北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 基于潜在郁闭度估算和NPP趋势的东北地区森林退化评估

方铭杰 崔璨 杨磊磊 赵晏铭 陶余浪 董浩 闫琰 刘伟国

# Analysis of forest degradation characteristics in Northeast China based on spatial distribution of canopy closure and NPP decreasing trend

Fang Mingjie, Cui Can, Yang Leilei, Zhao Yanming, Tao Yulang, Dong Hao, Yan Yan, Liu Weiguo

引用本文:
方铭杰, 崔璨, 杨磊磊, 赵晏铭, 陶余浪, 董浩, 闫琰, 刘伟国. 基于潜在郁闭度估算和NPP趋势的东北地区森林退化评估[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):46–63. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250288
Fang Mingjie, Cui Can, Yang Leilei, Zhao Yanming, Tao Yulang, Dong Hao, Yan Yan, Liu Weiguo. Analysis of forest degradation characteristics in Northeast China based on spatial distribution of canopy closure and NPP decreasing trend[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):46–63. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250288

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250288

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

郁闭度对樟子松林下人工更新阔叶树种生长的影响

Effects of canopy density on the growth of broadleaved tree species under artificial regeneration of *Pinus sylvestris* forest

北京林业大学学报, 2023, 45(8): 65–73. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220275

不同郁闭度林下施用污泥产品对菘蓝重金属富集的影响

Effects of sludge product application on heavy metal enrichment in *Isatis tinctoria* under different canopy densities

北京林业大学学报, 2024, 46(8): 139–147. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240031

随机森林模型解析极端暴雨洪峰流量驱动要素

Using random forest model to analyze driving factors of extreme rainstorm peak discharge: taking the “23・7” rainstorm in Beijing as an example

北京林业大学学报, 2025, 47(1): 51–62. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240266

东北森林生长季NDVI对昼夜不对称增温及降水变化的响应特征

Response characteristics of NDVI to asymmetric diurnal temperature increase and precipitation changes during the forest growing season in Northeast China

北京林业大学学报, 2023, 45(2): 34–48. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210396

天然云冷杉林树木生长与树木大小、竞争和树种多样性的关系

Relationship between tree growth and tree size, competition as well as species diversity in spruce–fir natural forests

北京林业大学学报, 2024, 46(5): 64–72. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220409

城市林荫环境下紫外辐射的人体健康曝露时长测算

Estimating human healthy exposure duration of ultraviolet radiation in urban tree shading environment

北京林业大学学报, 2025, 47(7): 21–29. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240108

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250288

# 基于潜在郁闭度估算和 NPP 趋势的东北地区森林退化评估

方铭杰[1] 崔 璨[1] 杨磊磊[1] 赵晏铭[1] 陶余浪[1] 董 浩[1]
闫 琰[1,2] 刘伟国[1,2]

（1. 西北农林科技大学林学院，陕西 杨凌 712100；2. 陕西秦岭森林生态系统国家野外科学观测研究站，陕西 杨凌 712100）

**摘要:【目的】**森林郁闭度是表征森林结构与生长状况的关键指标。定量评估东北地区森林郁闭度现状和潜在郁闭度，并结合森林净初级生产力（NPP）的变化趋势评估其退化特征，对区域森林质量精准提升及气候变化应对具有重要意义。**【方法】**基于 11 472 幅 0.5 m 分辨率森林郁闭度数据与实测样地数据，构建多林型随机森林模型，在 100 m 栅格尺度上反演东北地区森林郁闭度的空间分布。在此基础上，结合气候、土壤与地形因子，通过梯度分箱与条件筛选方法估算潜在郁闭度，并结合 NPP 呈下降趋势区域，识别与评估森林退化的范围与程度。**【结果】**随机森林模型验证集的 $R^2$ 为 0.567 ~ 0.774，拟合精度较高。东北地区森林郁闭度在空间上总体呈现“北低南高”的分布格局，值变化范围为 0.264 ~ 0.976，天然林与人工林的平均郁闭度分别为 0.716 和 0.689。在省级尺度上，吉林省的天然林与人工林森林郁闭度平均值最高（分别为 0.738 和 0.717），黑龙江省和内蒙古自治区相对较低。统计分析表明，不同起源（天然林/人工林）及不同林型间的郁闭度差异显著（$p < 0.001$）。研究识别出东北地区存在不同程度退化区域的森林总面积为 993.599 万 $hm^2$，占森林总面积的 24.27%。**【结论】**东北地区森林郁闭度整体水平较高且其值变化范围也较广，天然林优于人工林，阔叶林优于混交林与针叶林，但仍存在较大面积的退化现象。本研究以遥感光谱数据、气候数据和土壤地形数据为关键参数，并基于潜在郁闭度的估算和 NPP 变化趋势，能够准确、快速、全面地识别东北地区森林退化情况，为森林结构现状和未来进一步的森林功能定量研究提供了新的方法和思路。

**关键词：**东北地区；郁闭度；潜在郁闭度；不同林型；随机森林模型；退化程度

**中图分类号：**S758 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2026)04−0046−18

**引文格式：**方铭杰，崔璨，杨磊磊，等. 基于潜在郁闭度估算和 NPP 趋势的东北地区森林退化评估［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：46−63. Fang Mingjie, Cui Can, Yang Leilei, et al. Analysis of forest degradation characteristics in Northeast China based on spatial distribution of canopy closure and NPP decreasing trend［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 46−63.

# Analysis of forest degradation characteristics in Northeast China based on spatial distribution of canopy closure and NPP decreasing trend

Fang Mingjie[1] Cui Can[1] Yang Leilei[1] Zhao Yanming[1] Tao Yulang[1] Dong Hao[1]
Yan Yan[1,2] Liu Weiguo[1,2]

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;
2. Qinling National Forest Ecosystem Research Station, Yangling 712100, Shaanxi, China)

**Abstract:** ［**Objective**］Forest canopy closure is a key indicator characterizes forest structure and growth conditions. Quantitatively assessing the current and potential canopy closure of forests in Northeast China, and dynamically evaluating degradation characteristics in conjunction with net primary productivity (NPP), is of great significance for enhancing regional forest quality with precision and for responding to climate

**收稿日期:** 2025−07−29 **修回日期:** 2025−09−03

**基金项目:** 国家重点研发计划（2023YFF1304001-04）。

**第一作者:** 方铭杰。主要研究方向：森林生态学。Email: fmj123@nwafu.edu.cn 地址：712100 陕西省咸阳市杨陵区邰城路 3 号西北农林科技大学林学院。

**责任作者:** 刘伟国，副研究员，博士生导师。主要研究方向：全球森林资源生态学。Email: liuweiguo110@nwafu.edu.cn 地址：同上。

**本刊网址:** https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

change. [**Method**] Based on 11 472 forest canopy closure datasets at 0.5 m resolution, field plot measurements, a multi-forest-type random forest model was constructed to map the spatial distribution of forest canopy closure in Northeast China at a 100 m grid scale. Building on this foundation, by integrating climatic, soil, and topographic factors, potential canopy closure was estimated using gradient binning and conditional screening methods. Combined with areas exhibiting a decline trend in NPP, the extent and degree of forest degradation were identified. [**Result**] The $R^2$ of the random forest model ranged from 0.567 to 0.774, indicating a relatively high fitting accuracy. The spatial pattern of forest canopy closure in Northeast China generally exhibited a "low in the north and high in the south" distribution, with values ranging from 0.264 to 0.976. The average canopy closure values for natural and plantation forests were 0.716 and 0.689, respectively. At the provincial scale, Jilin showed the highest mean canopy closure for both natural and plantation forests (0.738 and 0.717, respectively), whereas Heilongjiang and Inner Mongolia exhibited comparatively lower values. Statistical analysis revealed that canopy closure differed significantly between forest origins (natural/plantation) and among forest types ($p < 0.001$). The study identified a total of 9.936 million hectares of forest experiencing varying degrees of degradation in Northeast China, accounting for 24.27% of the region's total forest area. [**Conclusion**] Northeast China's forests generally exhibit high canopy closure with a wide range of values. Natural forests outperformed plantations, and broadleaf forests surpassed mixed and coniferous forests. However, substantial areas of degradation still existed. This study employed remote sensing spectral data, climate data, and soil and topographic data as key parameters, and, based on estimates of potential canopy closure and NPP trends, was able to accurately, rapidly, and comprehensively identify forest degradation in Northeast China. It provides a novel approach and perspective for assessing current forest structure and for further quantitative studies of forest functions in the future.

**Key words:** Northeast China; canopy closure; potential canopy closure; forest types; random forest model; degradation severity

森林是地球生态系统的重要组成部分，具有不可替代的生态、经济和社会价值[1]。然而，近几十年来，全球气候变化显著改变了中高纬度地区森林的分布格局、生长过程和结构特征，中国东北地区作为气候变化敏感区，气候变暖的幅度已超过全球平均水平，其森林生态系统受到的影响尤为剧烈[2]。气候变化导致的物候期改变、病虫害加剧及火灾频发，正严重威胁着区域森林的健康与稳定[3−5]。为缓解气候变化带来的负面影响，我国在东北森林地区实施了"三北"防护林工程、天然林保护等一系列重大生态工程[6−7]。森林郁闭度(canopy closure)作为衡量森林结构的重要指标，能直观地反映区域森林的健康状况，是评估森林对干扰响应与生态工程成效的关键参数之一[8]。森林潜在郁闭度(potential canopy closure)作为郁闭度指标的延伸，能够进一步揭示森林生态系统的承载阈值。此外，在森林生态系统中，净初级生产力(net primary productivity，NPP)为单位面积植被在单位时间内吸收光合有机物的净量，反映了植被在自然环境条件下的生产能力，其时空动态也是评估森林稳定性和生活力的关键依据[9]。因此，对东北地区的森林郁闭度现状及潜在郁闭度进行估算，并结合 NPP 时空动态分析，有助于林业经营与资源管理以及森林生态保护与恢复的实践。

目前，基于遥感(被动微波、多光谱影像和激光雷达/LiDAR 等)数据反演森林郁闭度已成为高效且主流的手段[10−11]。例如，王鹏杰等[12]基于无人机激光雷达和高分六号数据，利用 Li-Strahler 几何光学模型估测了云南省普洱市思茅区森林郁闭度；魏智海等[13]基于 GF-1 PMS 多光谱影像构建了多个森林郁闭度的估测模型，量化了内蒙古自治区东北部柴河林业局的森林郁闭度现状。尽管相关研究已取得显著进展，但多集中于林场或市县小尺度，在区域尺度上的量化能力仍具较大的不确定性。机器学习算法(如随机森林、支持向量机和人工神经网络等)凭借强大的非线性拟合能力，为区域尺度郁闭度的高精度模拟提供有效解决方案[14]。然而，机器学习模型高度依赖训练数据的数量与质量[15]。因而，为能更具代表性地模拟相对大尺度地区(如整个东北地区)的森林郁闭度现状，数量足够且精度较高的郁闭度数据是必要的。因此，本研究以均匀布点的方式，对整个东北地区进行极高空间分辨率(Google Earth)影像的收集，获取数量足够且精度高的森林郁闭度

数据，从而更加合理地评估东北地区森林郁闭度的现状。

尽管现有手段已较为成熟，但对于东北地区不同起源（天然林与人工林）以及它们不同林型（如针阔混交林、落叶阔叶林，常绿针叶林等）的森林郁闭度估算的研究仍然较为匮乏。天然林与人工林在物种组成、生物多样性、水源涵养能力和固碳能力等方面存在显著差异[16−18]，对气候变化的响应与退化机制也不尽相同。若不加以区分，则易掩盖其实际退化状况。因此，本研究量化天然林与人工林以及不同林型的森林郁闭度现状与潜力，并评估其退化程度，可为针对不同类型森林制定差异化经营策略提供依据，从而有助于实施更精准有效的管理，促进森林生态系统恢复[19]。综上所述，本研究的目的是：（1）基于极高空间分辨率遥感影像所获取的数量足够且精度高的森林郁闭度数据，构建多个天然林与人工林及不同林型的随机森林机器学习模型；（2）基于随机森林模型与遥感输入数据，在 100 m 栅格尺度上精准刻画东北地区森林郁闭度的空间分布格局；（3）通过梯度分箱法估算潜在郁闭度，结合 NPP 变化趋势，构建基于“郁闭度偏离度与 NPP 趋势分析”的森林退化评估框架，从而定量识别森林退化区域和程度，为东北森林质量的精准提升提供科学依据。

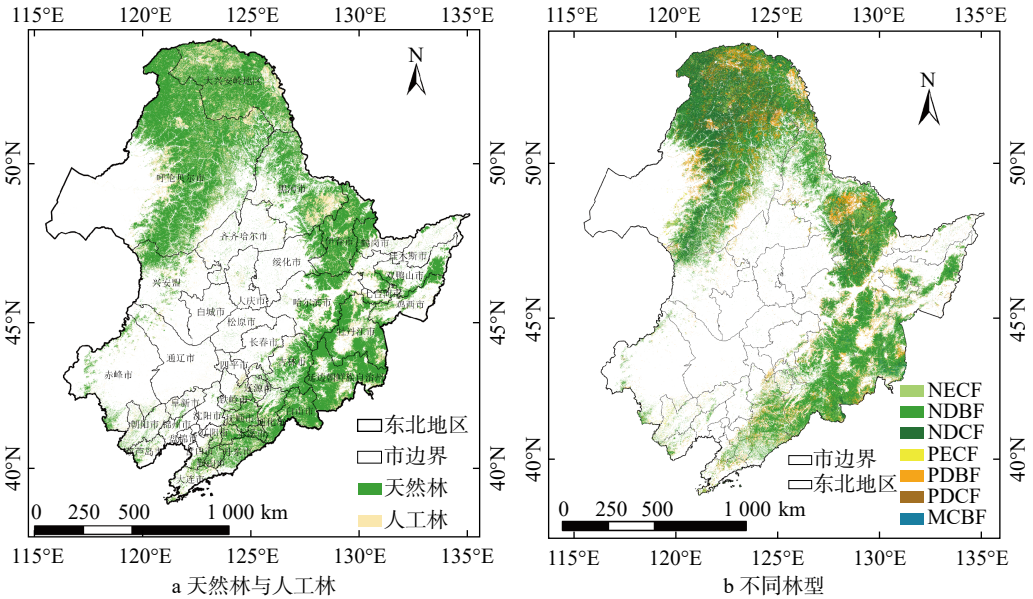
## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

我国东北地区地域辽阔，总面积约 126 万 km$^2$（约占全国领土的 12.05%），地理坐标为 38°42′36″ ~ 53°33′36″N，115°31′12″ ~ 135°05′24″E（图 1）。行政范围涵盖 4 个省份（黑龙江、吉林、辽宁和内蒙古部分地区）[20]。该区域兼具温带季风和温带大陆性气候特征，四季分明，夏季温热多雨，冬季寒冷干燥，年平均降水量为 430.7 ~ 678.7 mm。区域内地貌类型丰富，地形起伏明显，显著影响着森林植被的空间分布格局与生长环境[21]。作为中国最大的天然林区之一，东北森林主要分布于大兴安岭、小兴安岭和长白山 3 大林区，主要森林类型包括针叶林、阔叶林和针阔混交林等（图 1）。该区域也是“三北”防护林、天然林保护工程等生态恢复工程实施的重要区域[22−24]。

### 1.2 数据来源

本研究采用随机森林模型估算东北地区的森林郁闭度。整体数据主要分为因变量与自变量两部分。天然林与人工林的分布数据（图 1a）来源于 https://doi.org/10.34133/remotesensing.0204[25]，不同林型的分布数据（图 1b）来源于 https://doi.org/10.5281/zenodo.14729665[26]。天然林与人工林及它们不同林型分别为天然常绿针叶林（natural evergreen coniferous forests，NECF）、天然落叶阔叶林（natural deciduous broadleaf forests，NDBF）、天然落叶针叶林（natural deciduous coniferous forests，NDCF）、人工常绿针叶林（planted evergreen coniferous forest，PECF）、人工落叶阔叶林（planted deciduous broadleaf forests，PDBF）、人工落叶针叶林（planted deciduous coniferous forests，PDCF）以及针阔混交林（Mixed coniferous and broad-leaved forest，MCBF）。行政边界矢量数据来源于自然资源部标准地图服务系统




a 天然林与人工林　　b 不同林型

NECF 为天然常绿针叶林，NDBF 为天然落叶阔叶林，NDCF 为天然落叶针叶林，PECF 为人工常绿针叶林，PDBF 为人工落叶阔叶林，PDCF 为人工落叶针叶林，MCBF 为针阔混交林。下同。

图 1 研究区域及森林分布图

Fig. 1 Study area and distribution of forest

(http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/download.html),审图号为GS(2019)1822 号。

因变量数据为森林郁闭度实际值,来源于 11 472 幅面积为 1 $hm^2$ 的极高分辨率(0.5 m × 0.5 m) Google Earth 影像(https://earth.google.com/web/)。

自变量数据包括 6 个遥感指数、9 个植被指数、19 个生物气候变量和高程数据。6 种遥感指数为 Sentinel-2 影像自带的原始波段,分别为蓝色波段 B2、绿色波段 B3、红色波段 B4、近红外波段 B8、短波红外 1 B11 和短波红外 2 B12。9 种植被指数分别为归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)[27]、土壤调节植被指数(soil-adjusted vegetation index, SAVI)[28],修正型土壤调节植被指数(modified soil adjusted vegetation index, MSAVI)[29]、增强植被指数(enhanced vegetation index, EVI)[30]、比值植被指数(ratio vegetation index, RVI)[31]、植被因子指数(vegetative index, VEG)[32]、超绿指数(excess green index, EXG)[32]、超绿超红差分指数(excess green minus excess red index, EXGR)[32]和绿叶指数(green leaf index, GLI)[32]。遥感指数和植被指数均通过 Google Earth Engine(GEE)计算并下载。

19 个生物气候变量(BIO1 ~ BIO19)基于月最高气温、月最低气温和月总降水量 3 个气候因子,按照 WorldClim(https://www.worldclim.org/)提供的定义进行计算(表 1)。温度和降水数据来源于东北地区的 282 个气象站点数据,采用克里金插值法转为栅格数据。数据来源于中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(http://data.cma.cn/)。

高程数据(30 m 分辨率)来源于 NASA(https://www.earthdata.nasa.gov/)。利用 ArcGIS Pro 3.0.1 软件重采样至 100 m 分辨率。

**表 1　19 个生物气候变量**

Tab. 1　Nineteen bioclimatic variable

| 缩写 | 全称 | 单位 |
|---|---|---|
| BIO1 | 年平均气温 | ℃ |
| BIO2 | 平均气温日较差 | ℃ |
| BIO3 | 等温性 | |
| BIO4 | 气温季节性变动系数 | |
| BIO5 | 最热月份最高温度 | ℃ |
| BIO6 | 最冷月份最低温度 | ℃ |
| BIO7 | 气温年较差 | ℃ |
| BIO8 | 最湿季度平均温度 | ℃ |
| BIO9 | 最干季度平均温度 | ℃ |
| BIO10 | 最暖季度平均温度 | ℃ |
| BIO11 | 最冷季度平均温度 | ℃ |
| BIO12 | 年降水量 | mm |
| BIO13 | 最湿月份降水量 | mm |
| BIO14 | 最干月份降水量 | mm |
| BIO15 | 降水量季节性变化 | mm |
| BIO16 | 最干季度降水量 | mm |
| BIO17 | 最湿季度降水量 | mm |
| BIO18 | 最暖季度降水量 | mm |
| BIO19 | 最冷季度降水量 | mm |

### 1.3　数据处理与方法

#### 1.3.1　森林郁闭度样本库构建

为兼顾地理空间均衡性和生态代表性,本研究采用均匀布点策略获取森林郁闭度的数据。以 0.05°(约 5 km)为间隔对研究区进行均匀布点,共获取约 25 000 幅面积为 1 $hm^2$、分辨率为 0.5 m 的 Google Earth 高分影像。每幅影像均经过人工目视判读,筛选标准包括清晰度良好、拍摄时间不早于 2018 年、无空白值和形状无变形等,最终保留 11 472 幅影像(天然林 8 980 幅,人工林 2 492 幅)用于提取森林郁闭度。使用 ArcGIS Pro 3.0.1 软件的“重分类”工具对每幅影像的 RGB 值进行分配,并手动调整每幅影像的阈值,以确保识别的森林和目视观察到的森林达到最佳匹配。

为验证该方法的可行性,本研究从国家科学生态数据中心(https://www.nesdc.org.cn/)获取了“2014—2019 年东北森林国家级保护区及毗邻区植物群落和土壤生物调查样地生境”数据集中的 589 个实测样地数据,并构建郁闭度实测值与基于目视解译的森林郁闭度的线性模型(图 2)。其中,每幅影像的森林郁闭度定义为阈值范围内提取的像素总个数与整幅影像像素总数的比值,并将其视为森林郁闭度的实际值。

#### 1.3.2　随机森林模型构建与郁闭度估算

基于上述 11 472 幅森林郁闭度数据与 35 个变量因子,分别构建天然林、人工林及其不同林型的随机森林模型。模型通过 R version 4.4.2 中的 randomForest 包建立,经变量优选与参数调整后,重新构建优化后的随机森林模型。

利用本研究中经过变量筛选与参数优化的随机森林模型,评估东北地区 2023 年 100 m × 100 m 栅格尺度的森林郁闭度。所有植被指数和遥感指数变量(取 4—9 月均值)均来源于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)的哨兵 2 卫星遥感数据,重采样至 100 m × 100 m,云量阈值设为 30%。

#### 1.3.3　森林退化程度识别

参考《全国生态状况调查评估技术规范——生

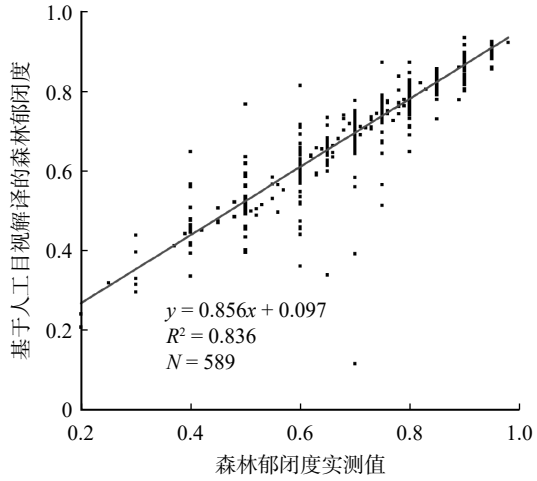



图 2 实测样地森林郁闭度与基于 Google Earth 影像目视解译的森林郁闭度的结果验证

Fig. 2 Validation of the measured canopy closure in the sample plot against the forest canopy closure interpreted visually based on Google Earth imagery

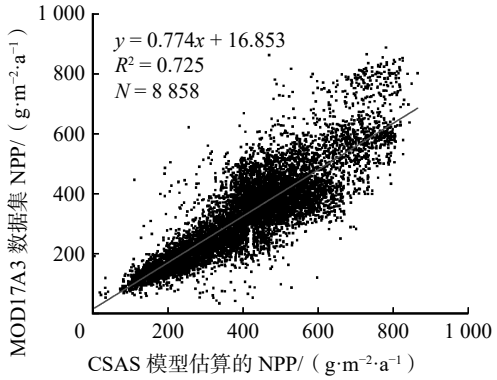



图 3 估算的 NPP 与 MOD17A3 产品的比较

Fig. 3 Comparison of estimated NPP values with the MOD17A3 dataset

态问题评估》(HJ 1174—2021)，森林退化是指在不合理利用下，森林生态系统发生逆行演替且生产力持续下降的过程。本研究以 2012—2023 年东北地区森林净初级生产力(net primary productivity，NPP)的变化趋势，并结合森林退化指数(forest degradation index，$I_{FD}$)(式 1)，将东北地区森林的退化程度分为轻度退化、中度退化和重度退化 3 个等级。具体分级为：在 NPP 呈下降趋势的前提下，轻度退化为 75% ≤ $I_{FD}$ < 90% 的森林，中度退化为 60% ≤ $I_{FD}$ < 75% 的森林，重度退化为 $I_{FD}$ < 60% 的森林。

$$I_{FD} = \frac{C_a}{C_b} \times 100\% \quad (1)$$

式中：$C_a$为森林现状郁闭度，$C_b$为森林潜在郁闭度。

东北地区森林 NPP 的估算基于朱文泉优化后的 CASA 模型[33]所实现，计算所需的 NDVI 数据来源于 MOD13Q1 产品(https://search.earthdata.nasa.gov/)，气候数据(包括降水、气温和太阳辐射等)来源于或衍生自 282 个气象站点数据(见 1.2 数据来源)。CASA 模型估算 NPP 的验证参考李传华[34]和 Chen[35]等文献报道，采用相对验证法，通过随机布点(10 000 个随机点，空值删除后剩余 8 858 个验证点)与 MOD17A3 遥感产品数据进行线性回归分析对比，结果表明 $R^2$ = 0.725，满足后续研究需求(图 3)。此外，基于 CASA 模型估算的 NPP 数据，本研究采用 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 检验法，分析东北地区森林 NPP 的变化趋势，从而确定 2012—2023 年 NPP 呈下降趋势的区域。

为估算东北地区森林潜在郁闭度，本研究基于气候因子(年降水量和年均温)、土壤因子(pH、有机碳、沙粒和黏粒含量)及地形因子(海拔、坡度、坡向)，采用梯度分箱法对各环境变量设置 3 个梯度。以各梯度组合内郁闭度前 5% 高值的均值作为潜在郁闭度，相关分析于 Python 3.12 中实现。气候数据源自 282 个气象站，土壤数据来自国家地球系统科学数据中心(http://soil.geodata.cn，分辨率 90 m，重采样至 100 m)，地形数据由 DEM 衍生获取。

### 1.4 统计分析

#### 1.4.1 随机森林模型拟合效果评估

为评估不同林型的随机森林模型拟合效果，本研究基于 R version 4.4.2 编程软件中的“Predict”函数，利用不同林型各自的验证集(30%)来分析森林郁闭度实际值与模拟值之间的关系。将森林郁闭度的实际值与模拟值输入至 Orgin 2024 软件中，使用“分析”模块中的“线性拟合”工具对森林郁闭度实际值与模拟值进行线性回归分析，并计算决定系数($R^2$)[36]，以评价不同林型森林郁闭度估算的随机森林模型的拟合效果。

#### 1.4.2 森林郁闭度分布数据差异的统计分析

基于所构建的多种林型随机森林模型，可获得天然林与人工林以及不同林型的森林郁闭度分布数据。为探讨这些不同林型的森林郁闭度数据在值分布情况上是否存在显著性差异，本研究采用 $t$ 检验、Kruskal-Wallis 检验以及事后 Dunn 检验进行比较分析。

针对天然林与人工林的森林郁闭度分布数据，采用“两独立样本 $t$ 检验”以明确东北地区天然林与人工林森林郁闭度的差异情况。对于 7 种不同林型的森林郁闭度分布数据，则采用 Kruskal-Wallis 检验与事后 Dunn 检验进行差异分析。其中，Kruskal-Wallis 检验用于判断 7 种林型的森林郁闭度分布数据整体是否存在显著差异；若整体差异显著，则进一步采用事后 Dunn 检验进行两两比较分析[37−38]。两类检验方法均以 $p$ 值表示差异显著性；$p$ < 0.001 表

示极显著差异，0.001 ≤ $p$ < 0.01 表示高度显著差异，0.01 ≤ $p$ < 0.05 表示显著差异，$p$ ≥ 0.05 表示无显著差异。上述检验方法均在 R version 4.4.2 中完成。

## 2　结果与分析

### 2.1　随机森林模型优化与精度验证

基于 out of bag(OOB 袋)外误差估计对模型参数进行优化。结果显示，当输入全变量时，最优参数组合为 $m_{try}$ = 4、$n_{tree}$ = 100; 经变量筛选并重构模型后，最优参数调整为 $m_{try}$ = 2、$n_{tree}$ = 100(表 2)。验证集评估表明，各林型模型的决定系数 $R^2$ 介于 0.567(PDCF) ~ 0.774(MCBF)之间(图 4)。表明本研究构建的多个天然林与人工林及其不同林型的随机森林模型具备良好的森林郁闭度模拟能力。

### 2.2　天然林与人工林郁闭度空间分布

随机森林模型模拟结果表明，东北地区天然林与人工林的郁闭度存在极显著差异($p$ < 0.001，图 5)。天然林郁闭度的均值为 0.716，值变化范围为 0.285 ~ 0.976; 人工林均值为 0.689，值变化范围为 0.264 ~ 0.924。尽管均值存在差异，两者的郁闭度整体分布模式相似，主要集中分布于 0.5 ~ 0.8 之间，低值和高值所占比例都较低(图 5)。

空间上，天然林的分布面积显著大于人工林，但两者的郁闭度空间分布格局整体相似，均呈北低南高的趋势(图 6)。省级尺度上，吉林省与辽宁省的天然林与人工林郁闭度平均值均高于黑龙江省和内蒙古自治区，其中吉林省的天然林与人工林郁闭度平均值均最高，分别为 0.738 和 0.717。黑龙江省的人工林郁闭度平均值(0.680)略低于内蒙古自治区(0.684)，但其天然林郁闭度(0.712)高于内蒙古自治区(0.704)(表 3)。此外，天然林郁闭度的最大值(0.976)出现在吉林省白山市，人工林郁闭度的最大值(0.924)位于吉林省吉林市(附表 1)。

### 2.3　不同林型郁闭度的空间分布

不同林型的森林郁闭度值的分布整体呈现相似性，主要集中分布于 0.5 ~ 0.8 之间，但具体的郁闭度水平存在极显著差异(图 7 和表 4，$p$ < 0.001)。落叶阔叶林的郁闭度普遍高于落叶针叶林与常绿针叶林，其中，NDBF 的郁闭度平均值最高(0.721)。PDCF 和 NECF 的郁闭度水平相对较低，而 PECF 在所有林型中平均值最低(0.664)。此外，MCBF 的郁闭度值分布范围最窄，但整体水平较高(0.467 ~ 0.863)(图 7)。

总体而言，东北地区森林郁闭度的空间分布呈现北低南高的特征，天然林与人工林中同一林型的郁闭度空间分布具有相似性，如 NDBF 和 PDBF(图 8)。阔叶林的高值区主要集中于研究区南部，而针叶林的高值区则更靠近研究区中部和北部。MCBF 仅分布于长白山脉和小兴安岭地区，其郁闭度变化不显著(图 8)。

东北地区郁闭度的平均值为 0.711，不同林型的郁闭度平均值对比显示，阔叶林 > 混交林 > 针叶林(表 5)。此外，在省级分布水平上，不同林型森林郁闭度的差异较为明显，其中吉林省与辽宁省的森林郁闭度平均值显著高于黑龙江省和内蒙古自治区。前两者的 NDBF 森林郁闭度水平较高，而黑龙江省的 MCBF 森林郁闭度水平较高(表 5)。

在市级水平上，不同森林类型郁闭度的平均值也存在差异。MCBF 的郁闭度平均值在鹤岗市最高(0.751)，NECF 在通化市最高(0.716)，NDBF 在营口市最高(0.774)，NDCF 在伊春市最高(0.755)，PECF 在大兴安岭地区最高(0.740)，PDBF 在通化市最高(0.745)，PDCF 在通化市最高(0.682)(附表 2)。

### 2.4　森林潜在郁闭度及退化程度

#### 2.4.1　潜在郁闭度与 NPP 趋势

基于气候、土壤和地形等环境因素的梯度分箱

**表 2　不同林型的随机森林模型参数与重要变量**

Tab. 2　Parameters and important variables of Random Forest models for different forest types

| 林型 | 第一次模型参数调整 | 重要变量 | 第二次模型参数调整 |
|---|---|---|---|
| PDBF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | NDVI, RVI, EXG, BIO6, BIO16, BIO1, VEG, SAVI, BIO10, BIO18, EXGR, B12 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| PDCF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | RVI, EVI, NDVI, VEG, MSAVI, SAVI, EXGR, GLI, EXG, B4, B12, B2 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| PECF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | RVI, NDVI, GLI, SAVI, MSAVI, EXG, EXGR, EVI, VEG, BIO6, BIO5, BIO2 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| NDBF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | NDVI, BIO10, BIO1, BIO2, RVI, BIO12, BIO14, BIO16, BIO18, BIO13, BIO6, BIO19 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| NDCF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | NDVI, BIO1, RVI, BIO14, BIO19, B4, DEM, BIO8, BIO10, BIO18, BIO11, BIO6 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| NECF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | RVI, VEG, NDVI, EXG, MSAVI, SAVI, GLI, BIO1, EVI, EXGR, BIO5, B8 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |
| MCBF | $m_{try}$ = 4<br>$n_{tree}$ = 100 | RVI, NDVI, MSAVI, SAVI, EVI, GLI, EXG, EXGR, VEG, BIO3, BIO14, B4 | $m_{try}$ = 2<br>$n_{tree}$ = 100 |

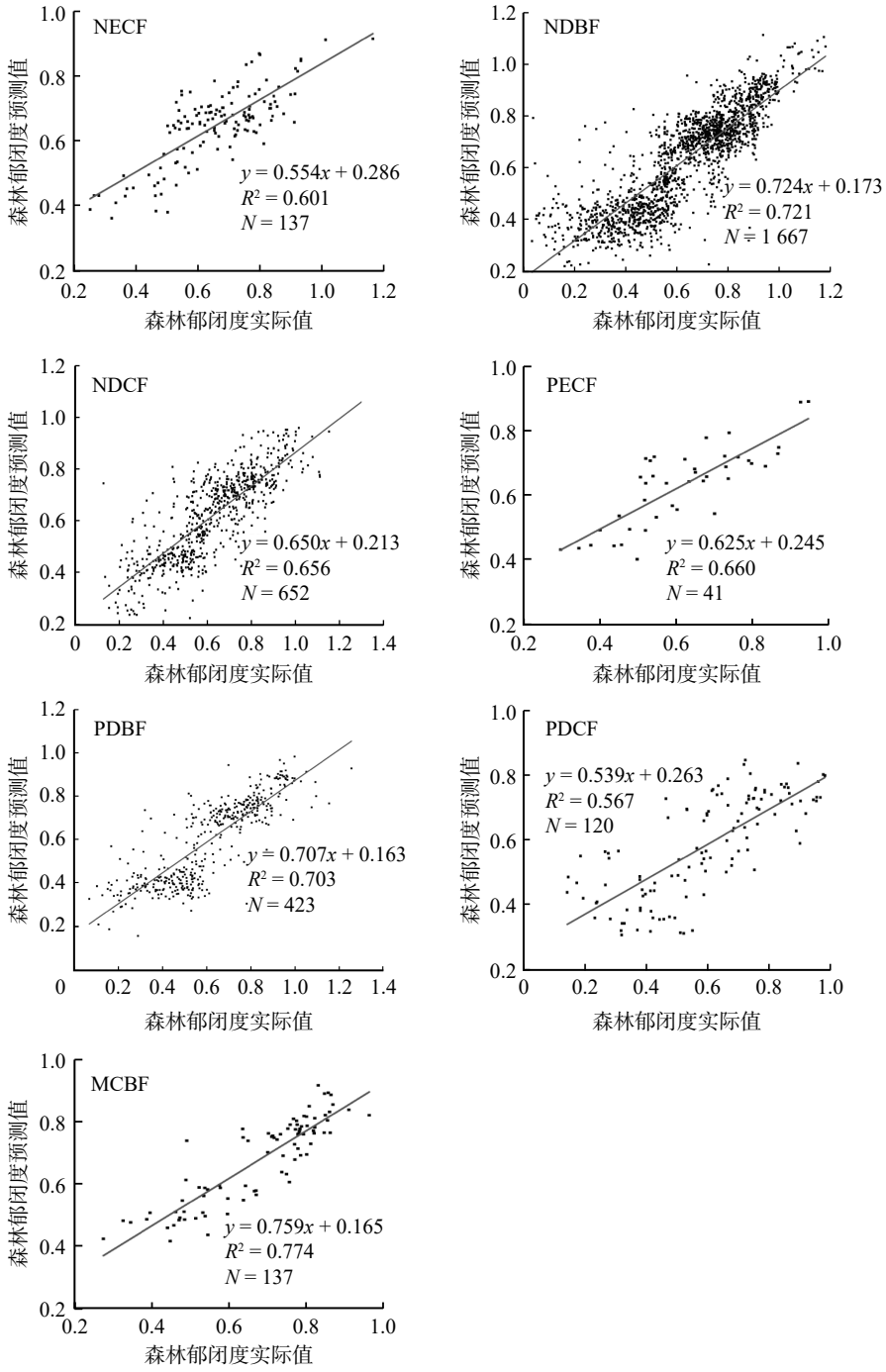
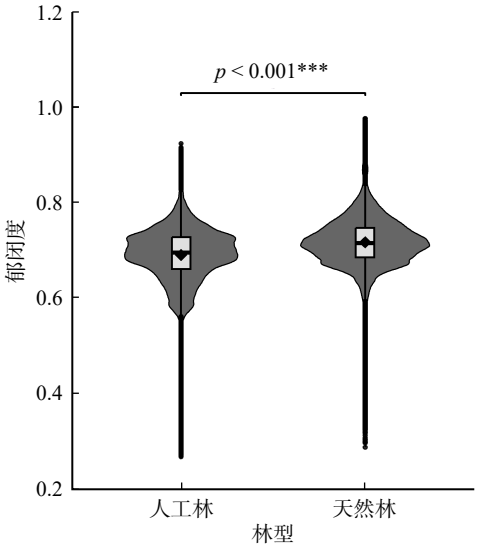



图 4 基于验证集郁闭度数据的随机森林模型结果验证

Fig. 4 Validation of random forest model based on field measured canopy closure data

法，本研究绘制了东北地区不同林型在 100 m 栅格尺度的潜在郁闭度分布图。结果显示，东北地区森林潜在郁闭度的值的分布范围为 0.714 ~ 0.880，整体空间分布与森林郁闭度相似，呈北低南高的空间分布格局(图 9)。其中，MCBF 的潜在郁闭度值分布范围最窄，为 0.773 ~ 0.787，与郁闭度现状的值的分布情况相似(图 8 和图 9)。NDBF 的潜在郁闭度值的分布范围最广，为 0.780 ~ 0.880。森林潜在郁闭度最低值 0.714 出现在 PDCF，但明显高于森林郁闭度现状的低值分布情况(图 8 和图 9)。在具体分布上，与郁闭度现状同样相似的为阔叶林的潜在郁闭度高值集中在研究区南部，而针叶林的高值更靠近研究区中部，NDCF 潜在郁闭度的低值则在研究区西北部呈现显著集中(图 9)。此外，基于 Theil-Sen Median 斜率估计和 Mann-Kendall 检验法对 2012—2023 年东北地区森林 NPP 的趋势分析结果表明，总体上，10 年间森林 NPP 呈下降趋势的区域在整个东北地区分布广泛，南北差异不显著。具体而言，森林 NPP 下降趋势的区域主要集中在研究区的西北和东南部(图 9)。




***为极显著差异。下同。

图 5　东北地区天然林与人工林郁闭度分布

Fig. 5　Canopy closure distribution of natural forests and plantations in Northeast China

### 2.4.2　森林退化区域及程度

基于东北地区森林郁闭度现状和潜在郁闭度的对比，结合 NPP 呈下降趋势的区域，本研究对东北地区森林的退化区域进行了识别。轻度退化的森林集中分布在研究区北部和东南部分区域；中度退化的森林主要集中在北部和西北部区域，且在东部和南部区域呈现较少的集中分布；重度退化的森林则以零散形式分布，仅在研究区北部有部分聚集(图 10)。总体而言，东北地区森林退化现象较为突出。

基于森林退化区域栅格数据的统计结果，东北地区森林退化区域的总面积为 993.599 万 $hm^2$，占东北地区森林总面积的 24.27%(表 5 和表 6)。其中，轻度退化的森林面积最大，为 969.814 万 $hm^2$，占总退化面积的 97.60%，占森林总面积的 23.69%；重度退化的森林面积最小，为 1.744 万 $hm^2$，分别占总退化面积和森林总面积的 0.18% 和 0.04%。此外，在省

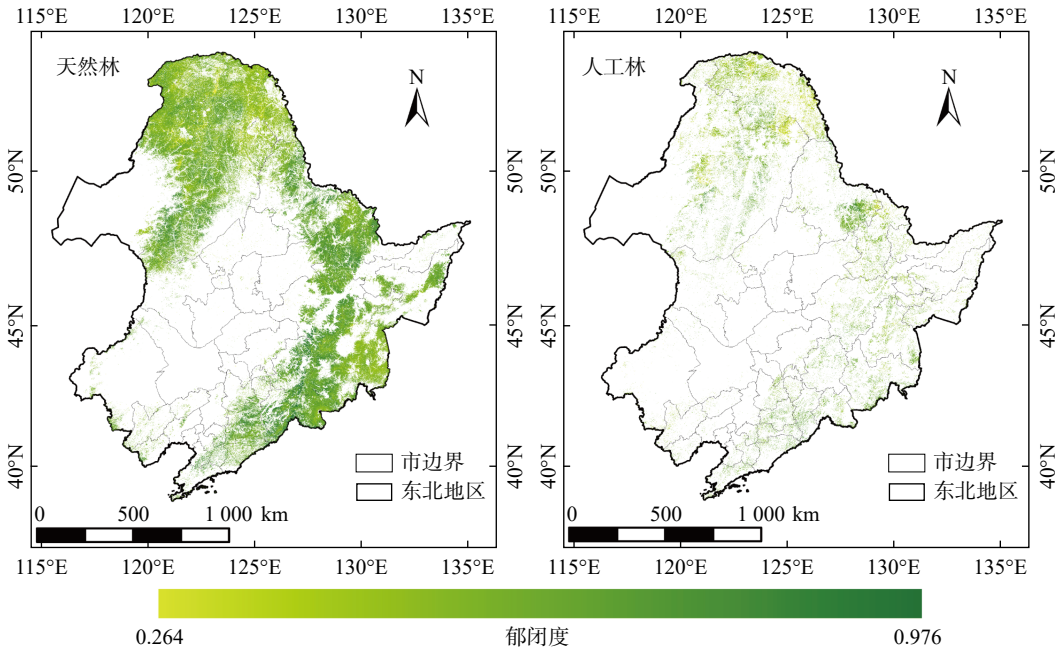



图 6　东北地区天然林与人工林郁闭度的空间分布

Fig. 6　Spatial distribution of canopy closure in natural forests and plantations in Northeast China

**表 3　东北地区天然林与人工林在不同省份的森林郁闭度**

Tab. 3　Provincial-level statistics of canopy closure in natural forests and plantations within Northeast China

| 森林类型 | 省份 | 分布面积/$10^4$ $hm^2$ | 郁闭度 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 最小值 | 最大值 | 平均值 |
| 天然林 | 黑龙江省 | 1 482.547 | 0.285 | 0.925 | 0.712 |
| | 吉林省 | 607.469 | 0.299 | 0.976 | 0.738 |
| | 辽宁省 | 241.193 | 0.329 | 0.950 | 0.737 |
| | 内蒙古自治区 | 1 034.811 | 0.294 | 0.916 | 0.704 |
| 人工林 | 黑龙江省 | 356.595 | 0.264 | 0.900 | 0.680 |
| | 吉林省 | 89.392 | 0.279 | 0.924 | 0.717 |
| | 辽宁省 | 68.030 | 0.287 | 0.896 | 0.714 |
| | 内蒙古自治区 | 186.179 | 0.269 | 0.912 | 0.684 |

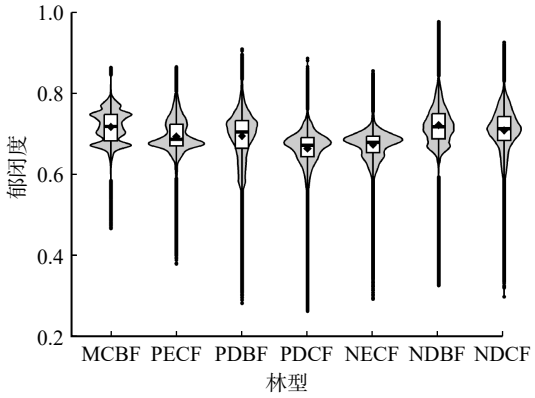



图 7 东北地区不同林型的郁闭度分布

Fig. 7 Canopy closure distribution of different forest types in Northeast China

**表 4 基于 Kruskal-Wallis 检验与事后 Dunn 检验的不同林型森林郁闭度数据分布差异的显著性分析**

Tab. 4 Significance analysis of canopy closure distribution variations across forest types using Kruskal-Wallis with Dunn's post-hoc tests

| 林型 | 对比林型 | *p*值 |
|---|---|---|
| 所有林型 | | 0.000 |
| MCBF | PECF | 0.000 |
| | PDBF | 0.000 |
| | PDCF | 0.000 |
| | NECF | 0.000 |
| | NDBF | 0.000 |
| | NDCF | 0.000 |
| PECF | PDBF | 0.000 |
| | PDCF | 0.000 |
| | NECF | 0.000 |
| | NDBF | 0.000 |
| | NDCF | 0.000 |
| PDBF | PDCF | 0.000 |
| | NECF | 0.000 |
| | NDBF | 0.000 |
| | NDCF | 0.000 |
| PDCF | NECF | 0.000 |
| | NDBF | 0.000 |
| | NDCF | 0.000 |
| NECF | NDBF | 0.000 |
| | NDCF | 0.000 |
| NDBF | NDCF | 0.000 |

注：为降低7个栅格数据两两比较的巨大计算量，在保证结果合理性的前提下，对每个林型的郁闭度栅格数据随机抽取10万个样本，共计70万个样本进行分析。

级尺度上，不同退化程度的森林面积差异明显。内蒙古自治区森林退化面积最大，为 385.321 万 $hm^2$，占总退化面积的 38.78%；黑龙江省的森林重度退化面积最大，为 0.843 万 $hm^2$，占总重度退化面积的 47.52%。相比之下，辽宁省的森林退化面积最小，为 55.518 万 $hm^2$，占总退化面积的 5.59%（表 6）。

## 3 讨 论

### 3.1 郁闭度的随机森林模型

本研究构建了多个不同林型的随机森林模型。在模型优化过程中，模型参数 $m_{try}$ 和 $n_{tree}$ 一致，但重要变量的差异较为显著。总体规律为天然林的重要变量中生物气候变量占比较高，而人工林的重要变量中植被指数变量的占比较高（表 2）。这种差异可能与森林结构的不同有关。例如，在水平格局方面，人工林通常呈现规则排列，而天然林具有较高的异质性，树木冠幅大小差异显著[8,39]。此外，考虑到部分植被指数（如 NDVI）可能受林冠饱和效应的影响而降低预测精度[40]，植被指数可能更适用于人工林的林冠结构分析。

本研究构建的多林型随机森林模型对森林郁闭度的总体模拟精度 $R^2$ 为 0.604 ~ 0.774，显著高于王迪[41]（$R^2$ = 0.489）及王蕊等[42]（$R^2$ = 0.598）基于多光谱影像的估算结果，与智献坡等[43]（$R^2$ = 0.682）的结果相近，但略低于杨晓慧等[44]与竹亮[45]基于无人机影像/LiDAR 的估算结果（$R^2$ = 0.725 ~ 0.798）。这种差异可能与后者数据的空间分辨率更高、对结构探测更精确有关。模型模拟结果显示，东北地区森林郁闭度平均值为 0.711（值的变化范围 0.264 ~ 0.976），略高于邱赛等[46]在汪清林区的统计结果（0.56），低于王迪[41]在帽儿山林场的估算值（0.8），与刘盼[47]在富尔河流域的范围（0.20 ~ 0.92）接近。区域气候差异及研究范围的不同可能是导致结果存在一定差异的主要原因。此外，本研究选取的植被指数与遥感指数聚焦于 4—9 月进行郁闭度估算，更符合森林生长季生物量积累的特征[48]，有助于支持森林功能评估研究。总体而言，本研究构建的天然林与人工林及其不同林型的随机森林模型能够较真实地反映实际郁闭度，可为森林资源监测与管理提供准确实时的数据支持。

### 3.2 森林郁闭度

以栅格尺度探究天然林和人工林及其不同林型的森林郁闭度差异，有助于整体和区域化的森林经营和生态恢复治理。对于天然林与人工林森林郁闭度的平均水平而言，除常绿针叶林外，天然林其余林型郁闭度明显高于人工林（表 5）。天然林结构复杂、功能完备，在长期竞争和适应过程中形成了合理的空间分布；而人工林以用材林为主，人为干预频繁，整体结构复杂性不及天然林[19]。因此，本研究中天

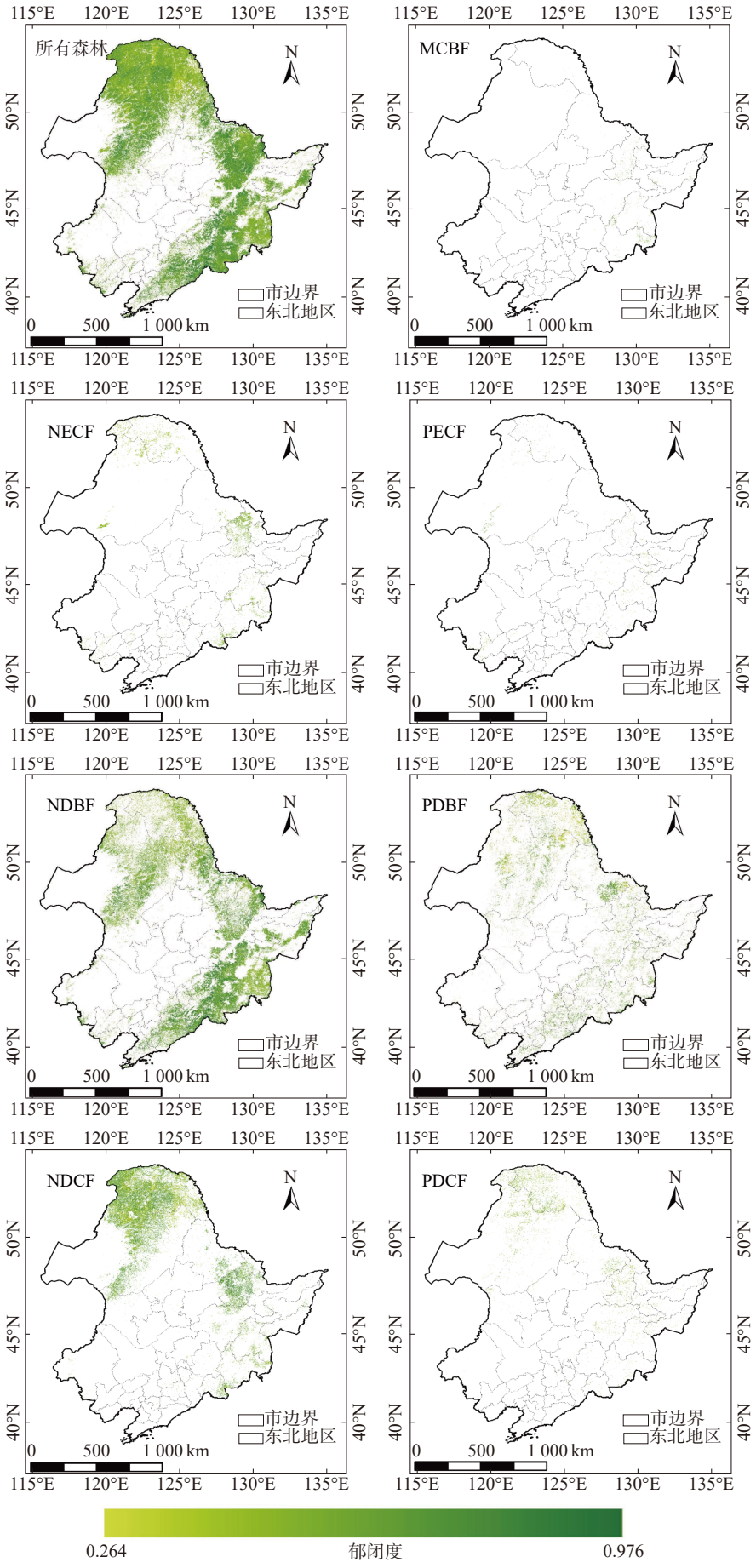



图 8　东北地区不同林型森林郁闭度的空间分布格局

Fig. 8　Spatial distribution patterns of forest canopy closure in Northeast China

**表 5 东北地区不同林型在不同省份的森林郁闭度统计**

Tab. 5 Provincial distribution of forest canopy closure by forest type in Northeast China

| 林型 | 省份 | 分布面积/$10^4$ hm$^2$ | 郁闭度 | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 最小值 | 最大值 | 平均值 |
| MCBF | 黑龙江省 | 16.034 | 0.467 | 0.863 | 0.721 |
| | 吉林省 | 8.201 | 0.526 | 0.863 | 0.711 |
| | 辽宁省 | 0.031 | 0.611 | 0.856 | 0.705 |
| | 内蒙古自治区 | 0.087 | 0.506 | 0.780 | 0.706 |
| NECF | 黑龙江省 | 102.934 | 0.295 | 0.835 | 0.677 |
| | 吉林省 | 27.277 | 0.358 | 0.855 | 0.685 |
| | 辽宁省 | 13.050 | 0.349 | 0.844 | 0.686 |
| | 内蒙古自治区 | 27.374 | 0.294 | 0.796 | 0.645 |
| NDBF | 黑龙江省 | 947.733 | 0.327 | 0.913 | 0.715 |
| | 吉林省 | 536.058 | 0.333 | 0.976 | 0.743 |
| | 辽宁省 | 227.429 | 0.329 | 0.950 | 0.741 |
| | 内蒙古自治区 | 561.996 | 0.332 | 0.916 | 0.706 |
| NDCF | 黑龙江省 | 432.840 | 0.324 | 0.925 | 0.713 |
| | 吉林省 | 43.363 | 0.299 | 0.913 | 0.706 |
| | 辽宁省 | 3.917 | 0.372 | 0.873 | 0.675 |
| | 内蒙古自治区 | 451.338 | 0.321 | 0.915 | 0.706 |
| PECF | 黑龙江省 | 20.051 | 0.380 | 0.864 | 0.692 |
| | 吉林省 | 6.802 | 0.401 | 0.864 | 0.704 |
| | 辽宁省 | 5.550 | 0.380 | 0.860 | 0.670 |
| | 内蒙古自治区 | 7.445 | 0.389 | 0.861 | 0.707 |
| PDBF | 黑龙江省 | 239.465 | 0.301 | 0.851 | 0.685 |
| | 吉林省 | 77.271 | 0.283 | 0.909 | 0.721 |
| | 辽宁省 | 62.686 | 0.291 | 0.883 | 0.718 |
| | 内蒙古自治区 | 135.242 | 0.296 | 0.856 | 0.689 |
| PDCF | 黑龙江省 | 100.986 | 0.264 | 0.859 | 0.664 |
| | 吉林省 | 6.770 | 0.279 | 0.886 | 0.671 |
| | 辽宁省 | 1.558 | 0.273 | 0.826 | 0.650 |
| | 内蒙古自治区 | 45.628 | 0.269 | 0.830 | 0.664 |
| 总和 | 黑龙江省 | 1 849.740 | 0.264 | 0.925 | 0.705 |
| | 吉林省 | 700.588 | 0.279 | 0.976 | 0.735 |
| | 辽宁省 | 314.194 | 0.273 | 0.950 | 0.731 |
| | 内蒙古自治区 | 1 229.078 | 0.269 | 0.916 | 0.701 |
| | 东北地区 | 4 093.599 | 0.264 | 0.976 | 0.711 |

然林郁闭度高于人工林的估算结果符合东北地区森林的实际情况。在本研究的估算结果中，不同林型的郁闭度表现为阔叶林大于混交林大于针叶林（表 5）。这一规律与树种的生物学特性及其分布环境等因素有关。如蒙古栎（*Quercus mongolica*）、白桦（*Betula platyphylla*）林等阔叶林叶片宽大、树冠开展，茂密的冠层结构能够有效拦截更多光线，从而形成较高的郁闭度；而红松（*Pinus koraiensis*）、樟子松（*Pinus sylvestris* var. *mongolica*）林等针叶林其树冠多为圆锥形，冠层相对稀疏且透光性较强，导致郁闭度较低[49−50]。从分布环境来看，阔叶林多分布于水热条件较好的低海拔平原或丘陵地区，有利于冠层发育；而针叶林多分布于寒冷、干旱或相对贫瘠的土壤区域（如大兴安岭），环境压力限制了树冠生长[51−52]。此外，从具体的区域分布来看，吉林省和辽宁省的森林郁闭度水平表现较好，这可能与长白山脉的分布

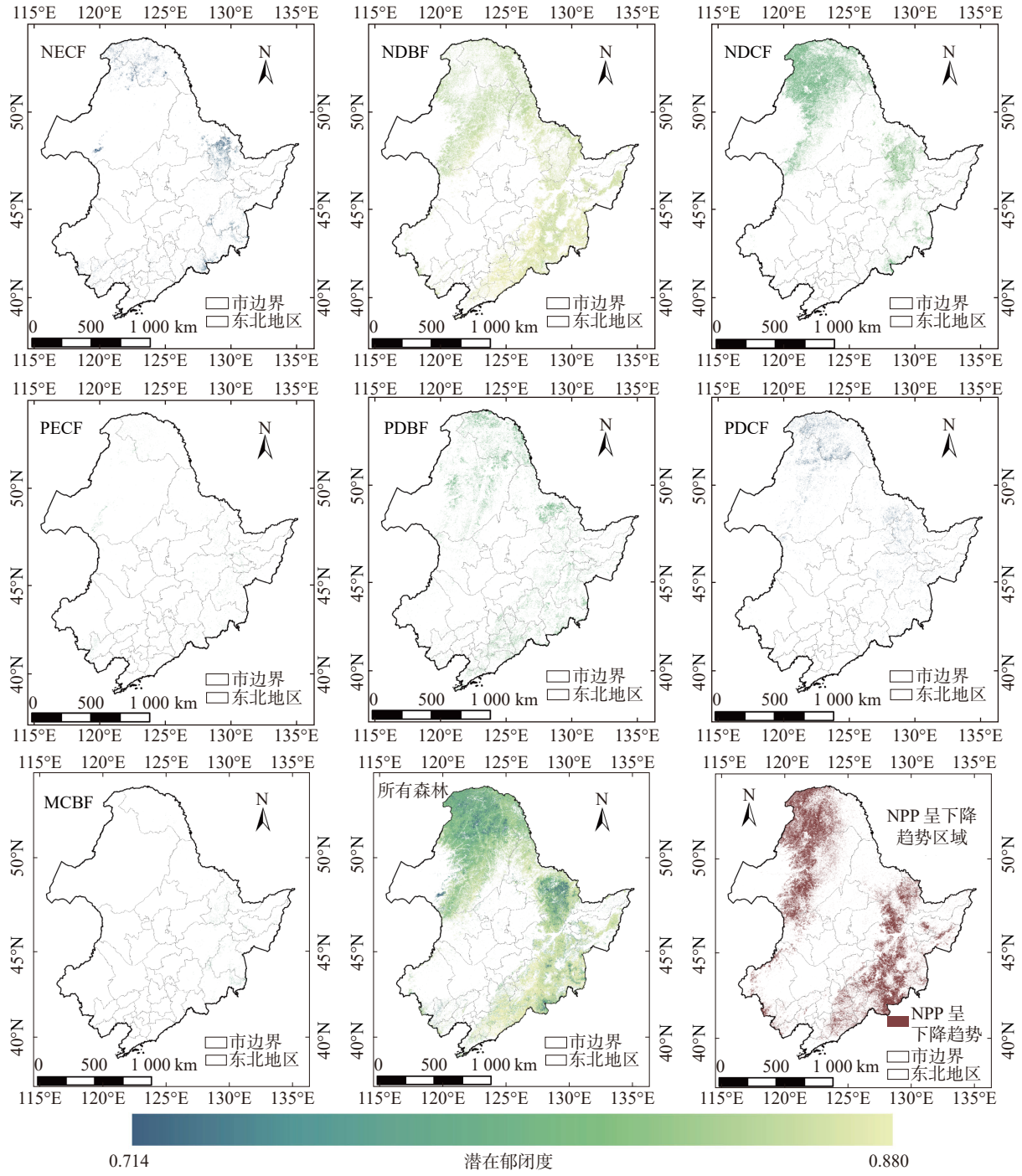



图 9　东北地区森林潜在郁闭度的空间分布及森林退化区域

Fig. 9　Spatial distribution of potential canopy closure and forest degradation areas in Northeast China

有直接关系。例如，长白山脉生态系统的垂直分布带谱及其典型的火山地质地貌[53]，使得混交林和阔叶林的 NPP 显著高于大兴安岭的寒温带针叶林[54]。

### 3.3　森林潜在郁闭度及森林退化

#### 3.3.1　森林潜在郁闭度

森林潜在郁闭度是揭示森林生态系统承载阈值、优化森林经营策略和预测气候变化响应的关键基准值。本研究中，森林潜在郁闭度的估算基于气候、土壤和地形等环境因素，通过梯度分箱与阈值条件筛选（取郁闭度前 5% 的均值）实现。这与此前研究多基于调整模型参数以估算潜在生态系统指标的方法有所不同。例如，毕凡[55]通过调整 CASA 模型参数，引入潜在光合有效辐射吸收比例估算了中国的潜在 NPP 值；潘竟虎和徐柏翠[56]则基于分类回归树对潜在的 NDVI 值进行了估算。然而，这些方法受模型参数影响较大，其准确性依赖于实测数据的支持。本研究选择气候、土壤和地形作为限制性因素，对森林结构上限进行机理化评估，主要基于以下原因：气候因素在宏观尺度上是决定物种分布的关键因素，从而影响潜在植被类型，水热组合在一定程度上决

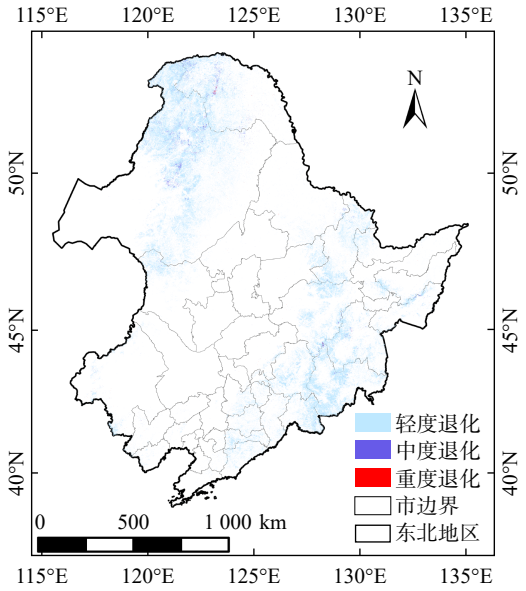



图 10 东北地区森林退化区域及程度

Fig. 10 Degraded areas and degrees of forests in Northeast China

**表 6 东北地区不同程度的森林退化面积在不同省份的分布**

Tab. 6 Distribution of forest degradation areas with varying severity levels across provinces in Northeast China

| 退化程度 | 省份 | 面积/$10^4$ hm$^2$ | 合计/$10^4$ hm$^2$ |
|---|---|---|---|
| 轻度退化 | 黑龙江省 | 318.053 | 969.814 |
| | 吉林省 | 223.568 | |
| | 辽宁省 | 54.983 | |
| | 内蒙古自治区 | 373.211 | |
| 中度退化 | 黑龙江省 | 8.594 | 22.011 |
| | 吉林省 | 1.388 | |
| | 辽宁省 | 0.366 | |
| | 内蒙古自治区 | 11.664 | |
| 重度退化 | 黑龙江省 | 0.843 | 1.774 |
| | 吉林省 | 0.316 | |
| | 辽宁省 | 0.169 | |
| | 内蒙古自治区 | 0.446 | |
| 东北地区 | | 993.599 | |

定了理论上限[57−58]。此外，研究表明，土壤和地形在塑造森林景观结构复杂性及动态变化方面具有关键作用[59]。东北地区土壤特征显著，如东北黑土区是世界四大黑土分布区之一[60]。在东北地区，地形因子可能比土壤养分更直接地影响森林地上生物量的积累[61]。因此，本研究选取气候、土壤和地形因子进行筛选，合理评估了东北地区森林的潜在郁闭度，为退化区域识别与森林经营管理提供了有效的数据支撑。研究结果表明，森林潜在郁闭度总体呈现北低南高的空间分布格局。南部长白山附近的森林潜在郁闭度显著高于北部的大兴安岭和小兴安岭地区（图 9 所有森林）。东北地区气候特征鲜明，受季风、海陆位置和纬度等因素影响，南部地区的年降水量和年均气温显著高于北部[62−63]，这表明森林潜在郁闭度受水热条件的影响显著。此外，森林潜在郁闭度的分布还受到森林不同林型的显著影响。例如，天然林的潜在郁闭度显著高于人工林，阔叶林的潜在郁闭度明显高于其他林型（图 9）。因此，充分考虑并估算不同林型的森林潜在郁闭度具有重要意义。

### 3.3.2 森林退化

对森林退化区域的识别及退化程度的分析，有助于生态保护与恢复、应对气候变化，并为可持续的森林生态系统管理提供科学依据。本研究对“森林退化”的定义引用自《全国生态状况调查评估技术规范——生态问题评估》（HJ 1174—2021）中的核心概念，即“在不合理利用下，森林生态系统发生逆行演替、生产力不断下降的过程，主要表现为森林高度、郁闭度、物种多样性和生产力的下降”。因此，本研究综合了过程（NPP 变化趋势）与状态（郁闭度比值）两个方面，以识别和评估森林退化区域与程度。对 NPP 变化趋势的分析能够可靠地捕捉森林生态系统的演替趋势，同时采用“当前郁闭度/潜在郁闭度”这一比值，充分考虑了气候、地形和土壤等要素，能客观地反映不同林型在当前状态下因人为干扰或环境压力导致的结构偏离顶极状态的程度。此外，在郁闭度之比的分级阈值上（0.9，0.75，0.6），本研究采用了与《全国生态状况调查评估技术规范——生态问题评估》（HJ 1174—2021）中森林退化指数（forest degradation index，FDI）的分级阈值一致的设定。尽管 FDI 以生物量为指标进行计算（为遥感获得的森林生态系统当前生物量与系统顶级群落的生物量之比），但考虑到森林郁闭度与生物量之间的极强相关性，且模型计算中郁闭度常被用作评估森林生物量的指标[64−65]，本研究对郁闭度比值的分级阈值设定具备一定的合理性。同时，基于遥感手段获取和监测郁闭度更为便捷，因此研究更具可操作性和实际管理指导价值。

基于栅格数据的统计，本研究估算的东北地区森林退化总面积为 993.599 万 hm$^2$（占森林总面积的 24.27%），低于 Yan 等[66]基于全国森林清查数据所评估的中国退化森林面积（东北地区森林退化面积约占森林总面积 44.67%），也低于闫星蓉[67]估算的退化乔木林面积（东北地区约 2 000 ~ 2 400 万 hm$^2$）。然而，后两者估算的退化林面积与本研究中 NPP 呈下降趋势区域面积（约 2 800 万 hm$^2$）相似。因此，本研究中的森林退化区域为生产力呈下降趋势且当前森林郁闭度偏离理论上限的区域。总体而言，本研

究结果与前人研究结果均表明，东北地区的森林退化问题仍然较为严重，较大面积的森林现状与理论上限仍存在一定差距，尤其是黑龙江省和内蒙古自治区(表 6)。从森林退化程度来看，中度退化和重度退化的森林在东北地区的北部和西北部更为集中(图 9)，这在一定程度上表明东北地区北部和西北部的森林退化问题更为严重。造成此类现状的原因包括多种因素，如气候变暖导致的冻土融化加剧土壤水分流失，从而加速森林枯死和退化[68−69]；北部雷击火多发导致的森林火灾面积远大于其他区域[70]；而又由于北部地区森林恢复困难，导致退化程度更加明显[71−72]。尽管在分布上东北地区北部的森林退化面积更加广泛，但对于森林的退化而言，实际生产中的情况可能更加复杂，如林分郁闭度低但具有较好的冠下更新状况的森林，则不能被视为退化林；而部分高郁闭度的人工林，由于冠下几乎无更新，则可能存在退化风险。尤其是人工的针叶林，其针叶凋落物分解缓慢，易导致林地土壤酸化，加之经营目标单一、经营模式固化，可能形成典型的“绿色沙漠”[73−74]。这类林分实际已处于中重度退化状态，但却可能被判定为轻度退化。基于此，未来应构建和完善多指标的森林退化评价体系，统筹考虑林分结构、更新潜力、土壤健康及生物多样性等多因子与指标，以实现良好的生态效益。此外，由于城市扩张和土地利用等因素，未来的造林可能会越来越多地集中在碎片化和边缘化的土地上[75]。因此，为加速东北地区森林生态系统的恢复，科学合理的生态恢复与经营手段(如在东北地区实施的林木补植、透光抚育和抚育采伐等)是必要且有效的[76−78]。

## 4　结　　论

本研究基于均匀布点获取并筛选的 11 472 个高精度森林郁闭度数据，结合 19 个生物气候变量、15 个植被与遥感指数以及高程数据，构建了东北地区天然林与人工林及其不同林型的多个随机森林模型，分析了森林郁闭度的空间分布特征，通过环境因子的梯度分箱法估算了潜在郁闭度情况，并结合森林 NPP 下降趋势区域对森林退化程度进行了评估。总体而言，东北地区森林郁闭度的水平较高(平均值为 0.711)，值的变化范围较广(0.264 ~ 0.976)；不同林型间的森林郁闭度差异明显($p < 0.001$)，表现为天然林郁闭度高于人工林，阔叶林郁闭度大于混交林，混交林又大于针叶林；森林郁闭度的空间分布具明显差异，整体呈现北低南高的趋势，在地方尺度上，吉林和辽宁的平均森林郁闭度高于黑龙江和内蒙古。此外，东北地区森林退化区域分布广泛，退化森林占森林总面积的 24.27%。从退化程度来看，东北地区北部和西北部的森林退化问题尤为严重。本研究对东北地区森林郁闭度以划分天然林和人工林以及不同林型的形式进行了高分辨率评估，并对森林退化区域进行了识别与退化程度的分析。尽管区域内森林郁闭度总体水平较高，但森林退化问题依然严峻，亟需从整体和区域尺度优化森林经营管理，推动生态保护与恢复。

附表 1 和附表 2 见 https://j.bjfu.edu.cn/article/exportSupplementary?id=56d62203-8e8e-4049-9647-66c5f6355d2d&pageType=cn。

## 参　考　文　献


[1] 赵同谦, 欧阳志云, 郑华, 等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价 [J]. 自然资源学报, 2004(4): 480−491.
Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004(4): 480−491.

[2] Fu Y, Liu C, He H S, et al. Assessing the impact of climate warming on tree species composition and distribution in the forest region of Northeast China [J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1430025.

[3] Huang C, Feng J, Tang F, et al. Predicting the responses of boreal forests to climate-fire-vegetation interactions in Northeast China[J]. Environmental modelling & software: with environment data news, 2022, 153: 105410.

[4] Yang X, Mu Y, Yang L, et al. Impacts of Climate Change on Forest Biodiversity Changes in Northeast China [J]. Remote sensing (Basel, Switzerland), 2024, 16(21): 4058.

[5] 王绪高, 吕晓涛, 郁凤明, 等. 东北陆地生态系统碳汇现状与研究展望 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(9): 2322−2337.
Wang X G, Lyu X T, Xi F M, et al. Current status and research prospects of terrestrial ecosystem carbon sink in Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(9): 2322−2337.

[6] 李俊. 从三北防护林建设看我国林业生态工程的发展 [J]. 中国林业, 2009(9): 38−39.
Li J. The development of China’s forestry ecological engineering from the perspective of the Sanbei Shelterbelt Construction [J]. Forestry of China, 2009(9): 38−39.

[7] 相恒星, 王宗明, 毛德华. 东北地区天然林资源保护工程生态保护成效分析 [J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(3): 314−322.
Xiang H X, Wang Z M, and Mao D H. Ecological effect of Natural Forest Protection Project in Northeast China [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(3): 314−322.

[8] 何兴元, 任春颖, 陈琳, 等. 森林生态系统遥感监测技术研究进展 [J]. 地理科学, 2018, 38(7): 997−1011.
He X Y, Ren C Y, Chen L, et al. The progress of forest ecosystems monitoring with remote sensing techniques [J]. Geographical Science, 2018, 38(7): 997−1011.

[9] 张远东, 鲁庆奥, 李威, 等. 中国国家森林公园植被净初级生产力与碳汇的空间分布特征 [J]. 陆地生态系统与保护学报, 2022,

2(4): 69−78.
Zhang Y D, Lu Q G, Li W, et al. Spatial Distribution of Net Primary Productivity and Carbon Sink in China's National Forest Parks [J]. Terrestrial Ecosystem and Conservation, 2022, 2(4): 69−78.

[10] 李正英, 舒清态, 李圣娇, 等. 遥感影像与激光雷达数据协同反演森林生物量综述 [J]. 世界林业研究, 2024, 37(6): 48−53.
Li Z Y, Shu Q T, Li S J, et al. A review of forest biomass inversion using remote sensing images and LiDAR data [J]. World Forestry Research, 2024, 37(6): 48−53.

[11] 郑妍, 徐增燕. 遥感技术在森林资源调查中的运用分析 [J]. 林业科技情报, 2024, 56(4): 92−95.
Zheng Y and Xu Z Y. Application analysis of remote sensing technology in forest resources investigation [J]. Forestry Science and Technology Information, 2024, 56(4): 92−95.

[12] 王鹏杰, 田昕, 陈树新, 等. 基于多源遥感数据及几何光学模型的森林郁闭度估测 [J]. 遥感技术与应用, 2023, 38(2): 383−392.
Wang P J, Tian X, Chen S X, et al. Estimation of forest canopy closure based on multi-source remote sensing data and geometric optical model [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2023, 38(2): 383−392.

[13] 魏智海, 张志超, 李崇贵. 基于 GF-1PMS 影像的森林郁闭度定量估测模型研究 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(4): 231−237.
Wei Z H, Zhang Z C, and Li C G. Quantitative estimation of forest canopy density based on GF-1 PMS images [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(4): 231−237.

[14] 罗俊杰, 任晓阳, 刘润东, 等. 结合机载 LiDAR 和多源遥感影像的森林郁闭度估测 [J]. 遥感技术与应用, 2025, 40(3): 600−609.
Luo J J, Ren X Y, Liu R D, et al. Combining airborne LiDAR and multi-source remote sensing images for forest canopy density estimation [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2025, 40(3): 600−609.

[15] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展 [J]. 地球科学进展, 2013, 28(7): 774−782.
Jia K, Yao Y J, Wei X Q, et al. A review on fractional vegetation cover estimation using remote sensing [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(7): 774−782.

[16] Kang D, Wang X, Li S, et al. Comparing the plant diversity between artificial forest and nature growth forest in a giant panda habitat [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3561.

[17] 王宇宁, 冯天骄, 孙龙, 等. 晋西黄土区典型人工林与天然林林下植被物种多样性差异及其影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(4): 103−116.
Wang Y N, Feng T J, Sun L, et al. Differences and influencing factors of understory vegetation species diversity between typical plantations and natural forests in the loess area of western Shanxi Province, northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(4): 103−116.

[18] 周宏. 祁连山浅山区青海云杉人工林与天然林水文过程研究评述 [J]. 林业与环境科学, 2024, 40(3): 1−8.
Zhou H. Review of research on hydrological processes in artificial and natural forests of picea crassifolia in the shallow mountainous areas of the Qilian Mountains [J]. Forestry and Environmental Science, 2024, 40(3): 1−8.

[19] 李丹, 陈宏伟, 李根前, 等. 我国天然林与人工林的比较研究 [J]. 林业调查规划, 2011, 36(6): 59−63.
Li D, Chen H W, Li G Q, et al. Comparative analysis of artificial forest and natural forest in China [J]. Forest Inventory and Planning, 2011, 36(6): 59−63.

[20] 贺伟, 布仁仓, 熊在平, 等. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 [J]. 生态学报, 2013, 33(2): 519−531.
He W, Bu R C, Xiong Z P, et al. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 519−531.

[21] 王让虎, 张树文, 蒲罗曼, 等. 基于 ASTER GDEM 和均值变点分析的中国东北地形起伏度研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(6): 49−54.
Wang R H, Zhang S W, Pu L M, et al. Analysis on the relief amplitude in Northeast China based on ASTER GDEM and mean change point method [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(6): 49−54.

[22] Yu D, Zhou L, Zhou W, et al. Forest management in Northeast China: history, problems, and challenges [J]. Environmental Management, 2011, 48(6): 1122−1135.

[23] 陈赛赛, 孙艳玲, 杨艳丽, 等. 三北防护林工程区植被景观格局变化分析 [J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(12): 85−90.
Chen S S, Sun Y L, Yang Y L, et al. Analysis on the vegetation landscape pattern changes in the Three-North Shelter Belt Program [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(12): 85−90.

[24] 王佳琪, 邢艳秋, 常晓晴, 等. 东北天然林资源保护工程成效评估及热点区域识别 [J]. 生态学报, 2024, 44(3): 1231−1241.
Wang J Q, Xing Y Q, Chang X Q, et al. Assessment of the effectiveness of the Northeast Natural Forest Protection Project and identification of hot spot areas [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1231−1241.

[25] Xiao Y, Wang Q, Zhang H K. Global natural and planted forests mapping at fine spatial resolution of 30 m [J]. Journal of Remote Sensing, 2024, 4: 0204.

[26] Zhang X, Liu L, Zhao T, et al. GLC_FCS10: a global 10 m land-cover dataset with a fine classification system from Sentinel-1 and Sentinel-2 time-series data in Google Earth Engine [J]. Earth System Science Data, 2025, 17(8): 4039−4062.

[27] Wardlow B D, Egbert S L. 2008. Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U. S. Central Great Plains[J]. Remote Sensing of Environment, 112(3): 1096-1116.

[28] Huete A R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 25(3): 295−309.

[29] Qi J, Chehbouni A, Huete A R, et al. A modified soil adjusted vegetation index [J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48(2): 119−126.

[30] Jiang Z, Huete A, Didan K, et al. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band [J]. Remote

Sensing of Environment, 2008, 112(10): 3833−3845.

[31] Major D J, Baret F, Guyot G. A ratio vegetation index adjusted for soil brightness [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 11(5): 727−740.

[32] 伏帅, 张勇辉, 李佳吕, 等. 不同植被指数和无人机航高对草地盖度估测精度的影响 [J]. 草业科学, 2021, 38(1): 11−19.
Fu S, Zhang Y H, Li J L, et al. Influence of different vegetation indices and heights of UAVs on the accuracy of grassland coverage estimation [J]. Pratacultural Science, 2021, 38(1): 11−19.

[33] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. 科学通报, 2006, 51(6): 700−706.
Zhu W Q, Pan Y Z, He H, et al. Simulation of maximum light utilization of typical vegetation in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 700−706.

[34] 李传华, 曹红娟, 范也平, 等. 基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析: 以河西走廊为例 [J]. 生态学报, 2019, 39(5): 1616−1626.
Li C H, Cao H J, Fan Y P, et al. Remote sensing estimation and analysis of net primary productivity (NPP) based on corrected CASA model: A case study of Hexi Corridor [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(5): 1616−1626.

[35] Chen A, Zhong X, Wang J, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of net primary productivity in South and Southeast Asia based on Google Earth Engine and MODIS data [J]. Catena, 2025, 249: 108689.

[36] Hu T Y, Cao M Q, Zhao X X, et al. High-resolution mapping of grassland canopy cover in China through the integration of extensive drone imagery and satellite data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, 218: 69−83.

[37] Elliott C A, Hynan L S. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal–Wallis analysis [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2011, 102(1): 75−80.

[38] Ostertagova E, Ostertag O, Kováč J. Methodology and application of the Kruskal-Wallis test [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 611: 115−120.

[39] 张岗岗. 天然林结构解译及林分状态综合评价 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.
Zhang G G. Natural forest structure interpretation and forest state comprehensive evaluation[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2020.

[40] Brandt M, Rasmussen K, Peñuelas J, et al. Human population growth offsets climate-driven increase in woody vegetation in sub-Saharan Africa [J]. Nature Ecology & Evolution, 2017, 1(4): 0081.

[41] 王迪. 基于 LiDAR 和 Landsat 8 OLI 数据的森林郁闭度估测 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Wang D. Estimation of forest canopy closure based on LiDAR and Landsat 8 OLI data[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[42] 王蕊, 邢艳秋, 王立海, 等. 联合星载 ICESat-GLAS 波形与多光谱 Landsat-TM 影像的森林郁闭度估测 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1657−1664.
Wang R, Xing Y Q, Wang L H, et al. Estimating forest canopy cover by combining spaceborne ICESat-GLAS waveforms and multispectral Landsat-TM images [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(6): 1657−1664.

[43] 智献坡, 李明泽, 于颖, 等. 应用 4-scale 模型对人工针叶林郁闭度的反演 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(12): 5−11.
Zhi X P, Li M Z, Yu Y, et al. Retrieval of canopy closure in planted coniferous forests using the 4-scale model [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(12): 5−11.

[44] 杨晓慧, 吴金卓, 刘浩然, 等. 基于 UAV-LiDAR 的人工林林分郁闭度估测 [J]. 林业科学, 2023, 59(8): 12−21.
Yang X H, Wu J Z, Liu H R, et al. Estimation on canopy closure for plantation forests based on UAV-LiDAR [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(8): 12−21.

[45] 竹亮. 结合无人机 LiDAR 与 Sentinel-2B 影像的郁闭度估测 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
Zhu L. Estimation of canopy closure using UAV LiDAR and Sentinel-2B imagery [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2022.

[46] 邱赛, 邢艳秋, 田静, 等. 基于 ICESat-GLAS 波形数据估测森林郁闭度 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2016, 40(5): 99−106.
Qiu S, Xing Y Q, Tian J, et al. Estimation of forest canopy density based on ICESat-GLAS waveform data [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2016, 40(5): 99−106.

[47] 刘盼. 基于资源三号影像的森林郁闭度遥感反演研究 [D]. 长春: 中国科学院大学 (中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2019.
Liu P. Remote sensing estimation of forest crown closure based on ZY-3 imagery [D]. Changchun: Northeast Institute of geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2019.

[48] 赵国帅, 王军邦, 范文义, 等. 2000—2008 年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 621−630.
Zhao G S, Wang J B, Fan W Y, et al. Vegetation net primary productivity in Northeast China in 2000−2008: Simulation and seasonal change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 621−630.

[49] 郭志华, 张旭东, 黄玲玲, 等. 落叶阔叶树种蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 对林缘不同光环境光能和水分的利用 [J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1047−1056.
Guo Z H, Zhang X D, Huang L L, et al. Solar energy and water utilization of *Quercus mongolica*, a deciduous broadleaf tree, in different light regimes across the edge of a deciduous broad-leaved forest [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1047−1056.

[50] 高慧淋. 东北林区针叶树树冠轮廓及特征因子模拟 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
Gao H L. Modeling crown profile and characteristic attributes of

coniferous tree species in Northeast China[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[51] Sun S, Li Z, Tian X, et al. Forest canopy closure estimation in greater Khingan forest based on Gf-2 data[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2019: 6640−6643.

[52] 王文杰, 王凯, 王媛媛, 等. 东北针叶林与阔叶林乔灌草组成特征及碳汇功能对比研究 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 52−67.
Wang W J, Wang K, Wang Y Y, et al. Comparative study on tree, shrub and herb composition and carbon sink function between coniferous and broadleaved forests in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 52−67.

[53] 刘雅各, 张茂亮, 关德新, 等. 长白山地区自然科学研究综述: 1956—2018[J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1783−1796.
Liu Y G, Zhang M L, Guan D X, et al. A review of natural science research in Changbai Mountain area: 1956-2018 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1783−1796.

[54] 徐雨晴, 肖风劲, 於琍. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述 [J]. 生态学报, 2020, 40(14): 4710−4723.
Xu Y Q, Xiao F J, Yu L. Review of spatio-temporal distribution of net primary productity in forest ecosystem and its responses to climate change in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 4710−4723.

[55] 毕凡. 基于潜在 NPP 的生态系统服务空间模拟研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2023.
Bi F. Study on Spatial Simulation of Ecosystem Services Based on Potential NPP[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2023.

[56] 潘竟虎, 徐柏翠. 中国潜在植被 NPP 的空间分布模拟 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(3): 1001−1012.
Pan J H, Xu B C. Modeling spatial distribution of potential vegetation NPP in China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(3): 1001−1012.

[57] Erhan H, Chen Y, Miao F, Zheng Y, Yu S. Environmental drivers of plant distributions at global and regional scales. Global Ecology and Biogeography[J]. 2021, 30(3): 697−709.

[58] Ehbrecht M, Seidel D, Annighöfer P, et al. Global patterns and climatic controls of forest structural complexity [J]. Nature communications, 2021, 12(1): 519.

[59] Zhang B B, Jackson T D, Coomes D A, et al. Soils and topography drive large and predictable shifts in canopy dynamics across tropical forest landscapes [J]. New Phytologist, 2025, 247(4): 1666−1679.

[60] Zhao C, Li Y, Huang W, et al. Soil nutrient changes in black soil of Northeastern China under long-term cultivation with different fertilizer applications and tillage patterns: a meta-analysis [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2025, 56(6): 894−910.

[61] Yuan Z, Ali A, Sanaei A, et al. Few large trees, rather than plant diversity and composition, drive the above-ground biomass stock and dynamics of temperate forests in northeast China [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 481: 118698.

[62] 程曦瑶. 1990—2022 年东北地区气温时空变化特征 [J]. 自然科学, 2024, 12(5): 830−836.
Chen X Y. The Characteristics of temporal and spatial changes of temperature in Northeast China in 1990 ~ 2022 [J]. Open Journal of Natural Science, 2024, 12(5): 830−836.

[63] Yu S Q, Shi X H, Lin X C. Interannual variation of East Asian summer monsoon and its impacts on general circulation and precipitation [J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(1): 67−80.

[64] 李明泽, 毛学刚, 范文义. 基于郁闭度联立方程组模型的森林生物量遥感估测 [J]. 林业科学, 2014, 50(2): 85−91.
Li M Z, Mao X G, Fan W Y. Forest biomass estimation using remote sensing based on canopy density simultaneous equations model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(2): 85−91.

[65] 吴发云, 高显连, 周蓉, 等. 基于林分高度及郁闭度的森林生物量和蓄积量模型研究 [J]. 林业资源管理, 2021(2): 61−67.
Wu F Y, Gao X L, Zhou R, et al. Research on forest biomass and stock volume model based on stand height and canopy density [J]. Forest Resources Management, 2021(2): 61−67.

[66] Yan X R, Xie D B, Feng L Y, et al. Estimating area, standing carbon stock, and potential carbon stock of degraded forests in China [J]. Forest Ecosystems, 2025, 13: 100321.

[67] 闫星蓉. 中国退化乔木林及其生产力恢复潜力 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2024.
Yan X R, Productivity recovery potential of the degraded arbor forest in China[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2024.

[68] 宋杨. 东北多年冻土退化对碳储量变化影响研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
Song Y. Research on the impact of permafrost degradation on carbon storage change in Northeast China[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2024.

[69] Shi H, Huang H Y, Chang J L, et al. The spatial and temporal distribution of freeze–thaw characteristics of near-surface soil in the Northeast of China and its influencing factors [J]. Catena, 2025, 249: 108644.

[70] 冯雨林, 刘爱柱, 郭常来, 等. 大兴安岭林区雷击火成因机理及影响因素研究进展 [J]. 地质与资源, 2024, 33(5): 701−706.
Feng Y L, Liu A Z, Guo C L, et al. Research progress on the genetic mechanism and influencing factors of lightning fire in daxinganling forest area [J]. Geology and Resources, 2024, 33(5): 701−706.

[71] Li Y, Piao S, Li L, et al. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China [J]. Science Advances, 2018, 4(5): eaar4182.

[72] 杨绪红, 金晓斌, 杨永可, 等. 1950—2020 年东北地区林地时空变化特征分析 [J]. 地理科学, 2022, 42(11): 1996−2005.
Yang X H, Jin X B, Yang Y K, et al. Spatially and temporal explicit analysis of forestland of Northeast China in 1950-2020 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(11): 1996−2005.

[73] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追

求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1−10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1−10.

[74] 及利, 杨雨春, 王君, 等. 不同土地利用方式下酚酸物质与土壤微生物群落的关系 [J]. 生态学报, 2019, 39(18): 6710−6720.
Ji L, Yang Y C, Wang J, et al. Relationship between soil phenolic acids and the soil microbial community under different land uses [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 6710−6720.

[75] Dong Y L, Yu Z, Agathokleous E, et al. Pitfalls in forest carbon sink projection [J]. Journal of Forestry Research, 2024, 35: 87.

[76] 王涛, 董灵波, 刘兆刚, 等. 大兴安岭天然次生林林木补植空间优化 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 127−136.
Wang T, Dong L B, Liu Z G, et al. Optimization of replanting space of natural secondary forest in Daxing'anling Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 127−136.

[77] 王亚辉, 牟长城, 杨智慧, 等. 透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林碳储量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(10): 54−64.
Wang Y H, Mu C C, Yang Z H, et al. Effects of release cutting intensity on the carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broadleaved trees in Xiaoxing'an Mountains of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(10): 54−64.

[78] 杨清雷, 何怀江, 王娟, 等. 采伐强度对东北针阔混交林生态系统碳储量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(6): 1−9.
Yang Q L, He H J, Wang J, et al. Effects of thinning intensity on carbon storage in the mixed coniferous and broadleaved forest ecosystem in northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(6): 1−9.

（责任编辑　范　娟
责任编委　臧润国）