

基于 GeoSOS-FLUS 平台的东北森林屏障带生态格局优化

齐麟^{1,2} 许东⁴ 朱琪^{2,3} 周旺明² 周莉² 王庆伟² 邓娇娇² 于大炮^{2*}

(¹沈阳大学生物入侵研究中心, 沈阳 110044; ²中国科学院沈阳应用生态研究所, 中国科学院森林生态与管理重点实验室, 沈阳 110016; ³中国科学院大学, 北京 100049; ⁴沈阳师范大学旅游管理学院, 沈阳 110034)

摘要 东北森林带作为我国两屏三带生态安全战略格局的重要载体之一, 其生态格局的优化对提升区域生态系统功能、质量及稳定性具有重要意义。本研究通过分析该区土地利用和生态系统服务时空格局, 明确其主要驱动因子, 以提升其主导生态功能为目标, 并耦合生态服务演变驱动机制, 利用元胞自动机模型对其土地利用格局进行了优化模拟。结果显示: 不同类型驱动因子对各生态系统服务的作用存在明显差异: 生境质量与土地利用的相关性最高 ($R = -0.420$, $P < 0.05$), 水源供给则受到年降水量的显著影响 ($R = 0.602$, $P < 0.05$), 土壤保持受到高程的显著影响 ($R = 0.358$, $P < 0.05$), 水源涵养与降水密切相关 ($R = 0.760$, $P < 0.05$), 而粮食供给则受到高程 ($R = -0.418$, $P < 0.05$)、坡度 ($R = -0.225$, $P < 0.05$) 和温度 ($R = 0.306$, $P < 0.05$) 的共同影响。本研究还发现, 针阔混交林对水源涵养能力和生境质量服务重要性最高; 相对于旱地, 水田对粮食生产的重要性更高。结合上述结果进行的土地利用优化模拟结果显示, 虽然生态用地(包括林地、草地、湿地)、生产用地(水田、旱地)和生活用地(建设用地)的比例与优化前没有明显差异, 但长白山和小兴安岭地区的林地, 应从现有以落叶阔叶林为主转变为以针阔混交林为主, 以提高这两个地区的水源涵养和生境质量; 大兴安岭地区应将部分落叶阔叶林转化为湿地以提高该区的水源涵养功能。在控制耕地总量不发生明显变化的条件下, 提高小兴安岭和长白山地区与三江平原交汇区耕地中水田的比例, 可以提高粮食供给服务。由此可见, 本研究在不进一步激化生态用地和其他用地类型空间矛盾的基础上, 优化了研究区生态格局, 为促进东北森林带主导生态功能提升及屏障作用的充分发挥提供了科学依据。

关键词 生态系统服务; 东北森林带; 土地利用优化; 生态系统服务权衡与协同

Ecological pattern optimization of forest barrier belt in Northeast China based on GeoSOS-FLUS. QI Lin^{1,2}, XU Dong⁴, ZHU Qi^{2,3}, ZHOU Wang-ming², ZHOU Li², WANG Qing-wei², DENG Jiao-jiao², YU Da-pao^{2*} (¹Biological Invasion Research Center, Shenyang University, Shenyang 110044, China; ²Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; ³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ⁴School of Tourism and Hospitality Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China).

Abstract: Northeast forest belt is an important carrier of ecological security pattern of China. It is of great significance to optimize its ecological pattern for improving the ecosystem function and stability. In this study, we analyzed the spatial and temporal patterns of land use and ecosystem services, and identified the major driving factors. With the aim to improve the dominant ecological functions of the Northeast China forest belt, we coupled the driving mechanism of ecological services, and used a cellular automata model to optimize its land use pattern. The results showed

国家重点研发计划项目(2018YFC0507305)资助。

收稿日期: 2021-03-12 接受日期: 2021-08-22

* 通讯作者 E-mail: yudp2003@iae.ac.cn

that the effects of different driving factors on ecosystem services were significantly different. Habitat quality had the strongest correlation with land use ($R = -0.420, P < 0.05$). Water supply was significantly affected by annual precipitation ($R = 0.602, P < 0.05$). Soil conservation was significantly affected by elevation ($R = 0.358, P < 0.05$). Water conservation was closely related to precipitation ($R = 0.760, P < 0.05$), while food supply was affected by elevation ($R = -0.418, P < 0.05$), slope ($R = -0.225, P < 0.05$) and temperature ($R = 0.306, P < 0.05$). The coniferous and broadleaved mixed forests were the most important for water conservation and habitat quality. Paddy field was more important for food production than dry farmland. The results of land use optimization simulation showed that the proportion of ecological land (including forest, grassland, and wetland), productive land (paddy field and dry farmland) and living land (construction land) was not significantly different from that before optimization. However, forests in Changbai Mountain and Lesser Khingan should be changed from deciduous broadleaved forest to coniferous and broadleaved mixed forest to improve water conservation and habitat quality. The Greater Khingan region should transform part of the deciduous broadleaved forest into wetlands to improve water conservation in the area. Under the condition of controlling the total amount of cultivated land without obvious change, increasing the proportion of paddy field in the intersection area between Lesser Khingan and Changbai Mountain and Sanjiang Plain can improve food supply service. In conclusion, this study could help optimize the ecological pattern of the study area without further aggravating the spatial contradiction between ecological land and other land use types, which provides a scientific basis for promoting the dominant ecological function of Northeast China forest belt and giving full expression of its barrier function.

Key words: ecosystem services; Northeast China forest belt; land use optimization; ecosystem services tradeoff and synergy.

东北森林带作为我国“两屏三带”生态安全战略格局中重要载体,其主导功能对发挥该区域生态屏障作用,调节东北亚地区水循环与局地气候、维护国家生态安全和保障国家木材资源和粮食安全具有重要战略意义(孙滨峰等,2017;尹礼唱等,2019)。然而,东北森林带经受了长期高强度的森林采伐和农业开垦,导致其森林、湿地等原生生态系统退化,主导生态功能下降(傅伯杰等,2017)。因此,开展东北森林带生态格局优化研究,全面掌握近年来东北森林带生态格局演变规律及调控机制,合理化区域生态系统布局和管理,保持生态系统结构功能的完整性和多样性,提升区域生态系统功能质量及稳定性,对于区域乃至国家生态环境的保护和生态系统可持续管理具有重要意义(王晓峰等,2019)。

作为人类对土地利用方式和强度的反映,土地利用格局动态对生态系统格局和过程具有强烈影响(曾杰等,2014)。对土地资源优化配置已成为缓解生态保护与经济发展之间冲突、优化资源分配的有效措施(刘耀林等,2019)。一些学者利用传统的线性规划(包蕊等,2018;贾宁凤等,2019)、多准则决策(罗紫薇等,2020)以及逻辑回归(金浩然等,2016)等模型对土地利用进行优化,但这些模型更

多的关注不同地类空间数量结构上的优化,计算速度和精度无法满足要求,且对用地类型的空间格局、生态功能演变规律欠缺考虑。另外一些研究者使用模型进行空间布局的模拟和优化,提出遗传算法(徐伟铭等,2016;杨露等,2020)、元胞自动机(曹帅等,2019;Lin *et al.* 2020;张晓荣等,2020)和蚁群算法(陆军辉等,2017)等模型,从不同方面对土地利用优化问题进行进一步深入研究。然而,这些研究内容上侧重于土地利用空间结构的模拟,在规划、政策的科学性、合理性和可达性等多类型约束下综合体现主导生态系统服务功能提升的土地利用优化研究还比较薄弱,不足以满足社会经济发展进入生态文明建设新阶段的现实需求。

为了优化研究区土地利用格局以提高其主导生态功能,本研究:(1)通过分析东北森林带土地利用及生态系统服务时空格局、两者的相关关系及驱动因素,探明该区生态系统服务演变的驱动机制;(2)以不同土地利用类型对各项生态系统服务的相对重要性为依据制定土地利用优化规则,利用元胞自动机模型对东北森林带土地利用空间格局进行优化,以期增加东北森林带生态格局优化的科学性,提高东北森林带主导生态功能提升的精准性。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东北森林带的范围是根据东北地区具有高生态价值森林分布区,以县级行政边界划定的。地理位置为 118.80°E—134.37°E、40.87°N—53.56°N,总面积约为 60 万 km²,其中有林地面积约占 66.0%,主要分布在大、小兴安岭、长白山和张广才岭。东北森林带区域涉及黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古等 4 个省(区) 72 个县市,含大、小兴安岭森林、长白山森林和三江平原湿地国家重点生态功能区(图 1; 欧阳志云 2008)。

东北森林带地貌类型多样,分布着大兴安岭、小兴安岭、长白山地、松嫩平原和三江平原,温带季风气候显著,自南向北地跨中温带和寒温带,四季分明,夏季温热多雨、冬季寒冷干燥,降水量 400~1000 mm,土壤分布有暗棕壤、白浆土和黑土。本区域是我国重点国有林区和北方重要原始林区的主要分布地,是我国沼泽湿地最丰富、最集中的区域。区域内生物多样性极高,分布野生植物近 4000 种,野生动物近 2000 种。

1.2 数据来源

本研究采用的土地利用数据为中国科学院生态环境研究中心以国产环境灾害卫星(HJ-1A/B)和美

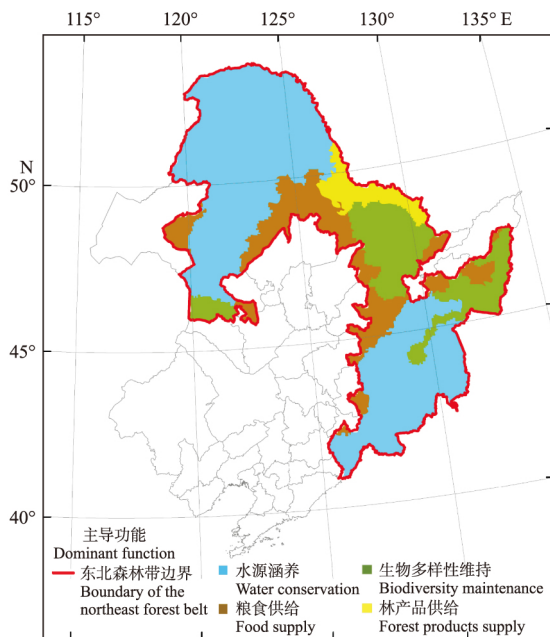


图 1 研究区域位置与生态功能区划(欧阳志云 2008)
Fig.1 Location and ecological function regionalization of study area

国陆地卫星(Landsat OLI)数据为信息源研制的土地利用数据(2000年和2015年)。该数据分辨率为 90 m,一级土地利用类型分为林地、草地、耕地、水体、人工表面和其他 6 类,二级包含 40 个子类型。本研究根据研究区现状及研究需求,将该数据重采样为 1000 m 分辨率,并将子类型重新分为 13 类。

气象数据来源于中国气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)发布的中国地面气候资料数据集,包括降水、蒸散发、风向等。NDVI 数据来自美国国家航空航天局(NASA)数据信息服务中心(DISC)发布的 MODIS 数据产品(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。县级、乡镇级行政边界、数字高程数据、植被区划数据、人口分布数据、GDP、耕地潜力数据来自于中国科学院地理科学与资源研究所的资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)。粮食产量数据来源于辽宁、吉林、黑龙江省以及内蒙古东四盟以区县为基本单位的 2000 年和 2015 年的统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 生态服务重要性评价 (1) 生境质量:本研究利用 InVEST 模型的生境质量模块计算研究区生境质量(Sharp *et al.*, 2015)。通过考虑威胁因子的影响距离及其权重、生境对于威胁源的敏感性等因素,评价生境质量,评价方法如下:

$$D_{xy} = \sum_{r=1}^R \sum_{\gamma=1}^{\gamma_r} (W_r / \sum_{\gamma=1}^{\gamma_r} W_r) r_{\gamma} i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (1)$$

式中 R 为胁迫因子; γ 为胁迫因子 r 栅格图层的栅格数; γ_r 为胁迫因子占栅格数; W_r 为胁迫因子的权重,表明某一胁迫因子对所有生境的相对破坏力,取值 0~1; r_{γ} 为栅格 γ 的胁迫因子值(0 或 1); i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫因子值 r_{γ} 对生境栅格 x 的胁迫水平; β_x 为栅格 x 的可达性水平,取值 0~1,该值越接近 1 表示越容易到达; S_{jr} 为生境类型 j 对胁迫因子 r 的敏感性,取值 0~1,该值越接近 1 表示越敏感。所需要的参数通过综合参考文献(黄木易等, 2020),确定依据如表 1。

土地利用类型对各个威胁因子的敏感度。由于各个土地利用类型对威胁因子具有不同的敏感性,所以对敏感性进行设置。相对来说,在所有的土地利用类型中,生态用地对于威胁因子具有较高的敏感性,其次是半生态用地。在模型中,将敏感性的范围设置为 0~1,值越大敏感性越高(表 2)。

(2) 水源涵养:本研究采用水量平衡方程来计

表 1 生境质量威胁因子

Table 1 Threats to habitat quality

威胁因子 Threat factor	最大影响距离 Maximum impact distance (km)	权重 Weight	衰减线性相关性 Attenuation linear correlation
耕地 Cropland	8	0.7	线性 Linear
居民点 Residential area	5	0.6	指数 Exponent
城镇 Town	10	1	指数 Exponent
铁路 Railway	3	1	线性 Linear
公路 Road	3	1	线性 Linear
沙地 Sandland	1	0.7	指数 Exponent
盐碱地 Saline land	1	0.02	指数 Exponent

算水源涵养量(张彪等,2009;王晓学等,2013),计算公式为:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (2)$$

式中: TQ 为总水源涵养量(m^3), P_i 为降雨量(mm), R_i 为地表径流量(mm), ET_i 为蒸散发(mm), A_i 为 i 类生态系统面积(km^2), j 为研究区第 i 类生态系统类型数, j 为研究区生态系统类型数。地表径流因子计算公式如下:

$$R = P\alpha \quad (3)$$

式中: R 为地表径流量(mm), P 为多年平均降雨量(mm), α 为平均地表径流系数。

(3) 土壤保持: 采用修正通用水土流失方程($RUSLE$)的土壤保持服务模型开展评价(胡云峰等,2018),公式如下:

$$A_c = A_p - A_R = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (4)$$

式中 A_c 为水土保持量; A_p 为潜在土壤侵蚀量; A_R 为

实际土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力因子; K 为土壤可蚀性因子; L, S 为地形因子 L 表示坡长因子, S 表示坡度因子; C 为植被覆盖因子。

(4) 水源供给: 采用 $InVEST$ 模型的水源供给模块($water\ yield$) 计算研究区流域产水量($Sharp\ et\ al.$, 2015)。 $InVEST$ 模型的产水量模块是基于水量平衡原理,通过降水、植物蒸腾、地表蒸发、根系深度和土壤深度等参数计算产水量。主要算法如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x} \right) P_x \quad (5)$$

式中: Y_x 为某景观类型的年产水量(mm); AET_x 为栅格单元 x 的年实际蒸散发量(mm); P_x 为栅格单元 x 的年降水量(mm)。

水量平衡公式中,土地利用/覆被类型的植被蒸散发 $\frac{AET_x}{P_x}$ 计算采用如下公式:

$$\frac{AET_x}{P_x} = 1 + \frac{PET_x}{P_x} - \left[1 + \left(\frac{PET_x}{P_x} \right)^\omega \right]^{1/\omega} \quad (6)$$

式中 PET_x 表示潜在蒸散量, ω 表示自然气候-土壤性质的非物理参数。

潜在蒸散量 PET_x 的定义为:

$$PET_x = K_c(L_x) ET_x \quad (7)$$

式中 ET_x 表示栅格单元 x 的参考作物蒸散, $K_c(L_x)$ 表示栅格单元 x 中特定土地利用/覆被类型的植物(植被)蒸散系数。 ET_x 通过参考作物蒸散量反映当地气候条件。

$InVEST$ 的产水量模块中,所需数据年降水量、

表 2 胁迫因子敏感性

Table 2 Sensitivity of land use to threats

地类 Land use type	生境 Habitat	耕地 Cropland	居民点 Residential area	城镇 Town	铁路 Railway	公路 Road	沙地 Sand land	盐碱地 Saline land
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	1	0.80	0.85	0.9	0.6	0.6	0.80	0.6
针叶林 Coniferous forest	1	0.80	0.85	0.9	0.6	0.6	0.80	0.6
针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	1	0.80	0.85	0.9	0.6	0.6	0.80	0.6
灌丛 Shrub	1	0.40	0.45	0.6	0.2	0.2	0.40	0.4
其他绿地 Other green space	1	0.90	0.95	1	0.7	0.7	0.80	0.3
草原 Grassland	0.8	0.40	0.45	0.6	0.2	0.2	0.50	0.4
草甸 Grassy marshland	0.8	0.40	0.45	0.6	0.2	0.2	0.50	0.4
水田 Paddy field	0.6	0.30	0.35	0.5	0.1	0.1	0.10	0.1
旱地 Dry farmland	0.6	0.30	0.35	0.5	0.1	0.1	0.10	0.1
湿地 Wetland	1	0.85	0.40	0.5	0.2	0.2	0.40	0.2
水体 Water	1	0.70	0.75	0.9	0.5	0.5	0.45	0.5
建设用地 Construction land	0	0	0	0	0	0	0	0
其他 Other land use	0	0	0	0	0	0	0	0

表 3 InVEST 产水模块参数
Table 3 Parameters of InVEST

土地利用代码 Land use code	二级分类 Land use type	产水系数 K_c	根系深度 Root depth	植被 Vegetation
1	落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	1.2	6000	1
2	针叶林 Coniferous forest	0.8	7000	1
3	针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	0.9	8000	1
4	灌丛 Shrub	1	3000	1
5	其他林地 Other forestland	0.8	5000	1
6	草原 Grassland	0.65	2000	1
7	草甸 Grassy marshland	0.65	2000	1
8	水田 Paddy field	1.2	1000	1
9	旱地 Dry farmland	0.65	1000	1
10	湿地 Wetland	1.2	7000	1
11	水体 Water	1	0	0
12	建设用地 Construction land	0.3	0	0
13	其他 Other land use	0.2	10	0

年平均蒸散量、土壤深度、土地利用类型图、植物可利用含水量、流域和小流域、生物物理属性表和参数(表 3)。

(5) 粮食生产

根据统计数据在 ArcGIS 中生成矢量数据后转化为栅格数据。

以上 5 项生态系统服务经归一化后利用自然断点法分为 5 级,级别越高,代表该生态系统服务的重要性越高。

1.3.2 空间相关性分析 本研究利用多变量空间相关性分析计算土地利用类型、生态系统服务及其驱动因子(坡度、坡向、高程、年均温、年均降水、年均蒸散量、土地利用、人口密度、GDP)的空间相关性。本研究还利用不同生态系统服务之间的空间相关性评价生态服务之间的相关关系,其中正相关关系定义为协同关系,负相关关系定义为权衡关系。空间相关性计算公式如下:

$$I = \frac{N}{\sum ij^{w_{ij}}} \frac{\sum i \sum j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum (x_i - \bar{x})^2)} \quad (8)$$

式中: i, j 为多边形编号 w_{ij} 为 i, j 之间的空间连接矩阵 x 为研究区域内的属性均值。

1.3.3 生态格局优化模拟 本研究利用基于 FLUS 模型的软件 GeoSOS-FLUS 对研究区生态格局进行优化模拟(Liu *et al.*, 2017)。FLUS 模型主要由基于 SD 模型的土地利用数量预测模块和基于 CA 模型

的土地利用空间模拟模块 2 部分组成。

首先,本研究利用 FLUS 模型中多层前馈神经网络算法(BP-ANN)从研究区 2015 年土地利用数据与包含多种生态驱动因子(高程、坡度、坡向、降水、蒸散土壤有机质含量、植被类型)获取各用地类型在研究范围内的适宜性概率。该模型当中的多层前馈神经网络算法由输入层、隐含层和输出层共 3 层网络构成,其公式为:

$$sg(g, k, t) = \sum_n W_{n,k} \times \text{sigmoid}(net_n(g, t)) = \sum_n W_{n,k} \times 1 / (1 + e^{-net(g, t)}) \quad (9)$$

式中: $sg(g, k, t)$ 表示第 k 种类型用地在栅格 g 时间 t 上的适宜性概率; $W_{n,k}$ 是隐藏层和输出层间的权重; $\text{sigmoid}()$ 是隐藏层至输出层的激励函数; $net_n(g, t)$ 表示在第 n 个隐藏时间 t 上从栅格 g 接收到的信号。对于多层前馈神经网络算法输出的适宜性概率 $sg(g, k, t)$ 在迭代时间 t 栅格 g 上,各用地类型的适宜性概率和恒定为 1,即:

$$\sum_k sg(g, k, t) = 1 \quad (10)$$

本研究中神经网络获取训练样本的采样方法为随机采样策略(random sampling),其特点是各类别用地的采样点数相同,隐藏层数量根据经验设置为 12 层,之后将各土地利用驱动力因子的栅格数据经过归一化处理后一并输入到 BP-ANN 模型当中,最终得出各用地类型在研究区内的适宜性概率。

采用元胞自动机模型迭代的方式,模拟以提高研究区生态系统服务为目标的土地类型分布格局。每类土地的惯性系数由现有土地数量与土地需求之间的差异决定,并在迭代过程中进行自适应调整,从而使各类用地的数量向预定目标发展。第 k 种用地在 t 时间上的自适应惯性系数 Ai_k^t 为:

$$Ai_k^t = \begin{cases} Ai_k^{t-1} & |D_k^{t-2}| \leq |D_k^{t-1}| \\ Ai_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & 0 > D_k^{t-2} > D_k^{t-1} \\ Ai_k^{t-1} \times \frac{D_k^{t-2}}{D_k^{t-1}} & D_k^{t-1} > D_k^{t-2} > 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中 D_k^{t-1}, D_k^{t-2} 分别为 $t-1, t-2$ 时刻第 k 种类型用地的栅格数量与需求量之间的差。在 BP-ANN 模型计算出每个栅格适宜性的总概率后,通过 CA 模型迭代,将各类型用地分配到栅格中。栅格 g 在 t 时点转化为地类 k 的总概率 $Tp_{g,k}^t$,可表示为:

$$Tp_{gk}^i = sg(g, k, i) \times \Omega_{gk}^i \times Ai_k^i \times (1 - sp_{p \rightarrow k}) \quad (12)$$

式中: $sp_{p \rightarrow k}$ 为土地利用类型 p 转化为类型 k 的成本; $1 - sp_{p \rightarrow k}$ 代表发生转化的难易程度; Ω_{gk}^i 为邻域作用, 其公式为:

$$\Omega_{gk}^i = \frac{\sum N \times N^{con(p_g^{i-1}=k)}}{N \times N - 1} \times w_k \quad (13)$$

式中: $\Omega_{gk}^i = con(p_g^{i-1}=k)$ 表示在 $N \times N$ 的 Moore 的邻域窗口, 上一次迭代结束后第 k 种地类的栅格总量; w_k 为各用地类型的邻域作用的权重。本研究中采用 3×3 的邻域, 迭代次数设定为 300 次。

2 结果与分析

2.1 东北森林带土地利用时空变化 (2000—2015 年)

从各种用地类型的面积和比例来看, 东北森林带以生态用地为主, 占总面积的 78.2% (2015 年), 主要分布在大兴安岭北部、小兴安岭西北部以及长白山中南部区域。其次为生产用地, 占总面积的 20.4% (2015 年), 主要分布在东北森林带东北部与三江平原和松嫩平原的交界处 (图 2)。

东北森林带生态用地中, 落叶阔叶林面积最大, 2000 年为 $24.82 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2015 年为 $25.02 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积比 2000 年增加 0.8% (表 4)。2015 年, 阔叶落叶林分别占大兴安岭、小兴安岭和长白山面积的 36.5%、40.0% 和 51.5%; 2000 年针叶林面积为 $10.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 2015 年面积为 $10.33 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表 4), 主要分布在大兴安岭地区 (图 2a, b); 针阔混交林所占的面积较小, 分别占大、小兴安岭和长白山面积的 1.4%、8.0% 和 7.9% (2015 年)。东北森林带湿地主要分布在大、小兴安岭 (图 2a, 2b), 2015 年面积分别占这两个区域总面积的 12.5% 和 8.6%。2000—2015 年, 湿地面积有所减少, 下降幅度为 2.1%。东北森林带生产用地以旱田为主, 2015 年占总面积的 17.0% (表 4), 比 2000 年减少 6.1%, 主要分布在小兴安岭和长白山地区 (图 2a, b)。水田主要分布在长白山和小兴安岭地区, 2000—2015 年面积增长 42.0%。

2000—2015 年, 较大面积 (大于 200 km^2) 的土地利用变化均为生态用地转移为非生态用地。其中, 面积最大的土地利用转移为落叶阔叶林转化为旱地, 面积为 $1.60 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要发生在大、小兴安岭与东北平原交界耕地面积较大的地区 (图 2c)。湿地转移为旱地的面积次之, 为 5060.08 km^2 , 主要

表 4 东北森林带不同土地利用类型面积及变化 (2000—2015 年)

Table 4 Area and change of different land use types in Northeast China forest belt (2000–2015)

土地利用类型 Land use type	面积 Area ($\times 10^4 \text{ km}^2$)			比例 Percentage (%)
	2000 年	2015 年	变化 Change	
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	24.82	25.02	0.20	0.8
针叶林 Coniferous forest	10.32	10.33	0.01	0.1
针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	3.06	3.09	0.03	1.0
灌丛 Shrub	0.20	0.23	0.03	15.0
其他林地 Other forestland	0.33	0.00	-0.33	-99.3
草原 Grassland	2.23	2.35	0.12	5.4
草甸 Grassy marshland	0.31	0.29	-0.02	-6.5
水田 Paddy field	1.43	2.03	0.60	42.0
旱地 Dry farmland	10.79	10.13	-0.66	-6.1
湿地 Wetland	5.22	5.11	-0.11	-2.1
水体 Water	0.53	0.55	0.02	3.8
建设用地 Construction land	0.80	0.90	0.10	12.5
未利用地 Other land use	0.06	0.06	0.00	-3.5

分布在小兴安岭东北部和长白山北部与三江平原的交界处。草地转化为旱地的面积位居第三, 为 1933.18 km^2 , 主要分布在大兴安岭西部和南部与东北平原交界的草原地区。此外, 2000—2015 年有 2358.83 km^2 的生态用地转化为建设用地 (图 2c)。

2.2 生态服务重要性时空格局及其影响因素

东北森林带内, 水源涵养重要性较高的区域是长白山南部, 大兴安岭北部次之 (图 3a1, a2)。2000—2015 年, 东北森林带内水源涵养重要性整体变化不大 (增幅小于 0.1%)。其中, 水源涵养重要性增加的区域面积为 $16.75 \times 10^4 \text{ km}^2$, 减少的区域面积为 $19.15 \times 10^4 \text{ km}^2$; 东北森林带整体生境质量较高, 2000—2015 年生境质量整体变化不大, 2000 年平均值为 0.889, 2015 年平均值为 0.888。其中, 减少的区域面积占总面积的 15.3%, 主要为生态用地转换为非生态用地的地区; 增加的面积比例为 4.3% 主要是退耕还林、还草区 (图 3b3); 2000—2015 年东北森林带土壤保持重要性整体上升, 上升较为明显的区域为长白山南部地区, 大兴安岭北部地区次之 (图 3c3)。2000—2015 年研究区固碳释氧重要性整体有所增加, 平均值增加 9.8%。固碳释氧重要性增加的区域面积占总面积的 93.0%, 减少区域面积占 2.8%, 主要分布在大兴安岭中西部地区 (图 3d3)。研究区内水源供给重要性呈现出“东南高西

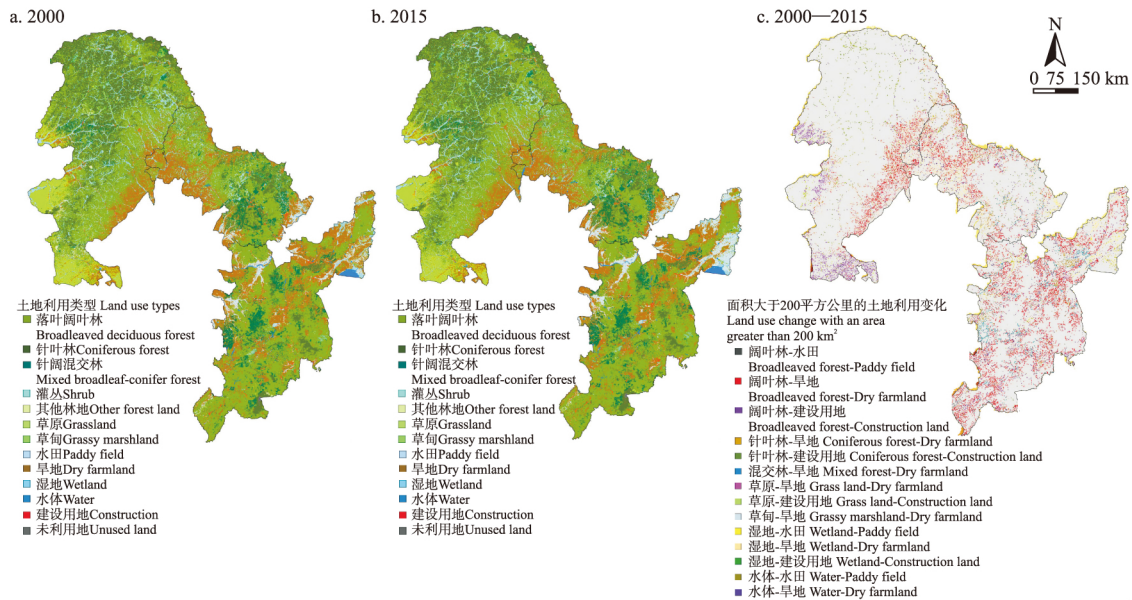


图2 东北森林带土地利用变化(2000—2015年)
Fig.2 Land use change of forest belt in Northeast China (2000—2015)

南低”的空间格局(图 3e1,图 3e2)。2000—2015 年研究区水源供给重要性显著增加,增幅为 132.9%。水源供给重要性增加区域的面积为 $58.44 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 97.4%,下降的区域面积为 $0.58 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占总面积的 1.0%,主要分布在长白山南端和小兴安岭东北部(图 3e3)。粮食供给重要性整体有所提升,升幅为 54.0%。研究区内粮食供给重要性较高的区域分布在小兴安岭和长白山与三江平原和东北平原的交汇区,2000—2015 年研究区粮食供给重要性上升的区域面积占总面积的 50.8%,下降区域的面积比例为 1.0%,主要分布在长白山南端(图 3f3)。

在本研究选取的 6 项生态系统服务中,生境质量主要受到地形条件和人为因素的影响,其中地形

因素中高程和坡度的影响较大,且为正向影响。人为因素中,土地利用的影响较大,且为负向影响。对水源供给服务影响较大的为气候条件,以降水和温度为主;土壤保持服务主要受到坡度的影响;水源涵养服务主要受到降水的影响;粮食供给服务主要受到高程、土地利用和温度的共同影响。在本研究选区的 5 项生态系统服务中,除粮食供给以外的其余 4 项都受到了土地利用较为明显的负向影响(表 5)。

2.3 土地利用生态适宜性评价

土地适宜性评估结果显示,东北森林带内适宜多种土地利用类型的区域面积占比较大,为 36.5%;在只适宜单一土地利用类型(最小适宜面积)的区域中,适宜落叶阔叶林的区域面积比例最大,为 31.2%,仅适宜旱地的区域面积次之,占 12.6%;仅

表 5 不同类型驱动因子与生态系统服务空间相关性 ($P < 0.05$)
Table 5 Spatial correlation between different driving factors and ecosystem services ($P < 0.05$)

生态服务 Ecosystem services	地形条件 Topographic condition			人为因素 Human factor			气候条件 Climatic conditions		
	高程 Elevation	坡向 Aspect	坡度 Slope	人口 Population	GDP	土地利用 Land use	降水 Precipitation	温度 Temperature	蒸散 Evapotranspiration
生境质量 Habitat quality	0.367	0.016	0.302	-0.204	-0.212	-0.420	0.038	-0.229	0.002
水源供给 Water supply	-0.150	-0.013	0.043	0.145	0.181	-0.035	0.602	0.300	-0.013
土壤保持 Soil conservation	0.358	0.01	0.465	-0.008	0.037	-0.269	0.293	0.096	0.015
水源涵养 Water conservation	-0.075	0.001	0.125	0.104	-0.153	-0.168	0.760	0.295	-0.254
粮食供给 Food supply	-0.418	-0.016	-0.255	0.176	0.191	0.344	0.110	0.306	0.162

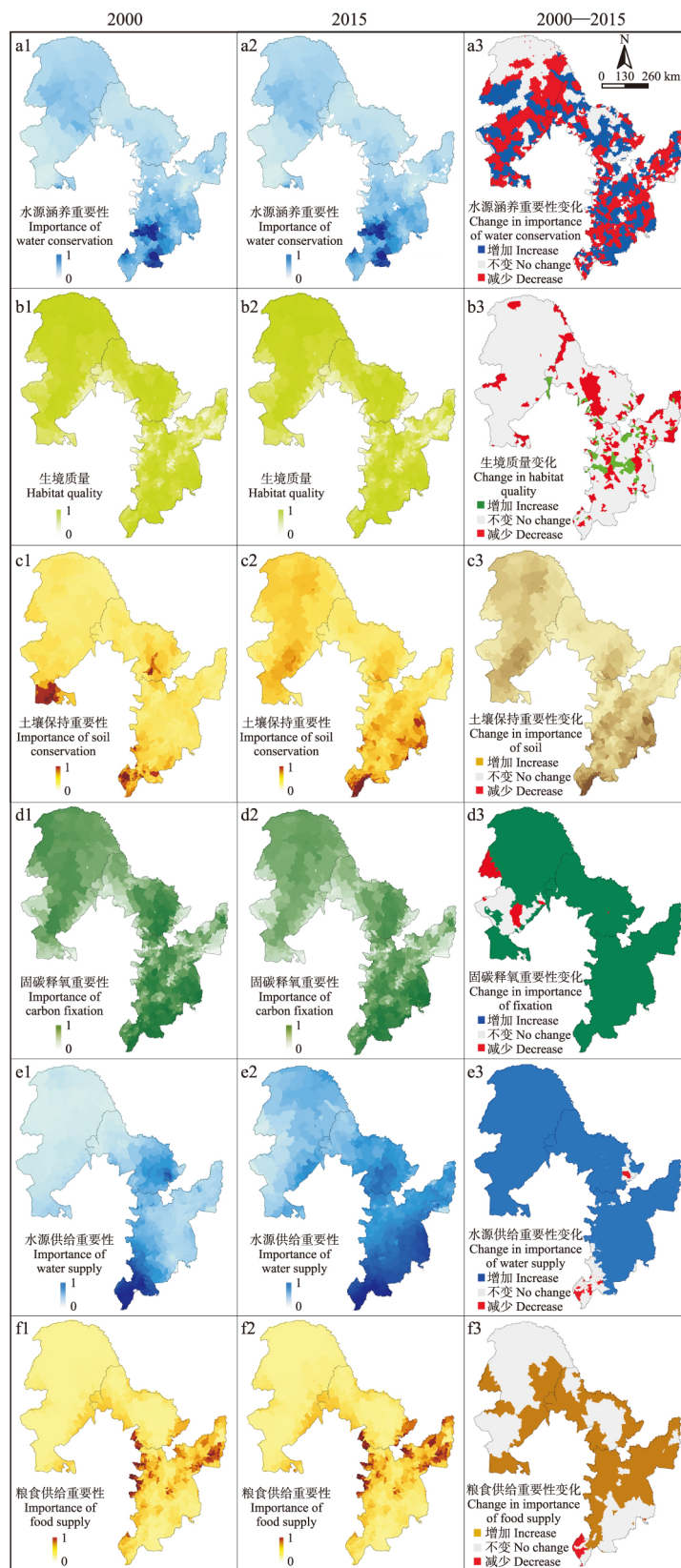


图 3 东北森林带生态系统服务重要性空间格局

Fig.3 Spatial pattern of the importance of ecosystem services in Northeast China forest belt

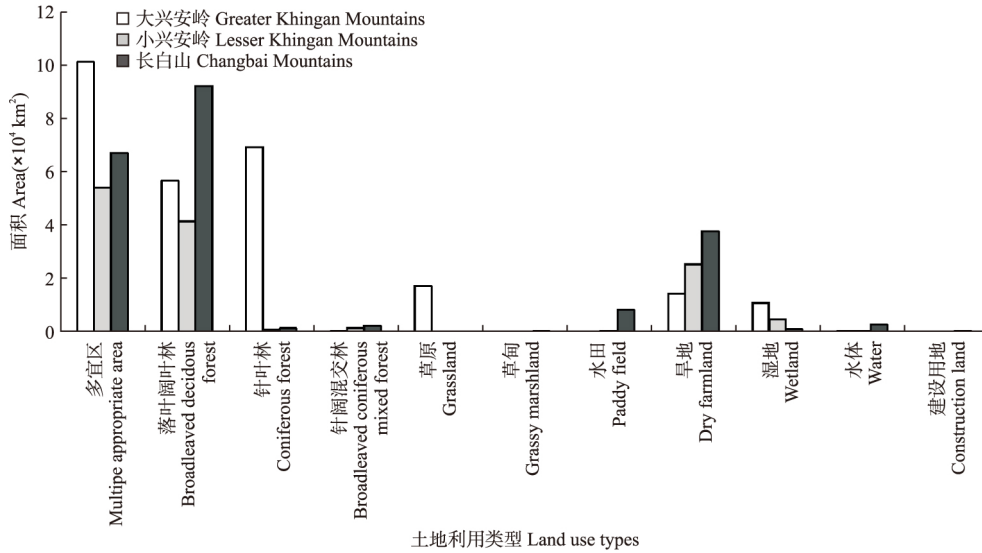


图 4 大兴安岭、小兴安岭及长白山地区不同土地利用类型最小适宜面积
 Fig.4 The minimum suitable area of different land use types in Daxinganling, Lesser Khinganling and Changbai Mountains

适宜针叶林区域比例位居第三,为 11.7%。大兴安岭地区仅适宜针叶林的区域面积比例最高(11.4%);长白山仅适宜作为耕地的面积较大,水田为 1.4%,旱地为 6.2%(图 4)。

2.4 生态格局优化模拟

2.4.1 土地利用与生态系统服务空间相关性 不同土地利用类型对研究选取的 6 种生态系统服务的重要性不同(表 6)。总体来说,生态用地(林地、草地、湿地和水体)对各项生态系统调节服务(水源涵养、生境质量、土壤保持和固碳释氧)的重要性较

高。具体来说,对水源涵养重要性最高的用地类型是针阔混交林,落叶阔叶林次之,水田位居第三;对生境质量重要性最高的用地类型是针叶林,阔叶林次之,针阔混交林位居第三;对土壤保持重要性最高的用地类型是落叶阔叶林,针阔混交林次之,针叶林位居第三;对固碳释氧重要性最高的用地类型是针阔混交林,落叶阔叶林次之,针叶林居第三;对水源供给重要性最高的用地类型是水体,湿地次之,针阔混交林位居第三;对粮食供给重要性最高的用地类型是水田,旱地次之,其他林地(主要为乔木园地)

表 6 不同土地利用类型 6 种生态系统服务重要性均值
 Table 6 Mean importance value of the six ecosystem services under different land use types

土地利用类型 Land use type	生态系统服务重要性 Importance of ecosystem services					
	水源涵养 Water conservation	生境质量 Habitat quality	土壤保持 Soil conservation	固碳释氧 Carbon fixation and oxygen release	水源供给 Water supply	粮食供给 Food supply
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	0.148	0.954	0.047	0.707	0.570	0.043
针叶林 Coniferous forest	0.131	0.970	0.042	0.680	0.506	0.010
针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	0.169	0.960	0.046	0.736	0.573	0.049
灌丛 Shrub	0.124	0.947	0.038	0.656	0.569	0.047
其他林地 Other forestland	0.084	0.570	0.033	0.462	0.635	0.165
草原 Grassland	0.058	0.804	0.025	0.382	0.407	0.053
草甸 Grassy marshland	0.103	0.884	0.028	0.512	0.526	0.050
水田 Paddy field	0.146	0.640	0.007	0.362	0.554	0.688
旱地 Dry farmland	0.136	0.718	0.019	0.426	0.000	0.395
湿地 Wetland	0.117	0.888	0.025	0.485	0.690	0.051
水体 Water	0.130	0.874	0.021	0.256	0.650	0.141
建设用地 Construction land	0.078	0.619	0.022	0.378	0.000	0.300
未利用地 Other land use	0.035	0.796	0.007	0.382	0.000	0.032

表 7 东北森林带各土地利用类型最大适宜面积、最小适宜面积、实际面积以及优化目标面积(km^2)

Table 7 Maximum suitable area, minimum suitable area, actual area and optimal target area of each land use type in Northeast China forest belt

用地类型 Land use type	最大适宜面积 Maximum suitable area	最小适宜面积 Minimum suitable area	实际面积 Actual area	目标面积 Target area
落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	352378.23	189793.00	257910.20	204562.00
针叶林 Coniferous forest	143000.10	70945.36	104343.70	104015.00
针阔混交林 Mixed broadleaf-coniferous forest	71002.57	3299.86	30452.02	71002.57
灌丛 Shrub	0.00	0.00	2034.39	0.00
其他林地 Other forest land	0.00	0.00	2898.31	0.00
草原 Grassland	31959.53	17082.23	20956.57	0.00
草甸 Grassy marshland	1.37	0.18	2797.07	0.00
湿地 Wetland	66207.44	15741.01	48295.83	66207.44
水体 Water	6581.45	2679.35	5295.56	5295.56
水田 Paddy field	22602.68	8459.54	20954.14	22602.68
旱地 Dry farmland	134949.97	76825.70	102865.90	97665.00
建设用地 Construction land	513.20	2.70	8077.21	8077.21
其他用地 Other land use	0.00	0.00	512.43	0.00

位居第三。由此可见,针阔混交林对综合生态系统调节服务的重要性最高,水田对生态系统供给服务重要性最高(表 6)。

2.4.2 土地利用转化规则 基于空间相关性分析的结果,结合不同用地类型适宜区面积,以提高东北森林带生境质量和水源涵养两项主导功能为主,兼顾土壤保持,保障水源供给和粮食供给服务为优化目标,制定土地利用转化规则。其中草原和草地面积确定为最小适宜面积,维持水体、建设用地面积;大幅减少未利用地面积;保证落叶阔叶林不低于最小适宜面积,适当增加湿地和针叶林面积;最大程度增加针阔混交林;控制耕地面积在最大和最小适宜面积范围内,并提高耕地中水田比例(表 7)。

2.4.3 土地利用转化限制区 双变量局部空间相关分析结果显示,在选取的 5 个生态系统服务之间存在着明显的协同与权衡关系,其中与生境质量和水源涵养两项东北森林带主导生态系统服务存在权衡关系的区域分布在大兴安岭北部和东南部,小兴安岭中部以及长白山东南部,面积占东北森林带面积的 34.5%,这些区域主导生态服务重要性等级均高于 3 级,且与其他生态服务存在权衡关系,因此作为土地利用转化的限制区(限制生态用地向其他类型地类转化)。此外,东北森林带内水体、湿地也对东北水资源安全具有重要意义,也作为土地利用转化的限制区域(图 5)。

2.4.4 土地利用优化模拟 模拟结果显示,东北森林带生态用地、生产用地以及生活用地总面积及比例没有发生大幅变化。优化后的生态用地面积为

$47.90 \times 10^4 \text{ km}^2$,面积仅增加 0.7%,生产用地面积减少 3291.2 km^2 ,降幅为 2.6%(图 6)。各用地类型内部结构发生了较为明显的变化。生态用地中,落叶阔叶林减少 20.0%,针阔混交林增加 134.7%。草甸、其他绿地、灌丛、草原和分别减少了 13.1%、6.6%、4.7%和 4.2%。湿地增加了 32.5%。而生产用地中,水田面积增加了 8.3%。落叶阔叶林减少的 20.0%面积中,有 14.8%转变为针阔混交林,而耕地则较多的转变为湿地和林地。

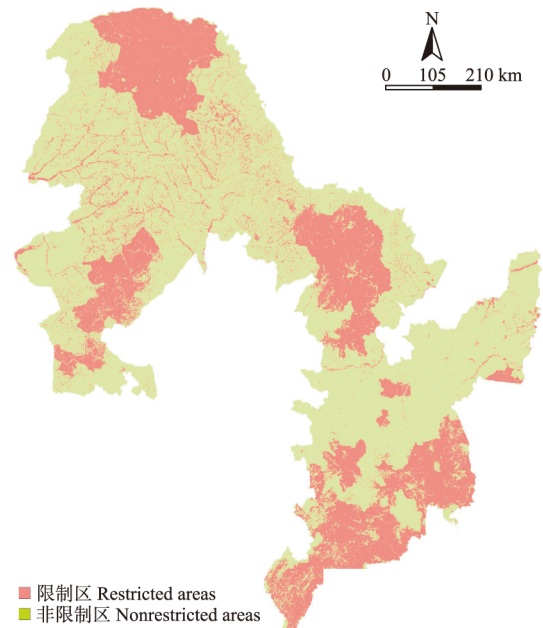


图 5 土地利用转化限制区分布

Fig.5 Distribution of restricted areas for land use conversion

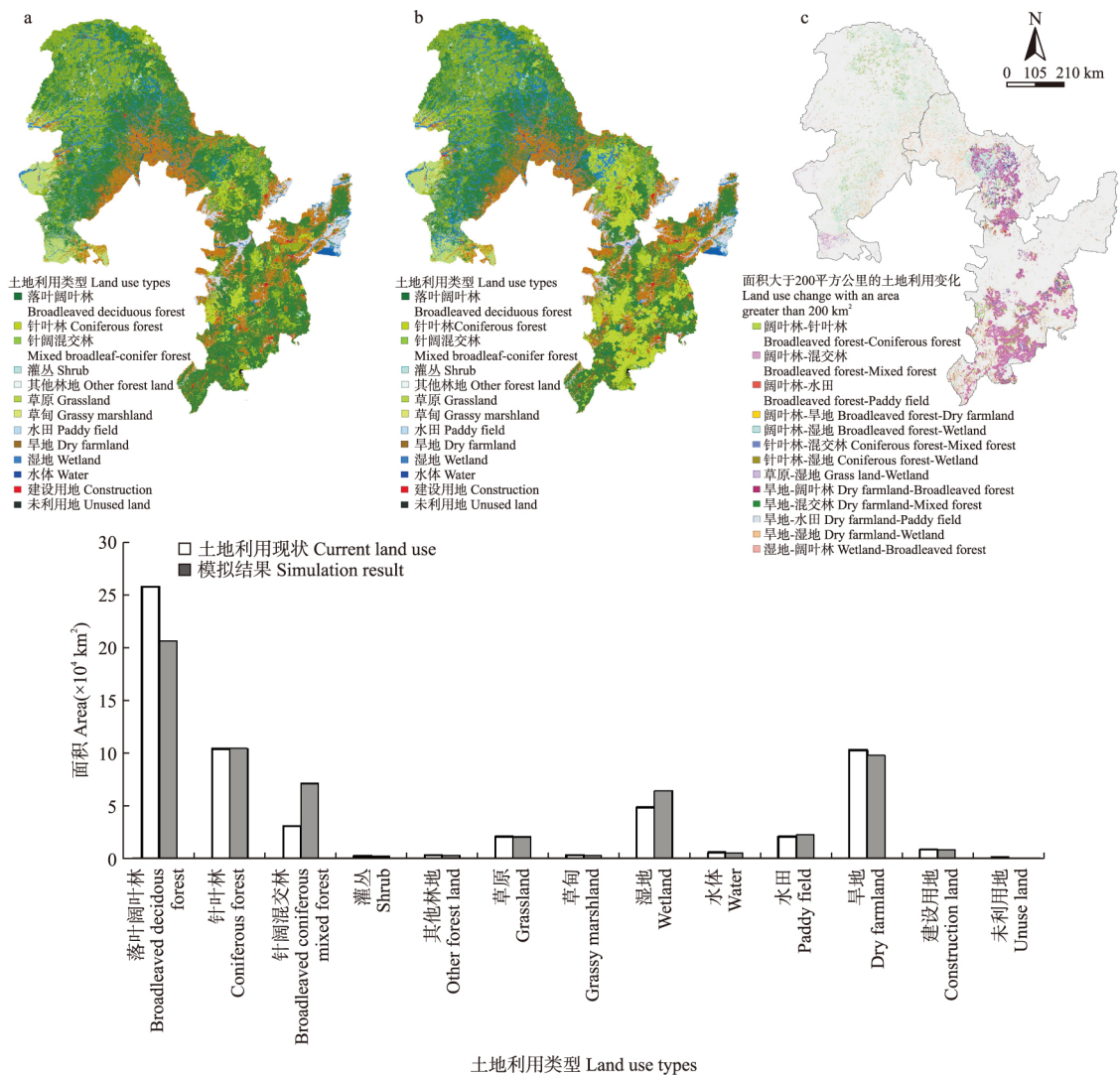


图6 2015年土地利用与优化后土地利用不同地类面积及空间格局对比
 Fig.6 Comparison of the area and spatial pattern of different land use types in 2015 and optimized land use

优化后的土地利用空间格局显示,小兴安岭中部和长白山中南部地区 14.9%的落叶阔叶林被针阔混交林所替代 ($3.84 \times 10^4 \text{ km}^2$, 表 8); 大兴安岭地区的部分落叶阔叶林则转化为湿地 ($1.27 \times 10^4 \text{ km}^2$)。长白山、小兴安岭与三江平原交汇的区域中,有 815.28 km^2 的旱地转化为水田(图 6c)。在长白山和小兴安岭坡度较高的区域, 3204.58 km^2 的旱地应进行退耕还林,其中 58.9% 应转换为针阔混交林(表 8)。

3 讨论

3.1 东北森林带生态系统服务影响因素

东北森林带主导生态系统服务水源涵养、生物多样性维持(生境质量)和粮食供给受到不同的因

素驱动,对不同土地利用变化的响应有显著差别。一般来说,水源涵养量是由该区域的降水、蒸散和径流共同决定的,但研究区大部分地区降水远高于蒸散,导致了该区水源涵养主要受到年均降水的影响。另外,针阔混交林植物丰富度更高、根系分布更密更深,对水的截留能力更强,因此,对水源涵养的重要性也更高。

生境质量越高的区域,其维持生物多样性的能力也越强。相对于农田等人工生态系统,森林、草地等自然生态系统受到的人类干扰相对较小,其生境质量均较高。土地利用可以较好地反映人类对地表覆盖的改变程度,侧面体现了人类的干扰强度,因此成为了生境质量的主要影响因素。

研究区内粮食供给主要受到年均温度的影响,

表 8 2015 年土地利用与模拟土地利用转移面积百分比 (%)
Table 8 Proportion of land use transfer between land use in 2015 and simulation

模拟土地利用 Land use by simulation	土地利用现状(2015年) Land use in 2015												
	落叶阔 叶林 Broadleaved deciduous forest	针叶林 Coniferous forest	针阔 混交林 Mixed broadleaf coniferous forest	灌丛 Shrub	其他林地 Other forest land	草原 Grassland	草甸 Grassy marshland	水田 Paddy field	旱地 Dry farmland	湿地 Wetland	水体 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
落叶阔叶林	0.00	0.35	0.72	3.05	4.78	0.53	1.87	0.09	24.69	7.12	0.02	0.21	0.55
针叶林	0.35	0.00	0.46	0.07	0.13	0.01	0.66	0.00	0.70	1.01	0.00	0.00	0.21
针阔混交林	14.87	0.56	0.00	4.16	0.43	0.15	3.72	0.05	35.49	1.82	0.03	0.57	2.43
灌丛	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.42	0.01	0.00	0.00	0.00
其他林地	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.00	1.34	0.04	0.00	0.00	0.00
草原	0.07	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.14	0.00	1.66	0.41	0.00	0.01	0.34
草甸	0.07	0.01	0.00	0.05	0.12	0.04	0.00	0.00	0.32	0.06	0.00	0.00	0.19
水田	0.38	0.01	0.02	0.13	0.00	0.02	0.23	0.00	15.31	0.48	0.01	0.08	1.72
旱地	0.70	0.01	0.13	0.48	0.36	0.37	0.62	0.15	0.00	1.47	0.01	0.31	0.41
湿地	4.92	0.50	0.41	3.03	7.27	4.80	13.69	0.13	58.58	0.00	0.05	0.42	11.28
水体	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.47	0.05	0.00	0.00	0.15
建设用地	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.68	0.02	0.00	0.00	0.00
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

其原因在于区内降水相对丰沛,但气温较低,是粮食产量的主要限制因素。此外,区内地形复杂,旱地中存在一定数量的坡耕地,这些耕地中水土流失现象明显,耕地质量相对较低。研究区水田主要分布在小兴安岭和长白山与三江平原的交汇处,这些地区降水丰沛、地势平坦且有机质含量较高,因此研究区中水田对粮食供给服务的重要性更高。

3.2 生态系统服务权衡与协同关系

诸多研究表明,由于异质景观中的生态系统服务具有多样性和空间不均衡性,不同的生态系统服务在空间上存在明显的此消彼长(权衡)或相互增益(协同)的关系(Lu *et al.*, 2014; Cabral *et al.*, 2016; 祝萍等, 2020),且这种关系存在明显的空间异质性(祁宁等, 2020)。本研究发现,研究区内主导生态功能与其他生态功能在区内不同斑块内的相关关系不同。明确不同生态系统服务之间权衡与协同关系,有助于找到区域内主导生态功能和其他生态功能的平衡点,为各生态系统服务协调发展提供科学依据。因此,本研究将区内主导生态功能重要性等级较高,且与其他生态功能存在权衡关系的生态用地设置为土地利用转化限制区。一方面,土地利用转化限制区保障了研究区主导生态功能不会因土地利用变化而降低;另一方面,在土地利用转化区的土地利用结构变化也促进了主体生态功能与其他生态

功能的协同提高。

3.3 东北森林带土地利用结构优化

本研究利用 GeoSOS-FLUS 模型,耦合生态系统服务演变机制及权衡协同关系,通过优化东北森林屏障带内二级土地利用结构实现区域主导生态功能提升的目标。因为研究区特殊的地理位置以及其在国家生态功能区划中的重要地位,优先生态保护和功能提升的发展目标方向明确。因此,本研究没有采用以往土地利用优化模拟研究中通过设置“自然演变”、“生态效益优先”以及“经济效益优先等”不同发展情景,再权衡不同效益目标后最终确定土地利用优化方案的研究思路(García *et al.*, 2017; 王旭等, 2020; 张经度等, 2020; 张晓荣等, 2020),而是直接以东北森林屏障带主体生态功能提升为最终目标对其进行土地利用结构优化。

本研究的模拟结果显示,研究区优化后生态用地、生产用地以及生活用地的比例与优化前并没有显著变化,但不同用地类型内部结构发生明显变化:生态用地中,落叶阔叶林、草原以及草甸的面积和比例明显减少。针阔混交林的比例大幅增加。而生产用地中,水田的比重显著增加。其原因在于:东北森林带整体生态系统服务总体良好,生态用地面积比例较高,通过增加生态用地面积来提高区内生态系统服务总量的方式在研究区内难以实现。因此,本

研究没有局限于单纯通过提高生态用地数量来增加生态效益。而是通过分析不同生态系统类型与研究区主导生态功能的相关关系,调整生态用地、生产用地的内部结构,以达到提高生态系统服务质量的目标。在制定土地利用转化规则,明确土地利用需求以前,本研究通过空间相关性分析明确土地利用二级分类与生态系统服务重要性的相关关系,再通过调整与研究区主导生态功能相关性较高的二级土地类型的结构提高主导生态功能的质量。例如:本研究发现,草原、草甸与本研究所选择的5种生态服务均呈现负相关关系,而水田对粮食供给服务重要性的影响要显著高于旱地。因此,在制定土地利用转化规则时,重点调整了这些土地利用类型的面积。这种设计一方面最大程度地缓解了生态保护与经济发展及生产生活在空间上矛盾冲突,另一方面也提高了土地利用结构优化的效率,保障了优化方案的可执行性。

由于基础数据的限制和对建模复杂性的控制,本研究中土地利用对生态服务驱动作用的考虑仍较为简单。此外,由于研究区域面积尺度的制约,本研究选区的 GeoSOS-FLUS 模型采取的是“先决策,后优化”的方式,相对于“遗传算法”等以“先定优,后变优,再择优”方式进行土地利用结构优化的模型存在生态服务提升效果量化评估难度大的局限。在后期研究中,首先应进一步深入研究土地利用与生态服务之间的相关关系,并将其耦合到模型运算过程中,还应针对不同的主导功能区分别进行生态格局优化,使研究区生态功能提升的精准度进一步提高。

4 结 论

研究区水源涵养和水源供给服务主要受到气候因子中降水的影响;生境质量主要受到土地利用的影响;粮食供给受到海拔、坡度以及温度的共同影响。

针阔混交林对研究区水源涵养、生境质量的重要性最高;相对于旱地,水田对粮食供给服务的重要性更高。

在不改变现有生态用地和生产用地面积的前提下,将长白山和小兴安岭地区的部分落叶阔叶林转化为针阔混交林,部分旱地转化为水田,可以在不激

化生态和生产用地矛盾的前提下实现生态服务调解服务(水源涵养和生境质量)与供给服务(粮食供给)的同时提升。

本研究以生态系统服务演变机制为依据,对土地利用二级分类的空间格局进行了优化调整,提高了东北森林带土地利用格局优化的科学性和准确性。

参考文献

- 包蕊,刘峰,张建平,等. 2018. 基于多目标线性规划的甲积峪小流域生态系统服务权衡优化. *生态学报*, **38**(3): 812-828. [Bao R, Liu F, Duan YL, et al. 2018. Multi-objective linear programming-based trade-off and optimization of the ecosystem services in Jiayiyu small watershed in the Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(3): 812-828.]
- 曹帅,金晓斌,杨绪红,等. 2019. 耦合 MOP 与 GeoSOS-FLUS 模型的县级土地利用结构与布局复合优化. *自然资源学报*, **34**(6): 1171-1185. [Cao S, Jin XB, Yang XH, et al. 2019. Coupled MOP and GeoSOS-FLUS models research on optimization of land use structure and layout in Jintan district. *Journal of Natural Resources*, **34**(6): 1171-1185.]
- 傅伯杰,王晓峰,冯晓明. 2017. 国家生态屏障区生态系统评估. 北京: 科学出版社. [Fu BJ, Wang XF, Feng XM. 2017. National Ecological Barrier Area Ecosystem Assessment. Beijing: Science Press.]
- 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 2020. 基于 INVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析. *生态学报*, **40**(9): 2895-2906. [Huang MY, Yu WZ, Feng SR, et al. 2020. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui province based on InVEST model. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(9): 2895-2906.]
- 金浩然,马萍萍,刘盛和. 2016. 林地变化驱动力研究中逻辑回归模型的应用. *世界林业研究*, **29**(3): 12-17. [Jin HR, Ma PP, Liu SH. 2016. Application of logistic regression model in the research on driving forces of forest-land use change. *World Forestry Research*, **29**(3): 12-17.]
- 贾宁凤,曹蓉,王晓雅. 2019. 区域生态和经济系统耦合效应下的土地利用优化配置——以山西省宁武县为例. *山西大学学报(自然科学版)*, **42**(2): 454-464. [Jia NF, Cao R, Wang XY. 2019. Land use optimization allocation under the coupling effect of regional ecological and economic system. *Journal of Shanxi University (Natural Science Edition)*, **42**(2): 454-464.]

- 刘耀林,郝弘睿,谢婉婷,等. 2019. 基于生态系统服务价值的土地利用空间优化. 地理与地理信息科学, **35**(1): 69-74. [Liu YL, Hao HR, Xie WT, et al. 2019. Optimization of land use based on the value of ecosystem services. *Geography and Geo-information Science*, **35**(1): 69-74.]
- 陆军辉,梅志雄,赵书芳,等. 2017. 土地利用配置的混沌蚁群优化算法研究. 地球信息科学学报, **19**(8): 1026-1035. [Lu JH, Mei ZX, Zhao SF, et al. 2017. Land use optimization allocation based on chaos ant colony algorithm. *Journal of Geo-information Science*, **19**(8): 1026-1035.]
- 罗紫薇,胡希军,韦宝婧,等. 2020. 基于多准则 CA-Markov 模型的城市景观格局演变与预测——以上杭县城区为例. 经济地理, **40**(10): 58-66. [Luo ZW, Hu XJ, Wei BJ, et al. 2020. Urban landscape pattern evolution and prediction based on multi-criteria CA-Markov Model: Take Shanghang County as an example. *Economic Geography*, **40**(10): 58-66.]
- 欧阳志云. 2008. 全国生态功能区划. 中国科技教育, (5): 21-22. [Ouyang ZY. 2008. National ecological function zoning. *China Science and Technology Education*, (5): 21-22.]
- 祁宁,赵君,杨延征,等. 2020. 基于服务簇的东北地区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, **40**(9): 2827-2837. [Qi N, Zhao J, Yang YZ, et al. 2020. Quantifying ecosystem service trade-offs and synergies in Northeast China based on ecosystem service bundles. *Acta Ecologica Sinica*, **40**(9): 2827-2837.]
- 孙滨峰,赵红,逯非,等. 2018. 东北森林带森林生态系统固碳服务空间特征及其影响因素. 生态学报, **38**(14): 4975-4983. [Sun BF, Zhao H, Lu F, et al. 2018. Spatial and temporal patterns of carbon sequestration in the Northeastern Forest Regions and its impact factors analysis. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(14): 4975-4983.]
- 王晓峰,勒斯木初,张明明. 2019. “两屏三带”生态系统格局变化及其影响因素. 生态学杂志, **38**(7): 2138-2148. [Wang XF, Le SMC, Zhang MM. 2019. Ecosystem pattern change and its influencing factors of “two barriers and three belts”. *Chinese Journal of Ecology*, **38**(7): 2138-2148.]
- 王晓学,沈会涛,李叙勇,等. 2013. 森林水源涵养功能的多尺度内涵、过程及计量方法. 生态学报, **33**(4): 1019-1030. [Wang XX, Shen HT, Li XY, et al. Concepts, processes and quantification methods of the forest water conservation at the multiple scales. *Acta Ecologica Sinica*, **33**(4): 1019-1030.]
- 王旭,马博文,李丹,等. 2020. 基于 FLUS 模型的湖北省生态空间多情景模拟预测. 自然资源学报, **35**(1): 230-242. [Wang X, Ma BW, Li D, et al. 2020. Multi-scenario simulation and prediction of ecological space in Hubei province based on FLUS model. *Journal of Natural Resources*, **35**(1): 230-242.]
- 徐伟铭,陆在宝,肖桂荣. 2016. 基于遗传算法的水土保持措施空间优化配置. 中国水土保持科学, **14**(6): 114-124. [Xu WM, Lu ZB, Xiao RG. 2016. Optimization of spatial allocation for soil and water conservation measures based on genetic algorithm. *Science of Soil and Water Conservation*, **14**(6): 114-124.]
- 杨露,颜耀文,宗乐丽,等. 2020. 基于多目标遗传算法和 FLUS 模型的西北农牧交错带土地利用优化配置. 地球信息科学学报, **22**(3): 568-579. [Yang L, Jie YW, Zong LL, et al. 2020. Land use optimization configuration based on multi-objective genetic algorithm and FLUS Model of agro-pastoral ecotone in northwest China. *Journal of Geo-information Science*, **22**(3): 568-579.]
- 尹礼唱,王晓峰,张琨,等. 2019. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, **38**(9): 2162-2172. [Yin CL, Wang XF, Zhang K. 2019. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier Zone. *Geographical Research*, **38**(9): 2162-2172.]
- 张经度,梅志雄,吕佳慧,等. 2020. 纳入空间自相关的 FLUS 模型在土地利用变化多情景模拟中的应用. 地球信息科学学报, **22**(3): 531-542. [Zhang JD, Mei ZX, Lv JH, et al. 2020. Simulating multiple land use scenarios based on the FLUS model considering spatial autocorrelation. *Journal of Geo-information Science*, **22**(3): 531-542.]
- 张彪,李文华,谢高地,等. 2009. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, **28**(3): 529-534. [Zhang B, Li WH, Xie GD, et al. 2009. Water conservation function and its measurement methods of forest ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, **28**(3): 529-534.]
- 张晓荣,李爱农,南希,等. 2020. 基于 FLUS 模型和 SD 模型耦合的中巴经济走廊土地利用变化多情景模拟. 地球信息科学学报, **22**(12): 2393-2409. [Zhang XR, Li AN, Nan X, et al. 2020. Multi-scenario simulation of land use change along China-Pakistan Economic Corridor through coupling FLUS model with SD model. *Journal of Geo-information Science*, **22**(12): 2393-2409.]
- 曾杰,李江风,姚小微. 2014. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. 应用生态学报, **25**(3): 883-891. [Zeng J, Li JF, Yao XW. 2014. Spatio-temporal dynamics of ecosystem service value in Wuhan Urban Agglomeration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **25**(3): 883-891.]
- 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等. 2020. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同. 生态学报, **40**(23): 8694-8706. [Zhu P, Liu X, Zheng YH, et al. 2020. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in key ecological function zones in northern China. *Acta Ecologica Sinica*,

- 40(23): 8694–8706.]
- Cabral RB, Halpern BS, Costello C, et al. 2016. Unexpected management choices when accounting for uncertainty in ecosystem service tradeoff analyses. *Conservation Letters*, **10**: 422–430.
- García GA, Rosas EP, García FA, et al. 2017. Multi-objective spatial optimization: sustainable land use allocation at sub-regional scale. *Sustainability*, **9**: 927.
- Liu X, Liang X, Li X, et al. 2017. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape & Urban Planning*, **168**: 94–116.
- Lu N, Fu B, Jin T, et al. 2014. Trade-off analyses of multiple ecosystem services by plantations along a precipitation gradient across loess plateau landscapes. *Landscape Ecology*, **29**: 1697–1708.
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, et al. 2015. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund.
-
- 作者简介 齐麟,男,1982年生,博士,副教授,研究方向为森林群落、景观恢复理论与技术。E-mail: qilin@iae.ac.cn
责任编辑 魏中青
-

齐麟,许东,朱琪,周旺明,周莉,王庆伟,邓娇娇,于大炮. 2021. 基于 GeoSOS-FLUS 平台的东北森林屏障带生态格局优化. *生态学杂志*, **40**(11): 3448–3462.

Qi L, Xu D, Zhu Q, Zhou WM, Zhou L, Wang QW, Deng JJ, Yu DP. 2021. Ecological pattern optimization of forest barrier belt in Northeast China based on GeoSOS-FLUS. *Chinese Journal of Ecology*, **40**(11): 3448–3462.