2068.
- [ 6 ] 权瑞松, 刘敏, 张丽佳, 陆敏, 王静静, 牛海燕, 许世远. 基于情景模拟的上海中心城区建筑暴雨内涝暴露性评价. 地理科学, 2011, 31(2): 148-152.
- [ 7 ] 曾建军, 邹明亮, 郭建军, 李凯, 杨超, 陈冠光, 岳东霞. 生态风险评价研究进展综述. 环境监测管理与技术, 2017, 29(1): 1-5, 10.
- [ 8 ] QUAN R S. Risk assessment of flood disaster in Shanghai based on spatial-temporal characteristics analysis from 251 to 2000. Environmental Earth Sciences, 2014, 72(11): 4627-4638.
- [ 9 ] BAI X M, Chen J, Shi P J. Landscape urbanization and economic growth in China: Positive feedbacks and sustainability dilemmas. Environmental Science & Technology, 2012, 46(1): 132-139.
- [ 10 ] Turner II B L, Kasperson R E, Matson P A, McCarthy J J, Corell R W, Christensen L, Eckley N, Kasperson J X, Luers A, Martello M L, Polsky C, Pulsipher A, Schiller A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2003, 100(14): 8074-8079.
- [ 11 ] 权瑞松. 基于情景模拟的上海土地利用变化预测及其水文效应. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1552-1562.
- [ 12 ] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝. 生态学报, 2016, 36(16): 4955-4957.
- [ 13 ] 白立敏. 基于景观格局视角的长春市城市生态韧性评价与优化研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2019.
- [ 14 ] 王岩, 方创琳. 大庆市城市脆弱性综合评价与动态演变研究. 地理科学, 2014, 34(5): 547-555.
- [ 15 ] 田鹏, 李加林, 史小丽, 王丽佳, 刘瑞清. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价. 长江流域资源与环境, 2018, 27(12):

2697-2706.

- [16] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架. 地理学报, 2019, 74(8): 1489-1507.
- [17] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长前景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [18] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 李贵才. 基于“重要性-敏感性-连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [19] He C Y, Zhang D, Huang Q X, Zhao Y Y. Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 75: 44-58.
- [20] 张衍春, 牛煜虹, 龙迪, 胡国华. 城市蔓延语境下新城市主义社区理论在中国的应用研究. 现代城市研究, 2013, (12): 22-29.
- [21] 赵雪, 黄庆旭, 何春阳. 城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究——以河北怀来为例. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1469-1481.
- [22] 甄江红, 王亚丰, 田圆圆, 何孙鹏, 王金礼. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例. 地理研究, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [23] 冯琰玮, 甄江红, 峰一, 陶云, 马晨阳, 韩帅. 干旱区城市增长边界划定方法与实证——以内蒙古呼和浩特市为例. 经济地理, 2019, 39(3): 76-83.
- [24] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D, Chan K M, Daily G C, Goldstein J, Kareiva P M, Lonsdorf E, Naidoo R, Ricketts T H, Shaw M. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [25] Schneider A, Woodcock C E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. *Urban Studies*, 2008, 45(3): 659-692.
- [26] 褚艳玲, 宫之光, 杨忠振. 21世纪以来中国航空货运空间变化研究. 地理科学, 2016, 36(3): 335-341.
- [27] 戴云哲, 李江风, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1340-1351.
- [28] 吕薇. 基于城市体系视角的中国城市土地利用变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [29] 王娟, 崔保山, 姚华荣, 刘世梁. 纵向岭谷区澜沧江流域景观生态安全时空分异特征. 生态学报, 2008, 28(4): 1681-1690.
- [30] 边振兴. 沈阳经济区核心地带村庄用地转型与调控研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010.
- [31] 陈利顶, 孙然好, 刘海莲. 城市景观格局演变的生态环境效应研究进展. 生态学报, 2013, 33(4): 1042-1050.
- [32] 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(12): 189-196.