

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.02.002

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:谢一帆,刘润霏,金艺华,彭诗雨,郭筱菲,尹振浩.多维场景下 PLUS-InVEST 模型在图们江流域生境质量评估中的应用[J].西安理工大学学报,2026,42(2):164-175,196.

Xie Yifan, Liu Runfei, Jin Yihua, Peng Shiyu, Guo Xiaofei, Yin Zhenhao. Exploring the application of the PLUS-InVEST model to habitat quality assessment in the Tumen River Basin in a multidimensional scenario[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(2): 164-175, 196.

多维场景下 PLUS-InVEST 模型在图们江流域 生境质量评估中的应用

谢一帆¹, 刘润霏¹, 金艺华¹, 彭诗雨¹, 郭筱菲¹, 尹振浩²

(1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002)

摘要: 流域生境是生物生存和可持续发展的基础, 土地利用变化显著影响其质量。本文以图们江流域为研究区, 基于 2000—2020 年土地利用数据, 结合 PLUS 模型与 InVEST 模型, 引入人类足迹指数(HFI), 构建多情景模拟框架, 预测 2030 年生境质量时空格局。结果表明: ①2000—2020 年, 耕地和林地面积分别减少 203.02 km² 和 275.61 km², 主要转为建设用地和草地; 数字地形模型对土地利用扩张影响显著(贡献率大于 40%), 坡向对耕地和林地扩张尤为关键(权重大于 0.8)。②2020 年土地利用模拟结果与实际数据高度吻合($K=0.82$, 总体精度等于 0.94), 验证了模型可靠性。③2030 年情景模拟显示, 生态优先情景下生境质量最高(0.745 3), 较 2020 年提升 2.62%; 快速扩张情景生境质量最低(0.714 6), 退化面积增加 23 192.55 hm²; 耕地保护情景通过限制耕地转建设用地(概率降低 60%), 间接减少对林地的侵占, 生境质量提升 1.92%。④空间上, 高等级生境质量区(>0.8)集中于珲春市、安图县等山地丘陵区(占流域 60% 以上), 而延吉市、龙井市等中部平原区因建设用地扩张导致生境质量显著下降。研究提出“保护区-恢复区-开发区”三级生态分区规划, 重点保护区面积占比 69.14%, 为优化土地利用结构、促进区域可持续发展提供科学依据。

关键词: 土地利用变化; 人类足迹指数; InVEST; PLUS 模型; 多情景模拟

中图分类号: P942

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)02-0164-12

Exploring the application of the PLUS-InVEST model to habitat quality assessment in the Tumen River Basin in a multidimensional scenario

Xie Yifan¹, Liu Runfei¹, Jin Yihua¹, Peng Shiyu¹, Guo Xiaofei¹, Yin Zhenhao²

(1. College of Agriculture, Yanbian University, Yanji 133002, China;

2. College of Geography and Ocean Sciences, Yanbian University, Yanji 133002, China)

Abstract: Watershed habitats are the foundation for biological survival and sustainable development, and land use changes exert a significant impact on their quality. Taking the Tumen River Basin as the study area, this study constructs a multi-scenario simulation framework based on land use data from 2000 to 2020 by combining the PLUS model and the InVEST model, and introduces the Human Footprint Index (HFI) to predict the spatiotemporal patterns of habitat quality in 2030. The results show that: ①From 2000 to 2020, the areas of cropland and forest

收稿日期: 2024-09-08; 网络首发日期: 2025-05-14

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20250514.1037.010>

基金项目: 吉林省自然科学基金资助项目(YDZJ202401516ZYT); 国家自然科学基金资助项目(42061042)

第一作者: 谢一帆, 男, 硕士生, 研究方向为多目标土地利用优化。E-mail: xieyifan288016@163.com

通信作者: 金艺华, 女, 博士, 讲师, 研究方向为景观生态与景观可持续性研究。E-mail: jinyh2018@ybu.edu.cn

land decreased by 203.02 km² and 275.61 km², respectively, and they are mainly converted to construction land and grassland; the digital terrain model had a significant impact on land use expansion (contribution rate is larger than 40%), with slope orientation particularly critical to cropland and forest land expansion (weight is larger than 0.8). ②The 2020 land use simulation results are highly consistent with the actual data ($K=0.82$, overall accuracy is equal 0.94), verifying the model reliability. ③The 2030 scenario simulation shows that the ecological priority scenario has the highest habitat quality (0.745 3), which is improved by 2.62% compared with that in 2020; the rapid expansion scenario has the lowest habitat quality (0.714 6), with the degraded area increased by 23 192.55 hm²; the cropland protection scenario indirectly reduces encroachment on forested land by restricting cropland to be converted to construction land (probability reduced by 60%), with the Habitat quality improved by 1.92%. ④Spatially, high-grade habitat quality areas (>0.8) are concentrated in hilly areas such as Hunchun City and Antu County (accounting for more than 60% of the watershed), whereas habitat quality in the central plains such as Yanji City and Longjing City shows a significant decline due to the expansion of construction land. The study proposes a three-level ecological zoning plan of “protected area-restoration area-development area”, with the area of key protected areas accounting for 69.14% of the total area, which provides a scientific basis for optimizing the land-use structure and promoting the sustainable development of the region.

Key words: land use change; human footprint index; InVEST; PLUS model; multi scenario simulation

土地资源是区域发展的核心要素,实现社会经济需求与生态环境保护之间的平衡是实现区域可持续发展的关键,旨在促进人类与自然的和谐共生。在土地资源稀缺的背景下,合理规划土地使用,以满足多元化需求并推动经济高质量发展,已成为当前面临的重大挑战。我国坚持生态优先的发展理念,致力于构建人与自然和谐共生的家园,其中高质量发展是实现可持续发展的关键。作为“一带一路”重要区域,图们江流域强调生态产业发展和质量保障,依托其丰富湿地和野生动植物资源。然而,城市化导致城镇用地扩张,对该区域的可持续发展构成了挑战。因此,评估未来土地利用对生境质量的影响,对于制定该流域的土地管理政策和促进生态环境的高质量发展显得尤为重要。

近年来,城市化进程的加快使得土地利用的变化愈加显著,对区域生境质量的影响也逐渐引起了广泛关注。目前,大多数研究集中在国家层级、城市地区以及经济发达区域的较大尺度上,而对地形复杂的流域地区生境质量的研究则相对匮乏。学者们通常使用 InVEST 和 SoIVES 模型来评估区域生境质量,尤其是 InVEST 模型,因其能够动态评估并分析时空变化而得到了广泛应用。与其他模型相比,InVEST 模型具有高可靠性、少量输入参数和强大的空间分析能力^[1]。为了研究和预测生境质量的

变化趋势,一些学者将生境质量评估模型与基于元胞自动机的土地利用模拟预测模型(如 CA-Markov、CLUE-S、FLUS)耦合使用^[2-3]。Liang 等^[4]开发的斑块生成土地利用变化模拟模型(PLUS)引入了新的策略和机制,能够高效模拟复杂地类演变。例如,高周冰等^[5]利用 PLUS 模型模拟预测了南京市在生态优先、协调发展、自然增长和经济发展 4 种情景下的 2025 年和 2035 年生境质量。目前,国内外流域生境质量研究主要集中在单点或样地尺度生境质量评价^[6]和区域整体生境质量评价^[7]。以往研究更多关注自然因素(如气候变化、地形地貌、水文条件等)对生境质量的影响,较少探讨人类活动与生态环境的地理相关性。随着可持续发展和生态保护意识的增强,近期研究越来越多地将人类活动纳入模型,以更全面地评估和预测生境质量。本文通过结合 PLUS-InVEST 模型和 HFI 指数,弥补了以往研究中仅以景观组分变化或土地利用变化单一指标计算的不足^[8-9],合理划定了研究区域的生态分区,大大提高了土地利用预测的准确性和可信度。

基于此,本研究集成 PLUS 和 InVEST 模型,以图们江流域为研究区域,分析了 2000—2020 年土地利用和生境质量的演变过程,并预测了 2030 年的生境质量时空格局。研究旨在揭示图们江流域土地利用与生境质量的演变机制,为流域的生态环境治

理与保护以及推动区域高质量发展提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据

1.1.1 研究区

图们江流域位于中国、朝鲜、俄罗斯三国交界处,是一条具有重要战略意义国际性河流。流域总面积为 33 168.4 km²,其中我国境内流域面积为 22 448 km²,占吉林省总面积的 12.2%^[10]。该流域包括七个县(市),是延边朝鲜族自治州的政治、经济和文化中心^[11]。流域地势自西南向东北倾斜,气候属于温带大陆性季风气候,四季分明,年均降水量为 500~700 mm,年均气温在-3℃~8℃。流域内自然条件多样。西部和南部山区森林茂密,生态环境良好;中部平原地区人口密集,农业发达,是吉林省重要的粮食生产基地;北部地区以山地和丘陵为主,尽管森林覆盖率较高,但由于气候寒冷干燥,生态环境相对脆弱。近年来,随着生态文明建设的深入推进,图们江流域在环境保护和经济社会发展方面取得了显著成效。各地区加强了生态保护和修复

工作,积极推动绿色产业发展,促进了区域经济的可持续发展。同时,流域内的水资源利用、水环境保护和水安全保障等方面也得到了有效提升,为流域的可持续发展提供了坚实支撑。

1.1.2 数据

本研究的数据来源包括 2000 年、2010 年和 2020 年的土地利用数据(分辨率为 30 m×30 m)、数字高程模型(DEM)数据、坡度数据,以及高速公路、主干道和铁路等交通数据。土地利用数据取自 GlobeLand30 全球地表覆盖数据库,根据研究区的实际土地利用情况,将土地分为耕地、林地、草地、湿地、水域和建设用地六类。以 2020 年为基期年,使用 PLUS 模型对未来土地利用进行预测。DEM 高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),分辨率为 30 m×30 m。坡度和坡向数据通过 ArcGIS 中的 Slope 工具从 DEM 数据中提取。道路数据来源于开放街道地图(OSM),包括高速公路、国道和铁路。为了便于数据处理和模型运行,所有研究数据均采用 UTM 投影和 WGS84 坐标系。各类数据及其用途详见图 1 和表 1。

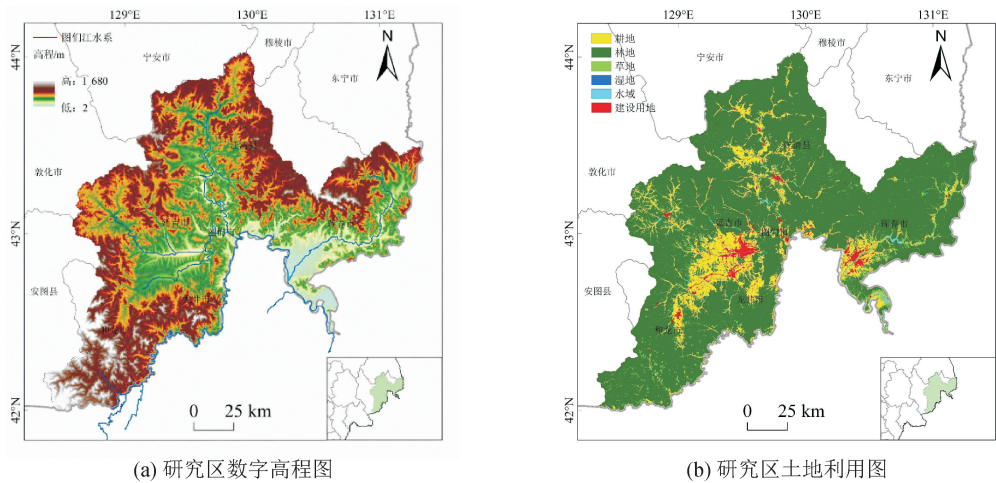


图 1 研究区数字高程及土地利用示意图

Fig. 1 DEM and land use situation of the study area

注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

表 1 数据类型与来源

Tab. 1 Type and source of data

数据类型	数据分辨率	数据来源
数字高程模型	30 m×30 m	United States Geographical Survey
土地利用数据	30 m×30 m	Landsat8 OLI
土壤数据	1 : 100 万	世界土壤数据库(HWSD)
气象数据	日	中国科学院资源环境科学数据中心
		中国气象数据网
水文站数据	日	延边州水利局

1.2 土地利用情景预测

1.2.1 PLUS 模型构建

PLUS 模型(patch-generating land use simulation)是一种基于栅格数据的斑块生成土地利用变化模型^[12]。该模型通过 LEAS 模块分析 2000—2020 年的土地扩张,并结合随机森林算法和 CARS 模块预测 2020 年和 2030 年的土地利用变化。

1) 情景设定

本研究依据《吉林省生态环境保护“十四五”规划》和《吉林省黑土地保护条例》,聚焦图们江流域的景观生态修复与生态系统增值,并基于流域实际情况、生态环境质量和粮食生产能力,设定 2030 年为目标年,设计了以下四种情景。

①自然发展情景:该情景基于 2000 年至 2020 年的土地利用变化趋势进行预测,以反映自然状态下的土地利用演变。通过分析历史数据发现,耕地年均转出率约为 1.2%,建设用地年均扩张率为 3.5%。因此,本情景未施加人为干预,保持历史转换速率,以验证模型的基准预测能力。

②耕地保护情景:该情景旨在平衡耕地保护与开垦,提高黑土地的可持续利用水平。根据《吉林省黑土地保护条例》中“耕地红线保有量不低于现状的 95%”的目标,结合历史耕地流失速率(年均减少 0.8%),通过敏感性分析将耕地转为建设用地的概率降低 60%^[13],确保 2030 年耕地面积降幅控制在 0.5%以内,与政策目标一致。

③快速扩张情景:该情景旨在促进城乡融合和县域经济高质量发展。参考《吉林省新型城镇化发展规划(2021—2035 年)》中“建设用地年均增速提升至 5%”的导向,通过校准模型发现,提高耕地、林地、草地、水域、湿地向建设用地的转移概率 20%^[14],并减少建设用地向其他用地类型转出概率

30%,可实现建设用地面积年均增长 4.8%,与规划目标吻合。

④生态优先情景:该情景以生态环境保护为优先,依据《吉林省人民政府办公厅关于印发吉林省生态环境保护“十四五”规划的通知》中“森林覆盖率提升至 85%”的要求,结合历史林地恢复潜力(年均增加 1.5%),设置林地和草地向建设用地的转移概率降低 50%,耕地向林地的转移概率提高 30%^[15]。此参数调整参考了同类流域研究的校准结果^[12],确保生态用地净增长符合区域生态修复目标。

2) 参数设置

本研究基于 PLUS 模型预测 2030 年不同情景下的土地利用覆盖。主要计算模块如下。

①土地扩张分析策略(LEAS)模块:该模块旨在确定不同土地利用类型变化的概率及其影响因子的贡献率。研究选取了 16 个驱动因子,包括自然因素(如 DEM、坡度、坡向、降水、气温)、社会因素(如人口密度、GDP、夜间灯光亮度)以及可达性因素(如距各级道路、铁路、主干道、高速、公路、行政村、河流的距离)。通过 LEAS 模块生成各类用地的适宜性概率图集,并通过均方根误差(RMSE)衡量模型精度。结果显示,六个模型的 RMSE 分别为 0.094 952 9、0.128 752、0.110 375、0.008 113 86、0.040 751 9、0.047 629 6,满足精度要求。

②基于多类随机斑块种子的元胞自动机模型(CA):该模型利用适宜性概率图集,结合成本矩阵和邻域因子,计算各类用地的总体转换概率。研究以 2020 年土地利用数据为初始数据,结合土地适宜性概率和限制转化因子,最终确定不同情景下的参数(见表 2 和表 3)。邻域因子参数取值范围为[0,1],值越接近 1,表示土地扩张能力越强且稳定性越高。在成本矩阵中,1 表示允许转变,0 表示限制转变。

表 2 不同情景下各土地利用类型的邻域权重因子

Tab. 2 Neighborhood weighting factors for each land use type in different scenarios

邻域权重	耕地	林地	草地	湿地	水域	建设用地
自然发展情景(NDS)	0.100 0	1.000 0	0.567 7	0.572 7	0.596 2	0.700 7
耕地保护情景(CPS)	0.100 0	1.000 0	0.444 9	0.563 9	0.590 4	0.816 4
快速扩张情景(RES)	0.100 0	1.000 0	0.602 9	0.610 1	0.631 7	0.818 6
生态优先情景(EPS)	0.100 0	1.000 0	0.414 1	0.485 9	0.499 1	0.517 1

表 3 不同情景下土地利用转换成本矩阵
Tab. 3 Matrix of land-use conversion costs in different scenarios

土地利用类型	自然发展情景(NDS)						耕地保护情景(CPS)						快速扩张情景(RES)						生态优先情景(EPS)					
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI
I	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
II	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
III	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
IV	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0
V	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
VI	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

注：I、II、III、IV、V、VI 分别表示耕地、林地、草地、湿地、水域和建设用地。

3) 精度验证。本研究通过 Kappa 系数、总体精度和优度系数 FoM 等指标对 Markov-PLUS 模型在模拟研究区土地利用空间格局模拟结果的准确性进行了评估。各指标的计算公式如下：

$$K = \frac{P_0 - P_c}{P_p - P_c} \tag{1}$$

$$F = \frac{B}{A + B + C + D} \tag{2}$$

式中：K 表示 Kappa 系数； P_0 表示实际一致率； P_c 表示观测一致率，通常取值为 1； P_p 为期望一致率；A 代表实际发生变化但被错误预测为不变的区域像元数；B 为被正确预测的像元数；C 为被错误预测为不同类型的区域像元数；D 为实际未发生 CP 变化但被错误预测为变化的区域像元数；F 为优度系数 FoM，用于衡量土地利用变化模拟的命中精度，是评估元胞自动机类模型模拟效果的核心定量指标。

1.2.2 生境质量评估

本文采用 InVEST 模型的生境质量模块对图们江流域生境质量进行评估^[16]，以揭示各时期的生境退化程度及其时空格局。基于以往研究和研究区实际情况，将耕地和建设用地等易受人类活动影响的生境(耕地、建设用地)作为威胁源，并设置了相关参数，如生境适宜性指数、对威胁的敏感性和半饱和参数(见表 4 和表 5)。具体公式如下：

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} \right) s_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{3}$$

式中： D_{xj} 为第 j 种生境类型的第 x 栅格的生境退化度；R 为威胁源的总数量； W_r 为第 r 个威胁源的权重； Y_r 为第 r 个威胁源对应的的栅格总数； S_y 为栅格 y 的胁迫值； β_x 为威胁源对栅格 x 的可达性

(其取值范围根据栅格受法律保护的程度在 0 到 1 之间)^[17]； S_{jr} 为生境类型 j 对威胁源 r 的敏感度； i_{rxy} 指的是栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫水平，可分为线性衰减和指数衰减两种，见式(4)~(5)。

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \tag{4}$$

$$i_{rxy} = \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \tag{5}$$

式中： d_{xy} 为栅格 x 和栅格 y 之间的直线距离； d_{rmax} 为威胁源 r 的最大胁迫距离。

表 4 威胁因子表
Tab. 4 Threat factor table

威胁因子	最大影响距离/km	权重	空间衰退类型
耕地	2.6	0.26	线性
建设用地	5.8	0.76	指数

表 5 生境类型对威胁因子的敏感度
Tab. 5 Sensitivity of threat factors in response to habitat types

土地利用类型	生境适宜度	敏感程度	
		耕地	建设用地
耕地	0.25	0.3	0.5
林地	1	0.8	0.8
草地	0.8	0.4	0.6
湿地	0.75	0.7	0.6
水域	0.9	0.65	0.5
建设用地	0	0	0

最后,可以通过式(6)来计算生境质量。

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (6)$$

式中: Q_{xj} 是生境类型 j 中 x 栅格的生境质量指数; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度 ($0 \leq H_j \leq 1$); k 为半饱和常数,取值为最大生境退化度的一半,通常设定为 0.5; z 为归一化常量,一般取 2.5。

1.2.3 人类足迹模型

人类足迹模型是一种用于评估人类活动对生态系统影响的工具,其通过人口密度、土地利用变化、道路网和夜间照明等指标衡量人类干预程度。其中,Sanderson 等^[18]提出的人类活动度量标准在学术界广泛应用。本文结合人类足迹指数方法、先前研究结果^[19]以及图们江流域的实际情况,选取了土地利用数据、交通可达性、人口密度和夜间光照指数四个因子来确定图们江流域的人类足迹指数(HFI)。

其中,土地利用是评估人类活动强度的重要标志,其数据通过投影、栅格裁剪和重采样获取,依据段群滔等的研究^[20],本文将所有建设用地赋值为 10 分,耕地赋值为 8 分,水域赋值为 2 分,其余土地利用类型均赋值为 0 分。人口密度采用自然断点法分为 10 个等级,分别赋值 1~10。夜间光照指数采用分位数分类赋值,根据前期研究^[21],2020 年 VIIRS_DBN_VNLV2 夜间灯光数据中 DN 值为 0 的网格被置为 0,其余网格按 1~10 赋值。交通可达性基

于高速公路、国道、省道和县道设置 500 m、500~1 500 m、1 500~2 500 m 的缓冲区,按先前研究^[13]的赋值标准进行处理,并整合到新的网格系统,通过比较缓冲区交集部分的最优值量化交通网络可达性。最后,将上述因子加权处理后,计算得出图们江流域的人类足迹指数。

2 结果与分析

2.1 PLUS 模型验证

通过 PLUS 模型模拟的 2020 年土地利用数据与实际数据进行精度验证,结果表明 Markov-PLUS 耦合模型的总体精度为 0.94,Kappa 系数为 0.82,FoM 系数为 0.15,模型表现出色且具有较高的可信度,可用于未来情景预测。因此,本文基于 2020 年土地利用数据,利用 PLUS 模型预测并分析 2030 年土地利用变化,结果显示模型具有科学性和普适性。

根据图 2 和表 6,图们江流域的土地利用类型主要为耕地和林地,占比超过 90%。从 2000 到 2020 年,耕地、林地和湿地面积分别减少了 203.02 km²、275.61 km²和 7.52 km²。耕地主要转为林地和建设用地,转出面积分别为 316.92 km²和 179.83 km²,重心从东北向西南移动。林地则主要转为耕地和草地,转移面积分别为 301.41 km²和 391.45 km²,重心从西南向东北移动。

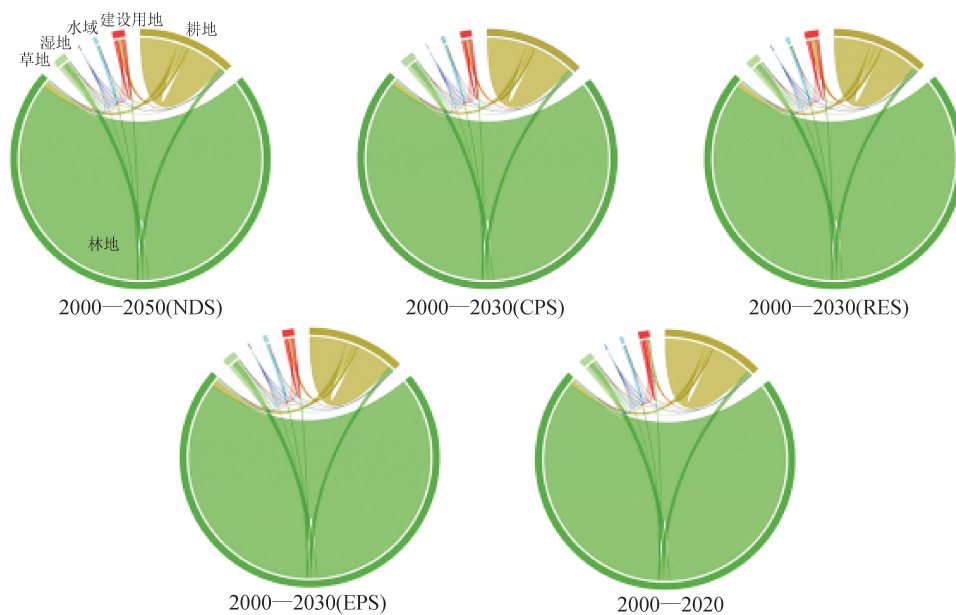


图 2 2000—2030 年多种情景图们江流域土地利用变化转移矩阵弦图

Fig. 2 Land use change transfer matrix in Tumen River Basin from 2000 to 2030 in various scenarios

表 6 2000—2030 年土地利用变化情况
Tab.6 Land use change(2000—2030)

土地 利用类型	年份							占比变化			
	2000	2010	2020	2030 (NDS)	2030 (CPS)	2030 (RES)	2030 (EPS)	2000— 2030(NDS)	2000— 2030(CPS)	2000— 2030(RES)	2000— 2030(EPS)
耕地	14.86	15.11	13.96	12.98	13.62	12.70	12.83	−1.88	−1.24	−2.16	−2.03
林地	82.33	80.81	81.11	81.50	81.22	81.41	81.86	−0.83	−1.11	−0.92	−0.47
草地	1.33	2.46	2.49	2.48	2.44	2.48	2.52	1.15	1.11	1.15	1.19
湿地	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	−0.03	−0.03	−0.03	−0.03
水域	0.31	0.36	0.59	0.68	0.60	0.66	0.70	0.37	0.29	0.35	0.39
建设用地	1.13	1.22	1.84	2.35	2.10	2.73	2.08	1.22	0.97	1.60	0.95

2.2 生境质量与人类足迹指数评价结果

本研究利用 InVEST 模型的生境质量模块,对研究区生境质量进行评估。参考先前研究^[22],应用

ArcGIS 的自然断点法,将 2000 年、2010 年和 2020 年图们江流域的生境质量分为低[0,0.4)、中[0.4,0.8)和高[0.8,1]三个等级(见图 3)。

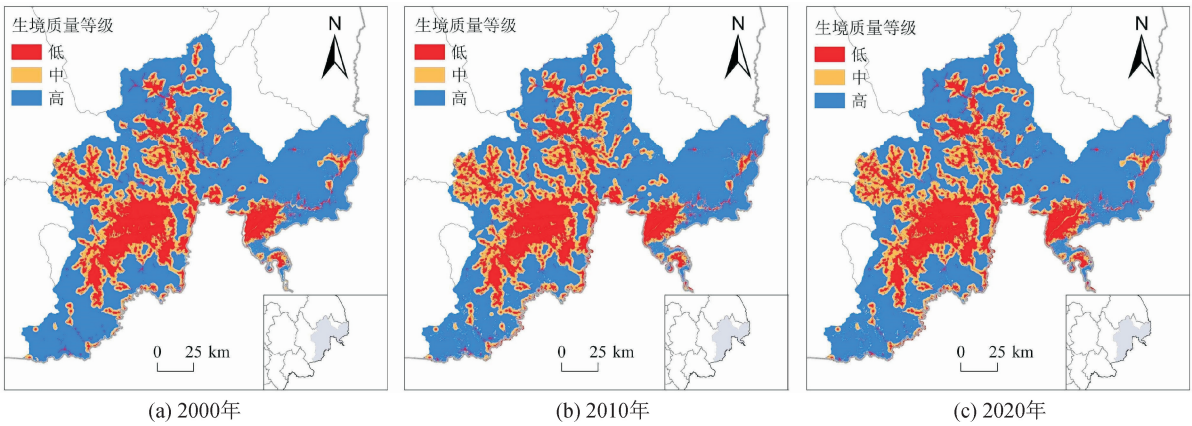


图 3 2000、2010 和 2020 年图们江流域生境质量评价结果

Fig.3 Results from habitat quality assessment in the Tumen River Basin in 2000, 2010 and 2020
注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作,底图无修改。

2000 年、2010 年和 2020 年图们江流域的平均生境质量分别为 0.746 7、0.723 4 和 0.747 0,显示出先下降后上升的趋势,这可能是因为将耕地转为林地的政策,增加了林地面积,从而改善了生境质量。从时间维度看,2000—2010 年,高、低等级生境质量区的面积减少,中等等级面积增加,导致整体生境质量下降。2010—2020 年,中等等级面积持续增加,高、低等级面积减少,整体生境质量逐步上升,高等级生境质量区域的占比始终超过 60%。从空间分布来看,各时期生境质量呈现“小分散、大聚集”的特点,以延吉市、龙井市和敦化市为中心,生境质量向外围扩散。高等级生境质量主要分布在珲春市、安图县和敦化北部,以山地和丘陵为主,森林覆盖率高,包括长白山景区等自然保护区。从生境质量等级转移情况来看(见图 3),2000—2020 年,低等级生境质量转为中、高等级的面积分别为 293.11 km² 和

55.21 km²,主要分布在草地增加的区域。中等生境质量主要保持原等级,少量转为低等级或高等级。在高生境质量区域中,有 46.72 km² 转为低等级,149.86 km² 转为中等级,主要发生在安图县和珲春市的耕地扩张区域。

基于前人的研究^[23],结合研究区的自然社会特点及数据可获取性,通过叠加计算土地利用数据、夜间照明指数、人口密度和交通可达性,得出 HFI 值,其值范围为 1 到 32。利用自然断点法,将人类足迹指数分为低[1,6)、中[6,12)和高[12,32]三个等级,得到图们江流域的人类足迹指数评价结果(见图 4)。结果显示,图们江流域的人类足迹指数呈现四周低、中部高的分布特征。高值区域主要集中在城市开发区、农田和道路建设区,受人类活动影响较大。低值区域位于农田周围和未开发的河流流域,尤其是被山林和草地环绕的区域,受人类干扰较少。

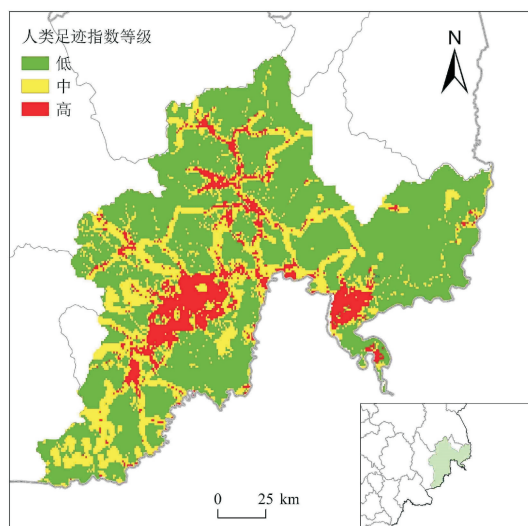


图4 图们江流域人类足迹指数(HFI)评价结果
Fig. 4 Evaluation results from Human Footprint Index (HFI) in Tumen River Basin

注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

基于2020年生境质量数据和图们江流域HFI结果,通过重分类工具将生境质量和HFI叠加分析,将其分为高、中、低三类。分析结果显示,形成了九种空间类型(见图5),并据此将图们江流域划分为保护区、恢复区和开发区(见图6)。

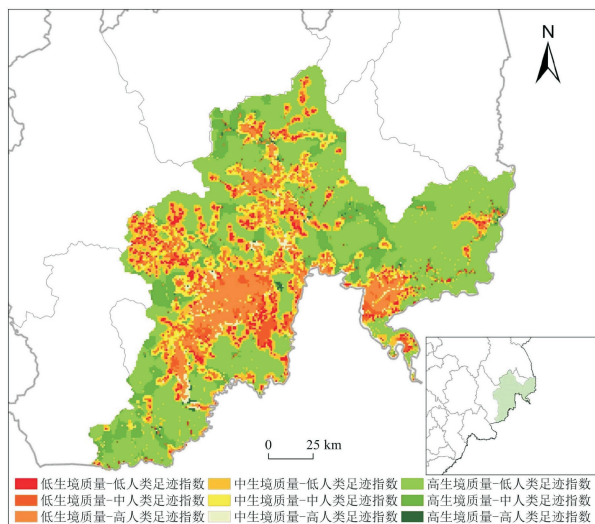


图5 生境质量与人类足迹指数叠加分析结果

Fig. 5 Superposition analysis results from habitat quality and HFI

注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

重点保护区呈现生境质量高值与人类足迹低指数的空间耦合特征,其地理分布集中于珲春市全境、安图县北部及敦化市的山地丘陵地带。该区域以天然林生态系统为主体,镶嵌分布着沼泽湿地等自然生境,形成完整的生态网络体系。作为长白山生物

多样性保护的关键廊道,其生态系统服务价值在东北虎豹国家公园建设中具有战略地位。依据景观生态学“源-汇”理论框架分析,该区作为优质生态源地,通过物质能量传输维系着跨境流域的生态过程完整性,尤其在大型哺乳动物迁徙廊道维护、跨境水系净化等方面发挥着不可替代的生态枢纽作用。

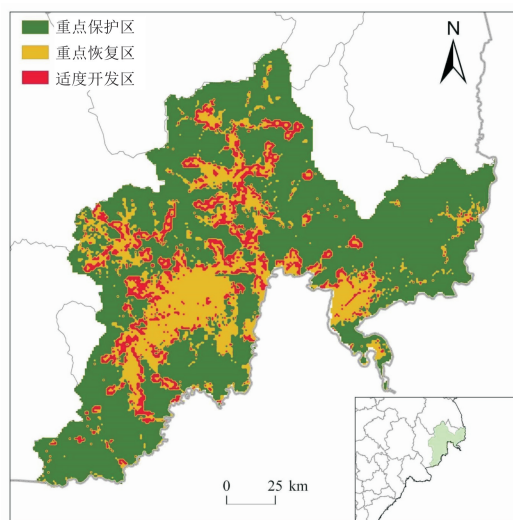


图6 生态分区规划结果

Fig. 6 Ecological zoning planning results

注:此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822的标准地图制作,底图无修改。

重点恢复区表现为中等生境质量与人类活动强度的过渡性特征,空间格局上环绕延吉市、龙井市形成环状缓冲带。实地调查显示,该区域受近十年农业垦殖强度增加42%的影响,原生植被覆盖率下降19%,土壤有机质流失速率达年均1.2%。根据恢复生态学原理,建议采用近自然林改造、表土保育、生态沟渠建设等复合修复技术,重点提升生态系统的抗干扰能力和自我修复能力。通过构建“林-田-水”立体修复模式,可望在5~8年内使区域生态韧性指数提升30%以上。

适度开发区呈现低生境质量与高强度人类活动的空间叠加态势,主要分布于延吉核心城区、和龙市等城镇化集聚区。该区域承载着全州65%的经济产出与48%的人口规模,建设用地占比已达32.7%。基于生态承载力评估模型测算,建议将开发强度控制在土地面积的45%阈值以内,通过立体绿化、海绵城市、工业用地集约化(容积率提升至2.5以上)等绿色基础设施改造,构建“生态占补平衡”机制。在商业中心区试点推广屋顶农场、垂直森林等生态建筑技术,可实现碳汇能力提升25%的同时维持经济发展增速。

本研究构建的分区方案综合考量生境质量的生态本底特征与人类活动干扰强度,契合“生态优先、分区管控”的国土空间规划理念。模型精度验证显示,

Kappa 系数达 0.82, FoM 系数为 0.15, 表明分区结果能客观反映流域生态-社会系统的空间异质性特征。

重点保护区作为流域生态安全屏障的核心载体, 其完整性保护对维系水源涵养、碳汇等关键生态功能具有决定性作用。重点恢复区的生态修复工程可有效提升区域生态连通性, 缓解生境破碎化问题。适度开发区的科学管控则有助于降低人类活动对生态敏感区域的胁迫压力。

研究结果为图们江流域“三区三线”划定提供了科学依据。具体管控建议如下: 重点保护区应纳入生态保护红线实施严格保护, 严禁大规模开发建设; 重点恢复区需针对性开展退耕还林、湿地修复等生态工程, 系统提升生态系统服务功能; 适度开发区应优化建设用地空间布局, 推广生态友好型产业发展

模式, 实现开发强度与生态承载力的协调匹配。

面积统计显示, 重点保护区、重点恢复区和适度开发区分别占研究区域总面积的 69.14% (15 516.39 km²)、20.61% (4 625.29 km²) 和 10.25% (2 300.09 km²)。其中, 重点恢复区主要涵盖裸地、戈壁、盐碱地等生境质量低下且生态环境脆弱的区域。该类区域因植被覆盖度低、土壤贫瘠化严重, 导致自然生态系统功能显著退化甚至丧失, 亟需通过系统性生态修复措施重建生态平衡, 增强生态系统稳定性与可持续性。

2.3 不同情景下生境质量的变化分析

根据生态分区规划结果, 利用 PLUS 模型模拟图们江流域 2030 年自然发展、耕地保护、快速扩张和生态优先四种发展情景下的土地利用空间格局(图 7)。

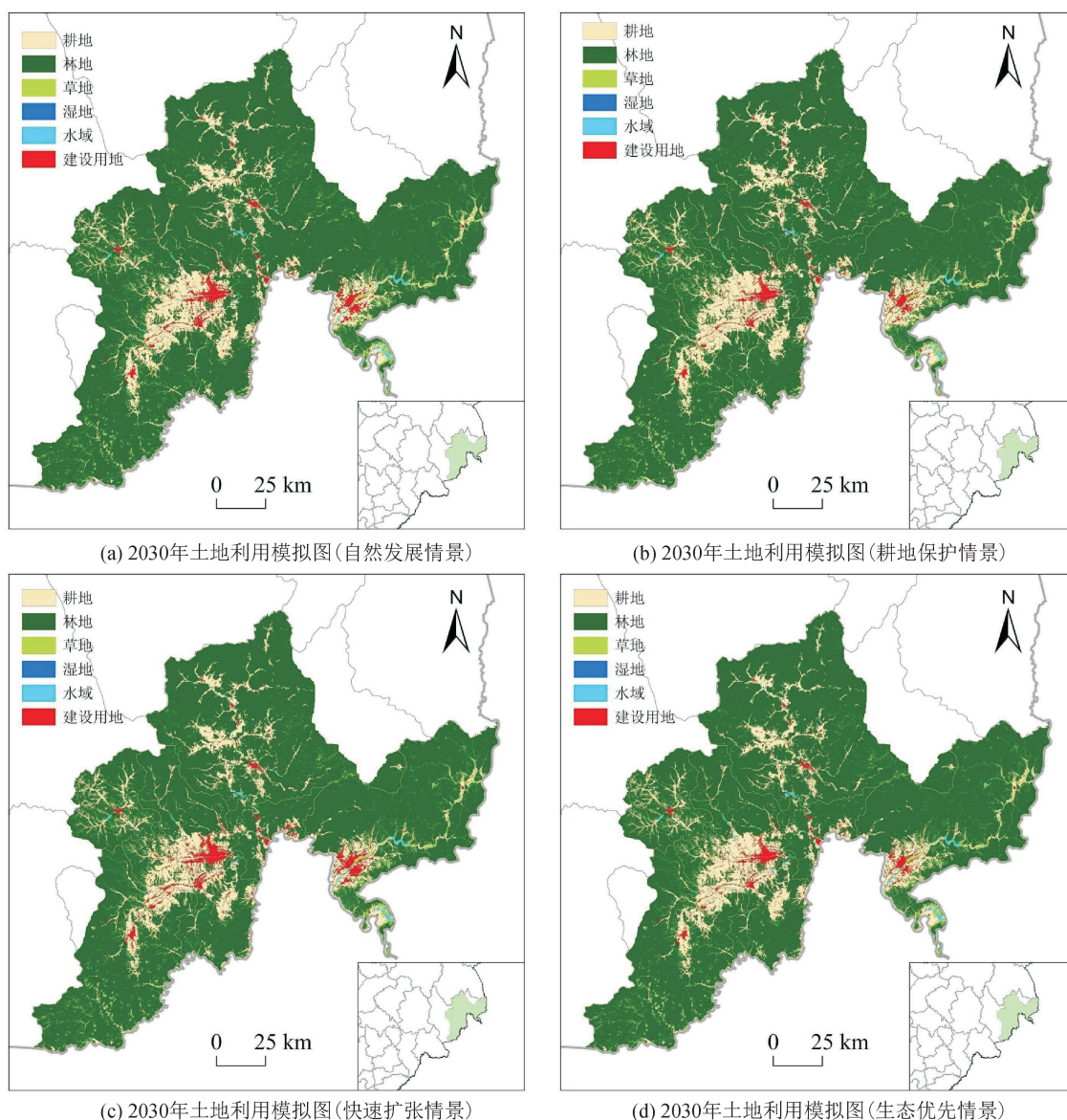


图 7 土地利用情景模拟

Fig. 7 Land use scenario simulation

注: 此图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为 GS(2019)1822 的标准地图制作, 底图无修改。

在自然发展情景下,图们江流域土地利用类型变化显著,其中耕地与林地的动态演变尤为突出。基于基准概率预测,至2030年,林地面积将净增加8 859.42 hm²,水域与建设用地面积分别扩张2 002.86 hm²和11 337.93 hm²,而耕地与草地面积则呈缩减态势,分别减少22 007.25 hm²和207.99 hm²。相应地,流域生境质量出现退化,2030年生境质量值降至0.726 3,具体表现为低生境质量区域扩张18 359.73 hm²、中生境质量区域增长91 938.6 hm²,高生境质量区域则减少110 298.33 hm²,该退化现象在延吉市、龙井市和和龙市尤为显著。

与之形成对比的是,耕地保护情景下土地利用结构调整呈现差异化特征。通过实施耕地保护措施,2030年耕地与草地的转化量较2020年显著降低,尽管林地与建设用地转化量有所增加,但耕地、草地和湿地面积仅分别减少7 582.14 hm²、1 143.18 hm²和11.34 hm²,较自然发展情景下的耕地、林地转化量明显下降,凸显保护政策的有效性。在此情景下,2030年流域生境质量值提升至0.735 7,较2020年增长1.92%,低生境质量与中生境质量区域分别扩展20 195.82 hm²和92 154.33 hm²,主要分布于汪清县和安图县,高生境质量区域则减少112 350.15 hm²,集中于安图县东南部。值得注意的是,耕地保护措施通过限制耕地流失与推进建设用地复垦,使耕地净减少量较自然发展情景降低65.5%,其中12.3%的新增耕地来源于建设用地复垦,主要集中在延吉市和龙井市城乡结合部。然而,建设用地复垦过程中土壤修复滞后问题导致复垦区域短期内仍维持中生境质量水平。未来研究需进一步完善模型,量化复垦工程对土壤肥力与生态功能的长期影响机制。

在快速扩张情景下,建设用地扩张速度大幅增加,增长了19 927.17 hm²,导致耕地、草地流失严重,分别减少了28 304.55 hm²和241.56 hm²。到2030年,生境质量值降至0.714 6,退化程度上升。低生境质量和中生境质量面积分别增加了23 192.55 hm²和89 408.07 hm²,主要集中在延吉市和和龙市,高生境质量面积减少112 600.62 hm²,主要集中在安图县。与自然发展情景相比,此情景下生境质量有所下降。

在生态优先情景下,林地和水域面积分别增加了16 960.05 hm²和2 460.69 hm²,建设用地面积增速放缓,仅增加5 369.31 hm²。耕地面积显著减少25 398.36 hm²。到2030年,生境质量值提升至0.745 3,提高了2.62%。低生境质量、中生境质量

和高生境质量的面积分别增加了8 194.14 hm²、14 767.92 hm²和65 737.8 hm²。与自然发展情景相比,生态优先情景下的生境质量显著提升。在自然发展情景下,耕地和林地的变化最显著。根据基准概率预测,到2030年,林地面积将增加8 859.42 hm²,水域面积增加2 002.86 hm²,建设用地面积增加11 337.93 hm²。相反,耕地面积将减少22 007.25 hm²,草地面积减少207.99 hm²。2030年,图们江流域的生境质量值为0.726 3。低生境质量和中生境质量区域分别增加18 359.73 hm²和91 938.6 hm²,而高生境质量区域减少110 298.33 hm²,主要集中在延吉市、龙井市和和龙市。总体来看,图们江流域的生境质量呈下降趋势。

在耕地保护情景下,耕地和草地转化量较2020年有所减少,显示出保护措施成效,但林地和建设用地转化量有所增加。耕地、草地和湿地面积相比2020年分别减少7 582.14 hm²、1 143.18 hm²和11.34 hm²。相比自然发展情景,耕地和林地的转化量减少,进一步体现了保护工作的效果。到2030年,图们江流域的生境质量值为0.735 7,较2020年提升了1.92%。低生境质量和中生境质量面积分别增加20 195.82 hm²和92 154.33 hm²,主要变化发生在汪清县和安图县;而高生境质量得面积减少了112 350.15 hm²,主要在集中安图县东南部。与自然发展情景相比,生境质量在此情景下有所提升。

在快速扩张情景下,通过降低转换为建设用地的成本和增加建设用地转换的难度来实现政策目标。与2020年实际情况相比,建设用地扩张速度大幅增加,增长了19 927.17 hm²,导致耕地、草地流失严重,分别减少了28 304.55 hm²、241.56 hm²。到2030年,生境质量值降至0.714 6,退化程度上升。低生境质量和中生境质量面积分别增加了23 192.55 hm²和89 408.07 hm²,主要集中在延吉市和和龙市,高生境质量面积减少112 600.62 hm²,主要集中在安图县。与自然发展情景相比,此情景下生境质量有所下降。

在生态优先情景下,通过限制高生态价值用地的转变,2020至2030年间林地和水域面积分别增加了16 960.05 hm²和2 460.69 hm²,同时建设用地面积也增加了5 369.31 hm²,但增速有所放缓。严格的生态保护措施和退耕还林政策导致耕地面积显著减少,减少了25 398.36 hm²。到2030年,图们江流域生境质量值提升至0.745 3,提高了2.62%。低生境质量、中生境质量和高生境质量的面积分别增加了8 194.14 hm²、14 767.92 hm²和65 737.8 hm²。

与自然发展情景相比,生态优先情景下得生境质量显著提升。

根据模拟预测,到 2030 年,图们江流域的生境质量在自然情景下总体呈下降趋势。然而,不同情景下,生境质量变化各不相同。①在生态保护情景中,通过限制建设用地扩张并增加森林、草地显著面积,提升生境质量。②在耕地保护情景中,虽然耕地得到有效保护,但其扩张影响了高适宜度地类,导致生境质量提升有限。③而在快速扩张情景中,建设用地无序增长导致生境质量大幅下降。

3 讨 论

在当前快速城镇化进程中,为实现区域可持续发展,科学合理评估土地利用与生境质量的关系至关重要。相比传统的 PLUS-InVEST 模型在生境质量预测中的应用,这些模型往往忽略了人类活动对生境质量的直接或间接影响,以及其与生态环境的空间依赖性。鉴于生态系统的复杂性和人类活动的多样性,人类足迹指数在评估人类活动强度时展现出广泛的适用性^[9]。研究人类足迹指数与生境质量之间的关系,有助于揭示人类活动对生态环境的影响。

以往研究多基于生态适宜性和开发适宜性标准来划分生态区域^[24],但常因数据获取困难而影响其科学性和完整性。因此,本研究尝试将人类足迹指数(HFI)与 InVEST 模型相结合进行综合评估,以简化数据获取过程,提升模拟结果的地域代表性、精确度和可信度。

本文研究了 2000—2020 年图们江流域的生境质量动态变化,并结合人类足迹指数,制定了该区域的生态分区规划。在此基础上,采用“过去—现在—未来”的分析框架,通过 PLUS-InVEST 模型对 2030 年四种情景下的生境质量变化进行了预测。结果显示,在自然发展情景下,耕地面积显著减少,其他用地类型持续增加,生境质量整体下降;在耕地保护情景下,耕地减少放缓,建设用地扩张受到抑制,生境质量有所提升,退化程度降低;在快速扩张情景下,建设用地快速增长,耕地大幅减少,生境质量和退化程度均表现最差;而在生态优先情景下,生态用地,尤其是林地面积增加显著,建设用地扩张受到限制,生境质量提升明显。

研究通过耦合 PLUS-InVEST 模型与人类足迹指数,系统评估了图们江流域生境质量的时空演变与情景响应,但仍需在数据精度、情景多样性和政策落地性等方面深化。在四种情景下,生态优先情景

对生境质量的改善最为显著,主要归因于生态区域的严格保护和建设用地扩张的限制。因此,未来的土地利用规划应重视生态优化,合理控制建设用地扩张,保护生态用地,并有效调控耕地与林地的转换,以提升区域的生态平衡和可持续发展水平。未来研究可通过多学科交叉与动态模拟,为流域可持续发展提供更具操作性的科学支撑。

4 结 论

本文分析 2000—2020 年图们江流域土地利用数据,揭示其时空演变规律。研究设定四种情景,结合生境质量与人类活动,进行生态分区规划,预测 2030 年土地利用需求。利用 PLUS 模型生成不同情景下的土地利用图,并用 InVEST 模型评估 2030 年生境质量及空间特征。

1) 2000—2020 年,耕地、林地和草地的扩张受相似因子影响,湿地、水域和建设用地受特定因子制约。数字地形模型对所有类型影响显著,坡向对耕地和林地影响较大。

2) 2030 年不同情景下土地利用变化不同:自然发展情景耕地显著减少;耕地保护情景耕地减少放缓,城市扩张抑制;快速扩张情景建设用地大幅扩张,耕地锐减;生态优先情景生态地类增加,建设用地扩张严格控制,维持生态平衡。

3) InVEST 模型显示,2000—2020 年生境质量先降后升。生态优先情景生境质量最高,其次耕地保护和快速扩张情景。地区生境质量差异显著,土地利用变化影响大。未来应关注生态优化和土地利用规划,管控建设用地扩展,保护生态用地。耕地保护情景中,降低耕地转出概率、提升建设用地复垦概率,减缓耕地流失。但复垦耕地生态效益有时滞,需土壤修复技术提升生境质量贡献。建议政策纳入复垦土地质量评估体系,协同提升耕地数量与生态功能。

参考文献:

- [1] 章磊,蔡俊,袁宏伟,等. 新安江流域生境质量时空演变及多情景预测[J]. 云南农业大学学报(社会科学版),2022,16(5):133-142.
Zhang Lei, Cai Jun, Yuan Hongwei, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality in the Xin'an River Basin and multi-scenario prediction[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Social Science Edition), 2022, 16(5): 133-142.
- [2] Li Zhaotian, Li Miao, Xia Beicheng. Spatio-temporal dynamics of ecological security pattern of the Pearl

- River Delta urban agglomeration based on LUCC simulation[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 114: 106319.
- [3] Van Dessel W, Van Rompaey A, Szilassi P. Sensitivity analysis of logistic regression parameterization for land use and land cover probability estimation[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(3): 489-508.
- [4] Liang Xun, Guan Qingfeng, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: a case study in Wuhan, China[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 85: 101569.
- [5] 高周冰,王晓瑞,隋雪艳,等. 基于 FLUS 和 InVEST 模型的南京市生境质量多情景预测[J]. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 1001-1013.
- Gao Zhoubing, Wang Xiaorui, Sui Xueyan, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2022, 39(5): 1001-1013.
- [6] Tang Xuguang, Li Hengpeng, Xu Xibao, et al. Changing land use and its impact on the habitat suitability for wintering Anseriformes in China's Poyang Lake region[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 557: 296-306.
- [7] 钟莉娜,王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255.
- Zhong Lina, Wang Jun. Evaluation on effect of land consolidation on habitat quality based on InVEST model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1): 250-255.
- [8] 荣益,李超,许策,等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异——以黄骅市为例[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381.
- Rong Yi, Li Chao, Xu Ce, et al. Ecosystem service values and spatial differentiation changes during urbanization: a case study of Huanghua City[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(5): 1374-1381.
- [9] 连喜红,祁元,王宏伟,等. 人类活动影响下的青海湖流域生态系统服务空间格局[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1254-1263.
- Lian Xihong, Qi Yuan, Wang Hongwei, et al. Spatial pattern of ecosystem services under the influence of human activities in Qinghai Lake watershed[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1254-1263.
- [10] 王洁,孙依. 图们江流域“2016.08.31”暴雨洪水调查分析[J]. *吉林水利*, 2018(6): 38-40.
- Wang Jie, Sun Yi. Investigation and analysis on the “2016.08.31” storm flood in Tumen River basin[J]. *Jilin Water Resources*, 2018(6): 38-40.
- [11] 崔阳. 浅谈延边朝鲜族自治州经济发展战略[J]. *延边党校学报*, 2007, 22(2): 52-54.
- [12] 王子尧,黄楚梨,李惊,等. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估——以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5789-5798.
- Wang Ziyao, Huang Chuli, Li Liang, et al. Ecological zoning planning and dynamic evaluation coupled with Invest-HFT-Plus model: a case study in Bortala Mongolian Autonomous Prefecture[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(14): 5789-5798.
- [13] 李俊,杨德宏,吴锋振,等. 基于 PLUS 与 InVEST 模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 378-387.
- Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(1): 378-387.
- [14] 武爱彬,陈辅国,赵艳霞,等. 京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响[J]. *环境科学*, 2024, 45(5): 2828-2839.
- Wu Aibin, Chen Fuguo, Zhao Yanxia, et al. Multi-scenario simulation of construction land expansion and its impact on ecosystem carbon storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(5): 2828-2839.
- [15] 张廷,胡玉柱,胡海辉,等. 基于 PLUS-InVEST 模型的哈尔滨市土地利用及生境质量预测[J]. *环境科学*, 2024, 45(8): 4709-4721.
- Zhang Ting, Hu Yuzhu, Hu Haihui, et al. Prediction of land use and habitat quality in Harbin City based on the PLUS- InVEST model[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8): 4709-4721.
- [16] 李胜鹏,柳建玲,林津,等. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- Li Shengpeng, Liu Jianling, Lin Jin, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [17] 谢余初. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生态系统服务时空变化研究[D]. 兰州:兰州大学, 2015.
- Xie Yuchu. Spatiotemporal change of ecosystem services based on InVEST model in the Bailong River Watershed, Gansu[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.

- Photonics Technology Letters, 2016, 28(3):327-333.
- [14] 朱振,胡艳,吴立志,等. 基于 PDV 技术的微型雷管爆炸驱动飞片速度测试研究[J]. 爆破器材,2016,45(5):56-61.
- Zhu Zhen, Hu Yan, Wu Lizhi, et al. Investigation on flyer velocity driven by miniature detonators based on the PDV technology[J]. Explosive Materials, 2016, 45(5): 56-61.
- [15] Hutchinson T M, Awe T J, Bauer B S, et al. Photonic Dopplervelocimetry of ohmically exploded aluminum surfaces[J]. Physics of Plasmas, 2020, 27: 052705.
- [16] Nissim N, Greenberg E, Werdiger M, et al. Free-surface velocity measurements of opaque materials in laser-driven shock-wave experiments using photonic Doppler velocimetry[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2021, 6: 046902.
- [17] 陆苗霞. 小波变换在信号去噪方面的仿真研究[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(5):48-50.
- Lu Miaoxia. Simulation study of wavelet transform for signal denoising[J]. Technological Innovation and Application, 2022, 12(5):48-50.
- [18] 梅迪,王可暄,杜昱岐,等. 一种自适应光子多普勒信号解调方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(3):13-17, 25.
- Mei Di, Wang Kexuan, Du Yuqi, et al. An adaptive photon Doppler signal demodulation method[J]. Automation & Instrumentation, 2023(3):13-17, 25.
- [19] Siddique M F, Ahmad Z, Ullah N, et al. A hybrid deep learning approach: integrating short-time Fourier transform and continuous wavelet transform for improved pipeline leak detection[J]. Sensors, 2023, 23(19):8079.
- (责任编辑 王绪迪)

(上接第 175 页)

- [18] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, et al. The human footprint and the last of the wild: the human footprint is a global map of human influence on the land surface, which suggests that human beings are stewards of nature, whether we like it or not[J]. BioScience, 2002, 52(10): 891-904.
- [19] 金铭,李明玉,李美娟,等. 长吉图地区“生产—生活—生态”空间生境质量时空演变分析[J]. 延边大学农学报, 2022, 44(2):99-109.
- Jin Ming, Li Mingyu, Li Meijuan, et al. Analysis on spatial and spatial evolution of habitat quality in production-life-ecology space in Changchun-Jilin-Tumen region[J]. Agricultural Science Journal of Yanbian University, 2022, 44(2): 99-109.
- [20] 段群滔,罗立辉. 1990—2015 年青藏高原人类足迹数据集[J/OL]. 中国科学数据, 2020, 5(3). (2020-01-30). DOI: 10.11922/csdata.2019.0082.zh.
- Duan Quntao, Luo Lihui. A dataset of human footprint over the Qinghai-Tibet Plateau during 1990—2015[J/OL]. CHINA Scientific Data, 2020, 5(3). (2020-01-30). DOI: 10.11922/csdata.2019.0082.zh.
- [21] 黄卓男. 广东省人类足迹与生态系统服务功能时空响应关系研究[D]. 广东:广州大学, 2023.
- Huang Zhuonan. Analysis of spatiotemporal relationship of human activity with and its influence on ecosystem service functions in Guangdong Province [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [22] He Jingfeng, Yao Yake, Huang Ge, et al. Intensification of the density stability in the air dense medium gas-solid fluidized bed based on a binary dense media [J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. 2017, 122: 58-67.
- [23] Mengist W, Soromessa T. Assessment of forest ecosystem service research trends and methodological approaches at global level: a meta-analysis[J]. Environmental Systems Research. 2019, 8(1): 22.
- [24] 成超男,胡杨,冯尧,等. 基于 CA-Markov 模型的城市生态分区构建研究——以晋中主城区为例[J]. 生态学报, 2020, 40(4):1455-1462.
- Cheng Chaonan, Hu Yang, Feng Yao, et al. Construction of urban ecological zones based on CA-Markov model: a case study of the main urban area of Jinzhong [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1455-1462.
- (责任编辑 王绪迪)