引文格式：李宇航,叶长盛. 基于FLUS模型的松潘城镇建设适宜性评价优化研究[J]. 地理空间信息, 2025, 23(3): 46-50. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.03.011

基于FLUS模型的松潘城镇建设适宜性评价优化研究

李宇航[1]，叶长盛[1*]
（1. 东华理工大学 地球科学学院，江西 南昌 330013）

摘　要：引入POI和人口动态数据改进FLUS模型，以提高模拟精度；再利用改进模型模拟未来松潘城镇发展的潜力区域，并与城镇适宜性评价结果进行对比。结果表明：①改进FLUS模型的Kappa系数提高了3.78%，总体精度提高了2.15%；②不同情景的空间分布基本一致，但相较于自然情景，低碳情景下的耕地、林地退化面积减少了1.19%和0.07%，草地面积增加了0.55%，建设用地扩张面积减少了26.22%，更符合现实要求，可作为未来城镇发展的依据；③正反思维相结合，对城镇建设适宜性评价结果进行优化，既满足国土空间精细化治理的要求，又能为规划提供更准确的决策支持。

关键词：改进FLUS模型；人口动态；POI；适宜性评价；松潘县
中图分类号：TU982　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）03-0046-05

Optimization Research on Construction Suitability Evaluation of Songpan County Based on FLUS Model

LI Yuhang[1], YE Changsheng[1]
(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to enhance simulation accuracy, we used POI and population dynamics data to improve the FLUS model at first. Then, we used the improved FLUS model to simulate the potential areas for future urban development in Songpan County, and compared them with the results of urban suitability evaluation. The results show that ①the improved FLUS model has increased the Kappa coefficient by 3.78% compared to the original model, and the overall accuracy has increased by 2.15%. ②The spatial distribution of different scenarios is basically consistent, but compared to natural scenario, the degradation area of cultivated land and forest under low-carbon scenario has decreased by 1.19% and 0.07%, grassland area has increased by 0.55%, and the expansion area of construction land has decreased by 26.22%, which is more in line with practical requirements and can be used as a basis for future urban development. ③The combination of forward and reverse thinking optimizes the results of suitability evaluation for urban construction, which not only meets the refined governance requirements of territorial space, but also provides more accurate decision-making support for planning.

Key words: the improved FLUS model, population dynamics, POI, suitability evaluation, Songpan County

城镇建设适宜性评价是资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价（以下简称“双评价”）的重要组成部分，是编制国土空间规划的前提和基础[1-3]。2019年印发的《关于建立国土空间规划体系并监督实施的若干意见》明确指出，要在“双评价”的基础上科学布局生态、农业、城镇等功能空间[4]。因此，评价城镇建设适宜性进而明确空间分布，对合理组织生活空间、统筹城镇建设与人居活动具有重要意义[5]。其关键环节在于构建一个全面的评价体系，并合理分配各影响因子的权重。现有研究主要采用两种模型，在数学模型方面，王海鹰等[6]采用层次分析法（AHP）构建了包括自然、经济等16项指标的评价体系，王兰化等[7]采用AHP与熵权法相结合的方式修正了建设用地适宜性评价的各影响因子权重；在机器学习模型方面，孙华芬等[8]采用GIS与神经网络相结合的方式确定各因子权重进而对建设用地进行评价；赵珂等[9]利用贝叶斯网络模型探索了城镇建设适宜性影响因子之间的真实联系。上述研究都难以避免运算过程中的随机性与主观性，从而难以获取科学的权重值；多采用垂直加权叠加的方法计算用地的综合适宜性，

项目来源：国家自然科学基金资助项目（42061041）。
第一作者简介：李宇航（1997—），硕士研究生，研究方向为土地利用变化与规划，E-mail：cxgh_lyh@126.com。
通信作者：叶长盛（1977—），博士，教授，研究方向为城乡发展、土地资源利用与保护，E-mail：ycs519@163.com。

但忽略了各因子在平面空间上的相互作用关系。鉴于此，本文以松潘县为研究区，尝试加入百度地图定位SDK终端人口活动数据和POI数据对FLUS模型进行改进，以求更精准地模拟松潘县未来城镇空间发展的潜力区域；再以潜力区域作为适宜区，将模拟结果与城镇建设适宜性评价结果进行对比分析和优化，为松潘县国土空间规划和未来高原生态家园、国际旅游胜地的建设提供参考。

1　研究方法

1.1　FLUS模型

1）预测土地栅格值。Markov模型通过研究事件的变化规律来预测其发生概率，多用于模拟不同地类面积变化的趋势[10]。

$$S_{(t)}=S_{(t-1)}\times \boldsymbol{P}_{ij} \tag{1}$$

式中，$S_{(t)}$、$S_{(t-1)}$分别为土地利用系统在t、$t-1$时刻的状态；$\boldsymbol{P}_{ij}$为土地利用转移概率矩阵。

2）ANN模型的土地分布测算。利用ANN模型建立各驱动因子与不同地类在空间上的竞争和相互影响关系，即

$$sp(p,k,t)=\sum_{j} w_{j,k}\times \mathrm{sigmoid}\left(\mathrm{net}_j(p,t)\right) \tag{2}$$

式中，$sp(p,k,t)$为地类k在位置p和时间t的概率；$w_{j,k}$为隐藏层与输出层之间的自适应权重；$\mathrm{sigmoid}\left(\mathrm{net}_j(p,t)\right)$为隐藏层到输出层的激励函数。

3）自适应惯性竞争模型设置。将邻域影响因子、自适应惯性系数、各地类转换成本、限制因子等作为自适应惯性机制的参数，计算得到土地利用总体转换概率[11]。

$$\Omega_{i,k}^{t}=\frac{\sum_{N\times N}\mathrm{con}\left(c_i^{t-1}=k\right)}{N\times N-1}\times w_k \tag{3}$$

式中，$\sum_{N\times N}\mathrm{con}\left(c_i^{t-1}=k\right)$为在$N\times N$窗口内，经过$t-1$次迭代后，地类$k$所占的栅格总数；$w_k$为地类扩张强弱的权重。

邻域因子权重代表了不同地类的扩张强度，取值在0~1之间，数值越大说明其扩张能力越强[12]。根据参考文献[13]，景观格局指标中各地类面积变化值经无量纲化处理后符合邻域因子参数的要求。本文将2015年和2020年各地类面积变化值进行无量纲化处理，作为自然发展情景的邻域权重，并结合已有文献研究[14]，设置低碳经济情景的邻域权重（表1）。惯性系数用于调整不同地类数量，使其向宏观需求目标发展。

$$I_k^t=\begin{cases} I_k^{t-1} & \text{if}\left|D_k^{t-1}\right|\leqslant\left|D_k^{t-2}\right| \\ I_k^{t-1}\times\dfrac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & \text{if}\,D_k^{t-1}<D_k^{t-2}<0 \\ I_k^{t-1}\times\dfrac{D_k^{t-1}}{D_k^{t-2}} & \text{if}\,0<D_k^{t-2}<D_k^{t-1} \end{cases} \tag{4}$$

式中，I_k^t为地类k在时间t的惯性系数；D_k^{t-1}、D_k^{t-2}为$t-1$、$t-2$时刻实际与需求栅格之间的差。

各地类总体转换概率的计算公式为：

$$TP_{ij,k}^{t}=\boldsymbol{P}G_{ij,k}\times\Omega_{ij}^{t}\times I_k^t \tag{5}$$

表1　不同情景的邻域权重设置

情景模式	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然发展情景	0.19	0	0.10	0.33	1.00	0.33
低碳经济情景	0.20	0.60	0.50	0.50	0.90	0.20

1.2　改进FLUS模型

驱动因子将在一定程度上影响FLUS模型预测的结果。POI[15]与人口动态数据作为一种社会感知数据，代表了土地系统中不同的地理实体[16]。本文利用POI数据提取城镇功能设施分布，人口动态数据提取居民活动热力分布，再将提取的数据与传统驱动因子共同纳入ANN模型进行深度算法训练，从而改进FLUS模型。为验证改进FLUS模型的精度，分别对原始模型与改进模型进行土地模拟，并将模拟结果与2020年真实土地利用数据进行对比。由于均采用Markov预测土地栅格数量，因此只考虑Kappa系数和总体精度。

1.3　不同情景的设置

本文利用改进FLUS模型设置两种情景来模拟2035年松潘县土地利用情况，自然发展情景根据2015—2020年土地变化特征以及自然、经济等数据，但不将自然保护区作为限制区域；低碳经济情景则注重对碳源空间的管控和碳汇空间的保护，将林地、草地和耕地转移为建设用地的概率限制为原来的70%[17]，并设定自然保护区为限制区域。

1.4　松潘县城镇建设适宜性评价

根据国土空间规划“双评价”技术指南和实地条件，选取生态系统敏感性等3个方面11项因子（表2），基于AHP[18]构建城镇建设适宜性评价体系，并通过专家打分确定各指标层权重；再根据各指标权重加权计

算结果[19]识别适宜建设区域；最后结合松潘县国土空间总体规划对城镇建设适宜性的分级要求将结果分为适宜、一般适宜、不适宜3级，分别赋予相应分值，赋值越高，适宜性越强[20]。

表2 城镇建设适宜性评价指标与权重确定

准则层	指标层	权重
生态系统敏感性评价	自然保护区	0.148 6
	NDVI	0.079 3
	水系可达性/m	0.134 6
自然系统风险性评价	高程/m	0.119 1
	坡度/(°)	0.101 5
	地质灾害易发程度	0.108 0
	距主要交通道路距离/m	0.087 5
	距集中建设区距离/m	0.031 2
社会系统优势度评价	距配套服务设施距离/m	0.048 7
	GDP/万元	0.039 8
	可利用土地类型	0.101 6

2 研究区概况与数据来源

松潘县位于四川省阿坝藏族羌族自治州东部（32°06′~33°09′N、102°38′~104°15′E），地势随山脉走向往东南倾斜，气候多样且灾害性天气活动频繁，多年平均降水量约为720 mm；下辖7个镇、10个乡，总面积约为8 342 km^2；截至2020年末，常住人口约为6.69万人，实现地区生产总值25.95亿元；县域自然保护区、水源敏感地分布广泛，是川西北开发与保护的重点冲突区域之一。

本文采用的数据包括土地利用数据、驱动因子和生态数据3大类（表3）。驱动因子综合考虑了松潘县高原地灾环境和人口向城区集中迁移的趋势；在纳入自然和社会层面因子的同时，还关注了县域生活圈的实际情况，引入了POI数据和人口动态数据，共选取高程、坡度、地灾点密度、距公路距离、距河流距离、距城镇道路距离、距铁路距离、POI密度、GDP、人口热力分布10种驱动因子。

表3 数据来源

类型	指标		数据来源
土地利用数据	2010年、2015年、2020年土地利用数据和2015年、2020年变更调查数据库		中国科学院资源环境科学与数据中心、松潘县自然资源局
驱动因子	自然地理	高程、坡度、地灾点密度	地理空间数据云平台、松潘县自然资源局
	交通可达性	距河流、铁路、公路、城镇道路距离	高德地图
	社会经济	GDP	中国科学院资源环境科学与数据中心
	POI数据	生活、公服、商务、居住、金融类	基于高德地图进行ArcGIS核密度分析，并进行权重叠加
	人口动态数据	2023年4月10—16日SDK定位信息	百度慧眼官网接口数据
生态数据	全国自然保护区边界		中国自然保护区标本资源共享，裁剪提取研究区
	NDVI数据		中国科学院资源环境科学与数据中心

3 研究结果与分析

3.1 改进FLUS模型的精度验证

为验证改进FLUS模型精度，基于松潘县2015年土地利用数据对其2020年土地利用数据进行模拟，并与2020年松潘县实际土地利用数据进行对比。结果表明（图1），改进FLUS模型模拟结果的Kappa系数为0.872 6，总体精度为93.58%，比原始模型分别提高了3.78%和2.15%。改进FLUS模型加入POI与人口动态数据后，涵盖了城镇功能设施与居民活动对城镇建设空间的综合影响，能比传统影响因子更精准地刻画城镇空间的分布情况，其模拟结果与城镇的实际发展更吻合。

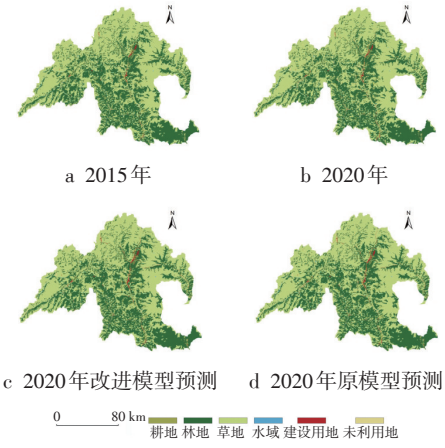


图1 改进模型与原模型对比

3.2 松潘县土地利用模拟结果分析

1）土地利用结构分析。从土地利用结构来看（表4），在自然发展情景下，林地、草地和耕地等碳汇来源地呈减少趋势，而建设用地作为碳源用地则呈

表4　两种情景下的土地利用结构变化/km²

地类	2015年面积	2035年自然发展情景	2035年低碳经济情景
耕地	194.26	164.73	167.05
林地	3 294.78	3 260.45	3 262.97
草地	4 763.90	4 755.14	4 781.69
水域	26.11	20.30	20.31
建设用地	39.79	118.62	87.52
未利用地	21.11	20.70	20.42

增加趋势，这是由于早期城镇经济发展所需的建设用地主要通过占用农用地、生态用地来实现，导致耕地、林草地面积缩减，3种地类面积较2015年分别减少了15.20%、1.04%、0.18%；在低碳经济情景下，3种地类面积减少程度减弱，耕地、林地较2015年分别减少了14.01%、0.97%，草地增加了0.37%，建设用地的扩张也得到一定程度的扼制，在管制碳源空间的同时达到了保护碳汇空间的目的，因此该情景更具科学性。

2）土地利用空间分析。从空间分布来看（图2），两种情景的发展趋势大致相同，均以带状贯穿松潘县南北两侧，与岷江河谷发展带、松潘城镇带的走向相一致；但低碳经济情景对耕地、林草地斑块的侵蚀更少，更符合《松潘县创建国家生态文明建设示范县工作方案》的相关规定。

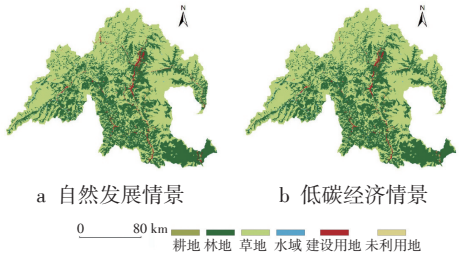


图2　2035年研究区土地利用模拟结果

3.3　松潘县城镇建设适宜性评价结果分析

松潘县城镇建设适宜区面积约为29.13 km²，集中分布于中心城区和地势平坦、高程适中的区域；一般适宜区面积约为246.77 km²，主要分布于适宜区周围的缓坡区，部分城镇道路、岷江支流经过该区域；不适宜区面积约为8 047.13 km²，集中连片分布于高海拔、坡度25°以上以及生态敏感区、陆地水域、交通不便的区域。

3.4　不同方法的结果对比与优化

城镇扩张通常倾向于适宜建设的区域，分别提取城镇建设适宜性评价结果中的适宜区和FLUS低碳经济情景模拟的城镇建设潜力区域（即适宜区），经过Kappa检验，其系数为0.831，具有较高的一致性，差异部分主要体现在：

1）城镇建设适宜性评价结果的适宜区面积为29.13 km²，而FLUS模拟的适宜区面积为86.82 km²，增加了57.69 km²。

2）FLUS模拟结果与城镇建设适宜性评价结果在发展趋势上均沿213国道呈带状分布（图3），差异主要位于松潘县城区外围的乡镇地区，如川主寺镇具有黄龙机场、高铁站、213国道等明显的交通优势，且作为松潘的副中心，区位上与中心城区相邻，从现实发展来看，周边用地极有可能与城区连接转换为建设用地，但城镇建设适宜性评价却将其降为一般适宜区，而FLUS将其模拟为适宜区；黄龙乡有黄龙自然公园、大熊猫国家公园等旅游资源，且黄龙互通高速、山地轨道、301省道均穿过该区域，未来有充分的条件实现交旅融合发展，但城镇建设适宜性评价也将其降为一般适宜区，而FLUS将其模拟为适宜区。

3）由于城镇建设适宜性评价中的自然保护区、水系、高程、地灾等生态、自然因素权重较大，较多地体现了对城镇空间底线的管控，难以识别城镇建设的潜力区域，因此在正向底线约束的基础上反向增加FLUS模拟的城镇建设潜力区域，正反思维相结合，对结果进行优化。

根据FLUS模型的优化结果可挖掘出城镇建设适宜性评价未能识别的潜在适宜区域，如在中心城区的辐射范围内，对中心城镇与副中心镇之间的潜在区域进行弥补，构建一体化县域乡镇发展带；在有资源支撑的一般镇、村内，根据镇村之间的交通干道进行用地延伸，形成衔接两个乡镇之间的发展轴线。

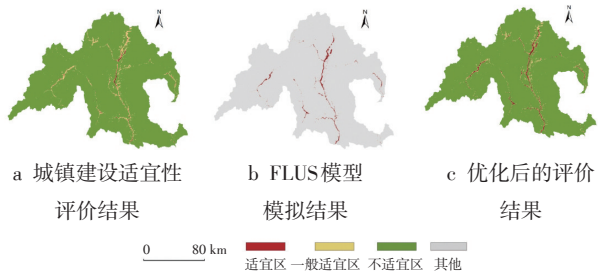


图3　不同角度的城镇建设适宜性对比与优化

4　结　语

在传统自然地理和交通因素的基础上，本文创新性地引入了POI、人口动态等数据，对FLUS模型进行改进；再根据改进FLUS模型的模拟结果和城镇建设适宜性评价结果，从两个角度对松潘县城镇建设适宜性进行了分析，得到以下结论：

1）改进FLUS模型的精度优于原始模型，其模拟结果与真实发展更接近，更能体现未来城镇的发展格局，同时POI与人口动态数据在城镇空间发展与管控上具有较好的应用前景。

2）与自然发展情景相比，低碳经济情景的耕地、林地退化程度减弱，草地面积持续增加，避免了向建设用地的大量转化，符合松潘县相关政策要求，可作为未来城镇空间发展的参考依据。

3）城镇建设适宜性评价缺乏对未来发展的考虑，导致评价结果往往与真实发展存在差距。为避免误差，可采用FLUS模型模拟未来不同情景下的城镇建设潜力区域，选取符合实际的情景，正反向思维相结合，对城镇建设适宜性评价进行优化，以提高评价的真实性和准确性。

在国土空间规划和土地开发决策中，对城镇建设适宜性的精确评价是至关重要的。本文利用改进FLUS模型来提高城镇建设适宜性评价的合理性和准确性，有效避免了传统评价中专家评分的主观性和多因素垂直叠加的局限性，使评价结果更加客观和科学。本文还存在一些不足，可在3个方面进行完善：①进一步引入新数据，推动未来城镇潜力空间更精准的模拟；②城镇建设适宜性评价体系不够全面，应继续完善指标体系；③应更深地融入国土空间规划编制工作，以提高实际应用价值。

参考文献

[1] 田川,刘广奇,李宁,等. 国土空间规划体系下“双评价”的实践与思考[J]. 规划师,2020,36(5):15-20

[2] 周贵鹏,龙花楼. 土地利用转型机理与国土空间格局优化:基于土地利用效益空间函数视角的分析[J]. 自然资源学报,2023,38(10):2 447-2 463

[3] 陈霆,徐伟铭,吴升,等. 国土空间规划视角下的城镇开发边界划定和空间管控体系构建[J]. 地球信息科学学报,2022,24(2):263-279

[4] 杨保军,陈鹏,董珂,等. 生态文明背景下的国土空间规划体系构建[J]. 城市规划学刊,2019(4):16-23

[5] 杨华,徐勇,周侃,等. 青藏高原建设用地的适宜性与适应性及后备潜力评价[J]. 地理学报,2023,78(9):2 128-2 146

[6] 王海鹰,张新长,康停军. 基于GIS的城市建设用地适宜性评价理论与应用[J]. 地理与地理信息科学,2009,25(1):14-17

[7] 王兰化,张莺. 层次分析—熵值定权法在城市建设用地适宜性评价中的应用[J]. 地质调查与研究,2011,34(4):305-312

[8] 孙华芬,赵俊三,潘邦龙,等. 基于GIS和BP神经网络技术的建设用地适宜性评价研究[J]. 国土资源科技管理,2008,25(1):112-116

[9] 赵珂,夏清清,胡晓艳. 城镇建设适宜性评价的贝叶斯网络机器学习方法[J]. 中国土地科学,2022,36(8):109-120

[10] 郭斌,张莉,文雯,等. 基于CA-Markov模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟[J]. 干旱区资源与环境,2014,28(12):14-18

[11] 陈理庭,蔡海生,张婷,等. 基于Markov-FLUS模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报,2022,42(10):3 947-3 958

[12] 徐崇敏,陈瑾,张露丹,等. 基于主体功能区划和FLUS-Markov模型的区域国土空间格局模拟:以福州都市圈为例[J]. 水土保持通报,2022,42(6):155-165

[13] 王保盛,廖江福,祝薇,等. 基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置:以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. 生态学报,2019,39(12):4 284-4 298

[14] 王旭,马伯文,李丹,等. 基于FLUS模型的湖北省生态空间多情景模拟预测[J]. 自然资源学报,2020,35(1):230-242

[15] 刘乐,张东映. 基于连锁POI名称的城市商圈提取方法[J]. 地理空间信息,2023,21(8):49-52

[16] 李立,胡睿柯,李素红. 基于改进FLUS模型的北京市低碳土地利用情景模拟[J]. 自然资源遥感,2023,35(1):81-89

[17] 王志远,张考,丁志鹏,等. 纳入动态数据的改进FLUS模型在城市增长边界划定中的应用[J]. 地球信息科学学报,2020,22(12):2 326-2 337

[18] 刘国锋,琚望静,冶建明,等. 基于AHP-GIS的西北干旱区聚落选址适宜性评价研究:以吐鲁番市为例[J]. 中国农业资源与区划,2021,42(8):129-139

[19] 王其腾,吴凤华. 基于POI数据的生活便利性研究[J]. 地理空间信息,2023,21(6):31-34

[20] 冯雁云,赵宇鸾,薛朝浪,等. 山地城市建设用地适宜性的山坝分异特征及优化研究:以贵阳市为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2021,44(1):21-29