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

基于多源遥感数据的福建省海岸带县域森林生态质量评价

闫谨 周小成 黄婷婷 乐通潮 王永荣 吴善群

Evaluation of forest ecological quality in coastal zone counties of Fujian Province, eastern China based on multi-source remote sensing data

Yan Jin, Zhou Xiaocheng, Huang Tingting, Le Tongchao, Wang Yongrong, Wu Shanqun

引用本文:
闫谨, 周小成, 黄婷婷, 乐通潮, 王永荣, 吴善群. 基于多源遥感数据的福建省海岸带县域森林生态质量评价[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5):12–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230200
Yan Jin, Zhou Xiaocheng, Huang Tingting, Le Tongchao, Wang Yongrong, Wu Shanqun. Evaluation of forest ecological quality in coastal zone counties of Fujian Province, eastern China based on multi–source remote sensing data[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5):12–25. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230200

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230200

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

应用遥感技术评价森林健康的路径和方法
Pathway and method of forest health assessment using remote sensing technology
北京林业大学学报, 2021, 43(9): 1–13. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210107

森林地上生物量遥感估算方法
Estimation of forest aboveground biomass by remote sensing
北京林业大学学报, 2021, 43(8): 137–148. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200166

多时相高分辨率遥感影像的森林可燃物分类和变化分析
Classification and change analysis of forest fuels by multi–temporal high resolution remote sensing images
北京林业大学学报, 2018, 40(12): 38–48. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180269

基于生境质量构建森林生物多样性保育价值模型
Construction of biodiversity protection value model for forest based on habitat quality
北京林业大学学报, 2020, 42(1): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190289

林业定量遥感研究进展和展望
Progress and perspective of quantitative remote sensing of forestry
北京林业大学学报, 2019, 41(12): 1–14. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190326

基于SAR极化分解与Landsat数据的森林生物量遥感估测
Remote sensing quantification on forest biomass based on SAR polarization decomposition and Landsat data
北京林业大学学报, 2018, 40(2): 1–10. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170284

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230200

基于多源遥感数据的福建省海岸带县域森林生态质量评价

闫 谨[1] 周小成[1] 黄婷婷[1] 乐通潮[2] 王永荣[3] 吴善群[4]
（1. 福州大学卫星空间信息技术综合应用国家地方联合工程研究中心，空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室，福建 福州 350108；
2. 福建省林业科学研究院，福建 福州 350012；3. 福建省漳平五一国有林场，福建 龙岩 364400；4. 福建省大田县林业局，福建 三明 366100）

摘要:【目的】森林生态质量是从生态角度反映森林质量的内涵，对森林的生态功能和生态服务、生长状况以及自我调节功能进行综合测度，以期提高森林改善生态环境、维护生态平衡的能力。**【方法】**利用中、高分辨率多源遥感数据，获取大范围尺度下能表征森林生态质量的关键指标信息，在此基础上，分析福建省海岸带 40 个县域的森林生态质量状况。首先，基于 2016 年 2 m 分辨率多源遥感数据为主要数据源，利用双层尺度集模型选定最佳分割尺度，多分类器集成算法集，自动选择最优分类算法进行森林类型提取，并结合 2020 年 Sentinel 遥感数据及森林分类产品，更新 2020 年福建省海岸带森林类型精细分布图；其次，利用 LandTrendr 算法衍生的干扰开始时间特征推算现存森林年龄，通过 GEDI 冠层高度产品获取海岸带森林冠层高度分布图；在以上关键森林质量指标提取基础上，对遥感手段获取的 8 项森林生态质量评价指标进行主成分分析，获得福建省海岸带县域森林生态质量综合评价结果。**【结果】**2020 年福建海岸带 40 个县域约 50% 的县域森林生态质量处于优良水平，其中仙游县、闽侯县、南安市、霞浦县、柘荣县及厦门海沧区、思明区、集美区、同安区等森林生态质量为优；森林生态质量较差的县域有惠安县、秀屿区、石狮市、福安市、平潭实验区、诏安县。**【结论】**结合中、高分辨率多源遥感数据，能够发挥遥感大范围监测优点，客观评价福建省海岸带 40 个县域的森林生态质量；研究结果表明 2020 年福建沿海县域森林生态质量还存在较大的提升空间，需要针对存在的问题采取相应森林管理措施提升森林生态质量。

关键词：遥感；森林类型；林龄；冠层高度；森林生态质量；福建海岸带
中图分类号：S771.8 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2024)05−0012−14
引文格式：闫谨，周小成，黄婷婷，等. 基于多源遥感数据的福建省海岸带县域森林生态质量评价［J］. 北京林业大学学报，2024，46(5)：12−25. Yan Jin, Zhou Xiaocheng, Huang Tingting, et al. Evaluation of forest ecological quality in coastal zone counties of Fujian Province, eastern China based on multi-source remote sensing data［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 12−25.

Evaluation of forest ecological quality in coastal zone counties of Fujian Province, eastern China based on multi-source remote sensing data

Yan Jin[1] Zhou Xiaocheng[1] Huang Tingting[1] Le Tongchao[2] Wang Yongrong[3] Wu Shanqun[4]
(1. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, National & Local Joint Engineering Research Center of Satellite Geospatial Information Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;
2. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, Fujian, China;
3. Zhangping Wuyi State-Owned Forest Farm of Fujian Province, Longyan 364400, Fujian, China;
4. Datian Forestry Bureau of Fujian Province, Sanming 366100, Fujian, China)

Abstract: ［**Objective**］Forest ecological quality reflects the ecological quality of forests from an ecological

收稿日期: 2023−08−23 **修回日期:** 2023−11−07
基金项目: 福建省林业科技攻关项目（2023FKJ02），福建省科技厅高校产学合作项目（2022N5008）。
第一作者: 闫谨。主要研究方向：环境与资源遥感。Email: 225520027@fzu.edu.cn 地址：350108 福建省福州市闽侯县上街镇学院路 2 号福州大学旗山校区。
责任作者: 周小成，博士，副研究员。主要研究方向：环境与资源遥感。Email: zhouxc@fzu.edu.cn 地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

perspective, measuring the comprehensive capacity of forests to improve the ecological environment, maintain ecological balance, and provide ecological functions and services. Utilizing medium and high-resolution multisource remote sensing data, we aim to acquire crucial indicator information that characterizes forest ecological quality at a large-scale level. Based on this foundation, our objective is to analyze the forest ecological quality status in the 40 coastal counties of Fujian Province of eastern China. [**Method**] Firstly, the primary data source utilized was 2 m resolution multisource remote sensing data. The bi-level scale-sets model (BSM) was employed to determine the optimal segmentation scale, integrating multiple classifiers to create an algorithm set. The best classification algorithm for forest type extraction was automatically selected. This approach was complemented by the use of Sentinel remote sensing data in 2020 and fine forest classification products, resulting in an optimized fine-scale distribution map of coastal forests in Fujian Province for year 2020. Secondly, forest age was estimated using disturbance onset time features derived from the LandTrendr algorithm. Additionally, GEDI crown height products were used to obtain the canopy height distribution map of coastal forests. Building upon the extraction of key forest quality indicators through remote sensing methods, a principal component analysis was conducted on eight forest ecological quality assessment indicators obtained through remote sensing. This led to a comprehensive assessment of forest ecological quality for the coastal counties of Fujian Province. [**Result**] In 2020, approximately 50% of the 40 coastal counties in Fujian's coastal zone exhibited a favorable level of forest ecological quality. Among them, Xianyou County, Minhou County, Nan'an City, Xiapu County, Zherong County, as well as the districts of Haicang, Siming, Jimei, and Tong'an in Xiamen, demonstrated excellent forest ecological quality. On the other hand, counties with relatively poor forest ecological quality included Huian County, Xiuyu District, Shishi City, Fu'an City, Pingtan Experimental Zone, and Zhao'an County. [**Conclusion**] Utilizing high and medium-resolution multisource remote sensing data, the advantages of remote sensing large-scale monitoring have been leveraged to provide an objective assessment of the forest ecological quality in the 40 coastal counties of Fujian Province. The research findings reveal that there is considerable room for improvement in the forest ecological quality of the coastal counties in Fujian Province in 2020. Addressing the existing issues calls for the implementation of appropriate forest management measures to enhance the forest ecological quality.

Key words: remote sensing; forest type; forest age; canopy height; forest ecology quality; Fujian coastal zone

森林资源作为陆地生态系统的主体，提供与人类生存发展休戚相关的生态服务功能，有助于国民经济的长期增长[1−2]。森林资源数量与质量并重已然成为目前我国林业发展的主要任务[3]。森林生态质量从生态角度反映森林质量的内涵，对森林的生态功能和生态服务、生长状况以及自我调节功能的综合测度，反映森林改善生态环境、维护生态平衡的能力[4−5]。评估区域森林生态质量的状态、变化过程与空间差异特征，对构建区域生态安全格局至关重要，是当前国际地理学、生态学等领域研究的热点议题[6]。

森林生态质量评价是一个多元且复杂的过程，构建能够反映森林生态质量的指标体系是森林生态质量评估的关键一步。目前学者常聚焦于森林生长、立地条件、生物物理属性等角度，选取易获取的指标体系综合评估森林质量[5,7]。如 Feng 等[8]综合森林生物量、森林结构及森林健康多个标准建立层次模型评价省级森林质量；张琳等[9]综合群落结构、物质生产指数、生物多样性指数、群落发展多维度指标更完整全面地反映植被质量状况。但上述研究获取指标因子都是基于地面调查的森林立地条件、生物属性获得，虽然获取的数据较为准确，但需要耗费大量的时间和人力物力，无法实现大区域的高效评价；而遥感技术的发展则弥补了传统评价方法的不足，可实现区域、乃至全球尺度森林生态参数的快速估算，为大范围进行森林生态质量评价提供了可能性。如陈强等[10]利用 MODIS 遥感数据产品和地面监测数据，从生产力、稳定性和承载力等方面构建指标体系对洞庭湖周边生态系统质量进行了评价；Zhao 等[11]根据卫星数据，使用各种回归方法对森林参数进行估算，评价了陕西永寿县森林质量状况，使用遥感与地面调查数据相结合的方式可实现森林指标参数的获取和生态质量评价。目前利用遥感技术

进行森林资源生态质量评价研究多基于林场[12]、市县等小范围，对于大区域的森林生态质量遥感评价研究较少，需要对大范围基于遥感的森林生态质量评价进行进一步研究。

指标权重确定和评价方法也是基于遥感森林生态质量评价研究的重点。由于表征森林生态质量的各类指标的贡献率不同，因此在评估过程中赋予他们的权重也不同[5]，确定权重的方法主要分为主观权重法和客观权重法两种，前者操作简单，实用性强但由于依赖决策者的个人经验，主观性较强，后者则更为客观，可避免人为因素造成的偏差。如唐雅娟[13]基于永安市森林资源二类调查数据，采用主成分分析法确定各指标权重对森林质量进行综合评价；杜志等[14]基于森林资源调查数据，利用因子分析法获取指标权重，对 31 个省级行政区森林质量进行了全面评价；使用主成分分析法和因子分析法可以更好地评价森林生态质量，其他方法如熵权法、均方差综合分析法等在森林质量评价中运用较少[15]。选择合适的森林生态质量评价方法是评估结果科学、准确的保证，常见的评价方法有模糊综合评价法、物元分析法、灰色关联分析法和综合指数法。在实际评估中为了避免使用单一方法的弊端，往往会将多种方法结合起来，如邵炜等[16]综合利用层次分析法和综合指数法，以 3 个层次 9 个指标构建指标体系，综合评定永定河流域森林质量状况。冯继广等[17]先通过因子分析计算相关指标权重，最后运用综合指数法对全国各省市森林质量进行评价。综合指数法具有简便实用，信息利用率高、评估结果直观准确等特点，其中的加法合成法在森林质量评价中应用最为广泛[18]，适合用于森林生态质量评价研究。

当前基于遥感开展大范围区域森林生态质量评价研究较少，基于此，本文综合利用 Landsat 时间序列影像、国产高分辨率影像、GEDI 星载激光雷达数据等多源卫星遥感数据，针对海岸带特色研究区，将遥感数据与地面调查数据相结合，旨在有效降低森林生态质量评价成本的前提下，高效准确获取福建省海岸带森林主要类型、林龄以及树高空间分布信息，根据衍生的森林生态质量遥感评价指标，综合评价福建省海岸带 40 个县域的森林生态质量。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

福建省位于中国东南沿海亚热带区域，森林覆盖率位居中国第一。福建省海岸（116°55′～120°43′E，23°35′～27°26′N）陆域面积达 3.04 万 km^2，福建省西北部高山峻岭的屏障作用以及海洋的调节作用，独特的气候和地形条件造就了海岸带复杂的植被覆盖类型。然而由于受人为活动和台风活动双重干扰，且多地种植经济作物，水土保持和涵养水源方面受到挑战，导致沿海地区森林覆盖率普遍低于全省平均森林覆盖率，森林生态质量受多方面制约亟待提升。在森林质量提升工程的推进下，森林管理和保护工作成为全省生态工作重点。本研究选取福建省临海的 6 个地级市（宁德市、福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市）下的 40 个海岸带县域作为研究区，发挥遥感技术优势进行海岸带森林生态质量评价研究。

1.2 数据获取与预处理

1.2.1 遥感数据获取与预处理

本文所用遥感数据源（表 1）按照空间分辨率分为两种：一是高分辨率遥感影像，包括天绘一号（TH-1）、资源三号（ZY-3）、高分一号（GF-1），影像数据时间跨度为 2015 年下半年到 2016 年，覆盖福建省海岸带县域研究区，因获得的影像是正射校正后的影像，为保证影像的颜色保真度和保持研究区地物的特性，本研究针对 TH-1 影像，采用主成分分析

表 1 遥感影像数据介绍

Tab. 1 Introduction of remote sensing image data

卫星名称 Satellite name	空间分辨率 Spatial resolution	景数 Scene number	获取时间 Access time
资源三号 ZY-3	2.1 m（全色） 2.1 m（panchromatic） 5.8 m（多光谱） 5.8 m（multispectral）	30	2015年9月至2016年9月，以2016年度卫星影像为主 September 2015 to September 2016, based on annual satellite imagery in 2016
高分一号 GF-1	2 m（全色） 2 m（panchromatic） 8 m（多光谱） 8 m（multispectral）	19	
天绘一号 TH-1	2 m（全色） 2 m（panchromatic） 10 m（多光谱） 8 m（multispectral）	13	
Landsat5、Landsat7、Landsat8	30 m	每年约20～40景 About 20−40 views per year	1991—2020年7—10月 July to October in 1991 to 2020

(principal components analysis, PCA)融合方法进行全色波段和多光谱波段融合, 针对 GF-1、ZY-3 影像, 采用最邻近扩散(nearest neighbor diffusion, NND)融合方法, 融合后分辨率为 2 m; 二是中等分辨率遥感影像, 主要为 1991—2020 年间的 Landsat 时序数据, 每年度时相集中在 7—10 月间, 并利用 Landsat 影像 QA 波段进行云掩膜处理。为了尽可能降低变化检测时传感器所带来的误差, 构建更加具有一致辐射特性的 Landsat 时序数据, 借助 Roy 等[19]提出的 Landsat 表观反射率转换系数表, 对 ETM + 影像和 OLI 影像的反射率进行转换, 量化不同传感器之间的线性差异。

1.2.2　GLC_FCS30-2020 地表分类产品

GLC_FCS30-2020(https://doi.org/10.5281/zenodo.4280923)是中国科学院刘良云团队研发和对外发布的全球 30 m 地表覆盖精细分类产品, 反映了 2020 年全球陆地区域在 30 m 空间分辨率下的地表覆盖分布状况[20]。该数据集包含针叶林、阔叶林、混交林 3 种森林覆盖类型, 适合作为福建省海岸带森林生态质量评价指标的辅助数据。

1.2.3　GEDI 冠层高度模型

全球生态系统动态调查(global ecosystem dynamics investigation, GEDI)研究卫星是一种新的星载激光雷达仪器, 搭载了全球首台用于高分辨率森林垂直结构测量的多波束线性体制的激光测高仪[21]。GEDI 仪器在全球范围内收集 51.6°N 和 51.6°S 之间的数据, 对地球的三维结构进行最高分辨率和最密集的采样。原始的 GEDI02_A 产品是一个空间分辨率(平均足迹)为 25 m 的点表, 马里兰大学全球土地分析与发现实验室 Peter Potapov 团队利用 GEDI 和 Landsat 数据获得 30 m 空间分辨率全球森林冠层高度图[22], 本研究利用该团队 GEDI 冠层高度产品(https://glad.umd.edu/dataset/gedi/), 结合野外实测数据和森林二类调查小班数据获得冠层高度验证样本点 91 个, 验证样本数据覆盖红树林、茶园、针叶林与阔叶林多种森林类型。

1.2.4　地形数据

本文使用的地形数据是 ALOS DEM 数字产品, 空间分辨率为 12.5 m。根据福建省海岸带研究区矢量边界和 DEM 数据生成研究区坡度、坡向、山体阴影影像图。

2　研究方法

本文以福建省海岸带为研究区开展森林生态质量遥感评价研究, 主要分为 4 个部分: 一是福建海岸带县域森林类型提取; 二是海岸带干扰量级、森林林龄及冠层高度指标提取; 三是利用遥感手段获得的森林生态质量关键指标及其衍生辅助数据, 基于主成分分析方法权衡指标的贡献程度; 最后基于综合指数法实现海岸带 40 个县域的森林生态质量评价。技术路线如图 1 所示。

2.1　高分辨率遥感森林类型提取

该部分以多源高分辨率遥感影像为数据源, 综合利用双层尺度集模型[23](bi-level scale-sets model, BSM)、多分类器集成算法和 2020 年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品(GLC_FCS30-2020)实现福建省海岸带森林类型提取与更新。BSM 通过对每景影像建立双层尺度集架构优化图像分割效果, 其中第一层利用小尺度参数进行初步分割, 随后通过二级分割, 提炼出更为精细的图像特征; 在影像分割的基础上, 本研究提取对象的光谱特征(各波段均值、比率、标准差、亮度、最大差及归一化植被指数[24]、归一化水体指数[25]、比值植被指数[26]、修正型归一化植被指数[27]、差异归一化差分植被指数、土壤调节植被指数、改进植被指数、红树林识别指数)、纹理特征(包括对比度、角二阶矩、同质性、相关性和信息熵等 5 个纹理特征[28])和地形特征构建特征向量集, 集成支持向量机、K-近邻、决策树、集成分类器等 16 种算法, 结合交叉验证的方式确定精度最高的最优分类算法进行森林覆盖类型提取, 实现不同分类器间的优势互补, 得到比单个分类器算法精度更高的分类结果[29]; 最后在机器学习分类结果的基础上, 利用 2020 年 10 m 分辨率 Sentinel 卫星影像, 重点区域 2 m 国产高分系列卫星遥感数据, 结合小班数据及实地勘察数据, 对 2016 年茶园、果园等森林类型进行人工修正, 将获得的 2020 年福建海岸带 40 个县域的精细森林覆盖类型嵌入 2020 年全球 30 m GLC_FCS30-2020 产品, 由此获得包括以阔叶林、针叶林、针阔混交林、茶园灌木林、果园经济林为主要林地类型的福建海岸带 2020 年森林类型分布图。

2.2　海岸带森林林龄指标提取

本研究运用 LandTrendr 算法[30], 分析福建省海岸带森林的时序变化和林龄估算。该算法的核心在于对时间序列数据的分割拟合能力, 通过追踪光谱时间轨迹, 既可以识别森林短期剧烈干扰, 如火烧、采伐, 也能够监测森林长期的恢复过程。Kennedy 等[30]的研究表明, 相较于归一化植被指数(normalized difference vegetation, NDVI)和缨帽变化湿度指数(Wetness), 归一化燃烧指数(normalized burn ratio, NBR)对于火烧、采伐等干扰事件具有更高的灵敏度[31], 并能够更好地揭示干扰的特征[32]; 为获取更为精确的森林干扰发生与恢复结果, 本研究在运用

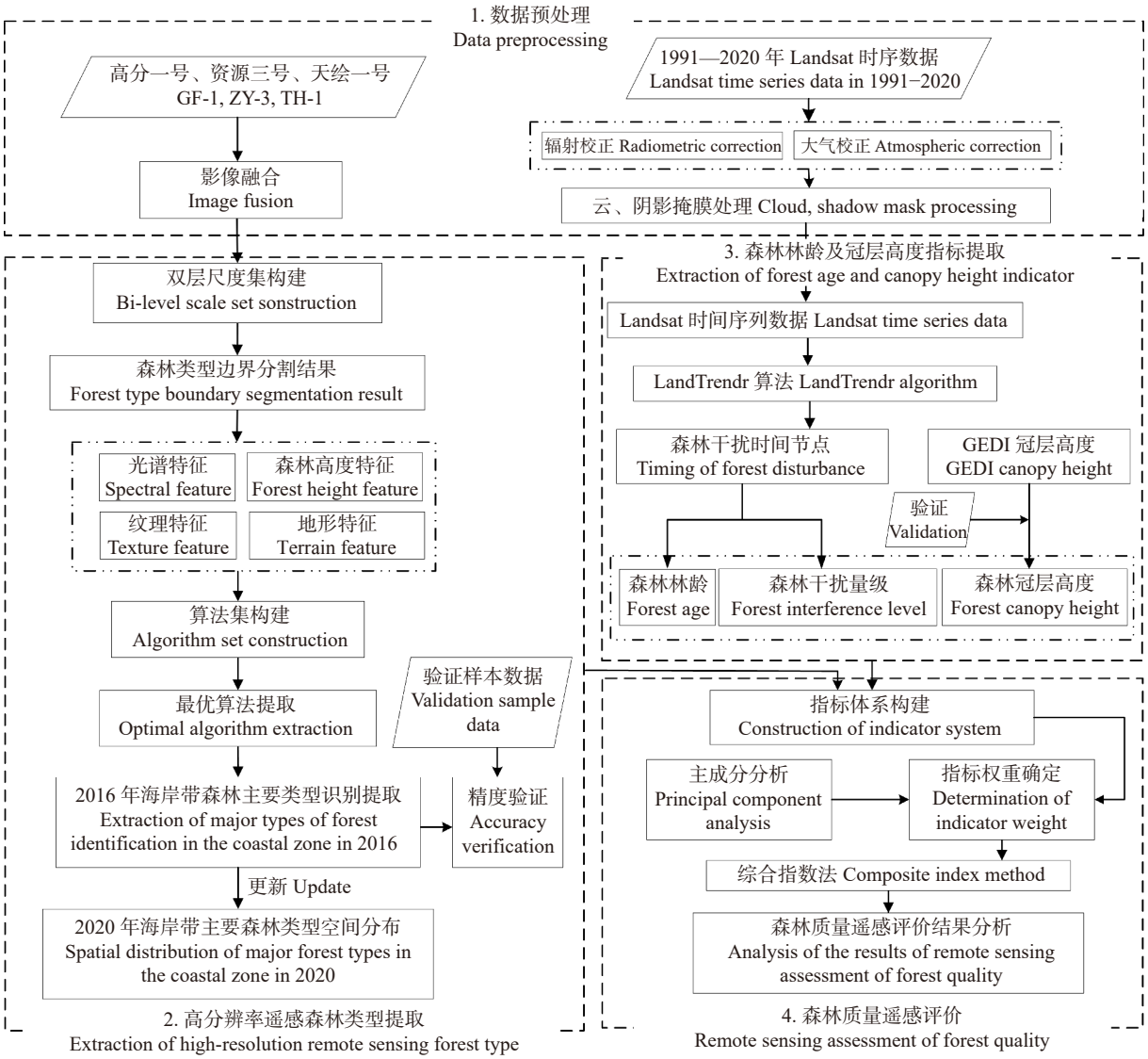


图 1 研究技术路线图

Fig. 1 Research technology roadmap

LandTrendr 算法时选取 NBR 作为光谱指数构建像素级的时间序列，通过监测 NBR 时序轨迹中突变点来准确判断森林的状态和变动。同时为适应目前研究区的植被特征，本研究在以往基础上基于 LT-GEE 算法[33]进行相应参数调整(表 2)，得到福建省海岸带 1991—2020 年 30 期的海岸带森林发生扰动情况。根据先验知识，南方森林采伐干扰与重新造林时间间隔通常不超过一年，福建用材林多以马尾松、杉木等针叶林为主，森林恢复图噪声较大，因此选择基于 LandTrendr 算法获得的每一年森林干扰开始时间，结合森林扰动持续时间的结束年份，作为干扰后新造林林分年龄计算依据，估算人工林林龄。

2.3 海岸带森林生态质量评价

森林的生物物理属性与生长状态因其时空尺度的不同而有所区别，国内外学者针对不同研究区域、不同尺度、不同侧重点上森林生态质量评价指标体

表 2 LandTrendr 算法参数

Tab. 2 Parameters of LandTrendr algorithm

过程 Step	参数 Parameter	值 Value
分割 Segmentation	核尺寸 Kernel size	3
	最大分段数 Maximum number of segmentation	6
	噪声值 Noise level	0.9
	恢复率阈值 Recovery rate threshold	0.25
	最优模型比例 Optimal model ratio	0.75
滤波 Filter	1年植被覆盖损失阈值 1 year vegetation cover loss threshold	10
	10年植被覆盖损失阈值 10 year vegetation cover loss threshold	3
	干扰前覆盖阈值 Pre-interference coverage threshold	20
	植被生长比例阈值 Threshold for percentage of vegetation growth	5
制图 Mapping	最小制图单位 Minimum mapping unit	30 m

系和评价方法也不尽相同[34]。本研究以目前森林生态质量研究现状和方法为基础，并结合海岸带森林实际情况，森林覆盖类型、自身生长状况等因素，依照定性与定量相结合的原则，基于遥感手段获得森林生态质量评价关键指标及其衍生的辅助指标(见表 3)。指标选取时，由于考虑到森林郁闭度、蓄积量等指标获取结果不确定性高，故选用相关性较高的森林覆盖度、冠层高度和林龄因子代替。指标获取过程中，GEDI 冠层高度产品验证精度要达到森林生态质量评价分析要求，才能直接作为冠层高度指标进行计算，否则需要考虑到福建省地理位置及地形地貌等特征信息，对 GEDI 产品进行修正。指标体系中 X_1, X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8 均根据森林类型、林龄、冠层高度及干扰量级等指标衍生而来，X_4 指标中人工林面积为 LandTrendr 算法计算得到的受干扰区域面积，各指标具体计算方法如表 3 所示。因各指标原始变量量纲有差异，本文选极差正规化方法来标准化数据。

表 3　森林生态质量评价指标体系

Tab. 3　Forest ecological quality evaluation index system

指标 Index	森林生态质量评价指标含义 Meaning of forest ecological quality assessment indicators	计算方法 Calculation method
森林类型 Forest type (X_1)	表征森林覆盖类型的均衡程度 Characterizing the balance of forest cover types	森林各类型面积与其区域面积比 Proportion of area of each forest type in relation to its regional area
森林覆盖率 Forest coverage (X_2)	反映地区森林资源、林业发展状况及森林效益的综合性指标 Comprehensive indicators reflecting regional forest resources, forestry development and forest benefits	区域森林面积与其区域面积比值 Ratio of regional forest area to its regional area
龄级结构 Age structure (X_3)	反映森林龄级的均衡水平 Reflecting equilibrium level of forest age class	各龄级与森林面积比值 Ratio of age classes to forest area
人工林比重 Percentage of plantation (X_4)	反映森林资源造林活动的演替程度 Reflecting the degree of succession of silvicultural activities on forest resources	人工林面积与森林面积比值 Ratio of plantation area to forest area
人均森林面积 Forest area per capita (X_5)	反映森林资源的人均占有量水平 Reflecting the level of per capita occupancy of forest resources	森林总面积与人口比值 Ratio of total forest area to population
林地利用率 Forest land utilization rate (X_6)	反映林业用地的利用水平 Reflecting the level of utilization of forestry land	有林地面积与林业用地面积比值 Ratio of forested land area to forest land area
冠层高度 Canopy height (X_7)	反映森林生长状况 Reflecting forest growth condition	各冠层高度面积与森林总面积比值 Ratio of area of each canopy height to total forest area
干扰量级 Interference level (X_8)	反映森林受干扰的程度 Reflecting the extent of forest disturbance	不同干扰量级与干扰总面积比值 Ratio of different interference levels to total interference area

为了构建更加科学合理的森林生态质量评价指标体系，结合研究区各项与森林生态质量相关的指标数据，利用主成分分析法对森林生态质量评价指标权重进行确定，然后利用综合指数法实现海岸带 40 个县域的森林生态质量评价($y_{(n)}$)，并结合自然断点法，使各段分级之间差异最大化，将森林生态质量状况划分为优($y_{(n)} \geqslant 0.50$)、良($0.35 \leqslant y_{(n)} < 0.50$)、中($0.15 \leqslant y_{(n)} < 0.35$)、差($y_{(n)} < 0.15$)共 4 个等级。

3　结果与分析

3.1　福建海岸带森林类型提取

3.1.1　海岸带森林类型提取精度评价

为评价森林类型提取结果精度，本研究利用分层随机采样的方法结合 GoogleEarth 影像及野外考察样本点获取总计 1 667 个验证样本点，对海岸带各个市域进行精度验证(表 4)。验证结果表明福建海岸带以市为单位的分类结果总体精度均能达到 90% 以上，说明选取最优算法方法在大区域森林类型提取研究中具有一定的普适性，提取结果可作为后续评价森林生态质量重要指标。森林类型提取结果中，有林地的用户精度和生产者精度最高，除莆田市用户精度为 88.89%，其余市都稳定维持在 90% 以上，茶园和果园光谱特征易与类似植被混淆，提取精度略有下降，但也稳定在 85% 以上，满足后续分析需求。

3.1.2　森林类型空间分布及面积统计

本研究福建海岸带遥感提取 2020 年森林类型主要包括阔叶林、针叶林、针阔混交林、茶园、果园经济林、红树林等森林类型(图 2)。研究区林地以阔叶林为主，总体森林分布呈现西北方向至东南方向逐渐减少的趋势，靠近海岸地区的森林覆盖明显减少，海岸带西南方向尤其明显。福州市辖区、厦门市辖区及泉州市辖区森林覆盖明显稀少，仙游县、闽侯县、福安市、云霄县等森林覆盖面积较大。

福建省海岸带研究区共有 40 个县域，本研究按照各县域森林类型面积大小降序排列结果如图 3 所

表 4 福建海岸带森林类型遥感分类结果精度验证

Tab. 4 Validation of the accuracy of forest classification results in the coastal zone of Fujian Province

地区 Region	精度 Accuracy	人工地表 Artificial surface	耕地 Plow land	迹地 Trails	有林地 Woodland	果园 Orchard	茶园 Tea plantation	水体 Waters	红树林 Mangrove	总体精度 Overall accuracy/%	Kappa系数 Kappa coefficient
宁德市 Ningde City	PA/%	94.12	91.89	88.89	92.86	88.46	88.24	95.83			
	UA/%	91.43	82.93	92.31	94.20	85.19	91.84	95.83		91.11	0.89
	F	92.75	87.18	90.57	93.53	86.79	90.00	95.83			
福州市 Fuzhou City	PA/%	92.31	88.10	89.74	96.25	88.24	87.10	97.37			
	UA/%	85.71	86.05	94.59	95.06	93.75	93.10	97.37		92.71	0.91
	F	88.89	87.06	92.11	95.65	90.91	90.00	97.37			
莆田市 Putian City	PA/%	92.31	94.00	91.67	92.31	85.71	87.18	94.87			
	UA/%	96.00	94.00	91.67	88.89	85.71	89.47	97.37		91.51	0.89
	F	94.12	94.00	91.67	90.57	85.71	88.31	96.10			
泉州市 Quanzhou City	PA/%	89.13	93.88	85.71	91.30	86.11	84.62	96.30	93.33		
	UA/%	95.35	85.19	92.31	95.45	86.11	81.48	92.86	87.50	90.20	0.88
	F	92.13	89.32	88.89	93.33	86.11	83.02	94.55	90.32		
厦门市 Xiamen City	PA/%	89.19	91.67	90.91	93.88	83.33	92.31	96.00			
	UA/%	91.67	91.67	90.91	93.88	88.24	92.31	92.31		91.96	0.90
	F	90.41	91.67	90.91	93.88	85.71	92.31	94.12			
漳州市 Zhangzhou City	PA/%	93.18	93.33	91.67	93.65	87.10	87.23	91.67	93.75		
	UA/%	93.18	91.80	91.67	92.19	88.52	89.13	93.62	90.91	91.32	0.90
	F	93.18	92.56	91.67	92.91	87.80	88.17	92.63	92.31		

注：PA、UA、*F*分别代表生产者精度、用户精度和*F*统计量。Notes: PA, UA, and *F* represent producer accuracy, user accuracy, and *F* statistic, respectively.

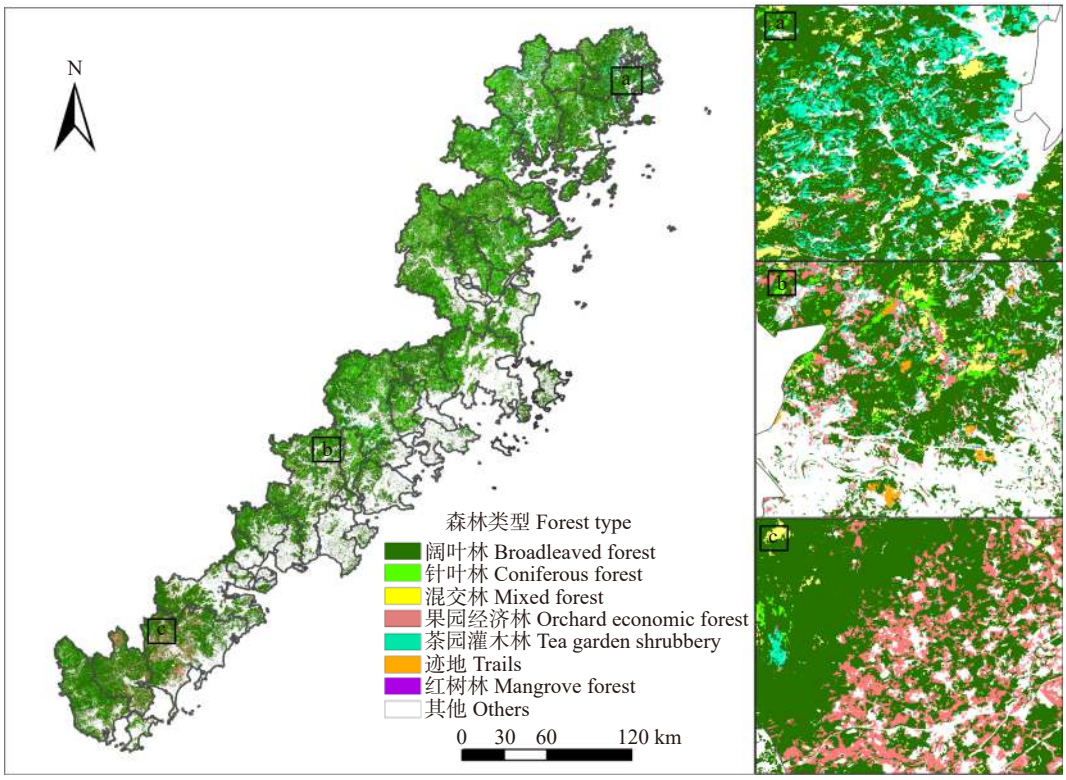


图 2 基于多源遥感数据的 2020 年福建海岸带森林类型分布提取结果

Fig. 2 Extraction results of forest type distribution in Fujian Province coastal zone in 2020 based on multi-source remote sensing data

示。研究区林地类型主要包括阔叶林、针叶林及混交林，漳浦县及龙海市等，阔叶林占有林地面积比重达到了 80% 以上，沿海行政面积较小的市辖区森林类型也基本从属于阔叶林。福建海岸带林地分布面积占比排名前八的县市（闽侯县、仙游县、南安市、福安市、霞浦县、蕉城区、漳浦县、福鼎市）林地面积均达到了 1 000 km^2 以上，闽侯县林地面积为 1 543.57 km^2。研究区范围内森林覆盖率最高的县为

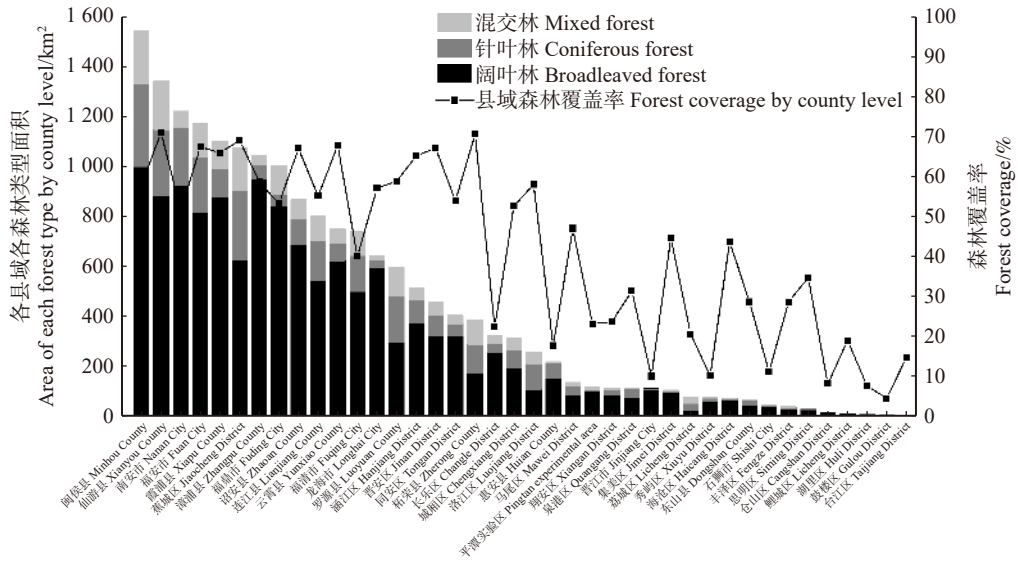


图 3　2020 年福建海岸带森林类型面积统计及森林覆盖率

Fig. 3　Forest area statistics and forest coverage of coastal zone in Fujian Province in 2020

仙游县，覆盖率高达 71.05%；除蕉城区外，其余市辖区的森林覆盖面积和覆盖率普遍较低。由此看出海岸带县域的森林覆盖状况差异较大，要提高福建省整体森林覆盖率，海岸带县域是治理的关键区域。

3.2　福建海岸带森林林龄提取

由于研究区域地理和时间跨度较大，在 LandTrendr 算法计算森林干扰与恢复结果基础上，首先掩膜掉持续森林、持续非森林、水体区域，获得 1991—2020 年 30 期的海岸带森林发生扰动的区域。本研究按照森林向非森林转换（林地转换为建设用地、耕地、采伐）、森林严重受损（自然因素）、森林退化（缓慢长期）等变化因素，将干扰力度从弱到强分为轻微干扰、中度干扰、重度干扰 3 个等级，福建海岸带干扰量级空间分布状况如图 4 所示。

本研究结合 LandTrendr 识别得到的森林干扰开始时间及结束年份估算发生扰动区域的森林林龄，而未检测到干扰的区域在时序内（1991—2020 年）则呈现持续森林特征，本文将该部分区域森林林龄初步估算为 30 年以上，以此得到研究区总体森林林龄空间分布（图 5）。

3.3　福建海岸带森林冠层高度提取

3.3.1　冠层高度结果验证

实测数据验证可得（图 6），GEDI 冠层高度结果与树高实测数据 R^2 达到 0.76，平均 RMSE 为 2.80 m，表明 GEDI 可有效探测到植被垂直高度。因此冠层高度产品得到的海岸带森林冠层高度信息，可作为

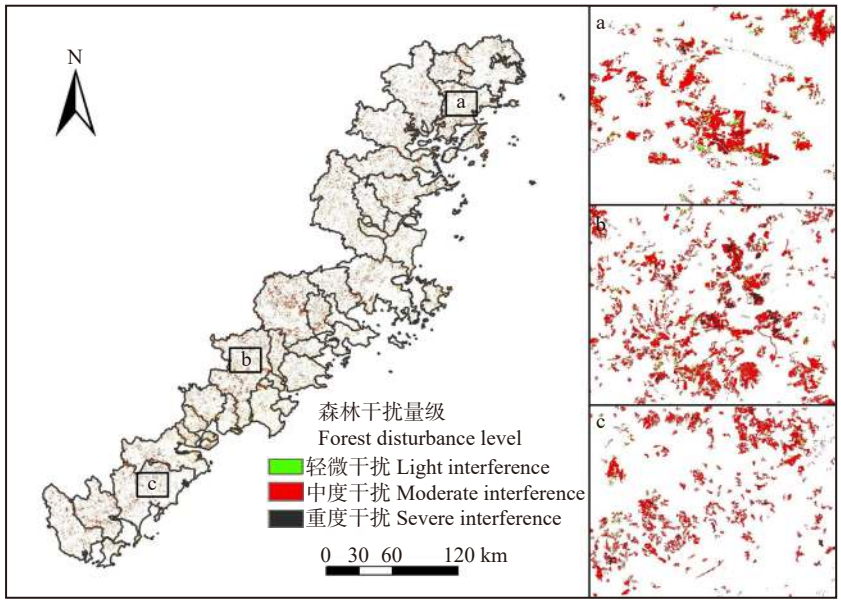


图 4　福建海岸带森林干扰量级

Fig. 4　Forest disturbance levels in Fujian Province coastal zone

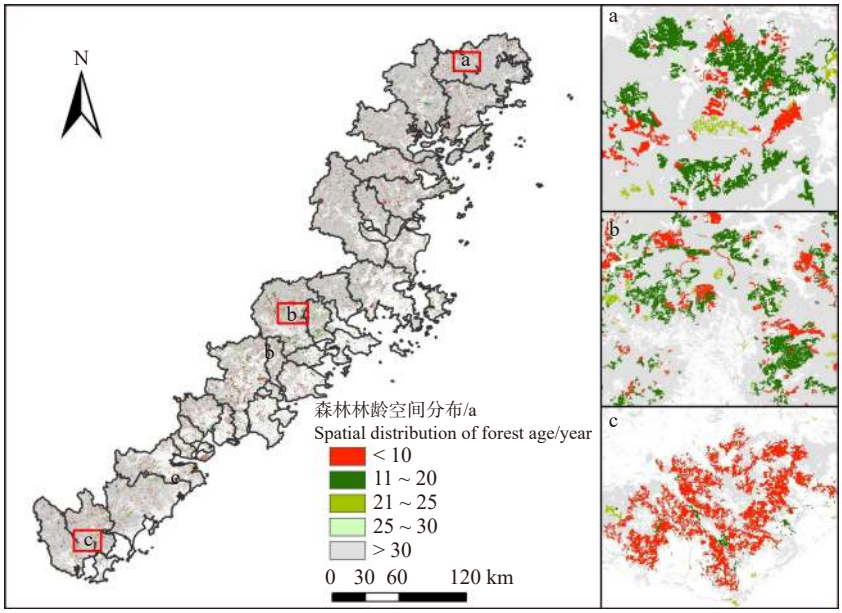


图 5 福建海岸带森林林龄空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of forest age in Fujian Province coastal zone

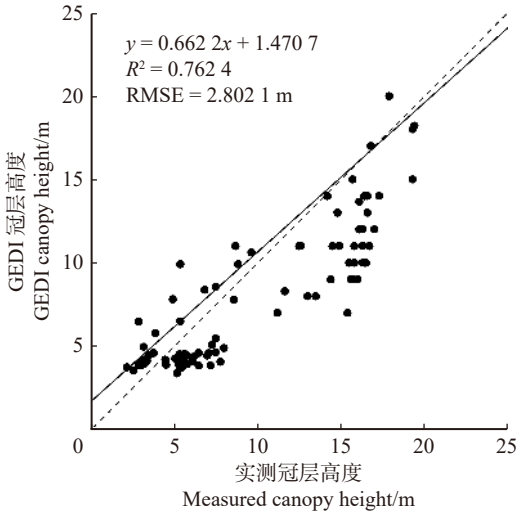


图 6 GEDI 冠层高度验证

Fig. 6 Verification of GEDI canopy height

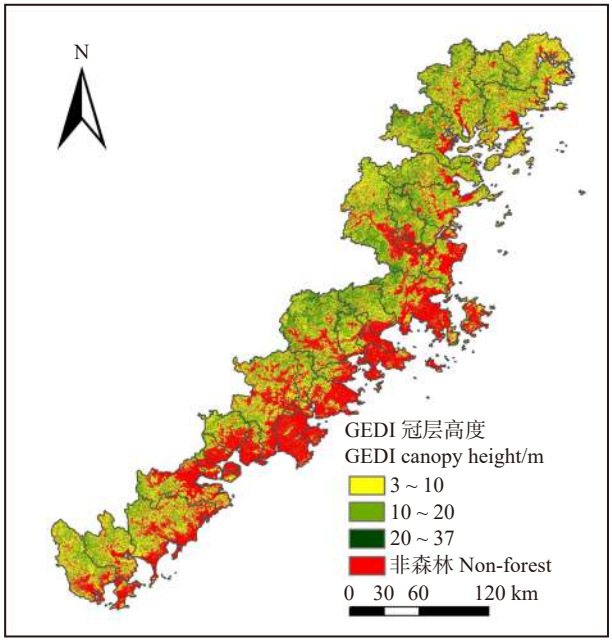


图 7 福建海岸带 GEDI 冠层高度分级

Fig. 7 GEDI canopy height classification of Fujian Province coastal zone

森林质量评价的一个关键指标因子。

3.3.2 海岸带森林冠层高度分布

森林树冠高度较低的区域，预测的林分生产力和树木材积偏低，而森林树冠高度高的地区立地质量相应较好[35]。基于此，将森林冠层高度划分为 3 ~ 10 m、10 ~ 20 m、> 20 m 3 个等级，见图 7。据统计分析可知，海岸带各县域森林树高在 3 ~ 10 m 的森林面积达到 10 264.01 km^2，占据总面积的 45.31%，10 ~ 20 m 树高森林范围为 11 815.476 3 km^2，占比 52.16%，而高度大于 20 m 的森林范围仅占总面积的 2.52%。

3.4 福建海岸带森林生态质量评价

3.4.1 森林生态质量评价指标

在上文得到的森林类型、林龄、干扰量级以及冠层高度等指标基础上，建立的森林生态质量评价指标体系，得到各项衍生指标具体数值，并对标准化后指标进行相关性分析，使用 Pearson 相关系数表示各指标间相关程度。结果如表 5 所示，龄级结构和人工林面积比与其他指标之间的相关程度相对较低，但森林结构、森林覆盖率、人均森林面积、林地利用率、冠层高度以及干扰量级 6 项指标之间在 0.01 水平上呈现显著相关关系；同时对指标数据进行 KMO（kaiser-meyer-olkin）和 Bartlett 检验，得到 KMO 值为 0.738，Bartlett 检验 P 值小于 0.05，均说明指标数

表 5　森林生态质量评价指标 Pearson 相关系数

Tab. 5　Pearson correlation coefficients of forest ecological quality evaluation indicators

指标 Index	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8
X_1	0.794	0.269	1							
X_2	0.556	0.329	−0.657**	1						
X_3	0.569	0.216	−0.039	−0.13	1					
X_4	0.325	0.178	−0.058	0.156	−0.241	1				
X_5	0.225	0.233	−0.643**	0.821**	−0.119	−0.028	1			
X_6	0.795	0.276	0.524**	−0.485**	−0.044	0.001	−0.475**	1		
X_7	0.578	0.271	0.414**	−0.830**	0.005	−0.041	−0.736**	0.207	1	
X_8	0.209	0.236	−0.558**	0.689**	−0.064	0.194	0.559**	−0.29	−0.571**	1

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$。Notes: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$.

据之间存在一定的相关性。综上，总体上来看森林质量评价指标间具有一定的相关性基础，可作为后续主成分分析的基础数据。

根据特征值贡献率和累计贡献率解释总方差，采用主成分分析法对遥感获取的森林生态质量评价指标进行主成分抽取，同时利用载荷系数信息等进行权重计算。首先基于载荷系数与特征根的平方根的比值计算主成分得分，再利用各主成分得分与方差解释率的乘积累加值除以累计方差解释率，得到综合得分系数，最后将综合得分系数归一化处理得到各指标权重(表 6)。主成分分析共提取出 4 个主成分，分别记作 Y_1、Y_2、Y_3、Y_4，此 4 个主成分方差解释率分别是 39.37%，20.54%，13.37%，12.84%，累积方差解释率为 86.12%，各指标权重如表中所示。

根据计算所得各指标权重，结合指标数据无量纲化标准值，计算各个县域森林生态质量的综合评价指数 $y_{(n)}$，森林生态质量评价计算公式为

$$y_{(n)} = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 + eX_5 + fX_6 + gX_7 + hX_8$$

式中：$y_{(n)}$为森林生态质量指数，X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、X_8 分别表示森林类型、森林覆盖率、龄级结构、人工林比重、人均森林面积、林地利用率、冠层高度、干扰量级指标；a、b、c、d、e、f、g、h 为各指标的权重值，依次为 0.139 2、0.157 4、0.089 2、0.087 2、0.159 5、0.104 8、0.124 3、0.138 5。

3.4.2　森林生态质量遥感评价

根据所得指标权重进行计算，得到各县域的森林生态质量综合评价指数(图 8)。依据森林生态质量等级划分标准绘制福建海岸带各县域与典型县域乡镇尺度森林生态质量等级空间分布图(图 9)。结合图 8 与图 9，可知海岸带近 50% 的县域森林生态质量处于优良水平，而处于中等及以下水平的县域森林生态质量还存在较大的提升空间。在县域尺度上，仙游县、闽侯县、南安市、霞浦县及柘荣县森林生态质量较好，市辖区如海沧区、思明区、集美区、同安区森林生态质量为优。森林生态质量综合指数最低的有惠安县、福安市、秀屿区、平潭综合实验区、石狮市、诏安县。综合来说，森林覆盖率高、人工干扰少、阔叶林及混交林比重较大、中龄林及成熟林占比较大的区域森林生态质量较好，相反若受人

表 6　线性组合系数及权重结果

Tab. 6　Results of linear combination coefficients and weights

名称Name	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	综合得分系数 Composite score coefficient	权重 Weight/%
X_1	0.292 9	0.522 0	0.083	0.089 2	0.284 6	13.92
X_2	0.493 5	0.282 4	0.087 5	0.102 1	0.321 8	15.74
X_3	0.026 0	0.025 0	0.128 9	0.968 9	0.182 3	8.92
X_4	0.027 7	0.003 3	0.932 1	0.135 4	0.178 3	8.72
X_5	0.453 4	0.314 6	0.139 7	0.147 5	0.326 0	15.95
X_6	0.082 7	0.720 8	0.028 0	0.000 2	0.214 1	10.48
X_7	0.529 5	0.008 1	0.048 5	0.016 9	0.254 0	12.43
X_8	0.420 1	0.168 8	0.278 3	0.050 6	0.283 1	13.85
特征根 Eigenvalue	3.149	1.643	1.069	1.027		
方差解释率 Variance explaination rate/%	39.37	20.54	13.37	12.84		

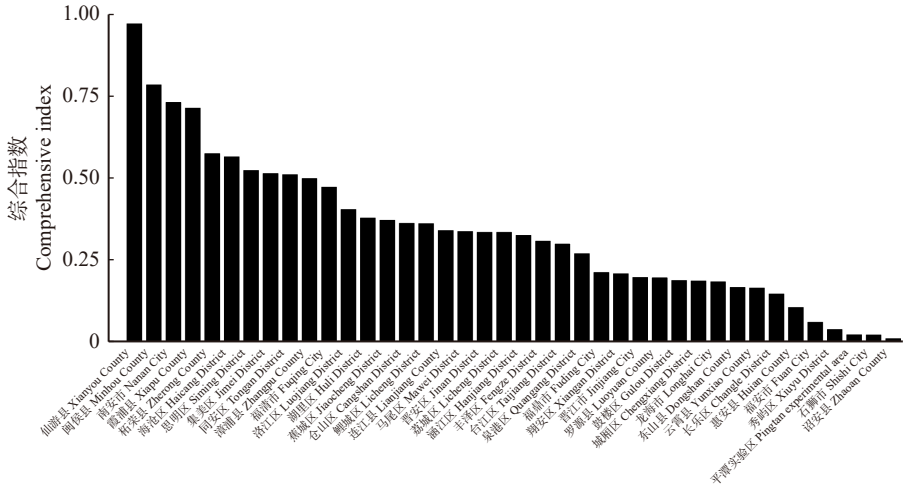


图 8 福建海岸带各县域森林生态质量综合指数

Fig. 8 Comprehensive index of forest ecological quality by counties in Fujian Province coastal zone

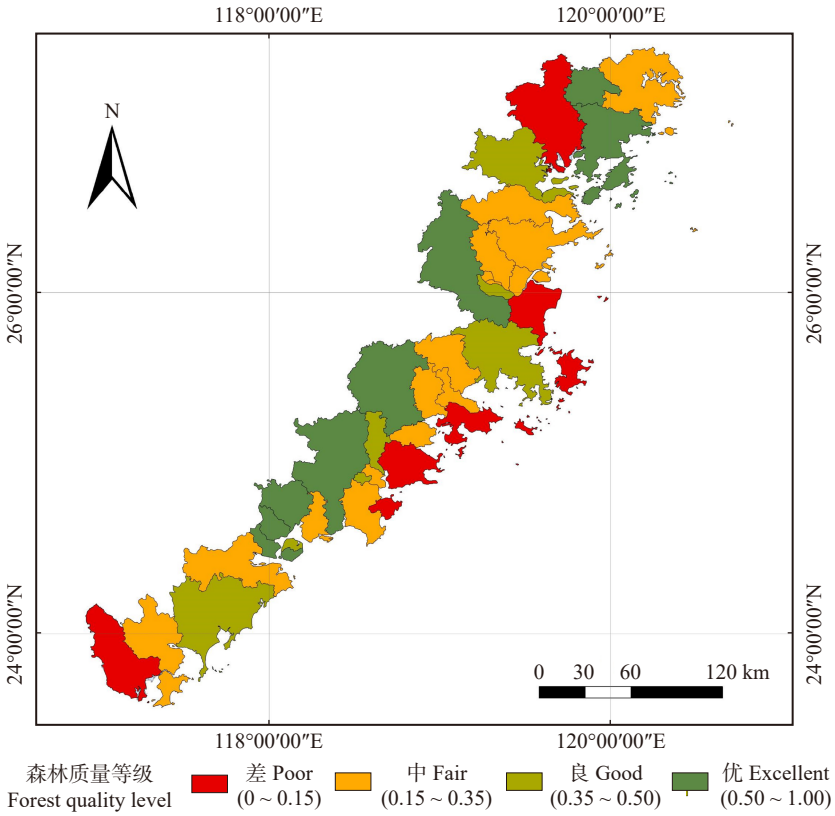


图 9 福建海岸带县域尺度森林生态质量等级分布

Fig. 9 Distribution of forest ecological quality levels at the county level in the coastal zone of Fujian Province

为干扰严重、且茶果园林地分布多、幼龄林比重较大且冠层高度较低区域的森林生态质量就较差。沿海县域森林生态质量还存在较大的提升空间，需要针对存在的问题采取相应森林管理政策提升森林生态质量。

4 讨论及结论

4.1 讨 论

本研究以利用遥感手段大范围高效、准确评价森林生态质量为目的，得到能够客观反映福建省海岸带 40 个县域的森林生态质量评价结果。基于评价结果，福建省森林生态质量差的县域应列为未来保护和修复的重点，相关部门应关注重点县域森林组成和龄组结构等关键指标现状，探寻森林生态质量差的问题所在，并找到最佳的路径提高生物多样性，防止林分退化，改善森林生态质量。

指标选取是森林生态质量评价的关键。森林结构、森林健康、森林生物量能够较为准确、客观地反映森林特征、生长状况以及生态功能等[5]，是评价森林生态质量的关键参数。基于此，本研究指标选取

时，首先根据森林生态质量评价相关规程初步选取具有代表性的指标，然后综合考虑初步选取的指标在福建省海岸带森林质量评价中的适用性，最终确定涵盖了森林结构、森林健康、生态功能、生物量方面的 8 个指标组成的评价体系。其中生物量指标考虑到通过遥感反演大范围区域生物量存在较大不确定性，难以保证反演结果的准确度，所以并未包含在指标体系中，同时 Guo 等[36]诸多学者都指出，森林生态质量评价指标体系包含生物量指标能更好地评估森林生态质量，所以本研究选取了树高、林龄等相关性较高的指标进行替换。

本文森林质量评价指标数据通过遥感影像获取，力求能客观、高效反映福建省海岸带森林现状。首先利用遥感手段分别获取森林类型、冠层高度和林龄等基础数据，进而结合相关统计数据进行计算得到反映福建省海岸带各市县森林质量的 8 项指标数据，以此为基准进行森林质量评价。森林类型数据获取采用面向对象分类、集成多分类器的方法在高分辨率遥感影像中进行提取，并利用提取结果对地表分类产品进行更新，来获取更为精确的福建省海岸带森林类型。相较于中低分辨率遥感影像，高分辨率遥感数据具有更为丰富的光谱信息，若基于像元进行森林类型提取，必然会出现大量噪点，影响最终森林类型提取结果精度；分类器选择方面，不同机器学习算法对同一类数据的敏感度有所不同，若能科学地集成多个分类器，为数据选取合适的算法，就能够提高森林类型信息提取精度，这与王怀警等[37]结合多分类器对高光谱影像进行森林类型精细识别具有相同的考虑。因此，将面向对象与结合多分类器方法相结合对大范围研究区进行森林类型提取是必要的，能提高提取结果精度，并保证模型的普适性；但由于多源遥感数据的复杂性以及大范围森林类型提取的工作难度较大，本研究未能有效区分出针叶林、阔叶林等精细森林类型，后续还需结合深度学习方法和高分辨率遥感数据完成大范围的森林类型精细提取工作。林龄指标获取相关研究中，Chen 等[38]、唐少飞等[39]多数研究者主要通过建立林龄估测回归模型实现，由于野外数据获取较为困难，回归模型的林龄预测仍存在一定的局限性，往往只适用于特定研究区，本研究则通过 LandTrendr 算法获取研究区内 30 年内干扰特征及衍生时间节点，通过干扰发生及持续时间估算林龄，适用于对大范围区域进行林龄估算，实现了人工林林龄的有效估算。

森林生态质量评价是一个多元化且复杂的问题，利用遥感手段进行森林生态质量评价还存在诸多问题。首先是鉴于遥感数据进行指标反演的可行性，目前多数研究选取的指标侧重于选取易获取的评价指标，不能够全面地评估森林生态质量。本研究构建的指标体系同样也存在此类问题，健康状态部分仅仅利用干扰强度指标反映，想要更加准确地评估森林生态质量，还需要引入更多元的指标反映森林的健康状态，比如病虫害、森林火灾以及气候灾害等干扰指标；同时各地区树种、立地条件以及遥感数据质量等不同，导致该评价模型可能在不同研究区应用时产生误差；因此利用该模型时，为确保客观评价森林生态质量，各指标阈值应当因地制宜地进行调整，以此来提高模型的普适性。其次，本研究构建的模型在利用遥感数据提取指标数据部分还有进一步优化的空间，目前冠层高度指标数据是利用 GEDI 冠层高度产品进行获取，虽然 GEDI 冠层高度和验证数据之间存在良好的相关关系，但还是存在一定误差，后续若能够获取更高精度的冠层高度数据，才能更加准确评估福建省海岸带森林生态质量状况。最后，利用遥感技术进行指标反演过程中，需要大量准确、有代表性的样本数据对模型进行训练以及验证，而样本数据获取通常需要耗费大量的时间，并且出现和影像数据不同步的问题，反而降低反演的精度；为开展高质量的森林生态质量评价，需要加强地面森林长期系统化监测，不断更新有效的样本数据，以提高遥感模型的评估精度。

4.2　结　论

本文以福建海岸带为研究区，综合利用国产高分辨率遥感、Landsat 时序遥感、GEDI 星载激光雷达等多源卫星遥感数据，开展海岸带森林生态质量遥感评价研究，以期为林业经营发展规划与宏观决策提供指导借鉴。得到如下主要结论：

(1)福建海岸带有林地主要以阔叶林为主，其中闽侯县有林地面积在各县域中排名第一，达到 1 543.57 km^2；森林覆盖率最高的县为仙游县，覆盖率高达 71.05%。

(2)利用 LandTrendr 算法衍生的干扰开始时间特征估算现有人工林年龄及通过 GEDI 冠层高度产品获取海岸带森林冠层高度分布具有可行性。

(3)利用遥感手段获取的 8 项森林生态质量评价指标进行森林生态质量评价，评价结果表明，福建省海岸带约 50% 的县域森林生态质量处于优良水平，而森林生态质量处于中等及以下水平的县域占据较大比例，评价结果与福建省海岸带森林生态质量的实际情况相符。

(4)综合 2020 年福建海岸带 40 个县域森林生态质量遥感评价结果，其中仙游县、闽侯县、南安市、霞浦县、柘荣县及厦门市的海沧区、思明区、集

美区、同安区等森林生态质量为优，而惠安县、福安市、秀屿区、平潭综合实验区、石狮市、诏安县森林生态质量较差。福建沿海县域森林生态质量还存在较大的提升空间，应该重点关注森林组成和龄组结构等关键指标现状，探寻森林生态质量差的问题所在，并找到最佳的路径提高生物多样性，防止林分退化，改善森林生态质量。

参 考 文 献

[1] Baumann M, Ozdogan M, Wolter P T, et al. Landsat remote sensing of forest windfall disturbance[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 143: 171−179.

[2] Ghebrezgabher M G, Yang T, Yang X, et al. Extracting and analyzing forest and woodland cover change in Eritrea based on Landsat data using supervised classification[J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2016, 19(1): 37−47.

[3] 张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1−18.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[4] 石春娜, 王立群. 浅析森林资源质量内涵 [J]. 林业经济问题, 2007, 27(3): 221−224.
Shi C N, Wang L Q. Connotation of forest resourses quality[J]. Problems of Forestry Economics, 2007, 27(3): 221−224.

[5] 韩皓爽, 万荣荣. 森林生态质量评估方法研究进展 [J]. 生态科学, 2021, 40(4): 212−222.
Han H S, Wan R R. A review on the methods of ecological evaluation of forest quality[J]. Ecological Science, 2021, 40(4): 212−222.

[6] 张静静, 穆艳华. 伏牛山地区森林生态系统生境质量多视角评价 [J]. 生态科学, 2021, 40(5): 116−121.
Zhang J J, Mu Y H. Multi-perspective evaluation on habitat quality of forest ecosystem in Funiu Mountain Region[J]. Ecological Science, 2021, 40(5): 116−121.

[7] 莫可, 赵天忠, 蓝海洋, 等. 基于因子分析的小班尺度用材林森林质量评价: 以福建将乐国有林场为例 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(1): 48−54.
Mo K, Zhao T Z, Lan H Y, et al. Quality assessment at subcompartment level of forests used for timber production based on factor analysis: a case study in Jiangle National Forest Farm, Fujian Province[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(1): 48−54.

[8] Feng J G, Wang J S , Yao S C, et al. Dynamic assessment of forest resources quality at the provincial level using AHP and cluster analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 184-193.

[9] 张琳, 宋创业, 袁伟影, 等. 基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系构建 [J]. 生态学报, 2023, 43(1): 128−139.
Zhang L, Song C Y, Yuan W Y, et al. Construction of comprehensive evaluation index system of vegetation ecological quality based on field survey[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 128−139.

[10] 陈强, 陈云浩, 王萌杰, 等. 2001—2010 年洞庭湖生态系统质量遥感综合评价与变化分析 [J]. 生态学报, 2015, 35(13): 4347−4356.
Chen Q, Chen Y H, Wang M J, et al. Ecosystem quality comprehensive evaluation and change analysis of Dongting Lake in 2001−2010 based on remote sensing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(13): 4347−4356.

[11] Zhao Q, Yu S, Zhao F, et al. Comparison of machine learning algorithms for forest parameter estimations and application for forest quality assessments[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 434: 224–234.

[12] 龚宇浩, 孙益群, 董晨, 等. 基于广义代数差分法和因子选择的杉木人工林立地质量评价 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(6): 1282−1291.
Gong Y H, Sun Y Q, Dong C, et al. Site quality evaluation of *Cunninghamia lanceolata* plantation based on generalized algebraic difference approach and factor selection[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(6): 1282−1291.

[13] 唐雅娟. 基于小班尺度的永安市森林质量评价 [J]. 林业与环境科学, 2021, 37(6): 130−134.
Tang Y J. Evaluation of forest quality based on subcompartment Scale in Yongan[J]. Forestry and Environmental Science, 2021, 37(6): 130−134.

[14] 杜志, 甘世书, 胡觉. 全国森林资源质量综合评价 [J]. 中南林业调查规划, 2018, 37(3): 1−5.
Du Z, Gan S S, Hu J. Comprehensive evaluation of forest resources quality in China[J]. Central South Forestry Inventory and Planning, 2018, 37(3): 1−5.

[15] 刘婷婷, 孔越, 吴叶, 等. 基于熵权模糊物元模型的我国省域森林生态安全研究 [J]. 生态学报, 2017, 37(15): 4946−4955.
Liu T T, Kong Y, Wu Y, et al. Provincial forest ecological security evaluation in China based on the entropy weight of the fuzzy matter element model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15): 4946−4955.

[16] 邵炜, 熊宇, 卢惠, 等. 永定河流域森林质量评价与分析 [J]. 陕西林业科技, 2021, 49(6): 36−40.
Shao W, Xiong Y, Lu H, et al. Evaluation of forest resources quality in Yongding River Basin[J]. Shanxi Forest Science and Technology, 2021, 49(6): 36−40.

[17] 冯继广, 王景升, 姚帅臣, 等. 基于因子分析的森林资源质量综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 27−32, 42.
Feng J G, Wang J S, Yao S C, et al. Comprehensive evaluation of forest resources quality based on factor analysis[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1): 27−32, 42.

[18] 刘海轩, 李锋, 马远, 等. 基于景观多样性的北京市域森林质量综合评价 [J]. 中国园林, 2022, 38(10): 14−19.
Liu H X, Li F, Ma Y, et al. Comprehensive evaluation of forest

quality in Beijing based on landscape diversity[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(10): 14−19.

[19] Roy D P, Kovalskyy V, Zhang H K, et al. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 185: 57−70.

[20] Liu L, Zhang X, Chen X, et al. GLC_FCS30-2020: Global land cover with fine classification system at 30 m in 2020[J]. Earth System Science Data, 2020, 13: 2753−2776.

[21] Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The global ecosystem dynamics investigation: high-resolution laser ranging of the earth's forests and topography[J/OL]. Science of Remote Sensing, 2020, 1: 100002[2023−03−21]. https://doi.org/10.1016/j.srs.2020.100002.

[22] Potapov P, Li X, Hernandez-Serna A, et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data[J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 253: 112165.

[23] Xiao D, Chen Q, Li S. A multi-scale cascaded hierarchical model for image labeling[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2016, 30(9): 1660005.

[24] Tucker C J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation[J]. Remote Sensing of Environment, 1979, 8(2): 127−150.

[25] Gao B C. NDWI: a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257−266.

[26] Jordan C F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor[J]. Ecology, 1969, 50(4): 663−666.

[27] Dihkan M, Guneroglu N, Karsli F, et al. Remote sensing of tea plantations using an SVM classifier and pattern-based accuracy assessment technique[J]. International Journal of Remote Sensing, 2013, 34(23): 8549−8565.

[28] 宋荣杰, 宁纪锋, 常庆瑞, 等. 基于小波纹理和随机森林的猕猴桃果园遥感提取 [J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 222−231.
Song R J, Ning J F, Chang Q R, et al. Kiwifruit orchard mapping based on wavelet textures and random forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 222−231.

[29] 窦鹏. 基于投票法的多分类器集成遥感影像分类技术 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
Dou P. Remote sensing image classification with multiple classifiers integration based on voting [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014.

[30] Kennedy R E , Yang Z , Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series (1): LandTrendr: temporal segmentation algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2897−2910.

[31] 钟莉, 陈芸芝, 汪小钦. 基于 Landsat 时序数据的森林干扰监测 [J]. 林业科学, 2020, 56(5): 80−88.
Zhong L, Chen Y Z, Wang X Q. Forest disturbance monitoring based on time series of Landsat data[J]. Scientia Silvae Sincae, 2020, 56(5): 80−88.

[32] Cohen W B, Yang Z, Kennedy R E. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series (2): TimeSync-Tools for calibration and validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2911−2924.

[33] Robert K , Zhiqiang Y , Noel G , et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth engine[J]. Remote Sensing, 2018, 10(5): 691.

[34] Zhao L Z Z. Comparison of machine learning algorithms for forest parameter estimations and application for forest quality assessments[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 434: 224-234.

[35] Li W, Chen J, Zhang Z. Forest quality-based assessment of the Returning Farmland to Forest Program at the community level in SW China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 461: 117938.

[36] Guo K, Wang B, Niu X. A review of research on forest ecosystem quality assessment and prediction methods[J]. Forests, 2023, 14(2): 317.

[37] 王怀警, 谭炳香, 王晓慧, 等. 多分类器组合森林类型精细分类 [J]. 遥感信息, 2019, 34(2): 104−112.
Wang H J, Tan B X, Wang X H, et al. Multiple classifiers combination method for precise classification of forest type[J]. Remote Sensing Information, 2019, 34(2): 104−112.

[38] Chen B Q, Cao J H, Wang J K, et al. Estimation of rubber stand age in typhoon and chilling injury afflicted area with Landsat TM data: a case study in Hainan Island, China[J]. Forest Ecology and Management, 2012, 274: 222−230.

[39] 唐少飞, 田庆久, 徐凯健, 等. Sentinel-2 卫星落叶松林龄信息反演 [J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1511−1524.
Tang S F, Tian Q J, Xu K J, et al. Age information retrieval of *Larix gmelinii* forest using Sentinel-2 data[J]. Journal of Remote Sensing (Chinese), 2020, 24(12): 1511−1524.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）