

# 市域土地覆被对生态系统功能重要性的动态影响

王 蕾<sup>1,2\*</sup>, 徐梦婷<sup>1,2</sup>, 陈媛媛<sup>1,2</sup>, 张心语<sup>1,2</sup>, 姚允龙<sup>2,3</sup>

- (1. 东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040;  
2. 黑龙江省寒区园林植物种质资源开发与景观生态修复重点实验室, 哈尔滨 150040;  
3. 东北林业大学野生动物与自然保护地学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:**研究聚焦哈尔滨市快速城市化进程中土地覆被对生态系统服务功能的动态影响,整合 2000 - 2020 年多源遥感数据,构建涵盖水源涵养、水土保持、防风固沙及生物多样性保护的多维度评价体系,并基于随机森林模型,量化不同土地覆被类型在不同时期的生态贡献度及其随时间演变的边际效应。结果显示:(1)植被净初级生产力(NPP)年均增长 0.82%,到 2020 年达 5124.44 g/(m<sup>2</sup>·a),其中生态保护区的 NPP 显著高于农业用地和建成区;(2)生态系统服务功能整体提升 12.3%,水源涵养与生物多样性保护年均增幅分别达 1.5% 和 1.2%,水土保持功能趋于稳定;(3)林地贡献 50% 的生态服务功能,水源涵养与生物多样性保护作用突出,而耕地与建设用地的边际效应逐年递减,水源涵养功能年均衰减 0.7%。据此提出“林地核心+多类型协同”空间配置模式,通过强化生态廊道连通性与林地基线管控提升服务韧性,为哈尔滨生态安全格局优化提供科学依据。

**关键词:**土地覆被演变;生态系统服务功能;重要性评价;边际效应;哈尔滨市

**中图分类号:**TU984      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672-2736(2025)10-0046-12

## 0 引言

生态系统服务功能是维系区域生态安全与人类福祉的核心要素<sup>[1,2]</sup>,在全球城市化快速推进的背景下,土地覆被格局的剧烈转变对生态服务功能的稳定性产生深远影响<sup>[3,4]</sup>,尤其在寒地城市中,自然覆被的缩减加剧了生态压力<sup>[5,6]</sup>。近年来,这一影响受到广泛关注<sup>[7]</sup>,如何在城市化进程中维持和提升生态系统服务,已成为城市生态管理与政策制定的重要议题。

城市用地的多样性和复杂性导致土地覆被在时空尺度上变化剧烈<sup>[8,9]</sup>。城市扩张和农业发展不断挤压自然生态空间,林地、湿地等逐步被建筑、道路、农田取代<sup>[10,11]</sup>。这一趋势改变了生态系统结构并削弱其服务功能<sup>[12]</sup>,如水源涵养能力下降<sup>[13]</sup>、生态保护减弱<sup>[14]</sup>,甚至影响生

物多样性<sup>[15]</sup>和生态稳定性<sup>[16]</sup>。自然覆被减少降低了生态承载力,增加了保护成本。尽管已有相关性分析<sup>[17]</sup>、空间聚类分析<sup>[18]</sup>和耦合坐标模型<sup>[19]</sup>等方法用于量化土地覆被与生态功能的关系,但研究多集中于功能相关性,忽视了多重土地覆被变化的影响,限制了精细化管理的实施。如今,城市土地利用正从单一利益最大化转向经济、社会与生态协调发展<sup>[20]</sup>。因此,研究协同不同土地覆被类型以促进国土空间优化,改善区域生态多功能性,尤为重要<sup>[21]</sup>。

尽管生态系统服务研究不断推进,但大多聚焦特定区域<sup>[22]</sup>或单一生态服务<sup>[23]</sup>,缺乏对不同土地覆被类型的综合评估。例如,区域研究往往强调局部生态特征,忽视整体层面的综合分析。在复杂生态系统中,量化不同土地覆被类型对生态服务的影响仍是一个挑战,需要进一步研究。

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2024YFD2200900);国家自然科学基金面上项目(42171246);黑龙江省公园城市发展战略研究(ZKKF2022181)。

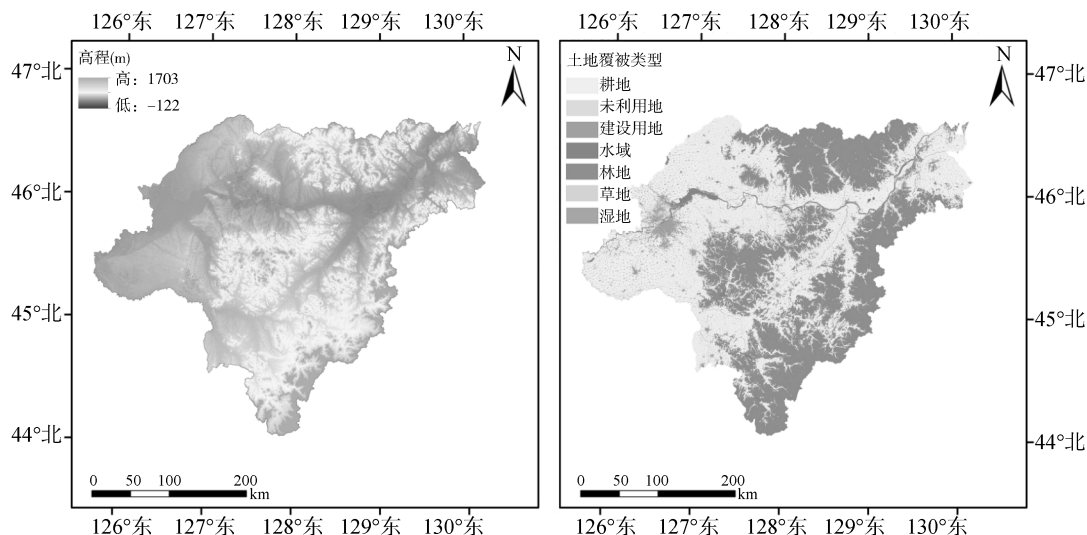


图1 哈尔滨市土地覆被类型空间分布

此外,现有研究多关注短期变化,缺乏对长期动态的分析<sup>[24-26]</sup>,难以准确揭示生态服务的演变,尤其在人类干预频繁的环境下更为突出。因此,在亟需构建完善的定量模型与深入研究长期城市化背景下,不同土地覆被类型对生态服务的多维影响,探索生态功能与城市发展的平衡,仍是未来研究的核心挑战。

综上,研究构建了生态系统服务功能评价模型,定量分析哈尔滨市不同土地覆被类型对生态系统服务功能重要性的贡献。结合多年数据,分析土地覆被的时空变化,探讨快速城市化对生态文明建设的影 响,特别是对自然生态的侵占及生态服务稳定性的影响。研究结果为哈尔滨及东北地区制定科学的用地规划和生态管理策略提供依据,助力城市规划与生态系统服务的协调发展。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

哈尔滨市位于东北平原黑龙江省西南部,平均海拔 127.95m,总面积 5.31 万 km<sup>2</sup>,是中国省会城市中面积最大的城市。哈尔滨市属于中温带大陆性季风气候,年均气温为 4.2℃,年降水量为 524.5mm。该地区冬季漫长,夏季较短,温差较大。土地覆被类型由西北向东南呈现耕地

与林地过渡分布,耕地占 52.09% (图 1)。过去,城市化导致农田开垦、森林砍伐、湿地破坏,引发水源涵养下降、热岛效应加剧等生态问题<sup>[27]</sup>。哈尔滨市作为黑龙江省的省会城市,是寒地城市的代表,城市化和农业发展的速度较快,导致土地覆被类型发生了显著的变化<sup>[28]</sup>,但对其生态效应的研究仍然不足,相关数据的积累和分析亟待加强。近年来,湿地恢复、退耕还林等措施改善了生态环境,林地和湿地功能逐步恢复<sup>[29]</sup>。因此,深入研究土地覆被类型变化对生态系统服务的影响,将为该区域的生态保护和可持续发展提供科学依据,帮助在城市化加剧的背景下有效维护生态功能。

### 1.2 材料

哈尔滨市行政边界数据来源于中国资源与环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。2000-2020 年土地覆被类型动态数据(空间分辨率 30m)来自中国 30m 年土地覆被数据集及其动态(<https://zenodo.org/>)。植被净初级生产力(NPP)数据集使用 NASA MOD17A3 v6 版本(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>),时间分辨率为年,用于生态系统服务功能评价。数字高程数据来自 ASTER GDEM 30M 分辨率产品(<https://www.gscloud.cn/>)。气象数据选自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

www.resdc.cn/) 的全国地面气象站观测数据集, 涵盖 2000 - 2020 年气温、降水、相对湿度及风速等逐月记录。土壤属性数据通过资源环境数据云平台 (https://www.resdc.cn/) 获得, 包括 HWSDv1.2 土壤数据库中的机械组成、有机质含量等理化性质指标, 支持土壤侵蚀模数和持水能力计算。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 生态系统服务功能重要性评价

##### (1) 指标计算

基于《生态保护红线划定技术指南》, 整合遥感、气象、地形等多源数据, 构建水源涵养 ( $W_R$ )、水土保持 ( $S_{pro}$ )、防风固沙 ( $S_{WS}$ ) 及生物多样性 ( $S_{bio}$ ) 四维评价指标 (公式 1-4), 并通过层次分析法确定权重, 最终计算综合重要性指数 ( $E_S$ )。数据归一化后, 采用自然断点法将结果划分为 4 个等级, 避免主观阈值设定偏差。

水源涵养功能重要性评价, 计算公式如下

$$W_R = N_{ppmean} \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo}) \quad (1)$$

式中:  $W_R$  为生态系统水源涵养服务能力指数;  $N_{ppmean}$  为区域多年生态系统净初级生产力平均值;  $F_{slo}$  为评价区域坡度;  $F_{pre}$  为常年降水量;  $F_{sic}$  为土壤渗流能力因子。

水土保持功能重要性评价, 计算公式如下

$$S_{pro} = N_{ppmean} \times (1 - K) \times (1 - F_{slo}) \quad (2)$$

式中:  $S_{pro}$  为水土保持服务能力指数;  $K$  为土壤可蚀性因子;  $F_{slo}$  为评价区域坡度。

防风固沙功能重要性评价, 计算公式如下

$$S_{WS} = (1 - N_{ppmean}) \times (1 - K) \times F_q \times (1 - D) \quad (3)$$

式中:  $S_{WS}$  为防风固沙服务能力指数;  $F_q$  为多年平均气候侵蚀力;  $D$  为地表粗糙度因子。

生物多样性保护功能重要性评价, 计算公式如下

$$S_{bio} = N_{ppmean} \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt}) \quad (4)$$

式中:  $S_{bio}$  为生物多样性保护服务能力指数;  $F_{pre}$  为常年降水量;  $F_{tem}$  为常年平均气温;  $F_{alt}$  为海拔。

##### (2) 模型构建

生态系统服务功能重要性评价模型的构建基于水源涵养、水土保持、防风固沙和生物多样性保护等功能的重要性指标, 从而形成了综合评价模型。

$$E_S = \omega_1 \cdot W_R + \omega_2 \cdot S_{pro} + \omega_3 \cdot S_{WS} + \omega_4 \cdot S_{bio} \quad (5)$$

式中:  $E_S$  为生态系统功能重要性指数;  $\omega$  为权重, 利用层次分析法确定,  $\omega_1 = 0.3447$ ,  $\omega_2 = 0.2495$ ,  $\omega_3 = 0.1573$ ,  $\omega_4 = 0.2485$ 。由于各评价指标的量纲不一致, 因此本研究将各指标归一化处理到 0 ~ 1 区间再计算  $E_S$ 。

##### (3) 等级划分

本研究使用自然断点分类法, 依据生态系统服务功能的重要性数据自动识别断点, 将其划分为一般重要、中等重要、重要和极重要四个等级。该方法避免了人为设定阈值的主观性, 使分类更科学合理, 准确反映生态系统服务功能的自然分布特征, 为生态保护与管理提供依据。

#### 1.3.2 贡献度分析

本研究利用 R(4.4.1) 中的 randomForest 包计算特征贡献度, ggplot2 包生成图表。构建随机森林模型, 量化土地覆被类型对生态服务功能的贡献度, 并通过边际效应分析揭示其动态变化特征。该方法避免直接计算变量相关性, 而是量化特征贡献度及边际效应, 揭示用地变化对生态系统服务功能的重要性。

## 2 结果与分析

### 2.1 土地覆被类型与 NPP 变化特征

#### 2.1.1 土地覆被类型变化特征

通过分析哈尔滨市土地覆盖变化数据, 将二十年分为四个五年阶段, 得出整体变化趋势。耕地和林地占据了研究面积的 90% 以上。在过去二十年里, 哈尔滨土地覆被变化分为四个阶段 (图 2): 第一阶段, 建设用地增加 202km<sup>2</sup>, 主要通过耕地和林地减少实现, 耕地转为建设用地 360km<sup>2</sup>, 推动城市化扩张。耕地与林地的相互转换频繁, 耕地转为林地 752km<sup>2</sup>, 林地转为耕地

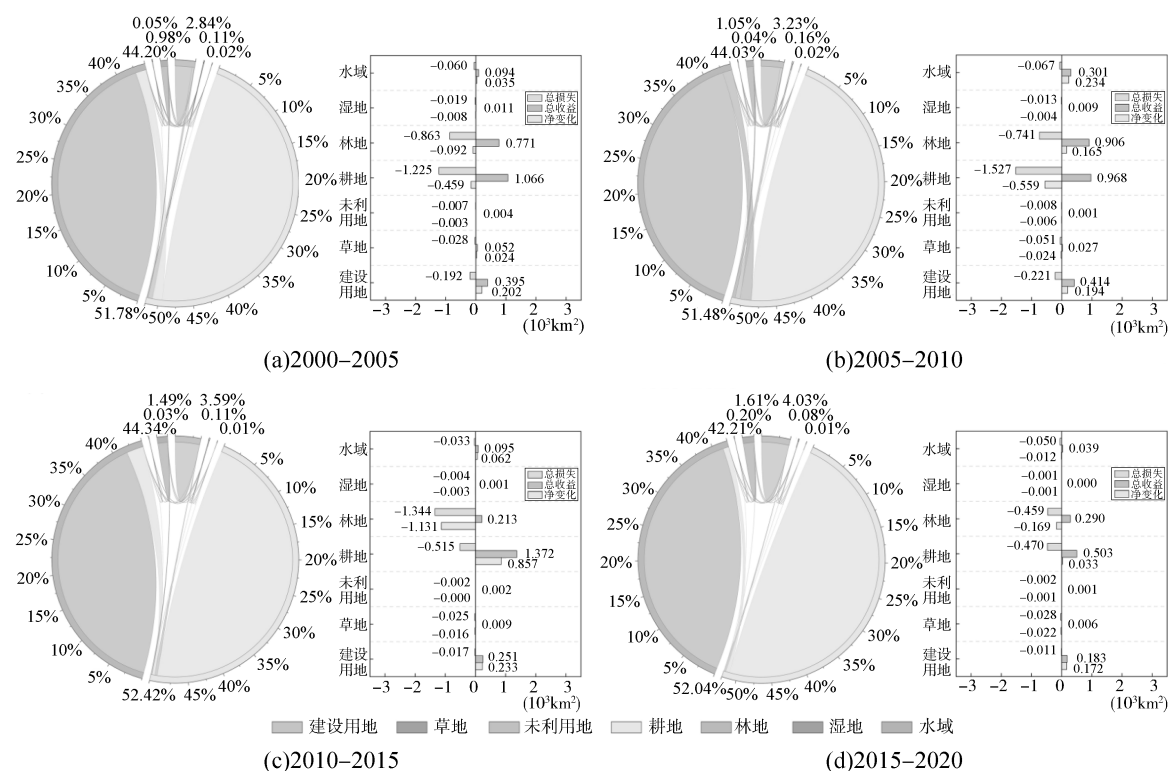


图2 2000 - 2020 年土地覆被类型转移面积比例图及面积总损失, 总收益及净变化数量

表 1 2000 至 2020 年土地覆被类型面积变化矩阵 (km<sup>2</sup>)

2000	2020							
	建设用地	草地	未利用地	耕地	林地	湿地	水域	总计
建设用地	1462.080	0.004	0.294	3.361	0.044	0	43.387	1509.170
草地	15.359	7.985	0.490	31.084	2.683	0.004	2.196	59.800
未利用地	4.919	0.122	0.598	3.282	0.105	0	4.186	13.213
耕地	770.927	12.048	0.869	25618.316	730.670	0.007	328.405	27461.243
林地	26.741	2.399	0.013	1927.280	21477.503	0	10.622	23444.557
湿地	0.039	0.021	0.001	14.614	1.783	11.791	0.621	28.868
水域	30.394	0.042	0.937	35.447	4.216	0	452.251	523.288
总计	2310.459	22.621	3.203	27633.384	22217.004	11.802	841.667	53040.140

842km<sup>2</sup>。第二阶段,建设用地、水域和林地分别增加 194km<sup>2</sup>、234km<sup>2</sup>、165km<sup>2</sup>,耕地减少 559km<sup>2</sup>。第三阶段,林地减少 1131km<sup>2</sup>,耕地、建设用地和水域分别增加 857km<sup>2</sup>、233km<sup>2</sup>、62km<sup>2</sup>。第四阶段,城市化放缓,林地转为耕地和建设用地分别为 451km<sup>2</sup>和 8km<sup>2</sup>,耕地转为林地和建设用地分别为 288km<sup>2</sup>和 150km<sup>2</sup>,显示城市化强度下降。

基于 2000 年与 2020 年土地覆被类型面积数据,本研究构建了土地覆被类型变化矩阵(表 1),对比分析了两年间土地覆被类型的面积变化,从而揭示了其变化趋势。这一方法反映了土地覆被的动态变化,并为城市规划提供了依据。结果显示,2000 至 2020 年间,哈尔滨经历了显著的土地覆被变化,尤其是农业、森林与城市化进程的互动。尽管耕地面积大幅减少,但由于林

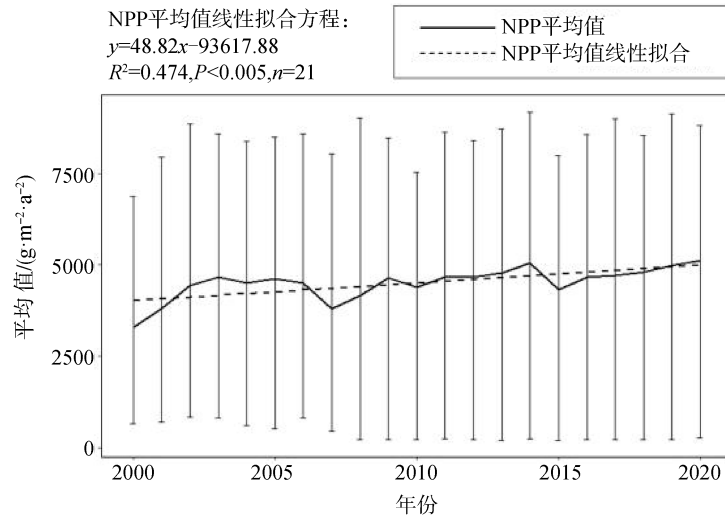


图 3 2000 - 2020 年哈尔滨年 NPP 时间变化

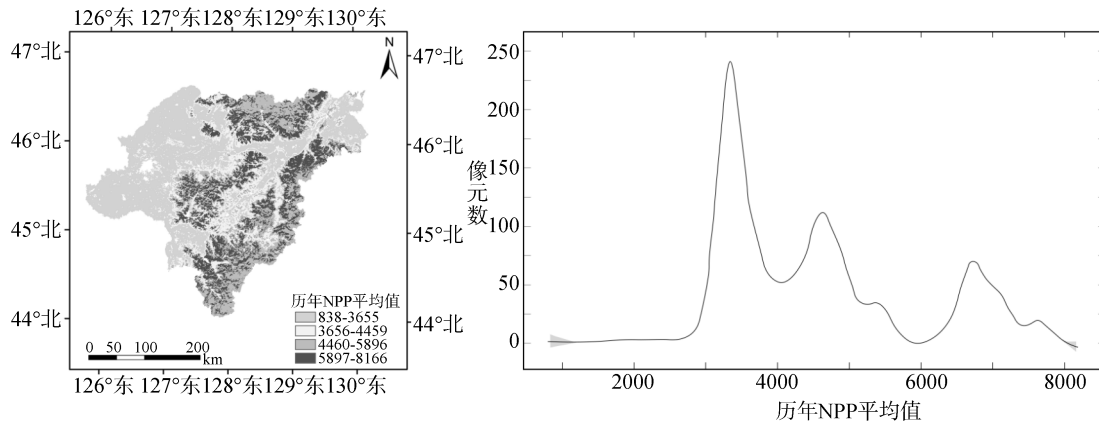


图 4 2000 - 2020 年历年 NPP 平均值的空间分布示意图及频数分布

地转化,耕地面积最终增加 172 km<sup>2</sup>,反映了城市扩张对农田的影响。森林覆盖显著减少 1228km<sup>2</sup>,变化与城市用地增加及耕地转化相关,显示经济发展对林地的压力。建设用地在 20 年内增加约 801km<sup>2</sup>,集中于城市扩展边缘,水域面积增加 318km<sup>2</sup>,表明水域生态有所保护。湿地、草地和未利用地的变化较小,可能与自然恢复和土地覆被模式稳定相关。总体而言,哈尔滨的土地覆被变化反映了城市化进程,并强调了在追求经济增长的同时保护生态环境的必要性。

### 2.1.2 NPP 变化特征

通过线性拟合分析 2000 至 2020 年哈尔滨市年均植被净初级生产力(NPP)变化,结果表明 NPP 呈现缓慢增长的趋势(图 3)。20 年间 NPP 的平均值为  $4507.41 \pm 1395.34g/(m^2 \cdot a)$ ,2020

年达到  $5124.44g/(m^2 \cdot a)$  的最高值。年均增长率为  $48.82g/(m^2 \cdot a)$ ,特别是在两次低谷后,自 2016 年起,NPP 以  $119.67g/(m^2 \cdot a)$  的速度稳步上升,线性拟合方程为  $y = 119.6731x - 236641.42, R^2 = 0.9583, P = 0.003664$ 。2015 年黑龙江省提出的加快生态文明建设政策促进了哈尔滨市自 2016 年以来生态环境的显著改善。

本文采用频数分布法对 2000 - 2020 年哈尔滨市 NPP 平均值进行统计分析,并进行平滑处理(图 4)。平滑曲线显示,NPP 呈三峰分布,峰值为  $3336g/(m^2 \cdot a)$ 。从 NPP 空间分布图可见, $838 \sim 3655g/(m^2 \cdot a)$  的区域占 38.65%,主要分布在西部和部分东部,属于农业或城市化区域,生态破坏,植被退化,导致 NPP 较低。相反, $4460 \sim 5896g/(m^2 \cdot a)$  的区域占 24.77%,集

中在

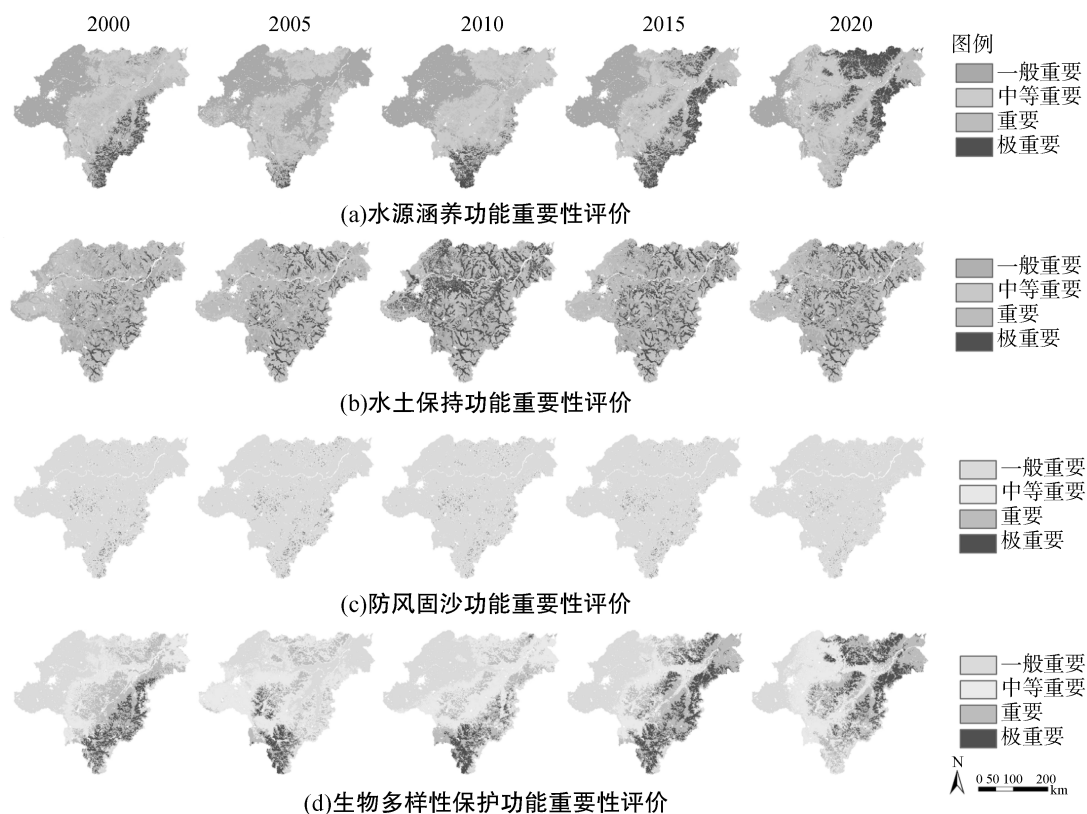


图5 单项服务功能指标重要性时空变化图

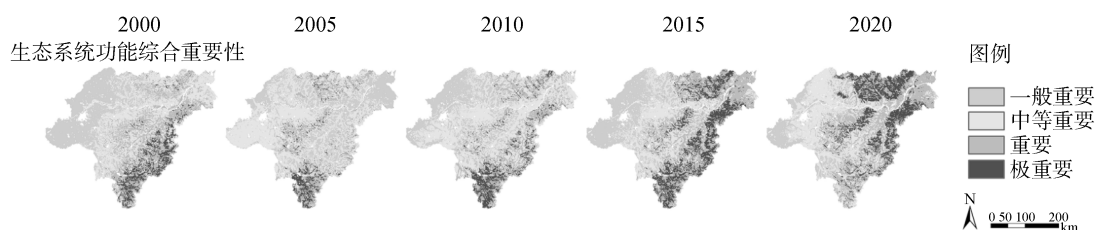


图6 生态系统功能综合重要性时空变化图

北部和东南部,主要是国家森林公园和风景区,植被良好,生态稳定,NPP 较高。

## 2.2 哈尔滨生态系统服务功能重要性

### 2.2.1 单项服务功能指标重要性

根据生态系统服务功能重要性评价模型,采用自然断点法对各服务功能指标进行分类,并分析时空变化特征(图5)。研究表明,水源涵养和生物多样性保护功能的重要性持续提升,水土保持功能在快速改善后趋于稳定,而防风固沙功能变化较小。具体而言,2000年水源涵养功能主要集中在“一般重要”和“中等重要”级别,

分别占31.67%和38.10%;到2020年,“极重要”区域的面积显著增加至17.52%,主要分布在东北部。生物多样性保护功能的变化趋势与水源涵养功能相似,2000年以“一般重要”和“中等重要”级别为主,而2020年则更多集中在“中等重要”和“重要”级别,分别占40.16%和33.38%。水土保持功能在2000年以“一般重要”级别为主,2005至2020年以“重要”级别为主,占38.46%。防风固沙功能的重要性变化较小,始终维持在“一般重要”级别,占比分别为84.87%和86.88%。

### 2.2.2 生态系统功能综合重要性

在生态系统功能综合重要性分析中,基于历年单项服务功能评价结果,利用模型对哈尔滨市生态系统功能进行整体评估(图 6)。结果显示,“极重要”区域占比最小,但由 2000 年的 6.83% 增至 2020 年的 15.43%,主要集中在东北部,可能受生态保护措施影响。2000 至 2020 年,“中等重要”区域占比最高,分别为 36.47%、47.01%、46.46% 和 39.11%,主要分布在主城区西部及松花江流域,2015 年降至 29.45%,而“重要”区域上升至 31.32%,反映出生态环境改善。2020 年,“重要”区域占 32.98%,主要位于中东部。“一般重要”区域占比从 2000 年的 33.53% 降至 2020 年的 12.47%,表明整体环境显著改善,但城市化仍对生态系统产生影响。

### 2.3 土地覆被类型对生态系统服务功能重要性的动态影响

基于随机森林模型对土地覆被变化与生态系统服务功能贡献度的动态分析(图 7)。结果表明,2000 年至 2020 年间,不同土地覆被类型

覆被类型。因此,本文重点分析了这些类型在 2000 年和 2020 年的边际效应变化(图 8),揭示了不同土地覆被类型对生态系统服务功能的动态影响。尽管整体趋势保持一致,不同土地覆被类型的影响仍然表现出显著的时空差异。具体而言,林地的边际效应持续上升,尤其在水源涵养和生物多样性保护方面,林地扩张有效提升了这些生态功能的服务能力。耕地在 2000 年时的边际效应有所上升,特别是在水土保持和防风固沙功能上,但到 2020 年,耕地的边际效应显著减弱,特别是在生物多样性保护方面,农业扩张和单一作物种植导致生态多样性下降,负面影响明显。建设用地对大多数生态功能的边际效应持续下降,尤其在水源涵养和生物多样性保护方面,但在防风固沙功能上则有所回升,并趋于平稳。水域的边际效应与建设用地相似,除防风固沙外,其他生态功能的边际效应均呈下降趋势。整体而言,林地扩张促进了生态系统服务功能的

对生态系统服务功能的重要性在时序上呈现出明显差异。林地在两期均对生态系统服务贡献最大,接近 50%,特别是在水源涵养与生物多样性保护方面始终发挥核心作用。但从动态趋势来看,林地在水源涵养和生物多样性保护中的相对贡献略有下降,而在防风固沙和水土保持方面则呈上升态势,反映出林地生态功能的结构性调整。耕地和建设用地的贡献分别约为 30% 和 10%,前者因其广泛分布,在早期具有较高贡献,但在近年水土保持和防风固沙功能中的边际效应趋于减弱;后者随着城市化进程推进,生态贡献度显著上升,尤其在生物多样性保护功能上表现出一定替代性。水域、湿地、草地和未利用地的贡献度总体稳定,约为 10%,生态影响较小。整体而言,生态服务功能受土地覆被结构演变的驱动不断调整,强调了在城市化背景下加强林地保护、科学控制建设用地与耕地扩张的重要性,以提升生态系统服务的综合韧性与可持续性。

研究结果显示,林地、耕地、建设用地和水域对生态系统服务功能的贡献明显高于其他土地

提升,耕地波动反映出农业管理的挑战,而建设用地和水域的扩展可能对生态系统造成负面影响,亟需加以谨慎管控。

## 3 讨论

本研究系统分析了 2000 - 2020 年哈尔滨市生态系统服务功能的重要性变化及其对不同土地覆被类型的响应差异,揭示了区域生态系统的复杂性与动态演变特征。研究结果验证了土地覆被变化是生态系统服务功能演变的关键驱动因素<sup>[30]</sup>,同时发现哈尔滨市生态系统服务在时空尺度上呈现显著差异,尤其在水源涵养和生物多样性保护等关键生态功能方面。此外,哈尔滨年均 NPP 在经历两次低谷后,自 2016 年起呈现稳步上升趋势;同期,生态系统服务功能重要性的时空分布格局也于 2015 年出现明显改善。2015 年前后的波动变化,与黑龙江省当年提出加快推进生态文明建设的政策密切相关,该政策

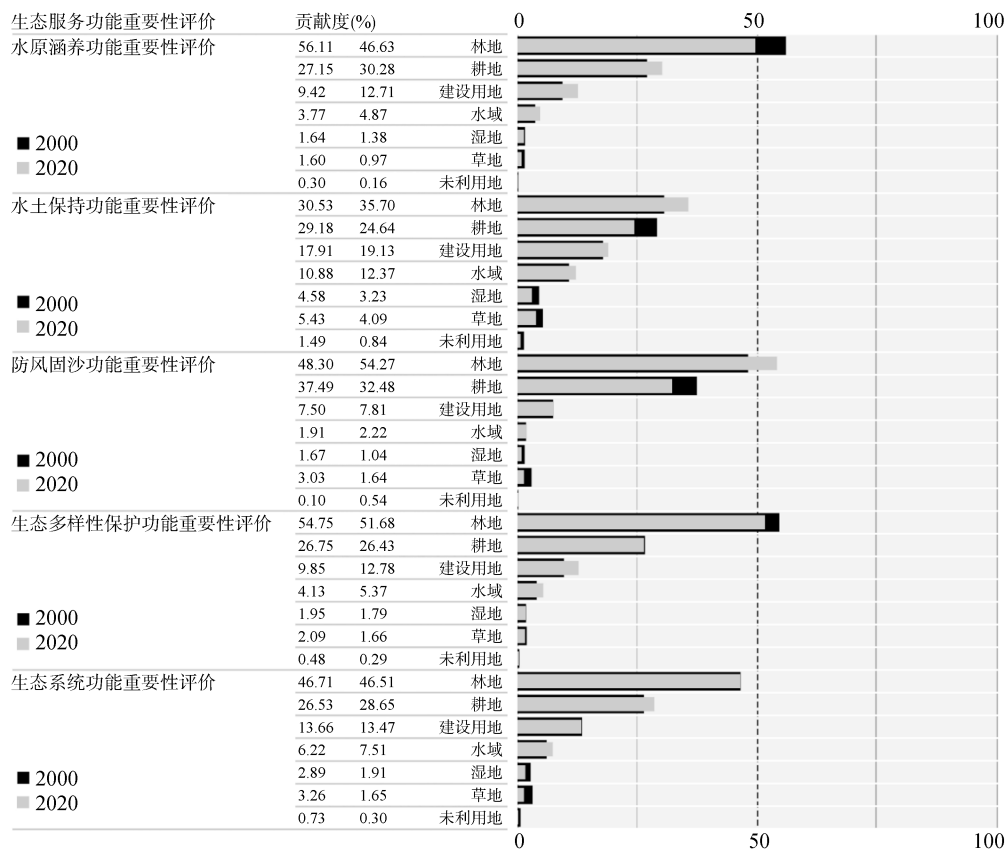


图7 2000 - 2020年土地覆被类型对生态系统服务功能重要性的相对贡献度

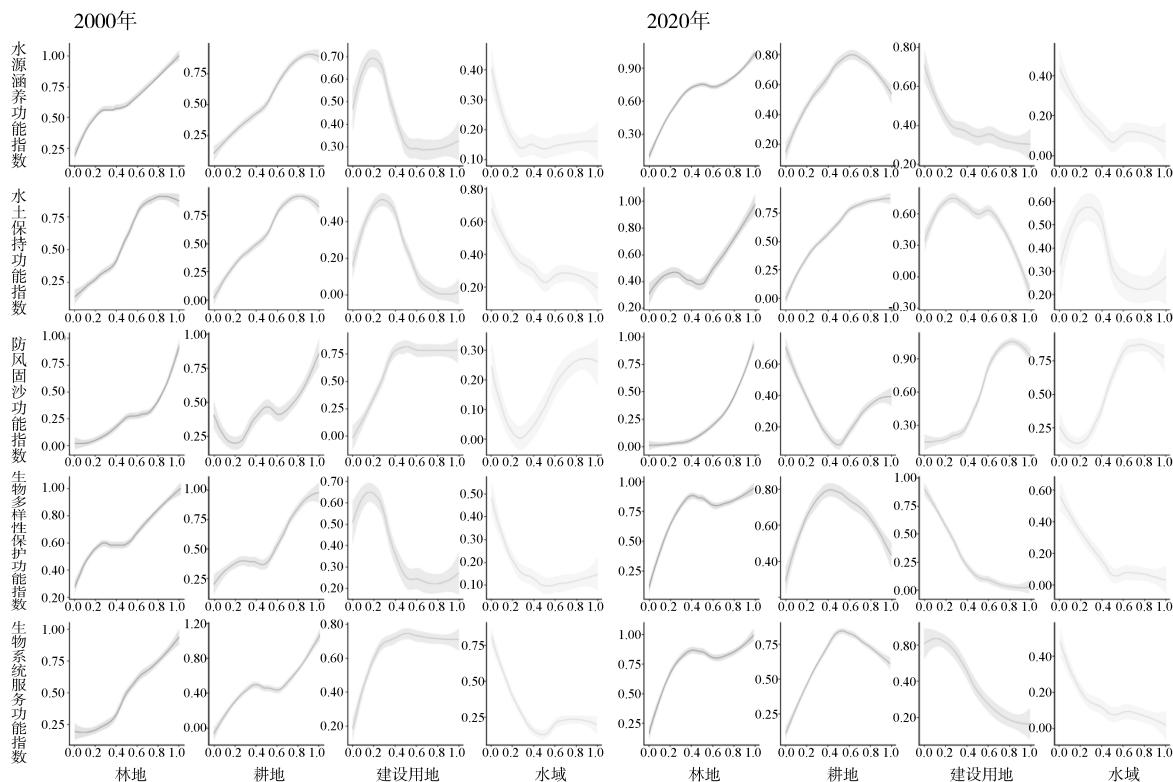


图8 2000 - 2020年土地覆被类型对生态系统服务功能重要性贡献度边际效应

的实施有效推动了哈尔滨市自2016年以来生态环境的显著提升。

水源涵养功能在东北部地区的“极重要”区域比例显著提升,这一变化可能与土地覆被类型的调整和水文气候条件的共同作用密切相关,尤其是林地面积的变化和生态管理措施的实施对这一提升具有重要影响。其次,水土保持功能在整个研究期间表现出相对稳定,尽管个别年份间略有波动,但总体趋势保持不变,反映出其在生态系统中的持久性和韧性。这种稳定性表明,水土保持功能能够有效应对外部环境的变化,成为维系生态系统稳定性的关键。此外,尽管防风固沙功能的重要性在不同年份间有轻微波动,但整体变化幅度较小,显示该功能受外界环境和气候条件的影响较为有限。生物多样性保护功能在西北部地区的“极重要”区域逐渐扩展,反映出过去 20 年中生物多样性保护取得了显著进展。上述研究结果为未来的生态管理和规划提供了宝贵的参考依据。

在不同土地覆被类型的分析中,林地作为哈尔滨市提供生态系统服务的主要贡献者,在水源涵养、防风固沙和生物多样性保护等方面,具有不可替代的关键作用。林地覆盖率的变化直接影响这些服务功能的稳定性,尤其是林地覆盖区域的迁移对服务功能的影响尤为显著。随着土地覆被类型转换的波动,林地所提供的生态系统服务功能也随之变化,这提示未来的生态规划应更加关注森林的保护与管理,优化林地管理措施,以增强其对生态风险的应对能力。

耕地作为另一主要土地覆被类型,尽管其面积变化相对有限,但其在生态系统服务功能中的贡献仍不容忽视,尤其在防风固沙功能方面表现突出。随着城市化进程的加快,建设用地的扩展显著削弱了水源涵养和生物多样性保护功能,城市化对当地生态系统的负面影响逐渐显现。但由于建设用地的硬质铺装特性,其在水土保持功能上仍有一定的贡献。因此,未来的城市规划需要更加关注生态系统的承载能力,探索与自然环境的平衡发展路径。

除林地和耕地外,湿地、草地和水域等土地覆被类型虽面积较小,但在特定生态功能中发挥

关键作用,尤其在水源涵养和水土保持方面,表现尤为突出。随着城市化的扩张,这些生态系统对局部土地覆被变化表现出较高敏感性。快速的城市扩张可能导致湿地和草地的生态服务功能出现波动,尤其在生态环境较为脆弱的山区,这一现象尤为显著。因此,未来的生态规划应加强对这些生态系统的保护与管理,以提高其服务功能的稳定性和适应性。

总体来看,研究结果强调了过去 20 年间哈尔滨市生态系统服务功能的显著变化,并突显了不同土地覆被类型在生态服务功能贡献上的差异。早期快速的城市化进程加剧了生态系统服务功能重要性的重要性下降,然而,近年来实施的生态治理措施有效改善了环境退化问题。在分析 2000 年与 2020 年土地覆被类型对生态系统服务功能重要性动态影响的过程中,研究发现“林地”在各类生态系统服务功能中的相对贡献度始终位居首位。边际效应分析进一步表明,林地对生态系统服务功能的重要性贡献呈持续上升趋势。尽管如此,其他土地覆被类型在部分生态系统服务功能中亦展现出一定的积极作用。因此,本研究提出构建“林地核心 + 多类型协同”的土地覆被空间配置模式,旨在通过强化林地基线保护与提升生态廊道连通性,增强生态系统服务的整体韧性。该模式为优化哈尔滨市生态安全格局提供了理论支撑与实践路径,有助于更有效地制定相关政策,推动区域生态系统的健康与可持续发展。

#### 4 结论

本研究系统分析了 2000 至 2020 年哈尔滨市生态系统服务功能重要性的时空变化及其与土地覆被演变之间的动态协同关系,揭示了不同土地覆被类型在不同时期对生态系统服务功能重要性的差异性与阶段性影响。结果强调,城市化进程推动了土地覆被格局快速演变,进而驱动生态系统服务功能重要性时空分布的动态调整。科学合理的城市空间规划应在保护生态基底的同时,动态优化土地覆被结构,实现生态功能与

城市发展的协调共赢。主要结论如下:

(1) 哈尔滨市土地覆被在 2000 至 2020 年间发生显著动态变化,城市化驱动下建设用地快速扩张,伴随耕地与林地频繁转化,呈现出明显的空间梯度特征。尽管城市扩展加剧了生态系统服务压力,但自 2016 年起,在生态政策推动下,区域 NPP 显著上升,生态系统初级生产力恢复趋势明显。空间分布上,生态良好区域 NPP 值持续较高,城市化强度大的区域则 NPP 偏低,凸显了土地覆被类型变化对生态功能演变的长期影响。未来应平衡经济与生态保护,优化土地覆被结构,提升生态功能。

(2) 生态系统服务功能的重要性在动态演变中整体增强。20 年间,水源涵养和生物多样性保护功能稳步提升,水土保持功能趋于稳定,防风固沙功能变化相对平缓。特别是在城市边缘与东北部生态屏障区域,生态功能的重要性显著增强。这种提升不仅反映了自然系统的自我修复能力,也与阶段性土地覆被结构优化密切相关。主城区及周边则仍面临生态功能退化风险,动态过程凸显了生态保护应聚焦关键节点区域和功能薄弱带,应进一步加强生态保护与管理,优化土地利用结构,从而提升生态服务功能和区域可持续发展能力。

(3) 不同土地覆被类型对生态系统服务功能的重要性具有动态贡献差异。林地始终是生态系统服务功能的核心贡献类型,尤其在水源涵养和生物多样性保护方面表现最为突出,且其边际效应在近年持续增强。与此同时,随着城市发展阶段的演进,耕地与林地之间的转化也表现出对不同生态功能的替代性与互补性。建设用地扩张持续对生态功能产生负面冲击,主要体现在生物多样性与水源涵养能力下降方面。因此,本研究提出构建“林地核心 + 多类型协同”的土地覆被空间优化模式,通过动态管理林地扩展与生态廊道连通性,增强区域生态系统服务的韧性和适应力。

参考文献 (References):

- [1] Benayas J M R, Newton A C, Diaz A, et al. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis [J]. *Science*, 2009, 325(5944): 1121 - 1124. doi: 10.1126/science.1172460.
- [2] Bergstrom D M, Wienecke B C, Van Den Hoff J, et al. Combating ecosystem collapse from the tropics to the antarctic [J]. *Global Change Biology*, 2021, 27(09): 1692 - 1703.
- [3] 惠乐, 王浩, 刘嘉敏, 等. 基于生态系统服务的关中平原生态安全格局构建 [J]. *自然资源遥感*, 2025, 37(02): 194 - 203.
- [4] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 城市化与生态系统服务的空间交互关系研究——以长株潭城市群为例 [J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7502 - 7513.
- [5] Guo X, Zhang Y, Guo D, et al. How does ecological protection redline policy affect regional land use and ecosystem services? [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 100: 107062.
- [6] Pham K T, Lin T H. Effects of urbanisation on ecosystem service values: A case study of nha trang, vietnam. [J]. *Land Use Policy*, 2023, 128: 106599.
- [7] Qian Y, Dong Z, Yan Y, et al. Ecological risk assessment models for simulating impacts of land use and landscape pattern on ecosystem services [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 833: 155218.
- [8] Yao Y, Jiang Y, Sun Z, et al. Applicability and sensitivity analysis of vector cellular automata model for land cover change [J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2024, 109: 102090.
- [9] Zhang J, Qu M, Wang C, et al. Quantifying landscape pattern and ecosystem service value changes: A case study at the county level in the Chinese loess plateau [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01110.
- [10] 何丹, 周璟, 蔡建明, 等. 中国高铁沿线区域土地利用景观格局变化分析 [J]. *生态科学*, 2021, 40(04): 184 - 194.
- [11] 杜雨潇, 闫佳博, 卜元坤, 等. 陕北黄土高原林草景观破碎化时空演变特征分析 [J]. *西北林学院学报*, 2022, 37(03): 155 - 161 + 198.
- [12] Deng G, Jiang H, Zhu S, et al. Projecting the response of ecological risk to land use/land cover change

- in ecologically fragile regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 914: 169908.
- [13] 王锐婕, 王伦澈, 曹茜, 等. 长江流域生态系统健康时空变化及驱动因素分析[J/OL]. *长江流域资源与环境*, 2005, 34(06): 1251 – 1265.
- [14] 孙杰, 徐梦佳, 刘冬, 等. 长江三角洲地区生态系统气候调节服务价值空间变化影响机制分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2024, 40(09): 1121 – 1133. 1673 – 4831. 2023. 1059.
- [15] 申宇, 程浩, 刘国华, 等. 基于生物多样性和生态系统服务的青藏高原保护优先区和保护空缺识别[J]. *生态学报*, 2024, 44(11): 4507 – 4516.
- [16] Zhao Y, He L, Bai W, et al. Prediction of ecological security patterns based on urban expansion: A case study of chengdu[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111467.
- [17] Pang R, Xu H, Zhang M, et al. Spatial correlation and impact mechanism analysis of cultivated land fragmentation and quality in the central plain of liaoning province, northeast China[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(15): 4623 – 4634.
- [18] 陶岸君, 赵鹏风, 杨文杰. 中国乡村聚落用地形态的地域分异特征研究[J]. *地理研究*, 2023, 42(05): 1267 – 1284.
- [19] Lei Y, Chen Y, Zhang L, et al. Examining the coupling relationship between industrial upgrading and eco – environmental system in resource – based cities in China [J]. *Frontiers in Public Health*, 2025, 13: 1527306.
- [20] Dong Y, Liu S, Pei X, et al. Spatially explicit multi – objective optimization tool for green infrastructure planning based on InVEST and NSGA – II towards multifunctionality [J]. *Land Use Policy*, 2025, 150: 107465.
- [21] Zhang J, Li S, Lin N, et al. Spatial identification and trade – off analysis of land use functions improve spatial zoning management in rapid urbanized areas, China[J]. *Land Use Policy*, 2022, 116: 106058.
- [22] Li X, Wu C. Sensitivity assessment and simulation of ecosystem services in response to land use change in arid regions: Empirical evidence from Xinjiang, China[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 171: 113150.
- [23] 刘俸汝, 赵俊三, 林伊琳, 等. 基于气候和土地利用变化的云南省水源涵养功能时空演变及驱动力分析[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(05): 212 – 224.
- [24] 陶德凯, 张子建. 江苏省国土空间绿色发展水平与生态系统服务耦合协同关系研究[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(02): 181 – 196.
- [25] 马超群, 弋志强, 员学锋, 等. 不同网格尺度下生态系统服务价值空间分异及影响因素分析——以秦岭西安段为例[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(01): 389 – 399.
- [26] 曹有莉, 万宇, 李文杰, 等. 长江上游航道整治工程对生态系统服务价值的影响[J]. *水运工程*, 2024, 49(09): 123 – 129 + 160.
- [27] Wu X, Zhang Y, Wang L. Coupling relationship between regional urban development and eco – environment: Inspiration from the old industrial base in Northeast China [J]. *Ecological Indicators*, 2022, 142: 109259.
- [28] Li M, Zang S, Wu C, et al. Spatial and temporal variation of the urban impervious surface and its driving forces in the central city of harbin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, 28(3): 323 – 336.
- [29] Song S, Gong Y, Yu Y. Integrating pattern, process, and function in urban landscape ecological network planning: A case study of Harbin central city[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 159: 111671.
- [30] 赖帆, 杨广平, 赵樊. 土地利用覆盖变化对生态系统影响的综合评价与优化策略[J]. *测绘通报*, 2025, 30(02): 150 – 155 + 162.

---

#### 作者简介:

第一作者/通讯作者: 王蕾, 1983 年生, 哈尔滨人, 博士, 东北林业大学, 教授, 主要研究方向为风景园林。Email: wanglei@nefu.edu.cn

---

## Dynamic Impact of Regional Land Cover on the Importance of Ecosystem Functions

WANG Lei\* ,XU Mengting ,CHEN Yuanyuan ,ZHANG Xinyu ,YAO Yunlong

(1. College of Landscape Architecture ,Northeast Forestry University ,Harbin 150040 ,China ;

2. Key Laboratory of Gemplasm Resources Development and Landscape Ecological Restoration of Garden Plants in Cold Regions of Heilongjiang Province ,Harbin 150040 ,China ;

3. College of Wildlife and Protected Area ,Northeast Forestry University ,Harbin 150040 ,China )

**Abstract:** This study focuses on the dynamic impacts of land cover change on ecosystem service functions during the rapid urbanization of Harbin. By integrating multi - source remote sensing data from 2000 to 2020 , a multidimensional evaluation system was established , encompassing water conservation , soil retention , windbreak and sand fixation , and biodiversity protection. Furthermore , a random forest model was employed to quantify the ecological contribution of different land cover types over time and to capture the temporal evolution of their marginal effects. The results of the study showed that : ( 1 ) the net primary productivity ( NPP ) of vegetation in Harbin City increased by 0. 82% per year during the study period , reaching 5124. 44 g / ( m<sup>2</sup> · a ) by 2020 , and the NPP value of ecological reserves was obviously higher than that of agricultural land and construction land ; ( 2 ) the ecosystem service function has been enhanced by 12. 3% and the water conservation and biodiversity protection functions have increased by 1. 5% and 1. 2% per year respectively , while the soil and water conservation function has stabilized. ( 3 ) forest land plays a key role in ecosystem services with a contribution of 50% , especially in water conservation and biodiversity protection. In contrast , the ecological marginal effect of cropland and construction land continues to diminish , and the decay rate of water conservation function reaches 0. 7% per year. Therefore this paper proposes to construct a spatial allocation model of land cover with “ woodland core + multi - type synergy ” to further strengthen the baseline protection of woodland , enhance the connectivity of ecological corridors , which provides theoretical support for the ecological security pattern of Harbin

**Key words:** land cover evolution ; ecosystem service function ; importance evaluation ; marginal effect ; Harbin