

## 浙江省丽水市亚热带森林景观格局对森林碳密度的影响

王剑武<sup>1</sup>, 季碧勇<sup>1</sup>, 王铮屹<sup>2</sup>, 朱程昊<sup>1</sup>

(1. 浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310020; 2. 国家林业和草原局 华东调查规划院, 浙江 杭州 310019)

**摘要:** 【目的】定量分析浙江省丽水市亚热带森林景观格局对森林碳密度的影响, 为开展森林经营、生态保护修复以提高亚热带森林碳汇功能提供理论依据。【方法】基于省级固定样地数据, 使用生物量模型和含碳率测算样地的森林碳密度, 再通过普通 Kriging 插值形成区域森林碳密度分布图, 并分析森林碳密度的空间自相关特征。选取 5 项景观格局指标和 3 项自然因素, 利用多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型探讨森林景观格局对森林碳密度的影响, 并分析影响结果的空间非平稳性。【结果】2012—2019 年, 丽水市森林平均碳密度从  $23.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  上升到  $31.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 且空间分布呈显著的正空间自相关性。森林景观格局显著影响森林碳密度, 并表现不同尺度效应, 影响程度在空间上也存在差异。景观蔓延度和斑块密度对森林碳密度驱动力较大, 而景观最大斑块指数的驱动力较小。【结论】森林景观格局对森林碳密度的影响表现较为明显的空间异质性, 应因地制宜制定森林经营管理政策, 实施自然演替和人工干预相结合的生态系统保护修复工程。图 3 表 4 参 42

**关键词:** 森林景观格局; 森林碳密度; 多尺度地理加权回归; 影响因素; 亚热带丘陵区; 丽水市

**中图分类号:** S718 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2024)01-0030-11

## Impact of subtropical forest landscape pattern on forest carbon density in Lishui City of Zhejiang Province

WANG Jianwu<sup>1</sup>, JI Biyong<sup>1</sup>, WANG Zhengyi<sup>2</sup>, ZHU Chenghao<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Forest Resource Monitoring Center, Hangzhou 310020, Zhejiang, China; 2. East China Inventory and Planning Institute, National Forestry and Grassland Administration, Hangzhou 310019, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Objective] This study, with a quantitative analysis of the effects of forest landscape pattern on forest carbon density in Lishui City, Zhejiang Province, is aimed to provide theoretical basis for forest management, ecological protection and restoration so as to improve forest carbon sink function. [Method] First, the forest carbon density of the continuous forest inventory plots was measured by using the biomass model and carbon coefficient. Then, the distribution map of regional forest carbon density was formed by ordinary Kriging interpolation before an analysis was conducted of the spatial autocorrelation characteristics of forest carbon density. Lastly, five landscape pattern indicators and three natural factors were selected, and multiscale geographically weighted regression (MGWR) models were used to investigate the effects of forest landscape pattern on forest carbon density, while the spatial non-stationarity affecting the results was analyzed. [Result] From 2012 to 2019, the average forest carbon density in Lishui increased from  $23.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  to  $31.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ , and the spatial distribution showed a significant positive spatial autocorrelation. Forest landscape pattern

收稿日期: 2023-03-14; 修回日期: 2023-10-05

基金项目: 浙江省“领雁”研发攻关计划项目 (2022C02053); 浙江省省院合作林业科技项目 (2021SY05)

作者简介: 王剑武 (ORCID: 0000-0002-5518-7146), 高级工程师, 从事森林生态综合监测研究。E-mail: jianwuwang1986@163.com。通信作者: 季碧勇 (ORCID: 0000-0002-3249-9745), 正高级工程师, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: 39278008@qq.com

significantly affected forest carbon density, showing different scale effects, and the degree of impact was also different in space. Landscape pattern indexes contagion (CONTAG) and patch density (PD) had a greater driving force on forest carbon density, while largest path index (LPI) had a smaller one. [Conclusion] The effects of forest landscape pattern on forest carbon density showed obvious spatial heterogeneity and the results of this paper can provide reference for making differentiated forest management policies and implementing targeted ecosystem protection and restoration projects. [Ch, 3 fig. 4 tab. 42 ref.]

**Key words:** forest landscape; forest carbon density; multiscale geographically weighted regression; influencing factor; subtropical hilly region; Lishui City

气候变化是人类面临的全球性问题。到 2050 年, 为了将全球升温控制在 1.5 °C 以内, 必须增加约 1 亿  $\text{hm}^2$  森林<sup>[1]</sup>。森林生态系统是全球陆地生态系统中最大的碳库<sup>[2]</sup>。森林碳密度是衡量森林生态系统固碳能力的重要指标, 其影响机制越来越受到重视, 已围绕树种组成<sup>[3]</sup>、气候驱动变化<sup>[4]</sup>、森林管护水平<sup>[5]</sup>、道路网络<sup>[6]</sup>和城市扩张<sup>[7]</sup>等自然与人为因素开展了富有成效的研究。

实际上, 景观格局反映了自然与人为因素在不同时空尺度上作用的最终结果, 并能够体现各生态过程在不同时空尺度上的相互作用关系<sup>[8]</sup>。森林景观格局反映了森林景观的组成、空间分布、数量、结构和功能等信息<sup>[9]</sup>, 森林景观规模异质性的增加, 改变了森林的结构、功能和过程<sup>[10]</sup>, 关注森林景观异质性能更好地衡量碳循环等森林生态功能<sup>[11]</sup>。森林景观如何影响森林碳储量受到越来越多关注<sup>[12]</sup>, 关于森林景观格局对森林碳储量的影响机制也进行了研究。森林景观格局优化可以促进森林碳储量提高<sup>[13]</sup>, 扩大斑块面积从而提高森林景观连通性, 促进次生林碳储量提升<sup>[14]</sup>, 而森林破碎化则会减少森林边缘的碳储量<sup>[15]</sup>。张丹<sup>[16]</sup>研究了不同尺度城市森林景观格局与碳储量的相关性, 并指出增加森林斑块面积和连通度, 减小斑块的平均邻近距离与周长面积比均可增加城市森林碳储量。宋洁<sup>[17]</sup>分析了祁连山森林景观格局对森林碳储量的相关性, 认为增加森林景观面积、景观形状复杂度、景观聚集度和连通性能够提升森林碳储量。吕海亮<sup>[18]</sup>研究了城市森林碳密度与景观格局关系, 认为平均斑块面积与碳密度呈显著正相关, 而景观形状指数则与其呈显著负相关。也有学者聚焦森林景观格局对森林碳密度的影响研究, 通过耦合协调度模型探究碳密度与森林景观不同组成、分布等特征的关系<sup>[19]</sup>。然而, 量化森林景观格局对森林碳密度影响的研究还不多, 且以上研究虽然解析了森林景观格局对森林碳密度的相关性, 但很少从空间上解释森林景观对森林碳密度的影响规律。实际上森林碳密度具有空间自相关性<sup>[20-21]</sup>, 忽略地理因素的空间非平稳性, 易导致结果有偏差或估计效率低下。

目前, 地理加权回归模型 (GWR)、空间计量模型、地理探测器等方法已被用于分析研究对象与各类驱动因素之间的空间关联性。其中, GWR 解释模型方差比其他模型更有效, 且相比于普通最小二乘模型 (OLS), 能较好地揭示解释变量的空间异质性, 但 GWR 模型是基于恒定带宽, 忽略了解释变量尺度作用差异。为此, FOTHERINGHAM 等<sup>[22]</sup>提出了多尺度地理加权 (MGWR) 模型, 解决了不同解释变量在不同尺度同一带宽的问题, 即允许在多个空间尺度上建立自变量和因变量的关系模型。MGWR 模型已成功应用于生境质量<sup>[23]</sup>、生态效率<sup>[24]</sup>、森林火灾<sup>[25]</sup>等的驱动因素分析, 但在森林景观研究中的应用仍处于探索阶段。

本研究选取了浙江省丽水市为研究区域, 采用 MGWR 模型探究亚热带森林景观格局对森林碳密度的影响机制和空间非平稳性, 为研究区域森林碳密度时空特征提供框架, 以期制定国土绿化、森林质量提升政策, 因地制宜开展森林保护与管理提供依据。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

丽水市位于浙江省西南部, 27°25'~28°57'N 和 118°41'~120°26'E, 地貌以丘陵、中山为主, 市域面积为 1.73 万  $\text{km}^2$ 。丽水市属中亚热带季风气候, 温暖湿润, 雨量充沛, 具有典型的山地气候。作为南方亚热带重要的集体林区, 及浙江省森林资源最为丰富的设区市, 截至 2019 年, 丽水市森林面积为

142.14 万 $\text{hm}^2$ ，森林覆盖率为 82.27%，森林蓄积量为 0.96 亿 $\text{m}^3$ ，居浙江省前列。近年来，随着快速的城市化和社会发展，该地区土地利用发生了相当大的变化，这对森林提供生态系统服务能力产生了重要影响<sup>[26]</sup>。同时该地区国家公园和自然保护区建设，以及森林管理活动也对森林碳循环产生了重大影响<sup>[27]</sup>，增强了森林景观格局和森林碳密度的空间异质性。

## 1.2 数据来源

①土地利用矢量数据来源于浙江省森林资源年度变更成果。将研究区的土地利用分为乔木林地、竹林地、灌木林地、未成林造林地、苗圃地、迹地、宜林地和非林地等 8 种类型。为更细致刻画森林景观特征，进一步把乔木林地细分为针叶林、阔叶林、针阔混交林等 3 种类型。地类和树种分类按照 DB33/T 640—2017《森林资源规划设计调查规程》<sup>[28]</sup> 执行。②样地数据来源于丽水市 716 个森林资源连续清查样地 (以下简称连清样地) 的现场调查，全市以公里格网 4 km×6 km 间距布设样地，单个样地面积为 0.08  $\text{hm}^2$ ，形状为正方形。③数字高程模型来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)，分辨率为 30 m。④年降水量和年平均气温数据根据资源环境科学与数据中心下载的中国 756 个气象站观测数据，通过普通 Kriging 法进行空间插值形成栅格数据，分辨率为 30 m。以上数据均取 2012 和 2019 年的数据。

## 1.3 测算森林碳密度

①利用 2012 和 2019 年连清样地实测的样木数据，将每株样木树种归类至表 1 所列的树种类型。②使用树高-胸径曲线模型计算单株树 (竹) 高；③使用冠长模型计算单株树 (竹) 冠长；④使用单株立木 (竹) 生物量模型计算各样地内的单株活立木 (竹) 的地上和地下部分生物量，再通过与含碳率的乘积测算单株活立木 (竹) 的碳储量；⑤将样地内各株活立木 (竹) 的碳储量累加形成样地林分水平的碳储量，然后除以样地面积得到森林碳密度。⑥利用 ArcMap 10.8 的球面半变异函数模型的普通 Kriging 法，形成丽水市森林碳密度空间分布图。树高-胸径曲线模型、冠长模型、生物量模型见表 1，含碳率见表 2。

为验证碳密度空间分布结果精度可靠性，基于已有数据，先将空间分布结果由栅格转为矢量面要素的格网，并裁切提取出丽水市行政范围内的格网；再将每个格网的面积与其碳密度相乘并汇总加和得到丽水市森林碳储量；然后按照文献 [29] 所述的系统抽样统计方法，基于连清样地计算丽水市森林碳储量的估计中值、估计精度和估计区间；最后根据文献 [30]，基于空间分布结果计算的森林碳储量如落入估计区间，则说明该结果是有精度保证的，森林碳储量是碳密度乘以丽水市面积得到，也可说明森林碳密度空间分布结果是有精度保证的。

## 1.4 量化森林景观格局指数

选择 5 个常用且相关性较低的景观指标：香农多样性指数 (SHDI)、最大斑块指数 (LPI)、斑块密度 (PD)、蔓延度指数 (CONTAG)、景观形状指数 (LSI)。各指标的含义和计算公式见文献 [31]。另外，本研究选择了年平均降水量 (PREP)、年平均气温 (TEMP)、海拔 (ELEV) 作为控制变量。气温和降水量是影响森林固碳能力最常见的气候要素，其影响是双向的。气温会影响植被光合作用和净初级生产力，从而影响森林生长<sup>[32]</sup>，但高温引起的呼吸增加可能使碳储量随着温度升高而减少<sup>[33]</sup>。一定范围内的水资源会促进森林的生长，水分过多则会抑制土壤呼吸，影响植物生长<sup>[34]</sup>。使用 Fragstats 4.2 软件，参照已有对市级尺度的景观研究<sup>[35-36]</sup>，选取 5 km×5 km 为窗口大小，采用移动窗口法生成各景观指标栅格图，基于 ArcMap 10.8 生成 4 km×4 km 的格网 (研究区共计 1 204 个网格)，对每个格网的景观格局指标数值和控制变量数值分区统计。

## 1.5 空间自相关分析

地理学第一定律表明，在涉及具有地理空间的数据时，事物之间距离越近关联性越大<sup>[37]</sup>。采用 Global Moran's  $I$  和 Local Moran's  $I$  来描述森林碳密度的全域和局部聚类特征。计算公式可见文献 [38]。Moran's  $I$  介于 -1 到 1 之间，>0 表示存在正相关性，<0 表示存在负相关性，0 表明不存在空间自相关。使用 GeoDa 1.12 绘制 LISA (local indicators of spatial association) 图，反映森林碳密度的空间格局，LISA 图包括 4 个类别，“高—高”和“低—低”表示空间正相关，“高—低”和“低—高”表示空间负相关。Global Moran's  $I$  也将用于量化 MGWR 模型的残差空间自相关，如果残差存在显著的空间自相关，则表明模型中缺失了关键解释变量。

表 1 树高-胸径曲线模型、冠长模型和生物量模型

Table 1 Height-diameter curves model, crown length model and biomass model

| 树种类型    | 树高-胸径曲线模型   | 冠长模型                                    | 生物量模型   |
|---------|---|---|---|
| 松类      | $H = 78.7110 + \frac{-10051.6200}{0.9848 D_{BH} + 129.7195}$  | $L = 0.9082 H^{0.7413}$                 | $B_{松类} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0600 H^{0.7934} D_{BH}^{1.8005}$<br>$B_2 = 0.1377 L^{0.4052} D_{BH}^{1.4873}$<br>$B_3 = 0.0417 H^{-0.0780} D_{BH}^{2.2618}$    |
| 杉类      | $H = 119.5839 + \frac{-24448.2140}{0.9884 D_{BH} + 205.6924}$ | $L = 0.4870 D_{BH}^{0.1707} H^{0.8971}$ | $B_{杉类} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0647 H^{0.8959} D_{BH}^{1.4880}$<br>$B_2 = 0.0971 L^{0.0346} D_{BH}^{1.7814}$<br>$B_3 = 0.0617 H^{-0.1037} D_{BH}^{2.1153}$    |
| 硬阔类 I   |   |   | $B_{硬阔类 I} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0560 H^{0.8099} D_{BH}^{1.8140}$<br>$B_2 = 0.0980 L^{0.4610} D_{BH}^{1.6481}$<br>$B_3 = 0.0549 H^{0.1068} D_{BH}^{2.0953}$  |
| 硬阔类 II  | $H = 58.2082 + \frac{-6994.7390}{0.9848 D_{BH} + 127.7195}$   | $L = 0.6316 H^{1.1801} e^{-0.0511 H}$   | $B_{硬阔类 II} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0803 H^{0.7815} D_{BH}^{1.8056}$<br>$B_2 = 0.2860 L^{0.9450} D_{BH}^{1.0968}$<br>$B_3 = 0.2470 H^{0.1745} D_{BH}^{1.7954}$ |
| 软阔类     |   | $L = 0.4413 H^{1.3770} e^{-0.0603 H}$   | $B_{软阔类} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0444 H^{0.7197} D_{BH}^{1.7095}$<br>$B_2 = 0.0856 L^{0.3970} D_{BH}^{1.2266}$<br>$B_3 = 0.0459 H^{0.1067} D_{BH}^{2.0247}$    |
| 乔木经济树种类 |   | $L = 0.6189 H^{1.2048} e^{-0.0382 H}$   | 使用硬阔类 I 的公式   |
| 竹类      | $H = 24.5570 + \frac{-233.8099}{D_{BH} + 8.4343}$             | $L = 0.7056 H^{1.1748} e^{-0.0601 H}$   | $B_{竹类} = B_1 + B_2 + B_3$<br>$B_1 = 0.0398 H^{0.5778} D_{BH}^{1.8540}$<br>$B_2 = 0.2800 L^{0.2740} D_{BH}^{0.8357}$<br>$B_3 = 0.3710 H^{0.1357} D_{BH}^{0.9817}$     |

说明：H 是树高 (m)， $D_{BH}$  是胸径 (cm)，L 是冠长 (m)， $B_1$ 、 $B_2$  和  $B_3$  分别是单株立木 (竹) 的树干生物量 (kg)、树冠生物量 (kg) 和树根生物量 (kg)。松类包括马尾松 *Pinus massoniana*、湿地松 *P. elliottii*、黄山松 *P. taiwanensis* 等树种；杉类包括杉木 *Cunninghamia lanceolata*、水杉 *Metasequoia glyptostroboides*、池杉 *Taxodium distichum* var. *imbricatum* 等树种；硬阔类 I 包括木荷 *Sciaphila superba*、红楠 *Machilus thunbergii*、樟 *Camphora officinarum* 等树干木材密度小于  $0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的树种；硬阔类 II 包括青冈 *Quercus glauca*、苦槠 *Castanopsis sclerophylla*、栎类 *Quercus* 等树干木材密度大于  $0.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的树种；软阔类包括桤木 *Alnus cremastogyne*、槭树 *Acer miyabei*、檫木 *Sassafras tzumu* 等树种；乔木经济树种类包括栗 *Castanea mollissima*、枇杷 *Eriobotrya japonica*、香榧 *Torreya grandis* ‘Merrillii’ 等树种；竹类包括刚竹 *Phyllostachys sulphurea*、毛竹 *Ph. edulis*、早竹 *Ph. violascens* 等。

表 2 树种含碳率

Table 2 Carbon contents of species

| 树种                                | 含碳率     | 树种  | 含碳率     | 树种                | 含碳率     |
|-----------------------------------|---------|---|---------|-------------------|---------|
| 冷杉 <i>Abies fabri</i>             | 0.499 9 | 柳杉 <i>Cryptomeria japonica</i> var. <i>sinensis</i> | 0.523 5 | 杨树 <i>Populus</i> | 0.495 6 |
| 云杉 <i>Picea asperata</i>          | 0.520 8 | 水杉 <i>Metasequoia glyptostroboides</i>              | 0.501 3 | 硬阔类               | 0.483 4 |
| 铁杉 <i>Tsuga chinensis</i>         | 0.502 2 | 樟树 <i>Cinnamomum camphora</i>                       | 0.491 6 | 软阔类               | 0.495 6 |
| 柏木 <i>Cupressus funebris</i>      | 0.503 4 | 楠木 <i>Phoebe zhennan</i>                            | 0.503 0 | 针叶混交林             | 0.510 1 |
| 黑松 <i>Pinus thunbergii</i>        | 0.514 6 | 栎类 <i>Quercus</i>                                   | 0.500 4 | 阔叶混交林             | 0.490 0 |
| 华山松 <i>Pinus armandii</i>         | 0.522 5 | 桦木类 <i>Betula</i>                                   | 0.491 4 | 针阔混交林             | 0.497 8 |
| 油杉 <i>Keteleeria fortunei</i>     | 0.499 7 | 椴树 <i>Tilia tuan</i>                                | 0.439 2 | 竹类                | 0.504 2 |
| 马尾松 <i>Pinus massoniana</i>       | 0.459 6 | 檫木 <i>Sassafras tzumu</i>                           | 0.484 8 | 乔木经济树种            | 0.483 4 |
| 高山松 <i>Pinus densata</i>          | 0.500 9 | 桉树 <i>Eucalyptus</i>                                | 0.525 3 | 其他树种              | 0.500 0 |
| 杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i> | 0.520 1 | 木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>                  | 0.498 0 |                   |         |

1.6 MGWR 模型

采用 MGWR 模型探究森林景观格局对森林碳密度的多尺度影响。MGWR 模型通过不断寻找各解释

变量的最优带宽并不断更新参数估计值，直至系数迭代收敛，从而形成最终回归结果<sup>[39]</sup>。该模型如下：

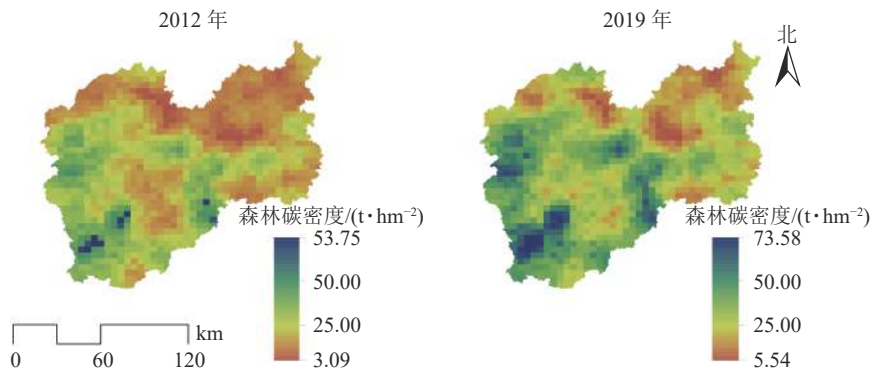
$$y_i = \sum_{j=1}^m \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i$$

其中， $y_i$  是格网  $i$  的被解释变量； $x_{ij}$  是格网  $i$  的第  $j$  个解释变量； $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$  为格网  $i$  的第  $j$  个解释变量的局部回归系数， $(u_i, v_i)$  为格网  $i$  的空间位置， $b_{wj}$  为第  $j$  个解释变量回归系数所使用的带宽  $b_w$ ； $m$  为解释变量的个数； $\varepsilon_i$  为误差项。本研究采用 MGWR 2.2 进行模型构建，MGWR 形式选择 Gaussian，空间 Kernel 类型选择 Adaptive Bisquare 函数，带宽搜寻方法采用 Golden Section，模型最优化准则采用 AICc 准则。

## 2 结果与分析

### 2.1 森林碳密度空间格局

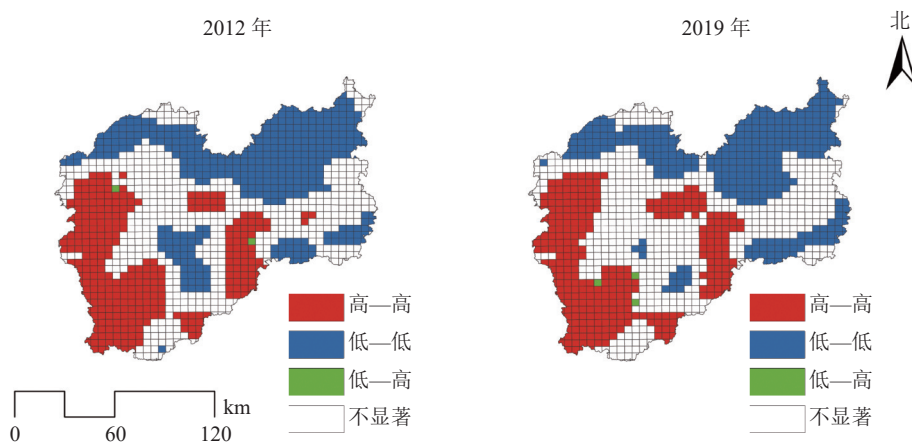
2012—2019 年，研究区森林碳密度平均值从  $23.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$  提高到  $31.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，年均增量为  $1.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据研究区森林资源连续清查结果，森林面积和森林蓄积量分别从 2012 年的  $132.81 \text{ 万 hm}^2$  和  $0.65 \text{ 亿 m}^3$  增加到  $142.14 \text{ 万 hm}^2$  和  $0.96 \text{ 亿 m}^3$ ，年均分别增加  $1.33 \text{ 万 hm}^2$  和  $0.04 \text{ 亿 m}^3$ ，森林面积和森林蓄积量逐年上升促进了森林碳密度增加。森林碳密度空间分布格局存在显著差异，低森林碳密度主要在研究区的北部、西部和西南部的森林碳密度较高(图 1)。2012 和 2019 年研究区的 Global Moran'  $I$  分别为 0.889 和 0.891 ( $P < 0.01$ )，表明森林碳密度较高或较低区域趋于聚集。由图 2 发现：①“高—高”区域主要分布在西南部和中南部地区。西南部是瓯江源头，拥有钱江源-百山祖国家公园百山祖园区等



基于浙江省自然资源厅标准地图服务网站浙 S (2023) 38 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图 1 丽水市森林碳密度空间分布图

Figure 1 Spatial distribution map of forest carbon density in Lishui City



基于浙江省自然资源厅标准地图服务网站浙 S (2023) 38 号的标准地图制作, 底图边界无修改。

图 2 丽水市森林碳密度 LISA 分布特征图

Figure 2 Spatiotemporal characteristics of LISA map of forest carbon density in Lishui City

多处自然保护地，得益于较少的人为干扰、公益林保护和森林生态保护修复，森林质量高。②“低—低”区域主要分布在北部，北部地区包含松谷平原和碧湖平原，这些地区耕地、建筑用地较多，受人类活动影响频繁。③“低—高”区域分布极少，说明出现周围森林碳密度高而本地森林碳密度低的空间结构概率较低。

基于丽水市连清样地，系统抽样统计结果(表 3)表明：2012 年全市森林碳储量估计中值为 4 023.48 万 t，估计区间为 (3 729.05~4 317.90) 万 t，估计精度为 92.68% ( $P < 0.05$ )。2019 年全市森林碳储量估计中值为 5 541.19 万 t，估计区间为 (5 192.46~5 889.91) 万 t，估计精度 93.71% 为 ( $P < 0.05$ )。2012 和 2019 年基于空间分布结果计算的森林碳储量分别为 4 023.08 万 t 和 5 543.42 万 t，均位于相应年份的估计区间内，说明森林碳密度空间分布结果是有精度保证的。

表 3 分别基于连清样地、森林碳密度空间分布结果计算的丽水市森林碳储量

Table 3 Forest carbon storage in Lishui City based on the continuous forest inventory and spatial distribution of forest carbon density, respectively

| 年份   | 基于空间分布结果的<br>计算值/万t | 样地森林碳储量<br>均值/t | 基于连清样地的<br>计算值/万t | 基于连清样地计算值的<br>估计区间/万t | 估计精度/% |
|------|---------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|--------|
| 2012 | 4 023.08            | 1.86            | 4 023.48          | (3 729.05, 4 317.90)  | 92.68  |
| 2019 | 5 543.42            | 2.57            | 5 541.19          | (5 192.46, 5 889.91)  | 93.71  |

## 2.2 基于 MGWR 模型的空间非平稳性分析

2.2.1 变量尺度效应 由表 4 可见：2012 和 2019 年的 MGWR 模型的 Adj- $R^2$  分别达 0.898 和 0.892。模型的带宽包含 44、79、992 和 1 204，由于研究区被划分为 1 204 个网格，因此从行政边界角度看，带宽 992 和 1 204 的空间尺度可定义为市级，44 和 79 可定义为县级。LSI 带宽为 44，作用尺度较小，表明景观形状复杂度对森林碳密度的影响在空间上存在较大差异。CONTAG、LPI 和 SHDI 的带宽都较大，说明森林景观连通性、面积优势度和景观多样性对森林碳密度影响的空间差异相对较小，也表明上述 3 个影响因素回归系数空间异质性较不明显。PD 带宽从 79 升至 1 204，作用尺度在扩大，意味着景观破碎化程度对森林碳密度影响的空间差异在变小。

2.2.2 回归结果 由表 4 可见：从景观格局指标的回归参数 2 期均值的绝对值看，CONTAG 对森林碳密度影响最大，其次是 SHDI 和 PD，LPI 和 LSI 相对影响较小。从图 2 的局部  $R^2$  看，研究区大部分区域拟合优度较高，模型可以揭示研究区 2012 年森林碳密度总变化的 17.8%~95.9% 和 2019 年的 22.1%~96.6%。从各影响因素 beta 系数的正负值占比看，除 CONTAG 和 SHDI 外，其余景观格局的参数估计值正负情况都存在，即对森林碳密度表现不同效应影响，说明 MGWR 模型能将系数的局部特征呈现出来。

2.2.3 回归结果的空间非平稳性 由图 3 可见：2012 和 2019 年，CONTAG 对森林碳密度的负向影响均从研究区的西北向东南下降，但对森林碳密度的负向驱动力在研究期间逐渐减弱。这可能是因为西北部包含了松古平原，同时遂昌县境内分布有若干小盆地，斜坡平缓，茶叶等经济林种植面积广，应当通过加强农田林网建设和平原绿化增加片状森林面积，降低经济树种的景观连通度，提高区域森林碳密度。PD 系数在研究区范围内以负值为主，并且负值区域在逐渐增多，说明降低森林破碎化程度一定程度上可减少对森林碳密度的负向影响。LPI 系数以负值为主，意味着大部分区域需要减少人为干扰，维持植被自然生长状态。从 2012 年到 2019 年，LPI 系数正值区域有所增加，在西北部和中西部等区域与森林碳密度呈正相关关系，说明这些地方通过适当增加森林抚育、补植造林等措施，能够对提高森林碳密度产生积极影响。从 2012 年到 2019 年，LSI 对森林碳密度的驱动力逐渐增强。说明在一定程度上，随着斑块形状的复杂度增加，森林碳密度也会随之增加。2019 年，LSI 对森林碳密度的正向影响由西向东下降，这表明相对于研究区东部，西部森林斑块复杂程度的增加对森林碳密度的正向影响更大。这可能是因为森林景观斑块形状复杂，能够促进斑块边缘的植被形成高效率的能量共生网络<sup>[40]</sup>，增强森林的边缘效应，而斑块边缘通常具有较高的初级生产力<sup>[41]</sup>。从 2012 年至 2019 年，SHDI 对森林碳密度的负向驱动力逐渐减弱，形成负向影响由西向东增加的格局，说明研究区的林分种类分布比较均匀。年平均降水量系数总体上呈现由东部大于西部转变为西部大于东部的趋势，但 2 期正向与负向影响区域的数量差异

表4 MGWR模型性能和回归参数描述性统计

Table 4 MGWR model performance and descriptive statistics for regression parameters

| 年份                  | 变量         | 带宽    | 均值     | 标准差   | 最小值                   | 中位数       | 最大值    | 正值/%  | 负值/%  |
|---------------------|------------|-------|--------|-------|-----------------------|-----------|--------|-------|-------|
| 2012                | CONTAG     | 992   | -0.107 | 0.001 | -0.108                | -0.107    | -0.106 | 0     | 100   |
|                     | PD         | 79    | -0.045 | 0.129 | -0.322                | -0.077    | 0.493  | 23.84 | 76.16 |
|                     | LPI        | 1 204 | -0.016 | 0.067 | -0.212                | -0.021    | 0.206  | 38.04 | 61.96 |
|                     | LSI        | 44    | -0.019 | 0.054 | -0.198                | -0.017    | 0.139  | 27.74 | 72.26 |
|                     | SHDI       | 1 204 | -0.069 | 0.001 | -0.071                | -0.069    | -0.068 | 0     | 100   |
|                     | PREP       | 44    | -0.013 | 0.573 | -1.661                | -0.010    | 1.793  | 48.59 | 51.41 |
|                     | TEMP       | 44    | -0.619 | 1.335 | -7.906                | -0.704    | 1.557  | 37.54 | 62.46 |
|                     | ELEV       | 44    | 0.150  | 0.133 | -0.126                | 0.132     | 0.554  | 90.28 | 9.72  |
|                     | 常数项        | 44    | 0.683  | 0.393 | -0.063                | 0.629     | 1.990  | 99.58 | 0.42  |
|                     | 局部 $R^2$   | 0.916 | 0.774  | 0.116 | 0.178                 | 0.792     | 0.959  |       |       |
|                     | Adj- $R^2$ |       |        |       |                       | 0.898     |        |       |       |
|                     | AICc       |       |        |       |                       | 968.668   |        |       |       |
|                     | 残差平方和      |       |        |       |                       | 101.026   |        |       |       |
|                     | 有效参数数量     |       |        |       |                       | 218.323   |        |       |       |
| 残差Global Moran' $I$ |            |       |        |       | 0.019 3 ( $P=0.092$ ) |           |        |       |       |
| 2019                | CONTAG     | 1 204 | -0.047 | 0.001 | -0.049                | -0.047    | -0.045 | 0     | 100   |
|                     | PD         | 1 204 | -0.092 | 0.099 | -0.465                | -0.095    | 0.135  | 16.69 | 83.31 |
|                     | LPI        | 1 204 | -0.004 | 0.082 | -0.190                | -0.013    | 0.309  | 43.02 | 56.98 |
|                     | LSI        | 44    | 0.041  | 0.023 | 0.007                 | 0.041     | 0.079  | 100   | 0     |
|                     | SHDI       | 1 204 | -0.055 | 0.006 | -0.066                | -0.055    | -0.045 | 0     | 100   |
|                     | PREP       | 44    | 0.113  | 0.618 | -1.400                | 0.011     | 1.376  | 51.41 | 48.59 |
|                     | TEMP       | 44    | 0.196  | 0.550 | -1.636                | 0.210     | 2.421  | 65.95 | 34.05 |
|                     | ELEV       | 44    | 0.152  | 0.129 | -0.162                | 0.154     | 0.517  | 86.88 | 13.12 |
|                     | 常数项        | 44    | -0.256 | 0.444 | -1.122                | -0.196    | 0.692  | 34.88 | 65.12 |
|                     | 局部 $R^2$   | 0.911 | 0.783  | 0.116 | 0.221                 | 0.810     | 0.966  |       |       |
|                     | Adj- $R^2$ |       |        |       |                       | 0.892     |        |       |       |
|                     | AICc       |       |        |       |                       | 1 018.145 |        |       |       |
|                     | 残差平方和      |       |        |       |                       | 107.759   |        |       |       |
|                     | 有效参数数量     |       |        |       |                       | 208.759   |        |       |       |
| 残差Global Moran' $I$ |            |       |        |       | 0.048 8 ( $P=0.002$ ) |           |        |       |       |

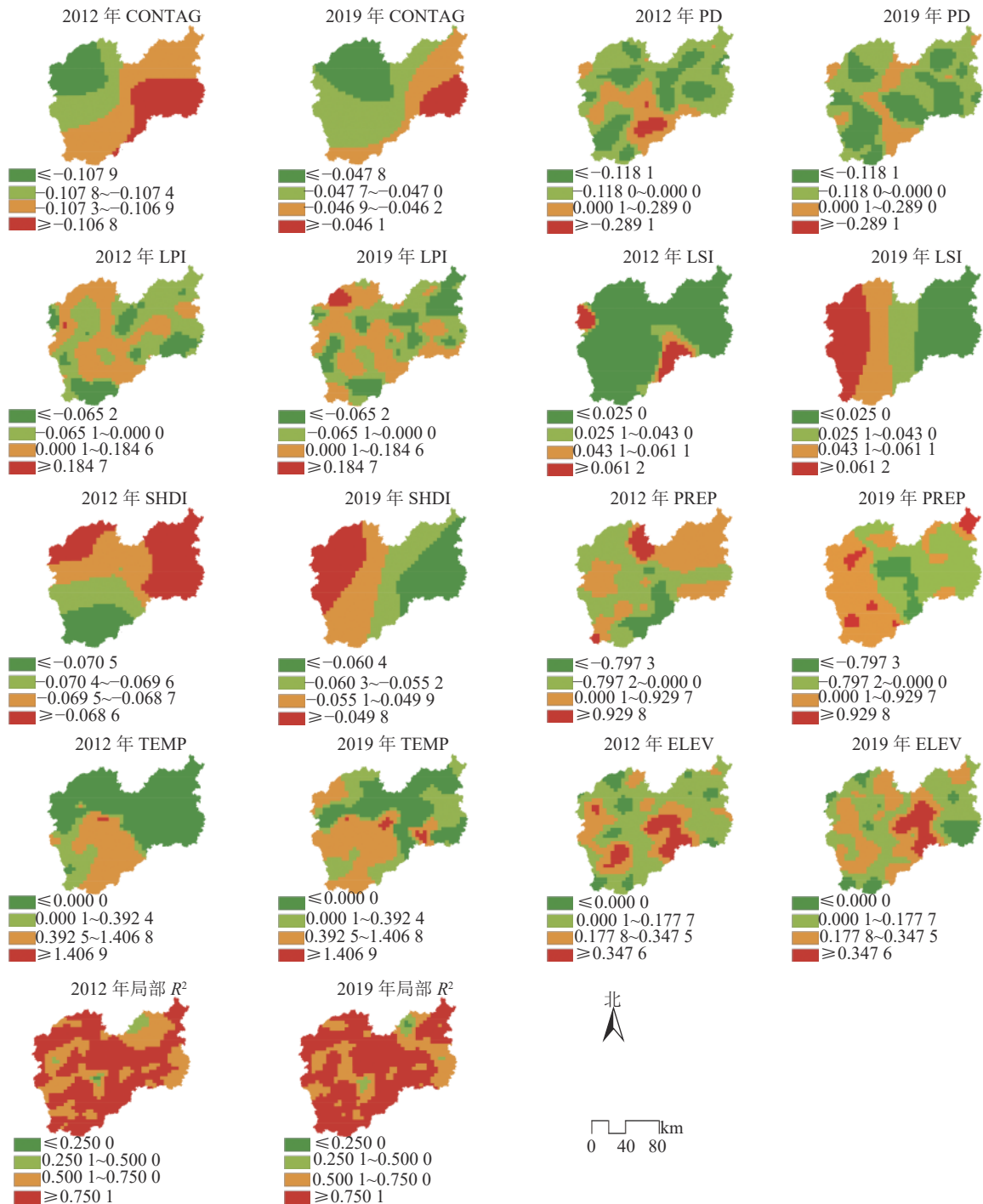
说明: SHDI 为香农多样性指数; LPI 为最大斑块指数; PD 为斑块密度; CONTAG 为蔓延度指数; LSI 为景观形状指数; PREP 为年平均降水量; TEMP 为年平均气温; ELEV 为海拔。

较小。年平均气温对森林碳密度的正向影响区域逐渐增多,而海拔系数空间分布差异不大。2019年,年平均降水量主要在西部和西南部与森林碳密度呈正相关关系,其余区域主要呈负相关关系。年平均气温系数空间分布与年平均降水量有一定相似,主要在西南部和西北部与森林碳密度呈正相关关系。研究区的绝大部分区域的海拔与森林碳密度呈正相关关系,并且中部区域的正相关关系更强。年平均降水量、年平均气温系数正值分布区域包含了钱江源-百山祖国家公园百山祖园区、九龙山国家级自然保护区、括苍山省级森林公园,充分利用丰富的水热资源,加强自然保护地内森林生态系统保护修复,有助于提高森林碳密度。

### 3 讨论

#### 3.1 MGWR模型能反映森林碳密度对森林景观格局响应的空间分异

本研究发现:森林碳密度具有显著的空间自相关性,考虑影响因素的空间尺度对模型的结果会产生



基于浙江省自然资源厅标准地图服务网站浙 S (2023) 38 号的标准地图制作, 底图边界无修改。CONTAG 为蔓延度指数; PD 为斑块密度; LSI 为景观形状指数; LPI 为最大斑块指数; SHDI 为香农多样性指数; PREP 为年平均降水量; TEMP 为年平均气温; ELEV 为海拔。由于 2012 年的 CONTAG 和 SHDI 系数均小于 2019 年系数的最小值, 为了便于空间可视化, 故不同年份取了不同间隔值。

图 3 MGWR 模型系数和局部  $R^2$  空间格局

Figure 3 Spatial pattern of MGWR model coefficient and local  $R^2$

重大影响。MGWR 模型拟合结果表明, 斑块密度、最大斑块指数、年平均降水量、年平均气温和海拔等变量在不同区域的回归系数既有正值也有负值, 因 MGWR 模型使用自适应带宽, 可以更精确地探索驱动因素对森林碳密度的作用机制和空间异质性影响, 并明确各驱动因素的具体影响尺度。

### 3.2 森林景观格局驱动森林碳密度对森林管理的建议

森林景观格局对森林碳密度影响表现出不同大小的驱动力和多尺度空间特征, 不同尺度需要关注的影响因素是不同的, 因此林业管理者可以根据这些特征制定宏观与微观的政策。在市级层面, 林业管理



者需要加强农田林网和生态廊道建设,降低纯林的景观连通度,同时对生态保护修复进行全区域尺度的管理,将森林恢复和减少森林破碎化战略纳入空间规划中,减少山区森林生态系统中人为干扰和森林破碎化,以提高森林碳密度的整体水平。在县级尺度上,通过合理配置森林景观组成可以有效增强森林固碳量<sup>[42]</sup>,并发挥森林组成成分间相互作用效能,发挥森林边缘效应优势。

### 3.3 局限性和未来研究方向

区域森林碳密度计算是一项复杂的研究任务且有多种计算方法,如采用 CASA 模型计算植被净初级生产力(NPP),再将其转换为固碳量,或采用 InVEST 模型计算固碳量。森林碳密度受各种因素的影响,本研究是在系统布设的固定样地计算结果基础上,采用空间插值形成区域森林碳密度,计算方法在某些方面可能仍需改进。由于缺少灌木林实测数据,本研究未测算样地内的灌木林碳储量。随着尺度增加,森林碳密度的影响因素也愈加复杂,由于景观格局具有尺度依赖性, MGWR 模型作为线性回归模型,对愈加复杂的影响因素解释能力需进一步探讨。此外,本研究使用边长 4 km 正方形的网格尺度来创建景观格局指标,并探究其与森林碳密度的关系,这个尺度可能更适用于建模,对实际森林管理会有不便。在未来研究中可以以乡镇、村级行政单位为建模单元,进一步增强模型结果的实际应用性。鉴于森林碳密度的空间自相关性,可以考虑使用空间计量模型进一步探究森林碳密度对森林经营管理和经济社会发展响应的机制。

## 4 结论

本研究以浙江省丽水市为研究区,使用 MGWR 模型探讨了森林景观格局对森林碳密度的影响。2012 和 2019 年,森林碳密度的空间自相关度分别为 0.889 和 0.891,呈显著的空间自相关性。森林景观格局对森林碳密度的影响在空间上存在非平稳性, CONTAG 和 SHDI 存在负向影响, PD、LPI、LSI 在空间上正向和负向影响并存。森林景观格局也表现出不同尺度效应, CONTAG、LPI、SHDI 的作用尺度较大, LSI 作用尺度较小。基于研究结果,建议进一步重视森林经营管理的空间决策支持,因地制宜实施自然演替和人工干预相结合的森林生态系统保护修复措施,促进森林生态系统碳汇功能提升。

## 5 参考文献

- [1] IPCC. *An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018: 616.
- [2] PINGOUD K, EKHOLOM T, SOIMAKALLIO S, *et al.* Carbon balance indicator for forest bioenergy scenarios [J]. *GCB Bioenergy*, 2016, **8**(1): 171 – 182.
- [3] HU Yanqiu, SU Zhiyao, LI Wenbin, *et al.* Influence of tree species composition and community structure on carbon density in a subtropical forest [J/OL]. *PLoS One*, 2015, **10**(8): e0136984[2023-03-10]. doi: 10.1371/journal.pone.0136984.
- [4] LAFLOWER D M, HURTEAU M D, KOCH G W, *et al.* Climate-driven changes in forest succession and the influence of management on forest carbon dynamics in the Puget Lowlands of Washington State, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2016, **362**: 194 – 204.
- [5] 余文梦, 张婷婷, 苏时鹏, 等. 劳动力转移和森林管护水平对森林碳密度的影响——基于福建253个村的实证研究[J]. *生态学报*, 2022, **42**(23): 9820 – 9829.  
YU Wenmeng, ZHANG Tingting, SU Shipeng, *et al.* Effects of labor transfer and forest management on forest carbon density based on an empirical study of 253 villages in Fujian Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(23): 9820 – 9829.
- [6] 林玉英, 李宝银, 邱荣祖, 等. 基于GWR模型的道路网络对森林碳密度干扰的地理变异——以闽江上游地区为例[J]. *地理科学*, 2022, **42**(6): 1113 – 1123.  
LIN Yuying, LI Baoyin, QIU Rongzu, *et al.* Geographic variation of road network effects on forest carbon density based on GWR model: a case study of the upstream district of the Minjiang River [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, **42**(6): 1113 – 1123.
- [7] REN Yin, YAN Jing, WEI Xiaohua, *et al.* Effects of rapid urban sprawl on urban forest carbon stocks: integrating remotely sensed, GIS and forest inventory data [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **113**: 447 – 455.
- [8] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题[J]. *地理科学*, 2003, **23**(3): 264 – 270.

- ZHANG Qiuju, FU Bojie, CHEN Liding. Several problems about landscape pattern change research [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, **23**(3): 264 – 270.
- [9] 王美玲, 张继超, 王舶鉴, 等. 长白山区森林景观格局动态[J]. 生态学杂志, 2017, **36**(11): 3138 – 3147.  
WANG Meiling, ZHANG Jichao, WANG Bojian, *et al.* Dynamics of forest landscape pattern in Changbai Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(11): 3138 – 3147.
- [10] WALZ U. Monitoring of landscape change and functions in Saxony (eastern Germany): methods and indicators [J]. *Ecological Indicators*, 2008, **8**(6): 807 – 817.
- [11] LIANG Liang, SCHWARTZ M D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics [J]. *Landscape Ecology*, 2009, **24**(4): 465 – 472.
- [12] PIRES C A, RIBEIRO M F, VILLA P M, *et al.* Multiple drivers influence tree species diversity and above-ground carbon stock in second-growth Atlantic forests: implications for passive restoration [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, 2022, **318**: 115588[2023-03-12]. doi:10.1016/j.jenvman.2022.115588.
- [13] 陈雅如. 三峡库区森林生产力与碳储量对景观格局变化的响应[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.  
CHEN Yaru. *The Response of Forest Productivity and Carbon Storage to Landscape Pattern Change in Three Gorges Reservoir Area* [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2017.
- [14] MATOS F A, MAGNAGO L F, MIRANDA C A, *et al.* Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity co-benefits [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(2): 509 – 522.
- [15] CHAPLIN K R, RAMLER I, SHARP R, *et al.* Degradation in carbon stocks near tropical forest edges [J/OL]. *Nature Communications*, 2015, **6**: 10158[2023-03-12]. doi:10.1038/ncomms10158.
- [16] 张丹. 城市化背景下城市森林结构与碳储量时空变化研究——以长春市为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.  
ZHANG Dan. *Spatial-temporal Changes of Urban Forest Structure and Carbon Storage under Rapid Urbanization: a Case Study in Changchun* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [17] 宋洁. 祁连山森林碳储量与森林景观格局时空变化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.  
SONG Jie. *Research on Temporal and Spatial Changes of Forest Carbon Storage and Forest Landscape Pattern in Qilian Mountains* [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [18] 吕海亮. 城市植被与土壤碳储量时空变化规律研究——以哈尔滨市为例[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.  
LÜ Hailiang. *Spatial and Temporal Variations of Urban Vegetation and Soil Carbon Storage: a Case Study in Harbin* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [19] 唐亦武, 余济云, 胡彪, 等. 海口市林分碳密度与景观格局指数耦合研究[J]. *西北林学院学报*, 2020, **35**(6): 168 – 175.  
TANG Yiwu, SHE Jiyun, HU Biao, *et al.* Coupling of forest carbon density and landscape pattern index in Haikou [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, **35**(6): 168 – 175.
- [20] 杜群, 徐军, 王剑武, 等. 浙江省森林碳分布与地形的相关性[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, **30**(3): 330 – 335.  
DU Qun, XU Jun, WANG Jianwu, *et al.* Correlation between forest carbon distribution and terrain elements of altitude and slope [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, **30**(3): 330 – 335.
- [21] ZHU Chenghao, WANG Zhengyi, JI Biyong, *et al.* Measurement and spatial econometric analysis of forest carbon sequestration efficiency in Zhejiang Province, China [J/OL]. *Forests*, 2022, **13**(10): 1583[2023-03-12]. doi:10.3390/f13101583.
- [22] FOTHERINGHAM A S, YANG Wenbai, KANG Wei. Multiscale Geographically Weighted Regression (MGWR) [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, **107**(6): 1247 – 1265.
- [23] 刘永婷, 杨钊, 徐光来, 等. 基于MGWR模型的皖江城市带生境质量对城镇化的响应研究[J]. *地理科学*, 2023, **43**(2): 280 – 290.  
LIU Yongting, YANG Zhao, XU Guanglai, *et al.* Impacts of urbanization on habitat quality using MGWR models in Wanjiang City belt [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2023, **43**(2): 280 – 290.
- [24] 马勇, 张瑞. 县域生态效率空间格局及影响因素研究——以长江经济带为例[J]. *中国地质大学学报(社会科学版)*, 2021, **21**(6): 62 – 76.  
MA Yong, ZHANG Rui. Spatial pattern and influencing factors of county-scale eco-efficiency: case of the Yangtze River economic belt [J]. *Journal of China University of Geosciences (Social Science Edition)*, 2021, **21**(6): 62 – 76.
- [25] LI Wenhui, XU Quanli, YI Junhua, *et al.* Predictive model of spatial scale of forest fire driving factors: a case study of Yunnan Province, China [J/OL]. *Scientific Reports*, 2022, **12**(1): 19029[2023-03-12]. doi:10.1038/s41598-022-23697-6.
- [26] ORDWAY E M, ASNER G P. Carbon declines along tropical forest edges correspond to heterogeneous effects on canopy

- structure and function [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, **117**(14): 7863 – 7870.
- [27] DIAO Jiaojiao, LIU Jinxun, ZHU Zhiliang, *et al.* Active forest management accelerates carbon storage in plantation forests in Lishui, southern China [J]. *Forest Ecosystems*, 2022, **9**(1): 33 – 46.
- [28] 浙江省林业标准化技术委员会. 森林资源规划设计调查规程: DB33/T 640—2017[S]. 杭州: 浙江省市场监督管理局, 2017.
- Technical Committee on Forestry of Standardization Administrator of Zhejiang. *Code for Forest Management Inventory: DB33/T 640—2017* [S]. Hangzhou: Market Supervision Administration of Zhejiang Province, 2017.
- [29] 季碧勇, 陶吉兴, 张国江, 等. 高精度保证下的浙江省森林植被生物量评估[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, **29**(3): 328 – 334.
- JI Biyong, TAO Jixing, ZHANG Guojiang, *et al.* Zhejiang Province's forest vegetation biomass assessment for guaranteed accuracy [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2012, **29**(3): 328 – 334.
- [30] 张国江, 季碧勇, 王文武, 等. 设区市森林资源市县联动监测体系研究[J]. *浙江农林大学学报*, 2011, **28**(1): 46 – 51.
- ZHANG Guojiang, JI Biyong, WANG Wenwu, *et al.* City-county synchronized monitoring system of forest resources in the city with districts under its jurisdiction [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2011, **28**(1): 46 – 51.
- [31] 邬建国. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- WU Jianguo. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [32] TALHELM A F, PREGITZER K S, KUBISKE M E, *et al.* Elevated carbon dioxide and ozone alter productivity and ecosystem carbon content in northern temperate forests [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(8): 2492 – 2504.
- [33] GUSTAFSON E J, MIRANDA B R, de BRUIJN A M, *et al.* Do rising temperatures always increase forest productivity? Interacting effects of temperature, precipitation, cloudiness and soil texture on tree species growth and competition [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, **97**: 171 – 183.
- [34] LU Chaoqun, SUN Shucun. A review on the distribution patterns of carbon density in terrestrial ecosystems [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, **28**(5): 692 – 703.
- [35] 白立敏, 冯兴华, 孙瑞丰, 等. 生境质量对城镇化的时空响应——以长春市为例[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(4): 1267 – 1277.
- BAI Limin, FENG Xinghua, SUN Ruifeng, *et al.* Spatial and temporal responses of habitat quality to urbanization: a case study of Changchun City, Jilin Province, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1267 – 1277.
- [36] 王甜, 卢付强, 李祖政. 基于遥感数据的常州市植被景观连通度研究[J]. *森林与环境学报*, 2021, **41**(2): 188 – 197.
- WANG Tian, LU Fuqiang, LI Zuzheng. Study on vegetation landscape connectivity of Changzhou City based on remote sensing data [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021, **41**(2): 188 – 197.
- [37] TOBLER W. Computer movie simulating urban growth in the Detroit region [J]. *Economic Geography*, 1970, **46**: 234 – 240.
- [38] ZHU Congmou, ZHANG Xiaoling, ZHOU Mengmeng, *et al.* Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China [J/OL]. *Ecological Indicators*, 2020, **117**(2): 106654[2023-03-12]. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106654.
- [39] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制——基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. *经济地理*, 2020, **40**(3): 75 – 83.
- SHEN Tiyan, YU Hanchen, ZHOU Lin, *et al.* On hedonic price of second-hand houses in Beijing based on multi-scale geographically weighted regression: scale law of spatial heterogeneity [J]. *Economic Geography*, 2020, **40**(3): 75 – 83.
- [40] 赵春燕. 森林景观斑块边缘效应和耦合机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- ZHAO Chunyan. *Research on Edge Effect and Coupling Mechanism of Forest Landscape Patches* [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2012.
- [41] 田超, 杨新兵, 刘阳. 边缘效应及其对森林生态系统影响的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(8): 2184 – 2192.
- TIAN Chao, YANG Xinbing, LIU Yang. Edge effect and its impacts on forest ecosystem: a review [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, **22**(8): 2184 – 2192.
- [42] de LIMA R A, OLIVEIRA A A, PITTA G R, *et al.* The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic forest biodiversity hotspot [J/OL]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 6347[2023-03-12]. doi:10.1038/s41467-020-20217-w.