

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.017

CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.017

叶遒, 洪燕真, 张榕欢, 等. 福建省森林生态系统服务价值时空演变格局及空间异质性分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 244-255, 263.

YE Chuan, HONG Yanzhen, ZHANG Ronghuan, et al. Spatiotemporal dynamics and spatial heterogeneity of forest ecosystem services in Fujian Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 244-255, 263.

福建省森林生态系统服务价值时空 演变格局及空间异质性分析

叶遒^{1,2}, 洪燕真^{1,2}, 张榕欢^{1,2}, 黄诗怡^{1,2}, 潘思杰^{1,2}

(1. 福建农林大学经济与管理学院, 福州 350002; 2. 国家林业和草原局集体林业改革发展研究中心, 福州 350002)

摘要: [目的] 科学评估福建省森林生态系统服务价值, 为福建省生态保护与高质量发展提供有益借鉴。[方法] 基于地理学的时空视角, 以福建省2000年、2003年、2008年、2013年、2018年和2023年的森林生态系统服务价值为研究对象, 运用价值当量法, 并进行3次系数修正, 测算对应年份的福建省森林生态系统服务价值, 运用ArcGIS重心模型、空间分析等模型方法分析其时空格局的演变。[结果] 1) 福建省森林生态系统覆盖面广, 总面积呈先增长后降低趋势, 分布较为均衡。但森林生态系统逐渐呈分散化趋势, 破碎化程度加深。2) 福建省森林生态系统服务价值呈波动变化趋势, 总值略有下降, 但变化程度较小, 调节服务价值是森林生态系统服务价值的主体, 变动趋势与森林生态系统服务价值的变动趋势基本一致。不同阶段的森林生态系统服务价值等级空间地域性分布规律明显, 不同时期各区县的级别分布存在差异。3) 福建省森林生态系统服务价值空间分布格局呈“东北—西南”的空间分布态势, 分布重心大体向西南方向移动, 逐渐偏离福建省的几何中心, 标准差椭圆的覆盖面呈较为稳定态势, 空间分布均衡性逐渐加强。4) 福建省森林生态系统服务价值呈高高集聚或低低集聚的空间分布特征, 且森林生态系统服务价值高-高、低-低类型的空间集聚效果比较显著, 低-高、高-低类型的空间集聚效果并不明显。[结论] 研究结果对福建省摸清森林生态系统家底、整合空间配置、制定科学合理的生态保护和管理政策及促进区域可持续发展具有重要的现实意义。

关键词: 福建省; 森林生态系统; 服务价值; 时空演变

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0244-12

Spatiotemporal Dynamics and Spatial Heterogeneity of Forest Ecosystem Services in Fujian Province

YE Chuan^{1,2}, HONG Yanzhen^{1,2}, ZHANG Ronghuan^{1,2}, HUANG Shiyi^{1,2}, PAN Sijie^{1,2}

(1. College of Economics and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Research Center for Collective Forestry Reform and Development, National Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, China)

Abstract: [Objective] This study aims to assess the forest ecosystem service value in Fujian Province, providing valuable insights for ecological conservation and high-quality development in the region. [Methods] From a spatiotemporal geographical perspective, this study evaluated the forest ecosystem service value of Fujian Province for the years 2000, 2003, 2008, 2013, 2018, and 2023 using the value equivalent method with three rounds of coefficient adjustments. ArcGIS tools, including the center of gravity model and spatial analysis, were employed to examine the spatiotemporal evolution patterns. [Results] 1) Fujian's forest ecosystem exhibited extensive coverage, with total area increasing first and then declining, showing a relatively balanced distribution. However, the forest ecosystem became increasingly dispersed, with more pronounced fragmentation. 2) The

收稿日期: 2025-01-07

修回日期: 2025-02-27

录用日期: 2025-03-19

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-18

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(72473021, 72073029, 72073107); 第四批林草科技青年拔尖人才项目(2024132017); 国家社会科学基金重大项目(24&ZD108); 广东省哲学社科重大项目(GD24WTCXGC07); 福建农林大学习近平生态文明思想研究院开放课题重点项目(STWMSX23-02)

第一作者: 叶遒(1997—), 男, 博士研究生, 主要从事林业经济理论与政策研究。E-mail: 764486161@qq.com

通信作者: 洪燕真(1984—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事林业经济理论与政策研究。E-mail: hongyanzhen1984@163.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

forest ecosystem service value exhibited a fluctuating trend with a slight overall decline and limited variation. Regulation services were the dominant component, and their trend closely mirrored the overall service value trend. Forest ecosystem service value grades showed clear spatial and regional distribution patterns across different stages, with varying forest ecosystem service value classifications among counties. 3) Spatially, forest ecosystem service value displayed a "northeast-southwest" distribution, with the center shifting southwestward, gradually deviating from Fujian's geometric center. The coverage of the standard deviation ellipse remained relatively stable, indicating enhanced spatial equilibrium. 4) The forest ecosystem service value in Fujian Province exhibited spatial distribution of high-high and low-low clustering, with these types of clusters being significant, while the low-high and high-low clustering effects were not obvious. **[Conclusion]** The results are of practical significance for identifying the full inventory of forest ecosystems and optimizing spatial allocation, thus supporting the formulation of science-based ecological protection and management policies in Fujian Province to foster sustainable regional development.

Keywords: Fujian Province; forest ecosystem; service value; spatiotemporal evolution

Received: 2025-01-07

Revised: 2025-02-27

Accepted: 2025-03-19

Online(www.cnki.net): 2025-06-18

党的二十大报告提出“建立生态产品价值实现机制,完善生态保护补偿制度”。森林生态系统作为陆地上最大的生态系统,指以乔木为主体的森林生物群落(包括动物、植物和微生物)与非生物环境(光、热、水、气、土壤等)之间相互作用,并进行能量转换和物质循环流动的综合生态体系,具有涵养水源、保持水土、调节气候、净化空气等生态功能,以及经济价值和生物多样性保护等多种功能和作用,基于森林生态系统各种生态功能而产生的森林生态系统服务价值是森林生态产品价值实现的重要载体^[1],更是落实好“绿水青山就是金山银山”的关键前提。因此,科学评估森林生态系统服务价值,对全面揭示森林多重价值,推动生态保护与经济发展的平衡,实现人与自然和谐共生具有重要意义。

为实现对森林生态系统服务价值的准确衡量,首要目标是构建一套科学的价值评估体系。早在2000年,联合国千年生态系统评估将生态系统服务定义为人类从生态系统中获取的惠益,包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务4大类,自此以后,围绕不同尺度、不同类型生态系统服务价值的计量研究已经广泛开展^[2],其中,森林生态系统服务价值评估逐步成为研究热点。在研究方法的选择上,目前对森林生态系统服务价值的评估方法主要有替代成本法、市场价值法和生态经济学模型等^[3]。在研究尺度的选择上,则主要分为全球尺度和区域尺度2个层面。基于全球尺度的研究表明,热带雨林和温带森林的生态系统服务价值更高;关于区域尺度,中国学者已有大量研究,如莫丽春^[4]结合多种经济评估方法估算湿地生态系统服务价值;彭婉婷等^[5]以上海共青森林公园为例,将非货币CES价值和空间信息

结合,把丰度、多样性和稀有度指数转化为空间生态综合指数,定量评价城市保护地生态系统文化服务价值。而在实际成果的应用上,该领域相关研究成果已被广泛应用于生态补偿和绿色GDP等多重领域。例如,中国实施的跨流域生态补偿、生态公益林补偿正是基于对森林生态系统服务价值的科学评估^[6]。然而,从实际应用效果来看,受主客观等多重因素影响,森林生态系统服务价值评估精度仍存在提升空间。一方面,部分森林生态系统服务(如文化服务)难以量化,且缺乏长期、连续的监测数据。现有数据在空间分辨率和时间尺度上存在局限性,影响核算结果的精度;另一方面,区域差异与尺度效应导致不同区域的森林生态系统服务价值存在显著差异,但现有核算方法在跨区域比较和尺度转换方面存在不足。

为进一步提升森林生态系统服务价值评估的精度,促进生态保护与高质量发展,本文以福建省森林生态系统服务价值为研究对象,首先,在评估框架的选择上,基于联合国千年生态系统评估提出的4个维度、11个细分指标构建评价指标体系。其次,在评价尺度和时间跨度的选择上,选取2000—2023年作为时间跨度,选取区(县)为最小评价尺度。在评价方法的选择上,选择谢高地等^[7]在COSTANZA等^[8]研究基础上改进的当量因子法。最后,基于修正的当量系数法,从时间和空间2个维度、3个层次对当量因子法进行修正,评估福建省2000—2023年的森林生态系统服务价值,并对其时空演变特征进行进一步分析。在科学意义上,通过对已有当量系数的修正,不仅可以进一步完善森林生态系统服务价值的相关理论体系,使其更加准确、全面地反映实际情况,提

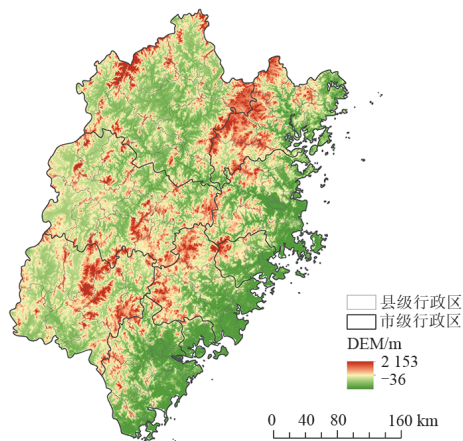
高理论的解释力和预测力,而且通过对原有评估方法的改进和优化,有助于提高评估结果的可靠性和有效性。在实践价值上,通过更精准地评估、量化福建省森林生态系统价值,研究结果能为政府制定相关生态保护政策(自然保护区规划)提供科学依据,可以为生态公益林补偿标准的制定提供参考,激励森林保护行为。在绿色经济兴起的当代,能为绿色GDP核算和森林资源资产审计提供数据支持,推动区域可持续发展。综合来看,本文的创新之处主要在于方法创新和理论拓展,价值当量法作为森林生态系统服务价值评估中的重要方法之一,因其对区域社会经济水平差异、地理空间异质性的考量不够,因而其在对中小尺度区域森林生态系统服务价值进行评估时会产生偏差,而本文通过对价值当量法进行基于省域、县域层次,时间和空间维度的修正,不仅提高价值当量法的评估精度,拓宽运用其评估森林生态系统服务价值的边界,使其更适用于中小尺度区域研究,还弥补传统评估方法在区域社会经济水平差异和地理空间异质性考量上的不足,为中小尺度区域的森林生态系统服务价值研究提供更为科学和可靠的方法支持,同时也为其他类似研究提供有益借鉴。

1 研究区概况

福建省地处中国东南沿海地区($23^{\circ}31' \sim 28^{\circ}18'N$, $115^{\circ}50' \sim 120^{\circ}43'E$)。森林资源丰富,是中国四大林区之一,也是中国南方重点林区之一,素有南方“绿色宝库”之称(图1)。福建省森林面积811.58万 hm^2 ,森林覆盖率65.12%,连续45 a位居全国首位,生态环境保护工作和森林生态效益显著,森林生态系统服务价值较高。森林蓄积量8.07亿 m^3 ,全国排名第8,其中乔木林单位蓄积量为121.64 m^3/hm^2 ,全国排名第3。

在林分类型上,福建省以人工林为主,在全国南方集体林区中具有较高的代表性。人工林在福建省的森林生态系统中占据重要地位,对当地的生态环境和经济发展产生深远影响。在森林生态系统类型上,福建省森林生态系统类型多样,包括亚热带常绿阔叶林、针叶林和竹林等。这些生态系统在结构和功能上各具特色,共同构成福建省丰富的生物多样性。其中,亚热带常绿阔叶林是福建省最具代表性的森林生态系统类型之一,在我国南方地区分布广泛,且具有重要的生态价值。福建省9市1区已全部成为国家森林城市,所有县市都是省级森林城市,武夷山国家公园更是中国首批5个国家公园之一。同时,福建省作为全国首个生态文明先行示范区,自2020年起,选取武夷山市等地作为山区样本,开展生

态系统服务价值核算试点,为福建省乃至全国的森林生态系统服务价值研究提供宝贵的经验和借鉴。随着经济社会的发展,近年来福建省面临着经济发展与生态保护的现实矛盾,一方面是经济发展对生态环境的压力,福建省的经济发展中,第二产业和第三产业占据主导地位,而第一产业虽然也有贡献,但相对占比较小,产业结构特征使得工业污染成为影响生态环境的主要因素之一。随着工业化进程的加速,一些高污染、高能耗的产业可能对生态环境造成压力,导致环境质量下降。另一方面,由于生态保护对经济发展的制约,为保护生态环境,福建省划定一系列生态红线区域,限制或禁止某些产业的发展,从而对当地经济产生一定影响。例如,一些高污染、高能耗的产业可能无法在这些区域内落地或发展,导致当地经济失去一些增长动力。随着环保政策的日益严格,企业为了符合环保标准,需要投入更多的资金用于污染治理和环保设施建设,可能增加企业的运营成本,降低其市场竞争力,从而对经济发展产生一定制约。综合来看,福建省森林资源丰富,森林生态系统服务价值显著,在节能降耗、空气质量、森林覆盖率等多个方面始终保持全国前列,生态保护意义重大。因此,选取福建省作为研究省份,具有重要的现实意义。



注:该图基于福建省标准地图(审图号为闽S[2023]254号)绘制,底图无修改。下同。

图1 研究区地理位置

Fig. 1 Geographical location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

关于福建省森林生态系统服务价值时空演变格局及空间异质性相关研究采用的数据包括植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、土地利用、农田平均粮食产量产值等。其中NPP数据来自NASA modis MOD17A3HGF数据集(空间分辨

率500 m),由于该数据集时间跨度为2001—2023年,因而福建省2000年NPP值基于2001年、2002年栅格数据的区域平均值,使用插值法进行补充;NDVI数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心2000—2023年中国年度NDVI数据集(空间分辨率1 km);土地利用数据来自武汉大学1985—2023年CLCD土地利用类数据(空间分辨率30 m),该数据将全国土地利用类型共分为9类,其中属于森林生态系统的有林地和灌木地2类,因而本文以福建省林地和灌木地的总面积作为森林生态系统的总面积;农田平均粮食产量来自《中国统计年鉴》^[9]。

关于福建省森林生态系统服务价值时空差异驱动机制研究所选驱动因子分为2类:自然要素因子和社会经济要素因子。自然要素因子包括降水、气温、湿度、坡度和海拔5个因子,社会经济要素因子包括人口密度、夜间灯光和国内生产总值3个因子。其中,气温、降水和湿度遥感数据均来源于国家青藏高原数据中心;海拔数据来自(<https://earthexplorer.usgs.gov/>),坡度则是基于海拔数据计算而来;夜间灯光数据是通过整合DMSP-OLS和SNPP-VIIRS数据得到的矫正后的1992—2023年逐年的中国范围的数据;人口密度数据来自(<https://landscan.ornl.gov/>);国内生产总值数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心中国GDP空间分布公里网格数据集。在数据的预处理上,研究根据自然间断点法将降水、气温、湿度、坡度、海拔、人口密度、夜间灯光和国内生产总值分为5类,并选取栅格为基本研究单元。

2.2 研究方法

由于森林生态系统服务价值及其价值系数具有尺度效应和区域异质性^[10],因而本文从省域到县域2个尺度进行修订,二者具有嵌套关系,在保证福建省森林生态系统服务价值在省域层面可比性的同时,又能显示在县域层面的空间差异情况。本文以谢高地等^[11]在2015年提出的“单位面积生态系统服务价值当量表”中森林生态系统各项服务的当量系数等研究成果为基础,对2020—2023年历史时期福建省森林生态系统服务价值进行逐年计算,公式为:

$$ESV = \sum P_i \times R_i \quad (1)$$

式中:ESV为森林生态系统服务总价值; P_i 为单位面积土地利用类型*i*的森林生态系统服务价值; R_i 为森林生态系统服务价值的土地利用面积,由于本文研究范围仅限于森林生态系统的土地利用类型,因而*i*=1。

2.2.1 基于土地类型的省域系数修正 本文将农田视为基准当量,并作为其他类型土地利用类型生态

系统服务价值当量的参照,将全国农田产值当量基准修订至福建省的农田产值当量。参考徐丽芬等^[12]的研究,选择福建省单位面积粮食产量与全国单位面积粮食产量的比值作为修正系数,以此反映全国生态系统服务价值与福建省生态系统服务价值的差异,修正方法为:

$$\alpha = \frac{T_z}{O_z} \quad (2)$$

$$ESV_1 = \lambda \times ESV \quad (3)$$

式中: α 为生态系统服务价值的省域修订系数; T_z 为第*z*年福建省单位面积粮食产量,万t; O_z 为第*z*年全国平均单位面积粮食产量,万t,其中*z*=1,2,...,n,表示年份;ESV₁为基于土地类型的省域修正后的森林生态系统服务总价值,万元。

2.2.2 基于森林生物量的县域系数修正 不同生态系统类型由于其植被情况不同,生态系统内部的生物量与区域水热状况也不尽一致,而生态系统的服务价值的大小与生态系统的生物量有密切关系,一般而言,森林生态系统由于生物量较大,相对于其他类型的生态系统,其生态系统服务价值更强。因此,在省域系数修正的基础上,进行基于生物量的2次修正。假定生态服务功能强度与生物量呈线性关系,对森林生态系统服务价值当量进行修正公式为:

$$\beta = \frac{b_{z,t}}{B} \quad (4)$$

$$b_{z,t} = \frac{\mu \times NPP_{z,t}}{\gamma} \quad (5)$$

$$ESV_2 = \beta \times ESV_1 \quad (6)$$

式中: β 为福建省森林生态系统服务价值的生物量修正系数; $b_{z,t}$ 为第*z*年第*t*个县森林生态系统单位面积生物量; B 为福建省森林生态系统平均单位面积生物量,参考田国帅等^[13]的研究,选取17.34 Mg/hm²作为测算值; μ 为生物量与生产力的比值,参考方精云等^[14]、WHITTAKER等^[15]、刘世荣等^[16]、李高飞等^[17]、朱坤等^[18]和吴鹏等^[19]的研究,此6项研究中其对应的生物量与生产力的比值分别为6.04、24.59、14.74、11.93、3.62、13.54,取其平均值为12.41; $NPP_{z,t}$ 为第*z*年第*t*个县植被净初级生产力; γ 为植被净初级生产力与干物质质量的转换系数,参考徐雨晴等^[20]的研究,选取0.5作为转换系数,其中*t*为不同区(县)。ESV₂为基于森林生物量的县域修正后的森林生态系统服务总价值。

2.2.3 基于植被覆盖度的县域系数修正 在森林生态系统内部,由于树种、树龄等要素使各区域的植被覆盖率具有差异。已有研究^[21]结果也证明,归一化植被

指数值与森林生态系统服务价值具有相关关系。归一化植被指数值越大,森林生态服务价值越高。因此,在系数修正的基础上,进行基于植被覆盖度的3次修正。对森林生态系统服务价值当量进行修正的公式为:

$$f_{z,t} = \frac{\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad (7)$$

$$\epsilon = \frac{f_{z,t}}{F_z} \quad (8)$$

$$\text{ESV}_3 = \epsilon \times \text{ESV}_2 \quad (9)$$

式中: $f_{z,t}$ 为第 z 年第 t 个县的植被覆盖度,%; ϵ 为福建省森林生态系统服务价值的植被覆盖度修正系数; F_z 为第 z 年福建省的植被覆盖度,%; ESV_3 为基于植被覆盖度的县域修正后的森林生态系统服务总价值,万元。

2.2.4 重心模型 本文选择重心模型用于分析福建省森林生态系统服务价值空间位置的分布特征,首先,假设研究区有 m 个单元;其次,将研究区各评价单元的森林生态系统服务价值覆盖面积乘以其几何中心坐标;将得出的数值除以研究区的森林生态系统服务价值覆盖面积。研究区森林生态系统服务价值重心坐标、迁移路径及转移方向角等计算公式为:

$$X_z = \sum_e C_e X_e / C_e \quad (10)$$

$$Y_z = \sum_e C_e Y_e / \sum_e C_e \quad (11)$$

$$D = \sqrt{(X_{z+a} - X_z)^2 + (Y_{z+a} - Y_z)^2} \quad (12)$$

式: (X_z, Y_z) 为第 z 年森林生态系统服务价值的重心坐标; (X_e, Y_e) 为第 e 个评价单元的几何中心; C_e 为第 e 个评价单元的森林生态系统服务价值覆盖面积; D 为第 $(z+a)$ 年森林生态系统服务价值重心迁移的距离; (X_{z+a}, Y_{z+a}) 为第 $(z+a)$ 年森林生态系统服务价值的重心坐标; $e=1, 2, \dots, n$,表示评价单元^[22]。

2.2.5 空间自相关分析 空间自相关分析包括全局自相关和局部自相关2个部分,全局自相关分析能表征研究区要素在整体空间分布上的相关性,本文选用莫兰指数(Global Moran's I)研究福建省森林生态系统服务价值空间整体分布特征,计算公式为:

$$I_G = \frac{m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m w_{jk} (\bar{x}_j - \bar{x})(\bar{x}_k - \bar{x})}{\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m w_{jk} (\bar{x}_j - \bar{x})^2} \quad (13)$$

式中: I_G 为全局莫兰指数,取值为 $[-1, 1]$ 。 I_G 为负值时表示森林生态系统服务价值离散分布,存在空间负相关性; I_G 为正值时表示森林生态系统服务价值聚集分布,存在空间正相关性; I_G 为0时代表森林生态

系统服务价值是随机分布的,不存在相关关系; x_j, x_k 分别为 j 区域和 k 区域的观测值; $\bar{x}$ 为区域的平均值; w_{jk} 为空间权重矩阵,取值为 $[-1, 1]$,考虑到全局空间自相关分析虽能从整体上反映福建省森林生态系统服务价值的分布特征,但不能衡量森林生态系统服务价值的局部集聚及空间异质性。因此,引入局部空间自相关分析森林生态系统服务价值周边差异程度,运用局部莫兰指数识别森林生态系统服务价值局部空间的集聚特征,计算公式为:

$$I_L = \frac{m(x_j - \bar{x}) \sum_{j \neq k} (x_k - \bar{x})}{\sum_j (x_j - \bar{x})^2} \quad (14)$$

式中: I_L 为局部莫兰指数,其余各变量含义与公式(13)相同。 I_L 为正值时表示空间单位观测值与相邻单位观测值相近; I_L 为负值时代表空间单位观测值与相邻单位观测值存在较大差异^[23]。

2.2.6 地理探测器模型 地理探测器模型是一种基于空间异质性分析的研究工具,其核心原理是通过比较总区域和子区域的方差,定量揭示地理现象的空间分异特征及其驱动机制^[24]。本文运用地理探测器模型中的因子探测模块和交互探测模块,系统识别福建省生态系统服务价值的驱动机制,计算公式为:

$$q = 1 - \left(\frac{1}{N\sigma^2} \right) \sum_{h=1}^U N_h \sigma_h^2 \quad (15)$$

式中: q 为驱动要素因子对福建省森林生态系统服务价值的解释程度,范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表明该驱动要素因子对福建省森林生态系统服务价值的影响越大; N, N_h 分别为福建省森林生态系统服务价值指标的总样本数量和分区样本数量; σ^2 和 σ_h^2 分别为总方差和分区的方差; U 为变量或影响因子的分层个数; $h=1, 2, \dots, n$,表示研究区域分区。

3 结果与分析

3.1 福建省森林生态系统面积的时空演变特征

了解福建省森林生态系统面积的时空分布特征,利用ArcGIS软件统计栅格数据得出福建省2000年、2003年、2008年、2013年、2018年和2023年的森林生态系统面积及其占全省土地总面积的比例,并绘制不同时期福建省森林生态系统分布图(图2、图3)。由图2可知,2000—2023年福建省森林生态系统总面积呈先增长后降低趋势,在2008年达到顶峰,森林生态系统面积约占全省土地总面积的83%,但逐年降低至2023年的80.2%。从森林资源整体概况来看,福建省的森林覆盖率保持在较高水平,近年来有所提升。截至2023年,福建省的森林覆盖率高

65.12%,主要得益于乔木林、竹林等类型的增加,而灌木林地可能并没有得到同样的关注和发展。城市化进程的加快和土地利用方式的改变,一些灌木林地可能被转化为其他用途,如建设用地和农业用地等,导致灌木林数量减少。从政策趋势来看,福建省在推进造林绿化工作时,更加注重乔木林和竹林等高效益林种的发展,而灌木林可能未得到足够重视,一定程度上影响灌木林的数量和分布,导致森林生态系统总面积下降。

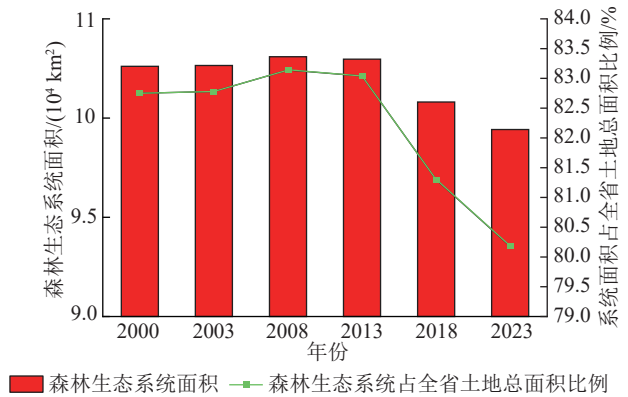


图2 2000—2023年福建省森林生态系统面积及占全省土地总面积比例

Fig. 2 Forest ecosystem area and its proportion to total land area in Fujian Province from 2000 to 2023

由图3可知,福建省森林生态系统覆盖面广,分布较为均衡。基于时间跨度来看,森林生态系统逐渐呈分散化趋势,破碎化程度加深,尤其是自2008年以来,破碎化速度逐渐加快。可能与福建省的深化集体林权制度改革有关。集体林权制度改革后,林地经营权从集体转向农户个人,导致林权高度分散。农户个人经营林地时,往往缺乏统一规划和布局,容易造成森林生态系统的分散化。

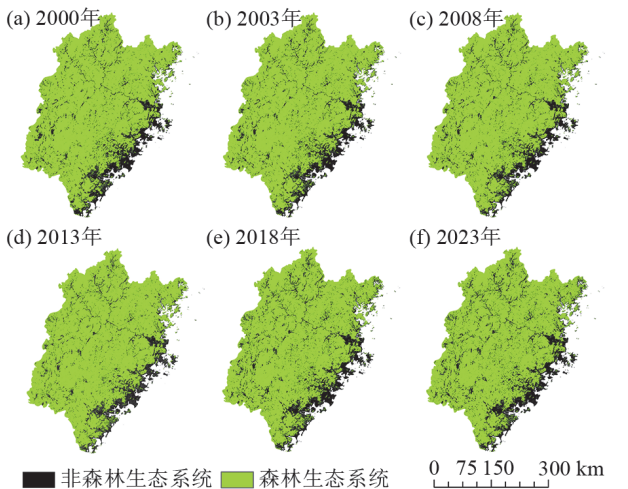


图3 福建省不同时期森林生态系统分布

Fig. 3 Spatial distribution of forest ecosystems in Fujian Province across different periods

3.2 福建省森林生态系统服务价值时间演变特征

3.2.1 基于森林生态系统服务类型差异的分析 由图4可知,2000—2023年福建省森林生态系统服务价值呈波动变化趋势,虽然总值略有下降,但变化程度较小,最小值在2010年。在内部4类服务中,供给服务价值和文化服务价值所占比重较小,整体较为稳定,支持服务次之,调节服务价值是森林生态系统服务价值的主体,其变动趋势与森林生态系统服务价值的变动趋势基本一致,表明福建省森林生态系统服务价值主要由调节服务提供,且连续年份贡献占比均达60%以上,具体表现在对森林生态环境的贡献。进一步分析调节服务价值的构成,可以发现其对气候调节、水源涵养、土壤保持等方面的贡献显著。特别是在气候调节方面,森林通过光合作用吸收大量二氧化碳,有效缓解温室效应,提升生态系统的稳定性。福建省森林生态系统以常绿阔叶林为主,生物多样性丰富,生物量和物质质量较高,为生态系统各个功能的发挥奠定坚实基础。森林通过林冠截留、土壤蓄水等方式,增强水源涵养能力,调节区域水循环,增加水资源可利用量,同时减少洪峰流量,降低洪水风险。水源涵养功能的提升则有助于进一步改善区域水文条件,增强土壤保持能力,减少水土流失。这些功能的协同作用,凸显福建省森林生态系统在生态保护和区域发展中的关键地位。综合来看,尽管调节服务价值有所波动,但显示出较强的生态服务功能,是区域森林生态系统的重要支撑。

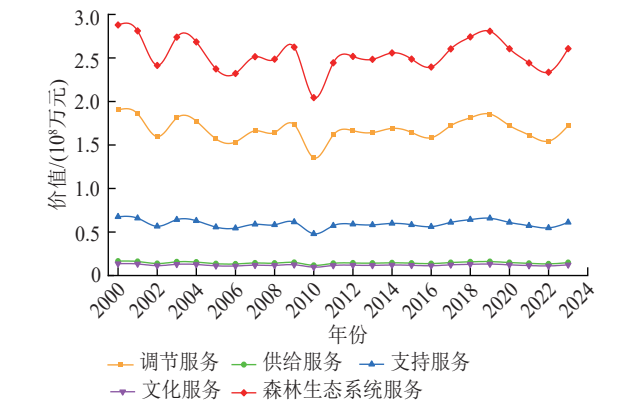


图4 基于类型差异的森林生态系统服务价值演变趋势

Fig. 4 Evolution trends of forest ecosystem service value by service type

3.2.2 基于森林生态系统服务价值省内区域差异的分析 由图5可知,在东西区域尺度上,2000—2010年,福建省森林生态系统服务价值为闽东>闽中西,2010—2023年,则为闽中西>闽东,其中,闽东地区,特别是宁德市,以其丰富的森林资源和良好的生态环境著称。宁德市全境森林覆盖率达70%,高于全省平均水平,且拥有大面积的天然林和人工林。

该地区注重生态保护和绿色发展,积极推进森林生态系统保护和修复工作,如实施“江河流域生态林工程”等,因而其森林生态系统服务价值较高。闽中西部地区的三明和龙岩作为集体林权制度改革的策源地,随着集体林权制度改革的推进,对于森林资源的保护水平和生产经营水平提升速度较快,其森林生态系统服务价值也随之提升,因而在2010年前后,以三明、龙岩等为代表的闽中西地区森林生态系统服务价值高于闽东。在南北区域尺度上,2000—2002年为闽北>闽南,2002—2023年为闽南>闽北。从森林资源丰富程度来看,闽北大于闽南,因而在2002年前闽北地区森林生态系统服务价值高于闽南,随着2001年福建省开始实施生态公益林补偿政策以后,划定生态公益林,对区域内的生态公益林采取禁伐措施,并给予生态公益林补偿。由于闽南经济基础好,林业产业和森林生态旅游发达,闽南地区对生态公益林资源的生产经营水平相对较高,运用生态公益林资源发展相关森林旅游、森林康养等产业化水平也相对较高,因而森林生态系统服务价值也相对较高。

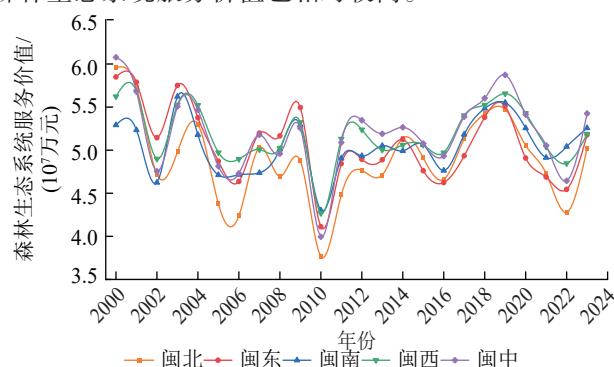


图5 基于省内区域差异的森林生态系统服务价值演变趋势
Fig. 5 Evolution trends of forest ecosystem service value based on regional differences within the province

3.2.3 基于森林生态系统服务价值等级差异的分析 采用自然间断点分级法,根据森林生态系统服务价值大小将福建省各区县的森林生态系统服务价值总量分为1、2、3、4、5级区域,其中:1级为(0.58, 92.64], 2级为(92.64, 301.48], 3级为(301.48, 475.30], 4级为(475.30, 685.35], 5级为(685.35, 1 016.59]亿元,并形成空间分布图,用于分析不同时期福建省森林生态系统服务价值的空间格局差异(图6)。由图6可知,福建省不同阶段的森林生态系统服务价值等级空间地域性分布规律明显,不同时期各区县的级别分布存在一定差异。2000—2023年福建省森林生态系统服务价值5级区域和1级区域都略有减少,其中5级区域主要分布在位于闽西的龙岩市辖区和位于闽北的南平市辖区,但位于闽北南平市内的5级区域随着时间的推进逐渐降至4级,可

能与南平市林分结构有关,其中纯林多、混交林少,单层林多、复层林少,不合理的林分结构会降低森林生态系统的稳定性和多样性,从而影响其服务价值,同时由于松树纯林比重较高。松材线虫病防控形势严峻,一旦传入核心区域,将对森林生态系统的原真性、完整性、多样性造成严重破坏,影响森林生态系统的服务价值。从总体等级分布来看,3、4、5级森林生态系统服务价值覆盖区域远多于1、2级森林生态系统服务价值覆盖区域,主要得益于福建省稳定且持续的高森林覆盖率、充足的森林蓄积量、多样的森林生态服务功能、迅速发展的林业产业以及政策支持与机制创新等多方面的优势。1、2级森林生态系统服务价值覆盖区域主要位于闽东、闽南等沿海经济发达地区,这些经济发达地区的城市化、工业化进程往往更快,导致大量森林用地被转化为建设用地,以满足经济发展的需求,这种转变直接减少森林生态系统的面积,降低森林生态系统服务价值。经济开发活动还可能带来环境污染和生态破坏,进一步影响森林生态系统的健康和稳定性。

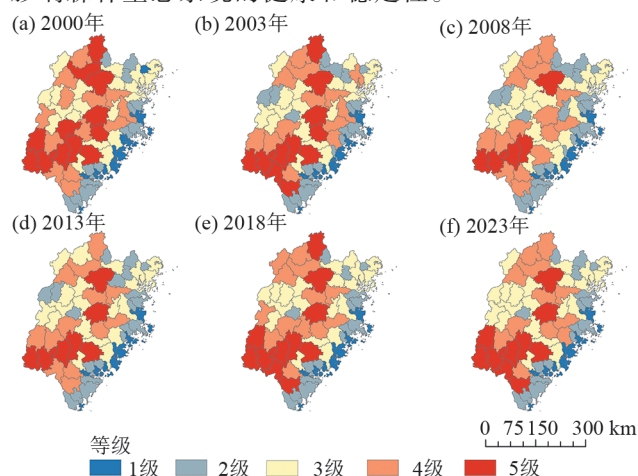


图6 福建省不同时期森林生态系统服务价值等级分布
Fig. 6 Hierarchical distribution of forest ecosystem service value in Fujian Province across different periods

3.3 福建省森林生态系统服务价值空间集聚的形态演化和重心迁移

运用 ArcGIS 空间统计作出的标准差椭圆可以更好地描述福建省森林生态系统服务价值的时空分布形态,同时平均值中心坐标的空间变化可以更直观反映森林生态系统服务价值分布重心的移动轨迹(图7、表1)。由图7可知,从方位角度来看,标准差椭圆的转角为45°,随时间变化的程度较小,同时标准差椭圆的中轴线几乎与福建省行政区域呈平行状态。从标准差椭圆的覆盖面、扁率和重心移动轨迹来看,2000—2003年,其覆盖面积在2000年基础上向西南方向拓展,重心也向南方短距离移

动,扁率略微增大,向心力和方向性则略有增强,这一时期福建省西南部的武平县正酝酿着集体林权制度改革,通过明晰产权、分山到户等方式,有效激发林农的积极性,实现生态效益。2003—2008 年,覆盖范围和长轴略有减少,分布重心也掉头向北方移动。2018—2023 年,标准差椭圆的面积有所增大,重心由大田县转移到尤溪县。综合来看,第一,福建省森林生态系统服务价值分布格局呈现“东北-西南”的空间分布态势,分布重心大体向西南方向移动,但逐渐偏离福建省的几何中心;第二,福建省森林生态系统服务价值标准差椭圆的覆盖面只进行了 1 次较大面积的拓展,呈较为稳定态势;第三,福建省森林生态系统服务价值重心迁移距离由最初的 8.32 km 减少至 2.41 km,说明福建省森林生态系统服务价值分布均衡性加强。

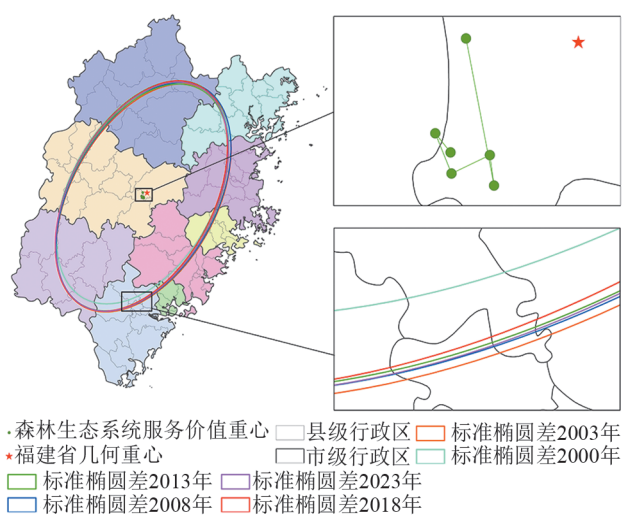


图 7 福建省森林生态系统服务价值标准差椭圆及重心移动轨迹
Fig. 7 Standard deviational ellipse and gravity center trajectory of forest ecosystem service value in Fujian Province

表 1 福建省森林生态系统服务价值重心及迁移路径

Table 1 Center of forest ecosystem service value and its migration path in Fujian Province						
项目	2000 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年	2023 年
重心 X 坐标/(°)	117.92	117.92	117.92	117.90	117.89	117.90
重心 Y 坐标/(°)	26.08	26.00	26.02	26.01	26.03	26.02
重心迁移距离/km	—	8.32	1.71	2.41	2.41	1.37
方向	—	东南	西北	西南	西北	东南

3.4 福建省森林生态系统服务价值空间相关性分析

3.4.1 全局空间自相关分析 以福建省 84 个区(县)级为基本空间单元,运用莫兰指数空间分析工具,深入研究福建省森林生态系统服务价值全局关联性。由表 2 可知,2000—2023 年 6 期均通过显著性检验,具有正相关性,从全局视角证明福建省森林生态系

统服务价值呈现高高集聚或低低集聚的空间分布特征。具体而言,2003 年全局莫兰指数最小为 0.611 7,表明该时期福建省森林生态系统服务价值空间分布相对离散。2008—2018 年,全局莫兰指数呈不断升高趋势,表明福建省森林生态系统服务价值范围持续扩散且空间集聚效应更为明显。

表 2 2000—2023 年福建省森林生态系统服务价值全局莫兰指数

Table 2 Global Moran's index of forest ecosystem service value in Fujian Province from 2000 to 2023						
项目	2000 年	2003 年	2008 年	2013 年	2018 年	2023 年
Moran'I 指数	0.639 7	0.611 7	0.617 5	0.626 8	0.641 7	0.631 4
Z 得分	7.571 2	7.249 0	7.312 8	7.419 4	7.592 8	7.472 7
p 值	0	0	0	0	0	0
预期指数	-0.012 0	-0.012 0	-0.012 0	-0.012 0	-0.012 0	-0.012 0
方差	0.007 4	0.007 4	0.007 4	0.007 4	0.007 4	0.007 4

3.4.2 局部空间自相关分析 采用莫兰指数进行全局空间自相关分析后发现,福建省森林生态系统服务价值分布具有显著的正相关性。为研究各区县间受空间自相关的影响而产生的差异,进一步反映福建省森林生态系统服务价值的局部空间集聚特征,绘制不同时期的福建省森林生态系统服务价值 LISA 集聚图(图 8)。由图 8 可知,2000—2023 年高-高自相关聚类主要集中在闽西的龙岩、闽中的三明、闽北的南平,表示这些区域及周围的森林生态系统服务价值都较高。在闽南厦漳泉、闽东福州地区存

在少量低-低聚类,表明这些区域在特定时期森林生态系统服务价值较低。同时,2000—2023 年低-低自相关聚类有明显的收缩趋势,且聚类覆盖面积缩小,可能与福建省沿海防护林建设工程相关,通过在福建省东部沿海地区构筑沿海绿色生态屏障,导致低-低集聚区的减少。低-高聚类覆盖中心从由南平市的松溪县向福州市的闽清县移动,在 2003 年、2008 年、2013 年 3 期保持不变,但在 2018 年开始转变为高-高聚类,可能与闽清县的政策推动和项目实施有关,例如,闽清县组织实施“青山挂白”涉及林地部分复绿项

目,通过植树造林等措施对受损林地进行修复和绿化,有助于改善森林质量和修复森林生态系统。综合来看,2000—2023年福建省森林生态系统服务价值高-高、低-低类型的空间集聚效果比较显著,低-高、高-低类型的空间集聚效果并不明显。

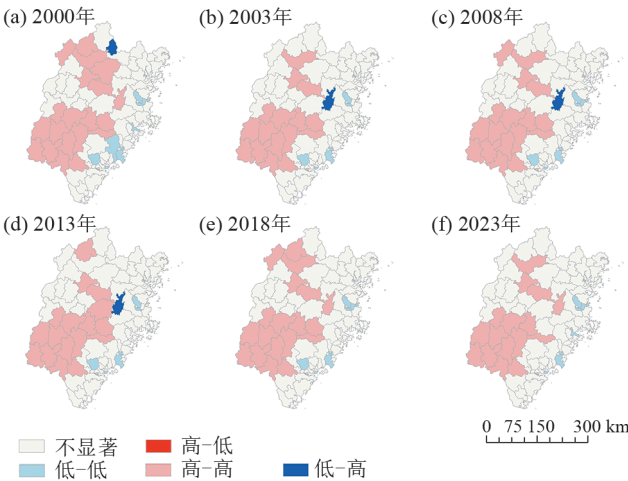


图 8 福建省森林生态系统服务价值 LISA 聚集图
Fig. 8 LISA cluster map of forest ecosystem service value in Fujian Province

3.5 福建省森林生态系统服务价值驱动机制分析

为定量分析诸多驱动因素对于福建省森林生态系统服务价值的影响,从福建省森林生态系统的实际情况出发,基于自然要素层面和社会经济层面,结合数据的科学性和可获得性,选取 2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年 4 个时间节点作为代表节点,以对应年份的福建省各区县森林生态系统服务价值作为

因变量,以湿度、气温、海拔、坡度、降水等代表自然要素影响为自变量,夜间灯光、国内生产总值、人口密度代表社会经济要素影响,针对 8 个影响因子,运用地理探测器模型进行分异探测。由表 3 可知,所选取的 8 个要素在 4 个代表年份的 p 值均为 0,通过显著性检验,同时因为 q 值越大,表明该因子对森林生态系统服务价值的影响也越大。综合来看,福建省森林生态系统服务价值受到湿度、温度、坡度、海拔、降水、人口密度、夜间灯光、国内生产总值 8 个要素的影响,在自然要素层面,降水的影响最大,在社会经济要素层面,国内生产总值的影响最大。

福建省森林生态系统服务价值不仅受到单一因子的影响,还受到多种因子的交互作用。本文运用地理探测器模型,定量分析所选 8 个驱动要素两两交互作用对福建省森林生态系统服务价值的影响程度。以 2020 年的数据为例,交互探测结果见表 4。由表 4 可知,不同驱动因子间的交互作用呈双因子增强和非线性增强,双因子交互所产生的影响力效应均大于单因子,表明福建省森林生态系统服务价值的时空差异不是由单因子所造成的,而是多因子相互作用的结果。关于交互作用之间的差异性,国内生产总值和降水 2 个驱动要素与其他因子的交换效应分别位列第 1 位和第 2 位,均为 >0.19 ,不仅验证了单因子地理探测结果的同时,也明确国内生产总值和降水是影响福建省生态系统服务价值的主要因子。

表 3 福建省森林生态系统服务价值驱动要素因子探测结果

Table 3 Factor detection results of drivers for forest ecosystem service value in Fujian Province									
年份	探测因子	湿度	人口密度	气温	坡度	降水	夜间灯光	国内生产总值	海拔
2005	q 值	0.029 3	0.015 2	0.086 7	0.020 2	0.225 4	0.038 9	0.235 8	0.102 2
	p 值	0	0	0	0	0	0	0	0
2010	q 值	0.024 8	0.014 9	0.073 9	0.015 1	0.175 1	0.054 3	0.194 2	0.083 2
	p 值	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	q 值	0.022 6	0.022 7	0.091 4	0.017 5	0.171 1	0.072 1	0.139 0	0.104 4
	p 值	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	q 值	0.020 4	0.049 7	0.093 3	0.018 1	0.173 2	0.094 1	0.290 3	0.108 6
	p 值	0	0	0	0	0	0	0	0

表 4 福建省森林生态系统服务价值驱动要素交互探测结果

Table 4 Interaction detection results of driving factors for forest ecosystem service value in Fujian Province									
驱动要素	湿度	人口密度	气温	坡度	降水	夜间灯光	国内生产总值	海拔	
湿度	0.020 4								
人口密度	0.057 1	0.049 7							
气温	0.110 8	0.114 6	0.093 3						
坡度	0.045 8	0.055 2	0.123 5	0.018 1					
降水	0.208 2	0.198 2	0.210 6	0.190 8	0.173 2				
夜间灯光	0.099 3	0.098 4	0.136 0	0.099 3	0.210 7	0.094 1			
国内生产总值	0.292 8	0.292 3	0.314 1	0.291 2	0.356 0	0.292 9	0.290 3		
海拔	0.120 2	0.120 5	0.174 5	0.126 0	0.272 9	0.141 8	0.303 7	0.108 6	

4 讨论

森林生态系统服务价值表征为人类社会提供的丰富自然资源、生态调节功能、休闲与科研场所及促进可持续发展的能力上,这些价值不仅涵盖直接的经济收益,还包括维护生物多样性、保持水土、调节气候、提供休闲空间及教育科研资源等重要的生态与社会功能。本文从时间和空间2个维度,以福建省2000年、2003年、2008年、2013年、2018年、2023年的森林生态系统服务价值为研究对象,用重心模型、空间自相关分析等方法分析其时空格局的变化特征,得出的大部分结论与已有研究一致,少部分结论则与已有研究存在差异。鉴于研究对象的不同,本文也得出一些新结论,以期为今后调控森林生态系统服务和自然资源提供参考与借鉴,从而促进福建省森林生态系统服务价值稳步提升。

1)通过对福建省森林生态系统所属土地利用类型遥感数据的统计可知,福建省森林生态系统覆盖情况与福建省森林覆盖率情况存在差异。已有研究^[25]表明,森林生态系统覆盖面积与森林覆盖率存在着显著相关性,但研究发现,2000年来,福建森林覆盖率呈稳步增长态势,研究期内福建省森林生态系统覆盖面积呈先增长后降低趋势,二者并不呈同步变化。一方面,与二者反映森林资源状况时不同的侧重点和视角有关,森林覆盖率直接反映森林资源的数量或丰富程度,而森林生态系统覆盖情况则不仅包括森林本身,还包括与森林密切相关的湿地、草地等其他生态要素,以及这些要素之间的相互作用和整体功能;另一方面,包括降水、地形、气候、土地利用方式的改变、森林砍伐、植树造林、在内的自然与人为因素对森林的生长和分布具有重要影响,这些因素的变化可能导致森林面积和森林生态系统面积的变化,但变化幅度和速度可能具有地区差异性,从而导致二者在变化情况上不同步。

2)通过对福建省森林生态系统服务价值测算及区域异质性分析可知,闽西、闽中、闽北的生态系统服务价值总体高于闽东和闽南地区,验证已有研究^[26]认为经济欠发达地区森林生态系统服务价值高于经济发达地区的结论。由于福建省闽东和闽南地区工业化和城市化进程总体高于闽中、闽西、闽北,而此过程往往伴随着土地用途的转化,使森林面积减少,进而影响森林生态系统的整体服务价值。其次,工业化和城市化进程带来的环境污染问题也相对严重,空气质量、水质等环境因素可能对森林生态系统产生不利影响,降低其服务价值。从人口结构来看,闽东和闽南地区的人口密度和人为活动强度

也较高,给森林生态系统带来更大的生态压力。与此同时,闽中、闽西、闽北地区则保留更多的原始森林和自然景观,森林面积相对较大,生物多样性丰富。例如,武夷山国家公园作为世界同纬度带现存最典型、面积最大、保存最完整的中亚热带原生性森林生态系统,其森林生态系统在涵养水源、保育土壤、固碳释氧等方面具有更高的服务价值。

3)通过对福建省森林生态系统服务价值年际变化的分析可知,研究期内福建省森林生态系统服务价值虽有波动,但总体较为平稳,与已有的研究^[27]结果基本一致。主要得益于福建省高森林覆盖率及林业相关政策的有力支持。一方面,福建省拥有丰富的森林资源,森林覆盖率长期保持在全国前列,为其提供坚实的生态基础,使得森林生态系统能够持续发挥水源涵养、土壤保育、气候调节等多种服务功能;另一方面,福建省作为我国的生态文明先行示范区,在林业财政补贴政策、生态公益林补偿制度等林业政策的制定上走在全国前列,促进林业的可持续发展,还有效保护森林资源,提高森林生态系统的稳定性和抵抗力。福建省是集体林权制度改革的策源地,通过深化集体林权制度改革,积极发展林下经济和森林旅游,进一步挖掘林业的生态和经济价值,实现生态、经济和社会效益的协同提升。

4)通过对福建省森林生态系统服务价值空间变化的分析可知,研究期内福建省森林生态系统服务价值具有空间集聚效应,与已有研究^[28]发现福建省闽西北地区(如南平、三明)由于森林覆盖率高、生态系统完整性好,其服务价值显著高于沿海地区(如厦门、泉州)的相关。高值区主要集中于武夷山、戴云山等自然保护区,低值区则多分布于城市化程度较高的沿海平原地区呈现高度相似性。从驱动机制分析来看,福建省森林生态系统服务价值的空间差异受自然要素和社会经济活动要素的影响,特别是降水和国内生产总值。闽西北地区地形以山地为主,降水丰沛,森林覆盖率高,森林生态系统完整且多样,生物多样性丰富,尤其是武夷山、戴云山等自然保护区,生态服务功能尤其突出。而反观厦门、泉州等沿海地区,地形以平原为主,城市化程度高,经济快速发展的同时使建设用地加快扩张,导致森林覆盖率低、森林生态系统破碎化,加之工业污染和土地利用变化等因素的影响,森林生态系统服务价值显著降低。闽西北地区作为重点生态功能区,受到严格的森林生态保护政策和补偿机制支持,其森林生态系统服务价值也得到进一步提升。

5 结 论

1)关于福建省森林生态系统覆盖面积变化特征,2000—2023年,福建省森林生态系统覆盖面广,且总面积呈先增长后降低趋势,在2008年达到顶峰,约占全省土地总面积的83%,分布较为均衡。但基于时间跨度来看,森林生态系统逐渐呈分散化趋势,破碎化程度加深,尤其是自2008年以来,破碎化速度逐渐加快。

2)关于福建省森林生态系统服务价值时间演变特征,2000—2023年福建省森林生态系统服务价值呈波动变化趋势,总值略有下降,但变化程度较小,最小值在2010年。调节服务价值是森林生态系统服务价值的主体,变动趋势与森林生态系统服务价值的变动趋势基本一致。在区域差异上,2000—2010年,福建省森林生态系统服务价值为闽东>闽中闽西,2010—2023年为闽中闽西>闽东。2000—2002年为闽北>闽南,2002—2023年为闽南>闽北。在等级差异上,福建省不同阶段的森林生态系统服务价值等级空间地域性分布规律明显,不同时期各区县的级别分布存在一定差异。

3)关于福建省森林生态系统服务价值空间集聚的形态演化和重心迁移特征,2000—2023年福建省森林生态系统服务价值分布格局呈“东北—西南”的空间分布态势,分布重心大体向西南方向移动,但逐渐偏离福建省的几何中心。福建省森林生态系统服务价值标准差椭圆的覆盖面只进行一次较大面积的拓展,呈较为稳定态势。福建省森林生态系统服务价值重心迁移距离由最初的8.32 km减少至2.41 km,空间分布均衡性加强。

4)关于福建省森林生态系统服务价值空间相关性特征,2000—2023年福建省森林生态系统服务价值呈现高高集聚或低低集聚的空间分布特征,且森林生态系统服务价值高-高、低-低类型的空间集聚效果比较显著,低-高、高-低类型的空间集聚效果并不明显。2003年福建省森林生态系统服务价值空间分布相对离散。2008—2018年,福建省森林生态系统服务价值范围持续扩大且空间集聚效应更为明显。

5)本研究存在的不足及未来研究方向。一是结合其他领域的研究还可以发现,即使本文从区(县)级尺度切入,研究尺度仍然不够微观,未能深入至村镇、地块,甚至是栅格层面进行具体分析;二是受限于数据的可得性,本研究在统计福建省森林生态系统覆盖面积时,只能通过简单的加总对应的土地利用类型,主要使用的是林地面积和灌木林面积的加总,从理论层面而言仍存在偏差;三是森林生态系统

内部还可分为多种类型,包括林地、灌丛、疏林地、其他林地,但本文使用的当量系数为平均值,当量系数未能具体细分至各类森林生态系统,因而测算出的森林生态系统服务价值准确度也存在一定偏差。关于未来研究方向,未来研究拟从微观尺度、数据精度和分类细化等方面进一步深化,包括开展村、镇级别的个案研究,拟计划运用其他类型的评估方法或结合多种方法重新评估福建省的森林生态系统服务价值,在进一步验证本文数据准确性的同时为森林生态系统服务价值评估提供更科学、更全面的支持。

参考文献:

- [1] 李思源,倪欢,牛晓楠,等.闽三角城市群土地利用与生态系统服务价值时空演变及未来多情景模拟[J].地理与地理信息科学,2024,40(5):28-34.
LI S Y, NI H, NIU X N, et al. Spatio-temporal evolution and future multi-scenario simulation of land use and ecosystem service value in Fujian Delta urban agglomeration[J]. Geography and Geo-Information Science, 2024, 40(5):28-34.
- [2] 钱佳霖,赵梦扬,卜灵心,等.黄河上游宁蒙大型灌区生态系统水分利用效率变化及其影响因素[J].干旱区资源与环境,2024,38(11):124-136.
QIAN J L, ZHAO M Y, BU L X, et al. Variations of water use efficiency in ecosystem of large irrigation districts along Ningxia-Inner Mongolia section of the upper reaches of the Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2024, 38(11):124-136.
- [3] 刘炳仓,杨海江.祁连山国家级自然保护区森林生态系统服务价值评估[J].林草资源研究,2024(3):18-24.
LIU B C, YANG H J. Assessment of forest ecosystem services vlaue in the Qilian Mountain national nature reserve[J]. Forest and Grassland Resources Research, 2024(3):18-24.
- [4] 莫丽春.北京湿地生态系统服务价值测度及演变分析[J].生态与农村环境学报,2024,40(6):749-756.
MO L C. Measurement and evolution analysis of the ecosystem service value of Beijing's wetlands[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(6):749-756.
- [5] 彭婉婷,刘文倩,蔡文博,等.基于参与式制图的城市保护地生态系统文化服务价值评价:以上海共青森林公园为例[J].应用生态学报,2019,30(2):439-448.
PENG W T, LIU W Q, CAI W B, et al. Evaluation of ecosystem cultural services of urban protected areas based on public participation GIS(PPGIS): A case study of Gongqing Forest Park in Shanghai, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(2):439-448.
- [6] 邱琼,王宏伟,景谦平.GEP核算能代表生态产品价值核算吗?基于SEEA EA对我国生态系统核算若干问题的探讨[J].中国国土资源经济,2024,37(4):4-10.

- QIU Q, WANG H W, JING Q P. Could GEP accounting represent the monetary accounting for ecosystem product? Discussion on ecosystem accounting in China based on SEEA EA[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2024, 37(4): 4-10.
- [7] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- XIE G D, ZHEN L, LU C X, et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919.
- [8] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387: 253-260.
- [9] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- Department of Rural Social and Economic Survey, National Bureau of Statistics. *China rural statistical year book*[M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [10] 王娜, 楚鑫磊, 勾蒙蒙, 等. 三峡库区森林生态系统服务权衡与协同分析[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(3): 475-484.
- WANG N, CHU X L, GOU M M, et al. Tradeoffs and synergies analysis on forest ecosystem services in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 475-484.
- [11] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [12] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 等. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法: 以渤海湾沿岸为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- XU L F, XU X G, LUO T, et al. Services based on land use: A case study of Bohai rim [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [13] 田国帅, 周小成, 郝优壮, 等. 结合修正后的全球生态系统动态调查冠层高度的森林地上生物量模型优化: 以福建省为例[J]. *生态学报*, 2024, 44(16): 7264-7277.
- TIAN G S, ZHOU X C, HAO Y Z, et al. Optimization model of forest aboveground biomass based on MGEDI canopy height: A case study in Fujian, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(16): 7264-7277.
- [14] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- FANG J Y, LIU G H, XU S L. Biomass and net production of forest vegetation in china [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.
- [15] WHITTAKER R H, LIKENS G E. Carbon in the biota [J]. *Brookhaven Symposia in Biology*, 1973, 30: 281-302.
- [16] 刘世荣, 徐德应, 王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 I. 中国森林现实生产力的特征及地理分布格局[J]. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 633-642.
- LIU S R, XU D Y, WANG B. Impacts of climate change on productivity of forests in China I. geographic distribution of actual productivity of forests in China [J]. *Forest Research*, 1993, 6(6): 633-642.
- [17] 李高飞, 任海. 中国不同气候带各类型森林的生物量和净第一性生产力[J]. *热带地理*, 2004, 24(4): 306-310.
- LI G F, REN H. Biomass and net primary productivity of the forests in different climatic zones of China [J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(4): 306-310.
- [18] 朱坤, 彭建松, 张文莉, 等. 曲靖市森林生态系统固碳释氧的生态效益[J]. *森林工程*, 2022, 38(2): 34-43.
- ZHU K, PENG J S, ZHANG W L, et al. Ecological benefits and value evaluation of carbon fixation and oxygen release in Qujing City [J]. *Forest Engineering*, 2022, 38(2): 34-43.
- [19] 吴鹏, 丁访军, 陈骏. 中国西南地区森林生物量及生产力研究综述[J]. *湖北农业科学*, 2012, 51(8): 1513-1518.
- WU P, DING F J, CHEN J. Study on the biomass and productivity of forest in southwest China [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(8): 1513-1518.
- [20] 徐雨晴, 周波涛, 於琰, 等. 气候变化背景下中国未来森林生态系统服务价值的时空特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1952-1963.
- XU Y Q, ZHOU B T, YU L, et al. Temporal-spatial dynamic pattern of forest ecosystem service value affected by climate change in the future in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(6): 1952-1963.
- [21] 刘鲁霞, 胡波, 桑国庆, 等. 激光雷达森林结构指标在森林植物多样性评估中的研究进展[J]. *林业科学*, 2025, 61(1): 176-196.
- LIU L X, HU B, SANG G Q, et al. Assessing forest vegetation diversity using forest structure indicators based on LiDAR remote sensing: A reviews [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2025, 61(1): 176-196.
- [22] 燕玲玲, 巩杰, 徐彩仙, 等. 子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 188-197.
- YAN L L, GONG J, XU C X, et al. Spatiotemporal variations and influencing factors of soil conservation service in Ziwuling area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 188-197.
- [23] 李清, 贾庆洲, 汪福庆. 中国包容性绿色发展协同演进及空间收敛性分析[J]. *生态经济*, 2024, 40(10): 156-164.
- LI Q, JIA Q Z, WANG F Q. Analysis of inclusive green growth, synergy evolution, and spatial convergence in China [J]. *Ecological Economy*, 2024, 40(10): 156-164.

(下转第 263 页)

- [20] LIU H M, HU Y X, HAO Y L, et al. Progressive freeze-thaw redistributes water, solute and CO₂ emissions across soil layers: The role of soil particle size[J]. *Catena*, 2022, 219: e106614.
- [21] LIU S N, WU J Q, LI G, et al. Seasonal freeze-thaw characteristics of soil carbon pools under different vegetation restoration types on the Longzhong Loess Plateau[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: e1019627.
- [22] CHEN Y Q, ZHOU Z F, WANG J G, et al. Quantification and division of unfrozen water content during the freezing process and the influence of soil properties by low-field nuclear magnetic resonance [J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: e126719.
- [23] JI X M, LIU M H, YANG J L, et al. Meta-analysis of the impact of freeze-thaw cycles on soil microbial diversity and C and N dynamics[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2022, 168: e108608.
- [24] JOSEPH G, HENRY H A L. Soil nitrogen leaching losses in response to freeze-thaw cycles and pulsed warming in a temperate old field[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(7): 1947-1953.
- [25] MIURA M, JONES T G, HILL P W, et al. Freeze-thaw and dry-wet events reduce microbial extracellular enzyme activity, but not organic matter turnover in an agricultural grassland soil [J]. *Applied Soil Ecology*, 2019, 144: 196-199.
- [26] LI J T, XU H M, HICKS L C, et al. Comparing soil microbial responses to drying-rewetting and freezing-thawing events[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2023, 178: e108966.
- [27] FREPPAZ M, WILLIAMS B L, EDWARDS A C, et al. Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions: Implications for N and P availability[J]. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35(1): 247-255.
- [28] 郭冬楠, 臧淑英, 赵光影, 等. 冻融作用对小兴安岭湿地土壤溶解性有机碳和氮素矿化的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 260-265.
- GUO D N, ZANG S Y, ZHAO G Y, et al. Effect of freeze-thaw action on dissolved organic carbon and nitrogen mineralization of wetland soil in Xiaoxing'an Mountains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 260-265.
- [29] WU X, CHEN Z, KIESE R, et al. Dinitrogen (N₂) pulse emissions during freeze-thaw cycles from montane grassland soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2020, 56(7): 959-972.
- (上接第255页)
- [24] 常晓东, 王士君, 杨志鹏, 等. 21世纪以来中国粮食生产能力空间重构过程与驱动机制[J]. *自然资源学报*, 2025, 40(3): 728-749.
- CHANG X D, WANG S J, YANG Z P, et al. The spatial reconstruction process and driving mechanism of China's grain production capacity since the 21st century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2025, 40(3): 728-749.
- [25] 刘博, 牛全福, 王刚, 等. 联合多源遥感数据的黄土高原(甘肃区)森林覆盖变化及驱动力分析[J]. *科学技术与工程*, 2025, 25(1): 54-66.
- LIU B, NIU Q F, WANG G, et al. Analysis of forest cover changes and driving forces in the Loess Plateau (Gansu region) based on multisensor remote sensing images[J]. *Science Technology and Engineering*, 2025, 25(1): 54-66.
- [26] 刘奕汝, 杨培涛. 区域森林生态-自然-经济-社会复合系统的耦合协调度: 以长沙市为例[J]. *林业科学*, 2023, 59(9): 139-146.
- LIU Y R, YANG P T. Coupling coordination degree of regional forest ecological-nature-economy-society complex system: A case study in Changsha [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2023, 59(9): 139-146.
- [27] 程瑞英, 范海兰, 吴承祯, 等. 福建省天然林生态系统服务价值评价及其恢复与重建策略[J]. *江西农业大学学报*, 2005, 27(3): 352-356.
- CHENG R Y, FAN H L, WU C Z, et al. Evaluation of ecosystem service of natural forest in Fujian Province and strategies for reconstruction and restoration[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(3): 352-356.
- [28] 范海兰, 洪伟, 吴承祯, 等. 福建省森林生态系统服务价值的变化[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2004, 33(3): 347-351.
- FAN H L, HONG W, WU C Z, et al. The dynamics of forest ecosystem service values in Fujian Province [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2004, 33(3): 347-351.