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

基于MGWR模型的森林覆盖率分布特征及影响因素

吴雅桃 林坤 胡娅楠 林昕毅 孙帅超

Spatial patterns and drivers of forest cover: a MGWR modeling framework

Wu Yatao, Lin Kun, Hu Yanan, Lin Xinyi, Sun Shuaichao

引用本文:
吴雅桃, 林坤, 胡娅楠, 林昕毅, 孙帅超. 基于MGWR模型的森林覆盖率分布特征及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(2):70–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250205
Wu Yatao, Lin Kun, Hu Yanan, Lin Xinyi, Sun Shuaichao. Spatial patterns and drivers of forest cover: a MGWR modeling framework[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2):70–79. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250205

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250205

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

基于地理加权回归的天然次生林进界木空间分布模拟
Spatial distribution simulation of recruitment trees of natural secondary forest based on geographically weighted regression
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 1–9. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200157

温带云冷杉混交林凋落物养分的空间分布特征
Spatial distribution characteristics of litter nutrients in temperate spruce–fir mixed forests
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 73–84. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200065

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应
Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 119–130. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546

川西米亚罗亚高山暗针叶林土壤pH和养分空间异质性分析
Spatial heterogeneity of soil pH and nutrients in Miyaluo Subalpine dark coniferous forest of western Sichuan, southwestern China
北京林业大学学报, 2022, 44(2): 55–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200422

基于小班尺度的北京市密云区森林火灾危险性评价
Hazard assessment of forest fire in Miyun District of Beijing based on the subcompartment scale
北京林业大学学报, 2024, 46(2): 75–86. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230227

黄土丘陵区典型人工林土壤有机碳储量的分布特征
Distribution characteristics of soil organic carbon stocks in typical plantations in loess hilly region of northwestern China
北京林业大学学报, 2023, 45(12): 100–107. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230097

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250205

基于 MGWR 模型的森林覆盖率分布特征及影响因素

吴雅桃[1]　林　坤[2]　胡娅楠[1]　林昕毅[1]　孙帅超[1]
（1. 福建农林大学林学院，福建 福州 350002；2. 福州市规划设计研究院集团有限公司，福建 福州 350108）

摘要:【目的】森林资源是社会发展的物质基础，也是可持续发展的重要保障，探析森林覆盖率的空间分布特征及其影响因素，为保护和发展森林资源提供建议。**【方法】**以省市为基本研究单位，结合各地区基础数据，基于 ArcGis Pro 与 GeoDa 平台，探究全国尺度下森林覆盖率的空间分布特征。采用空间自相关分析揭示森林覆盖率空间分布异质性，并通过多重共线性检验筛选显著影响变量。进一步构建多元线性回归模型（OLS 模型）、地理加权回归模型（GWR 模型）和多尺度地理加权回归模型（MGWR 模型），比较其在解释森林覆盖率影响因素中的适用性。**【结果】**（1）森林覆盖率在空间上呈现显著的正向依赖，全局 Moran's *I* 指数为 0.502，*Z* 值为 4.34（$p < 0.001$）；（2）根据模型评价指标结果，相较于 OLS 模型和 GWR 模型，MGWR 模型在探究森林覆盖率影响因素的研究中表现出最佳的性能，其 R^2 和 R^2_{adj} 均最高，AICc 则最低；（3）基于 MGWR 模型的分析结果表明，降水量在空间上与森林覆盖率呈现正相关，日照和土壤平均 pH 值呈现负相关，各自然因素在西部地区对森林覆盖率的影响更大，而东部地区森林覆盖率受社会经济活动影响更大。**【结论】**（1）森林覆盖率在空间上表现出不均衡性，整体格局呈现“东南−西北”梯度递减分布，在空间分布上呈聚集态势，局部空间关联类型主要为高−高聚类、低−低聚类，适用于多尺度地理加权回归分析；（2）多尺度地理加权回归模型在探究森林覆盖率影响因素的研究中表现出较好的效果，能够解释 81.2% 的森林覆盖率的变化差异。

关键词：森林覆盖率；多尺度地理加权回归模型；空间异质性；空间分布；地理信息系统
中图分类号：S717　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)02−0070−10
引文格式：吴雅桃，林坤，胡娅楠，等. 基于 MGWR 模型的森林覆盖率分布特征及影响因素［J］. 北京林业大学学报，2026，48(2)：70−79. Wu Yatao, Lin Kun, Hu Yanan, et al. Spatial patterns and drivers of forest cover: a MGWR modeling framework［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(2): 70−79.

Spatial patterns and drivers of forest cover: a MGWR modeling framework

Wu Yatao[1]　Lin Kun[2]　Hu Yanan[1]　Lin Xinyi[1]　Sun Shuaichao[1]
(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. Fuzhou Planning and Design Research Institute Group Co., Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract:［**Objective**］Forest resources constitute the material foundation for social development and a crucial guarantee for sustainable development. Analyzing the spatial distribution characteristics of forest cover and its influencing factors provides valuable insights for protecting and developing forest resources.［**Method**］Using provincial-level administrative units as the basic research units and integrating regional fundamental data, this study investigated the spatial distribution characteristics of forest cover at the national scale based on ArcGIS Pro and GeoDa platforms. Spatial autocorrelation analysis was employed to reveal the heterogeneity in the spatial distribution of forest cover. Significant influencing variables were screened through multicollinearity tests. Multiple linear regression (OLS), geographically weighted regression (GWR), and multiscale geographically weighted regression (MGWR) models were constructed and compared to evaluate their applicability in explaining the factors influencing forest cover.

收稿日期: 2025−06−09　**修回日期:** 2025−12−09
基金项目: 国家自然科学基金项目（32201558）。
第一作者: 吴雅桃。主要研究方向：林业资源调查与监测。Email：1102185902@qq.com　地址：350002 福建省福州市仓山区福建农林大学。
责任作者: 孙帅超，讲师。主要研究方向：林分生长与森林经营。Email：sun_sc@yeah.net　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn；https://journal.bjfu.edu.cn

［**Result**］(1) Forest cover exhibited significant positive spatial dependence, with a global Moran's *I* index of 0.502, $Z = 4.34$ ($p < 0.001$); (2) Based on model evaluation indicators, compared with OLS and GWR models, the MGWR model performs best in analyzing the influencing factors, showing the highest R^2 and adjusted R^2 and the lowest AICc; (3) MGWR-based analysis indicates that precipitation is positively correlated with forest cover rate spatially, while sunshine duration and average soil pH are negatively correlated. Natural factors have greater influence on forest cover rate in western regions, whereas the eastern regions are more affected by socioeconomic activities. ［**Conclusion**］(1) Forest cover rate displays spatial imbalance with an overall "southeast–northwest" decreasing gradient and a clustered spatial pattern. Local spatial associations mainly consist of high-high and low-low clusters, suitable for multiscale geographically weighted regression analysis; (2) The MGWR model shows superior performance in analyzing forest cover rate influencing factors, explaining 81.2% of the spatial variation according to the adjusted R^2.

Key words: forest cover; multiscale geographically weighted regression (MGWR); spatial heterogeneity; spatial distribution; geo-information system

森林资源被誉为"水库、钱库、粮库、碳库"，兼具生态、经济和社会效益，是生态文明建设和可持续发展的物质基础[1]。根据《中国统计年鉴(2025 年)》公布数据，我国森林面积 2.20 亿 hm^2，位居世界第 5 位，森林整体覆盖率 22.96%。其中，森林覆盖率最高的省份为福建省，达到 66.80%，最低的省份是新疆维吾尔自治区，仅 4.87%。

森林覆盖率是区域森林资源评价的关键指标，其影响因素研究经历了从自然因子到社会经济因子，再到多因子综合分析的深化过程。早期研究聚焦自然本底。陈实[2]证实气候、地貌和土壤等自然条件能够解释四川盆地森林覆盖率 80% 以上的变化。随后，灰色关联度分析被广泛应用，邱微等[3]指出林木蓄积量和森林面积为主导因子；高鸿杰等[4]、陈哲华等[5]均识别出年平均气温、降水量及日照时长是关键影响因素。Evans 等[6]进一步揭示了降水量与植被生长的密切关联。近年来，马京京等[7]运用地理探测器发现高程与降雨的交互作用影响最大，而王兰会等[8]基于计量经济学方法证实人口规模和国民生产总值同样具有重要影响。此外，人口迁徙[9]、农业用地变化[10]、城市建设[11]、人工干涉[12]等社会经济活动，以及林地面积、土地资源状况等自然因素[13−15]均对森林覆盖率有一定的影响。然而，现有研究多局限于省域尺度，而自然环境条件在省域范围内的变化幅度相对较低，因此可能无法准确外推至环境变化较大的全国尺度。

森林覆盖率空间分布特征研究随技术方法演进不断深化。早期研究主要依赖全国森林资源清查数据及林业统计资料，侧重于时序变化分析，空间可视化研究相对薄弱。随着遥感与地理信息系统技术的发展，定性定量相结合的空间分析方法已成为主流[16]，并被广泛应用于森林资源格局解析[17]。方法论层面，陈丹璐等[18]采用聚类与空间自相关分析揭示森林覆盖率分布模式，张淑兰等[19]利用分布式流域生态水文模型模拟森林覆盖率的分布情况，刘浩等[20]基于 K-均值聚类、层次聚类等方法识别空间分异，李巧玉等[21]运用叠加分析法等探究森林资源分布规律。这些方法创新为深化森林资源空间异质性认知提供了多元路径。

近年来，地理加权回归(geographically weighted regression，GWR)因其有效处理空间关系，在解析空间异质性方面展现出显著优势[22]。张凌宇等[23]对比 GWR、空间误差模型(spatial error model，SEM))和最小二乘模型(ordinary least squares，OLS)发现，GWR 模型在数据拟合方面明显优于其他方法，能够更好地描述各参数对森林碳储量空间分布的影响；韩静等[24]对比 GWR 与 OLS 发现，GWR 能够有效捕捉国家园林城市、森林城市空间格局影响因素的局部作用机制，验证了其在空间非平稳性建模中的适用性。然而，GWR 的单一带宽假设限制了其对多尺度空间过程的解析能力，尤其当不同变量在空间中存在不同尺度时，其参数估计可能产生偏差[25]。为了解决这一问题，Fotheringham 等[26]对 GWR 模型进行改进处理，提出了多尺度地理加权回归(multiscale geographically weighted regression，MGWR)模型，该模型进一步考虑了不同变量在不同尺度下的空间变化，并在相关研究中表现出更好的应用效果。例如，张琦等[27]应用 MGWR 模型探究旅游发展对城乡收入差距的多尺度影响，进一步证实了其在复杂空间相互作用研究中的优越性。

综上，本研究以我国 31 个省(自治区、直辖市)为基本单元，在省域尺度下解析森林覆盖率的空间分异特征。基于森林分布规律与已有研究成果，遴选了 23 个候选影响因子，综合应用空间自相关分析

识别其空间集聚模式，进而采用 MGWR 模型揭示各因子影响的空间异质性及尺度效应，以期更深入地刻画自然要素与人类经济活动对森林覆盖率的协同作用机制，弥补全局回归模型在处理空间非平稳性方面的不足。

1 数据来源与处理

1.1 变量选取及数据说明

本研究以中国大陆 31 个省（自治区、直辖市）为基本空间单元，基于森林覆盖影响因素的综合性与复杂性，从自然环境和社会经济两个维度选取 23 个候选变量（表 1），以规避遗漏变量偏误。其中，森林覆盖率数据来源自《中国统计年鉴（2025 年）》，解释变量数据来自各省市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报、国家气象信息中心和地理遥感生态网等公开发布的数据集。

1.2 数据标准化处理

鉴于各变量的测量尺度与量纲存在差异，影响模型对变量权重的分配。*Z*-score 标准化将原始数据转换为均值为 0、标准差为 1 的无量纲数值，可在保留数据分布特征的同时消除量纲影响，增强变量间可比性与模型稳定性[28]。因此，本研究采用该算法对变量数据进行标准化处理。

2 研究方法

2.1 多尺度地理加权回归模型

省域尺度下森林覆盖率影响因子的空间异质性与空间自相关性显著。MGWR 模型通过独立优化各变量的空间带宽，能够有效刻画自然要素与社会经济因素对森林覆盖率影响的空间非平稳性。

$$y_i = \beta_{\mathrm{bw}0}(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^{k} \beta_{\mathrm{bw}j}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \tag{1}$$

式中：y_i 为点 i 处的森林覆盖率，$\beta_{\mathrm{bw}0}$ 为最优带宽下的截距，(u_i, v_i) 为点 i 处的坐标。$\beta_{\mathrm{bw}0}(u_i, v_i)$ 为点 i 的常数项，即点 i 的最佳带宽下的截距；x_{ij} 为第 i 个单

表 1 森林覆盖率解释变量

Tab. 1 Explanatory variables of forest cover rate

维度	解释变量	单位	数据来源
自然环境因素	日照时长	h/a	国家气象信息中心（http://data.cma.cn）
	平均相对湿度	%	
	年平均温度	℃	
	年日均最低温度	℃	
	年日均最高温度	℃	
	年降水量	mm	
	阴天天数（全年云量≥80%日数）	d	
	雨天天数	d	
	晴天天数	d	
	面积	km^2	
	平均气压	Pa	
	平均海拔	m	
	土壤平均pH值	无量纲	地理遥感生态网（http://www.gisrs.cn）
社会经济因素	人口	人	《中国统计年鉴（2025年）》、各省市统计年鉴、各省市国民经济和社会发展统计公报等
	人口密度	人/km^2	
	GDP	万元	
	人均GDP	万元/人	
	用水总量	亿m^3	
	人均用水量	m^3/人	
	建成区绿化覆盖率	%	
	建成区面积	km^2	
	公路里程	km	
	绿地面积	km^2	

元的第 j 个解释变量; $\beta_{bwj}(u_i,v_i)$为点 i 的第 j 个解释变量的局部回归系数; ε_i是随机误差项。本文模型领域类型为相邻要素的数目，领域选择方法为黄金搜索，局部权重方案为高斯函数。

2.2　Moran's *I* 指数

Moran's I 指数是用于衡量空间自相关性的指标[29]，可检验数据在空间中是否存在聚集或者分散的趋势，取值范围为 [−1, 1]。其中，正值表示正空间自相关，即高值与高值相邻，低值与低值相邻，负值则相反。

$$I = n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})(x_j-\bar{x})\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2\right)^{-1} \tag{2}$$

式中: n 为空间单元数量，x_i 和 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的观测值，$\bar{x}$为观测值的平均值。w_{ij} 为空间权重矩阵，表示第 i 个单元和第 j 个单元之间的空间距离关系。

2.3　评价指标

在变量共线性检验方面，本研究通过方差膨胀因子(variance inflation factor，VIF)检验多重共线性问题，当 VIF 值小于 5.0 时，表明共线性的可能性较低，可保留该变量[30]。在模型拟合方面，采用决定系数(R^2)、调整决定系数(R^2_{adj})、校正的赤池信息量准则[31](Akaike's information criterion with correction，AICc 值)评价模型拟合效果。

3　结果与讨论

3.1　森林覆盖率特征分析

3.1.1　森林覆盖率的空间分布特征

基于 ArcGIS Pro 空间分析平台，本研究定量解析了全国森林覆盖率的空间异质性特征(图 1)。森林覆盖率整体呈现“东南—西北”梯度递减格局，与胡焕庸线高度一致。东南沿海属极值聚集区(福建省 66.80%、江西省 61.16%)，而西北内陆干旱区(新疆 4.87%、青海 5.82%)，仅为沿海区域的 1/10。

为探究不同省份森林覆盖率在全国所处的位置，采用自然间断点分级法，将各省森林覆盖率划分为 5 个等级(图 2)。第 1 级(覆盖率≥51%)均为南方沿海省份，其中广东(53.5%)虽为该等级最低但仍远高于全国均值。上海市、江苏省、山东省和天津市受地形及社会经济活动影响，其森林覆盖率均低于 20%，与西部省份同处于第 5 类别，四省市中覆盖率最小的为天津市，仅为 12.07%。中间等级主要分布于中北部地区。根据等级划分分布图，森林覆盖率在东南部聚集，可能受沿海降水影响较大。

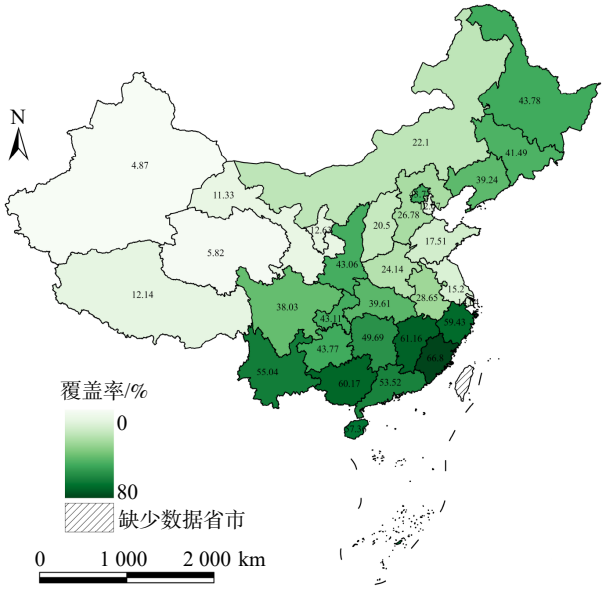


图 1　森林覆盖率空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of forest cover rate

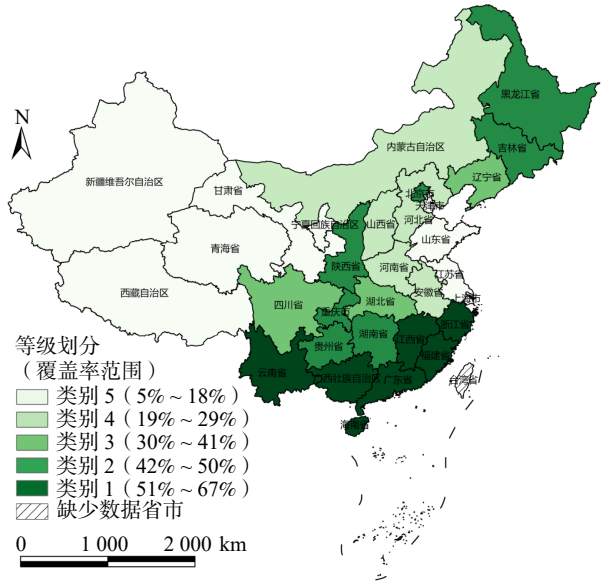


图 2　各省市森林覆盖率的等级划分

Fig. 2　Classification of forest cover rate by province

3.1.2　森林覆盖率的空间自相关分析

为探究森林覆盖率的空间自相关性，基于 GeoDa 平台构建空间权重矩阵，并计算 Moran's I 指数[32]，为评估其统计显著性，进一步采用了蒙特卡洛置换检验(采用 999 次置换)。结果表明，省域森林覆盖率的全局 Moran's I 指数为 0.502 > 0(Z = 4.34, p < 0.001)，该指数显著大于 0，且数值较高，表明省域森林覆盖率在空间分布上存在显著的正自相关关系。

全局统计量仅能反映空间关联的整体趋势，无法揭示局部区域的空间异质性特征。因此，本研究进一步采用 GeoDa 平台进行局部空间自相关性分析(图 3)。森林覆盖率的局部空间关联类型主要为高−

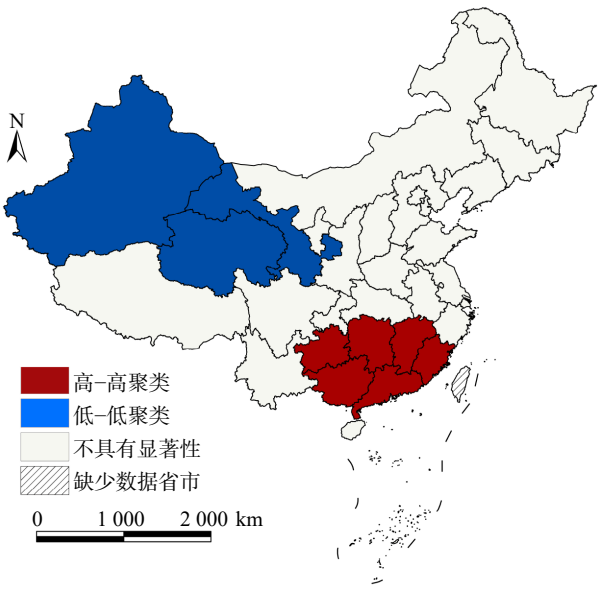


图 3 森林覆盖率聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of forest cover rate

高聚类和低–低聚类。其中，高–高聚类主要聚集于南部地区（云南、贵州、广西及福建等省份），其森林覆盖率显著高于全国平均水平，形成稳定的高值区域；低–低聚类主要分布在西北内陆（新疆、甘肃及内蒙古等）。高–低聚类和低–高聚类在图中未通过显著性检验，表明省域尺度上森林覆盖率的空间关联以正向协同为主，异质性相对较弱。该结果为后续采用 MGWR 模型探索空间关系提供了依据。

3.2 解释变量特征分析

3.2.1 森林覆盖率与解释变量间的相关性分析

本研究从两个维度选取 23 个指标作为备选解释变量（表 1）。由于既有研究多聚焦于单个省份或区域，其变量体系可能不适用于全国范围下的分析。因此，本研究通过 SPSS 对 23 个变量与森林覆盖率进行皮尔逊相关性检验[33]，筛选出 12 个显著相关变量（表 2）。其中，平均气压、平均海拔与森林覆盖率在 $p < 0.05$ 水平下显著相关，其余变量均在 $p < 0.01$ 水平下显著相关。

进一步分析变量间相关性（图 4）发现：年平均温度、年日均最高温度与年日均最低温度之间的相关系数接近于 1，存在较强多重共线性风险。而建成区绿化率、平均气压和平均海拔变量与其他变量的相关系数趋近于 0，说明这 3 个变量相对独立。

由于皮尔逊相关性分析主要用于全局的相关性分析，而森林覆盖率与相关变量具有明显的局部空间特征，因此进一步展开双变量空间相关性分析[34]。通过 GeoDa 平台的双变量局部 Moran's *I* 指数分析进一步筛选后保留 10 个变量（表 3）。森林覆盖率与各变量在空间局部相关性显著省市数量为 10 ~ 16 个，显著省市占比超过总数的 15%，满足空间相关性分析的显著性判定标准，因此，Moran's *I* 指数结果可靠。

表 2 森林覆盖率与保留变量的相关性

Tab. 2 Correlation between forest cover rate and retained variables

序号	变量	*r*
1	日照时长	−0.633**
2	平均相对湿度	0.660**
3	年平均温度	0.615**
4	年日均最低温度	0.602**
5	年日均最高温度	0.519**
6	年降水量	0.796**
7	雨天天数	0.680**
8	晴天天数	−0.517**
9	平均气压	0.404*
10	平均海拔	−0.408*
11	土壤平均pH值	−0.819**
12	建成区绿化覆盖率	0.464**

注：*、**分别代表变量结果在$p < 0.05$、$p < 0.01$的水平下显著相关。

3.2.2 解释变量间的多重共线性检验

在初步筛选出与森林覆盖率显著相关的解释变量后，本研究进一步诊断了变量间的多重共线性问题（VIF < 5.0），以确保模型估计的稳健性。采用普通最小二乘法构建多元线性回归模型，最终以统计显著性（$p < 0.05$）为标准，纳入日照时长、年降水量和土壤平均 pH 值作为核心解释变量。三者的标准化平均回归系数分别为−0.24、0.54 和−0.63（表 4），表明年降水量对森林覆盖率具有正向驱动作用，而日照时长与土壤平均 pH 值则呈现显著负向关联。

3.3 基于 MGWR 模型的森林覆盖率影响因素分析

基于前文筛选的日照时长、年降水量和土壤 pH 值 3 个核心变量，分别构建 OLS、GWR 及 MGWR 模型（表 5）。结果表明，MGWR 模型拟合优度最优（$R^2 = 0.833$，$R^2_{adj} = 0.812$），且 AICc 值最低，其 R^2_{adj} 较 OLS 模型提升 24.1%，该模型能解释森林覆盖率 81.2% 的空间变异，有效捕捉了各因素作用尺度的局部差异。

MGWR 模型的局部 R^2 呈现“西高、东低”的空间分异格局，相对高值区（局部 $R^2 \geqslant 0.80$）主要分布在新疆、西藏等内陆省份（图 5）。这表明在环境梯度主导的西部地区，日照、降水及土壤 pH 对森林覆盖率的解释效力较强，驱动机制相对简单。而东北地区的局部 R^2 相对较低（局部 $R^2 < 0.80$），反映出该变量组合在此区域解释力有限，表明其森林覆盖格局

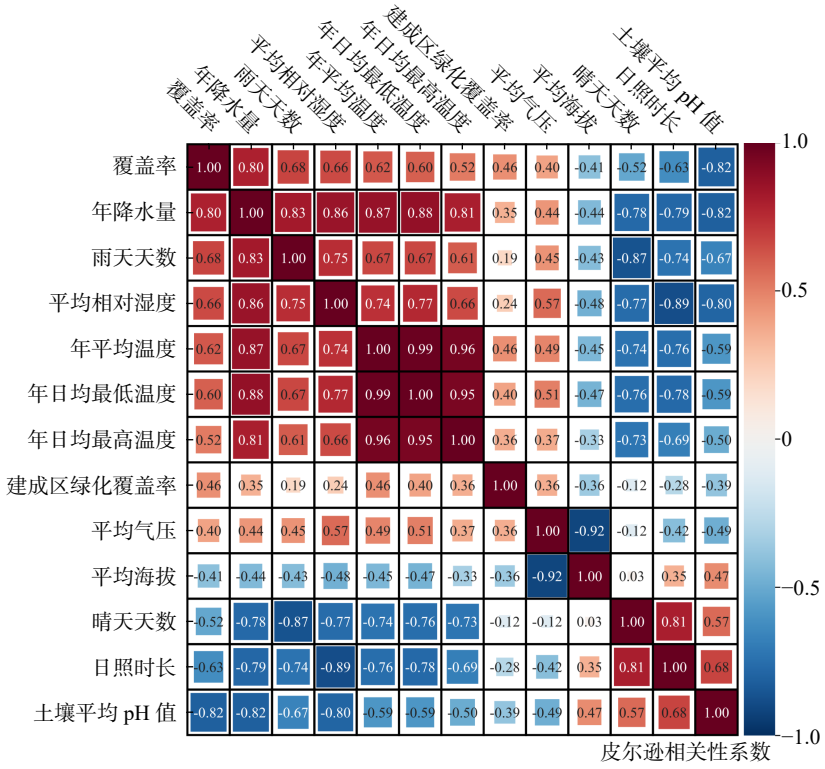


图 4　变量间的皮尔逊相关系数

Fig. 4　Pearson correlation coefficients among variables

表 3　双变量空间相关性分析

Tab. 3　Bvariate spatial correlation analysis

序号	变量	Moran's *I*指数	*p*值	*Z*值	局部显著省市数
1	日照时长	−0.416	0.001	−4.37	13
2	平均相对湿度	0.474	0.001	4.89	14
3	年平均温度	0.407	0.001	4.31	16
4	年日均最低温度	0.410	0.001	4.27	14
5	年日均最高温度	0.331	0.002	3.68	12
6	年降水量	0.555	0.001	5.34	16
7	雨天天数	0.455	0.001	4.54	13
8	晴天天数	−0.336	0.001	−3.62	13
9	平均海拔	−0.301	0.001	−3.45	13
10	土壤平均pH值	−0.492	0.001	−4.88	10

表 4　多重共线性检测分析

Tab. 4　Multicollinearity diagnosis and analysis

变量	VIF值	*p*值	平均回归系数
日照时长	2.72	0.024	−0.24
年降水量	4.4	0.019	0.54
土壤平均pH值	3.22	0.002	−0.63

表 5　模型评估指标

Tab. 5　Model evaluation metrics

模型	R^2	R^2_{adj}	AICc值	σ^2
OLS模型	0.686	0.654	63.921	
GWR模型	0.787	0.765	60.137	0.290
MGWR模型	0.833	0.812	56.625	0.277

可能受低温限制、地形效应或人为干扰等未建模因子的叠加影响，作用机制更为复杂。

MGWR 模型的核心假设之一是误差独立性，即模型残差项不存在空间自相关。据此，对模型残差进行空间自相关检验。结果(图 6)显示，标准化残差在空间分布中呈现出随机性，表明 MGWR 有效消除

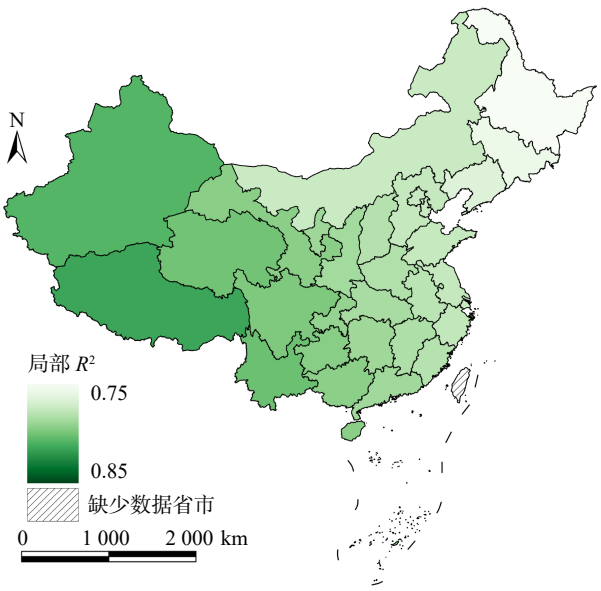


图 5 基于 MGWR 模型的局部决定系数空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution of local R^2 based on MGWR model

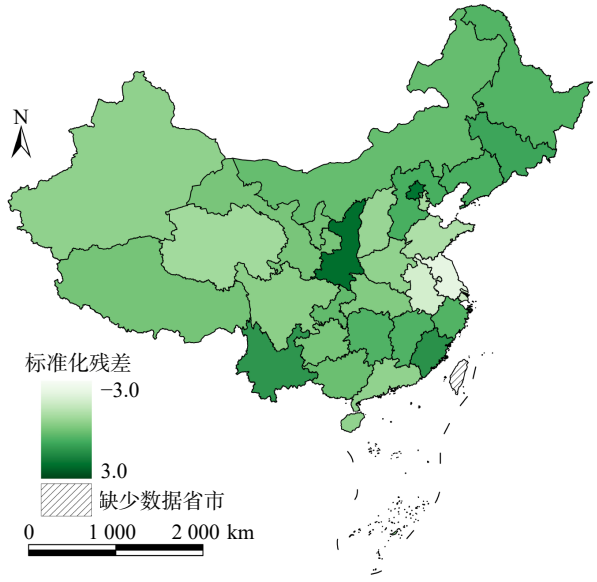


图 6 基于 MGWR 模型的标准残差分布

Fig. 6 Spatial distribution of standardized residuals based on MGWR model

了空间非平稳性，模型设定较为合理。

MGWR 模型下回归系数统计(表 6)表明，年降水量($r = 0.590$)在空间上与森林覆盖率呈正相关，且与森林覆盖率空间分布高度协同；日照时长($r = -0.274$)、土壤平均 pH 值($r = -0.582$)则与覆盖率呈负相关。此外，日照时长、年降水量和土壤平均 pH 值的最佳带宽分别为 25 个、27 个和 28 个。变量的带宽越大表明该变量能够在越大的范围内影响森林覆盖率，带宽差异使 MGWR 模型能够更加准确地捕捉各区域的空间异质性，提高模型的解释力。

图 7 显示：降水高值区集中于东南沿海，呈“东南—西北”梯度递减格局，与森林覆盖率分布高度协同(图 7a)。然而，其回归系数的空间分布呈现相反趋势，西部干旱半干旱区的平均系数值(西部地区平均系数在 0.60 上下波动)高于东部湿润区(东部地区平均系数在 0.55 上下波动)(图 7b)。西部地区深处内陆，水分是植被生存和分布的关键限制因子，森林主要分布在水文条件相对较好的山地或河谷，降水波动对覆盖率的边际效应显著，故回归系数更高。而东南沿海地区雨热充沛，年降水量能够满足森林生长的需求，水分限制作用减弱，森林覆盖率多受地形、土壤类型、土地利用等因素的影响，降水量的增加对森林生长的促进作用减弱，边际效应递减，系数相应降低。

日照时长空间分布呈“北多南少、西高东低”格局，四川盆地因地形荫蔽效应形成低值中心(图 7c)。其回归系数显示，西部高海拔地区的负向效应(西部地区平均系数在−0.30 上下波动)强于东部(东部地区平均系数在−0.25 上下波动)，揭示光照约束存在空间阈值效应：在西部高山地区，较长日照时间通过增强潜在蒸散加剧水分胁迫，从而抑制森林生长；而在东部湿润区，水分胁迫减弱，日照负面效应随之降低。

土壤平均 pH 值空间分异与日照时长类似(图 7e)，呈现“东南酸、西北碱”的分布格局。我国东部和南部地区受季风气候影响显著，降水丰沛，淋溶作用强烈，加之人为活动(过量施肥、工业排放)加剧局部土壤酸化，导致 pH 值较低。而西北部干旱地区因蒸发旺盛、淋溶作用弱，盐基离子富集，因此土壤多呈碱性。土壤平均 pH 值的回归系数绝对值呈“西部高、中部低、东部中”的格局(图 7f)。西部干旱区土壤 pH 与水分共同构成关键限制因子，系数最高；中部地区人类活动干扰强烈，土壤 pH 作用被削弱；东部林区受社会经济活动影响，土壤 pH 作为协

表 6 MGWR 模型回归系数统计

Tab. 6 MGWR model regression coefficient statistics

序号	变量	平均值	标准差	最小值	中值	最大值
1	日照时长	−0.274	0.017	−0.299	−0.273	−0.242
2	年降水量	0.590	0.007	0.578	0.589	0.602
3	土壤平均pH值	−0.582	0.004	−0.593	−0.581	−0.574

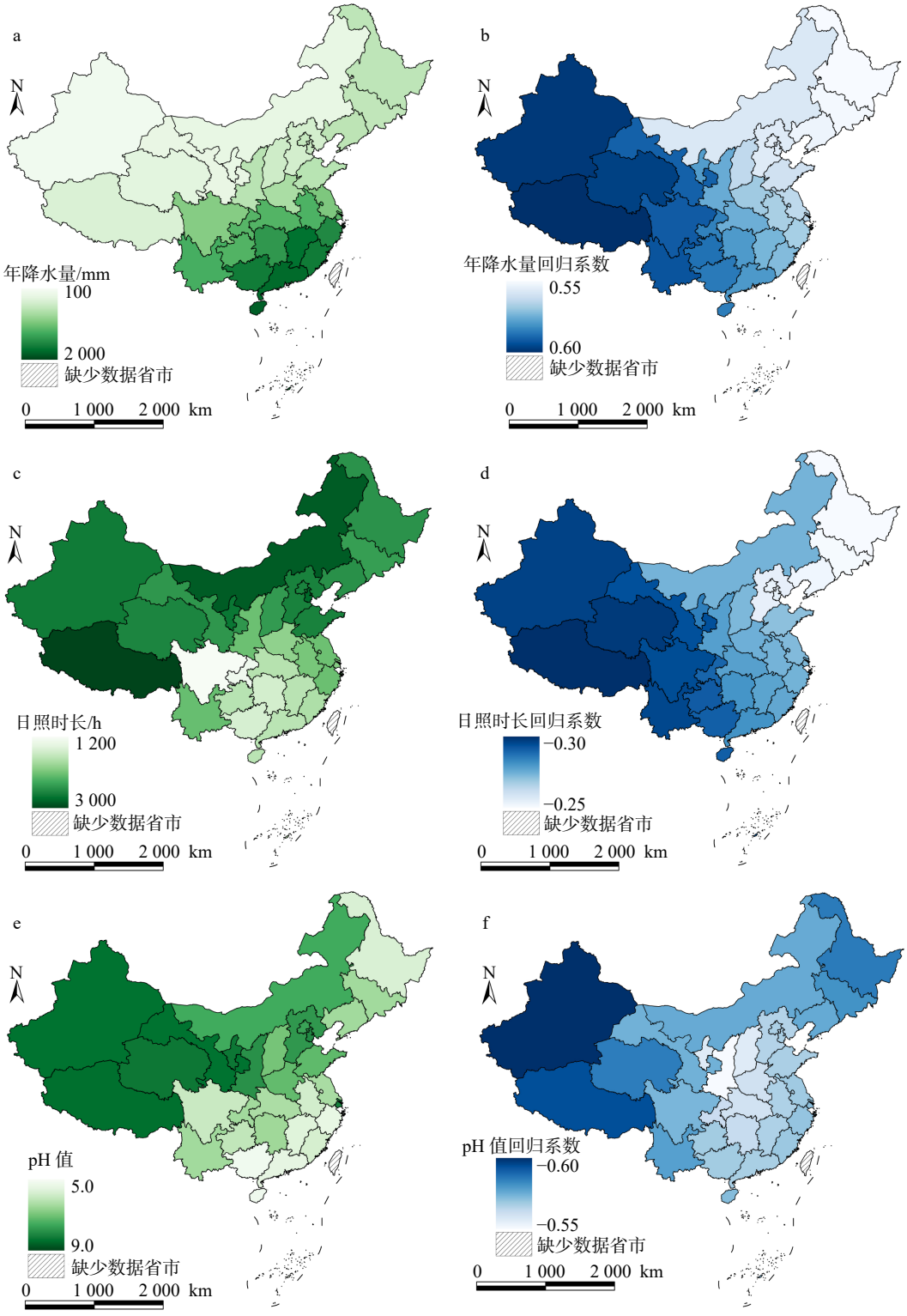


图 7　MGWR 模型中解释变量的空间分布与回归系数

Fig. 7　Spatial distribution of explanatory variables and regression coefficients in the MGWR model

同因子稳定发挥作用，系数居中。

4　结　　论

（1）中国森林覆盖率在空间分布上存在不均衡性，整体格局呈现“东南—西北”梯度递减分布，Moran’s *I* 指数显示存在聚集现象，主要受降水等环境因子驱动。

（2）通过逐步筛选确定日照时长、年降水量、土壤平均 pH 值 3 个核心变量。模型对比表明，MGWR（$R^2 = 0.833$，$R^2_{adj} = 0.812$）模型在拟合优度和捕捉空间异质性方面显著优于 OLS 与 GWR 模型。

（3）MGWR 模型结果揭示：年降水量与森林覆盖呈正相关，其边际效应自东向西递增；日照时长和土壤 pH 值呈负相关，影响强度均为西高东低，表明

西部地区森林覆盖对自然环境更敏感，而东部可能受人为干扰等多重因素叠加影响。

基于本研究结果，拟提出以下对策。(1)分区精准施策。西北干旱区应坚持“以水定林”，优选耐旱树种并配套节水技术，避免强日照加剧水分胁迫的负面效应；中部经济活动密集区需强化土地利用管制，减少人为扰动；东南湿润区应从面积扩张转向质量提升，优化林分结构增强系统稳定性。(2)协同立地调控。山地造林应区分阴阳坡微环境，阳坡优选喜光耐旱树种，阴坡可适当选择水分需求较高的树种；针对土壤 pH 值偏离适生范围的区域(如盐碱地、矿山废弃地)，采取客土、施用改良剂等精准治理措施，确保植被与立地条件匹配。

本研究在省域尺度上量化了中国森林覆盖的空间分布特征及影响因素，但受数据可得性所限，未能更多纳入社会经济等潜在因子。未来可结合多源数据，拓展至县域等尺度，进一步揭示森林覆盖的影响机制，为森林资源保护与管理提供科学依据。

审图号：GS 京(2026)0319 号

参 考 文 献

[1] 钟金发, 邓佳露, 翁志强, 等. 森林“碳库”经济价值实现机制研究 [J]. 林业经济问题, 2024, 44(1): 42−50.
Zhong J F, Deng J L, Weng Z Q, et al. The realization mechanism of economic value of forest “Carbon Pool” [J]. Issues of Forestry Economics, 2024, 44(1): 42−50.

[2] 陈实. 四川盆地森林覆盖率自然影响因素分析 [J]. 资源开发与保护, 1992, 8(2): 91−94.
Chen S. Statistical analysis on the natural factors affecting the forest cover in Sichuan basin [J]. Resource Development & Market, 1992, 8(2): 91−94.

[3] 邱微, 李崧, 赵庆良, 等. 黑龙江省森林覆盖率的灰色评价和模型预测 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(10): 1649−1651.
Qiu W, Li S, Zhao Q L, et al. Grey evaluation and forecasting of the forest coverage of Heilongjiang province [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(10): 1649−1651.

[4] 高鸿杰, 张眉. 清远市森林覆盖率的影响因素分析与模型预测 [J]. 西南林业大学学报 (社会科学), 2020, 4(6): 63−67.
Gao H J, Zhang M. Analysis of influencing factors and model prediction of forest coverage in Qingyuan city [J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2020, 4(6): 63−67.

[5] 陈哲华, 杨超裕, 邓冬旺, 等. 广东省森林覆盖率的影响因素分析和模型预测: 基于灰色关联分析和 GM(1, 1) 模型 [J]. 林业与环境科学, 2017, 33(5): 101−106.
Chen Z H, Yang C Y, Deng D W, et al. Analysis of influencing factors and model prediction of forest coverage in Guangdong province: based on grey correlation analysis and GM (1, 1) model [J]. Forestry and Environmental Science, 2017, 33(5): 101−106.

[6] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535−554.

[7] 马京京, 高美玲, 李振洪, 等. 黄河流域森林覆盖时空变化及驱动因素分析 [J]. 测绘通报, 2023(7): 51−57.
Ma J J, Gao M L, Li Z H, et al. Spatial and temporal changes of forest cover and its driving factors over the Yellow River basin [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(7): 51−57.

[8] 王兰会, 刘俊昌. 1978—1998 年我国森林覆盖率变动的影响因素分析 [J]. 北京林业大学学报 (社会科学版), 2003, 2(1): 33−36.
Wang L H, Liu J C. An analysis on the factors affecting forest coverage(1978−1998) [J]. Journal of Beijing Forestry University(Social Sciences), 2003, 2(1): 33−36.

[9] Tiki L, Abdallah J M, Tolera M, et al. Impacts of participatory forest management on land use/land cover of Adaba-Dodola forest in south eastern Ethiopia and its implication to REDD + implementation [J]. Environmental Management, 2025, 75(2): 341−355.

[10] 张红亮, 杨子涵, 吴健. 中国农业生产力对森林覆盖率的影响实证分析 [J]. 生态学报, 2025, 45(5): 2364−2373.
Zhang H L, Yang Z H, Wu J. The impact of agricultural productivity on forest cover in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(5): 2364−2373.

[11] 关玉贤. 福建省森林覆盖率影响因素分析及对策研究 [J]. 林业勘察设计, 2015(1): 10−13.
Guan Y X. Analysis on influencing factors of forest coverage in Fujian Province and countermeasures [J]. Forestry Prospect and Design, 2015(1): 10−13.

[12] Guo J, Gong P. Forest cover dynamics from Landsat time-series data over Yan’an city on the Loess Plateau during the Grain for Green Projectt[J]. International Journal of Remote Sensing, 2016, 37(17−18): 4101−4118.

[13] Mátyás C, Berki I, Bidló A, et al. Sustainability of forest cover under climate change on the temperate-continental xeric limits [J]. Forests, 2018, 9(8): 489.

[14] Jia K, Liang S, Wei X, et al. Fractional forest cover changes in Northeast China from 1982 to 2011 and its relationship with climatic variations [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(2): 775−783.

[15] 刘珉. 森林资源变动及其影响因素研究 [J]. 林业经济, 2014, 37(1): 80−86.
Liu M. Study on fluctuation and influencing factors of forest resources [J]. Forestry Economics, 2014, 37(1): 80−86.

[16] 臧淑英, 祖元刚, 倪红伟. 森林资源可持续利用空间格局分析 [J]. 生态学报, 2000, 20(1): 74−80.
Zang Z Y, Zu Y G, Ni H W. Spatial pattern of forest resources sustainable exploitation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 74−80.

[17] 徐少君, 曾波, 苏晓磊, 等. 基于 RS/GIS 的重庆缙云山自然保护区植被及碳储量密度空间分布研究 [J]. 生态学报, 2012, 32(7):

2174−2184.
Xu S J, Zen B, Su X L. Spatial distribution of vegetation and carbon density in Jinyun Mountain Nature Reserve based on RS/GIS [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(7): 2174−2184.

[18] 陈丹璐, 靳茗茗. 我国森林覆盖率的时空分布规律及对空气质量的影响 [J]. 河北林业科技, 2016(2): 52−55,68.
Chen D L, Jin M M. Study on temporal and spatial distribution law of the forest coverage of China and its influence on air quality [J]. Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2016(2): 52−55,68.

[19] 张淑兰, 于澎涛, 张海军, 等. 泾河流域上游土石山区和黄土区森林覆盖率变化的水文影响模拟 [J]. 生态学报, 2015, 35(4): 1068−1078.
Zhang S L, Yu P T, Zhang H J, et al. A simulation study on the hydrological impacts of varying forest cover in the stony mountain area and loess area of the upper reaches of Jinghe Basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4): 1068−1078.

[20] 刘浩, 郑璞冰, 叶江霞, 等. 面向自然资源资产清查的云南森林资源均质区划分研究 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2025, 45(1): 137−145.
Liu H, Zheng P B, Ye J X, et al. Study on the division of forest homogeneous zones in Yunnan for natural resource asset inventory [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2025, 45(1): 137−145.

[21] 李巧玉, 陈嬝嬝, 余正玺, 等. 贵州省森林康养资源空间分布特征及影响因素分析 [J]. 西南林业大学学报 (自然科学), 2023, 43(3): 175−182.
Li Q Y, Chen N N, Yu Z X, et al. Spatial distribution characteristics and driving factors of forest health care resources in Guizhou Province [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023, 43(3): 175−182.

[22] Brunsdon C , Charlton F M . Geographically weighted regression-modelling spatial non-stationarity, Journal of the Royal Statistical Society[J]. Series D (The Statistician), 1998, 47(3): 431−443.

[23] 张凌宇, 赵庆, 吴晓君, 等. 广东西樵山国家森林公园森林碳储量空间分布研究 [J]. 森林工程, 2023, 39(5): 48−56.
Zhang L Y, Zhao Q, Wu X J, et al. Study on the spatial distribution of forest carbon storage in Xiqiao mountain national forest park, Guangdong Province [J]. Forest Engineering, 2023, 39(5): 48−56.

[24] 韩静, 芮旸, 贺建雄, 等. 国家园林城市与国家森林城市空间分布特征及影响因素比较 [J]. 规划师, 2020, 36(2): 20−26.
Han J, Rui Y, He J X, et al. A comparative study on spatial pattern characteristics and influencing factors of national garden cities and national forest cities [J]. Planners, 2020, 36(2): 20−26.

[25] 曹聪, 郭泽鑫, 郭彦青, 等. 基于地理加权回归模型的珠三角森林碳储量空间分布 [J]. 林草资源研究, 2023(6): 98−104.
Cao C, Guo Z X, Guo Y Q, et al. Spatial distribution of forest carbon storage in the Pearl River Delta based on geographically weighted regression model [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2023(6): 98−104.

[26] Fotheringham A S, Yang W, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) [J]. Annals of the American Association of Geographers, 2017, 107(6): 1247−1265.

[27] 张琦, 曹蔚宁, 延书宁. 旅游发展对城乡收入差距影响的空间异质性: 基于多尺度地理加权回归模型 (MGWR)[J]. 中国地质大学学报 (社会科学版), 2022, 22(5): 112−123.
Zhang Q, Cao W N, Yan S N. Spatial heterogeneity of the impact of tourism development on urban-rural income gap in China: based on multi-scale geographically weighted regression model (MGWR) [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2022, 22(5): 112−123.

[28] 张立军, 袁能文. 线性综合评价模型中指标标准化方法的比较与选择 [J]. 统计与信息论坛, 2010, 25(8): 10−15.
Zhang L J, Yuan N W. Comparison and selection of index standardization method in linear comprehensive evaluation model [J]. Journal of Statistics and Information, 2010, 25(8): 10−15.

[29] Lee S I. Developing a bivariate spatial association measure: an integration of Pearson's r and Moran's I [J]. Journal of Geographical Systems, 2001, 3(4): 369−385.

[30] 朱钰, 郑屹然, 尹默. 统计学意义下的多重共线性检验方法 [J]. 统计与决策, 2020, 36(7): 34−36.
Zhu Y, Zheng Y R, Yin M. Multicollinearity test under statistical significance [J]. Statistics & Decision, 2020, 36(7): 34−36.

[31] Pan W. Akaike's information criterion in generalized estimating equations [J]. Biometrics, 2001, 57(1): 120−125.

[32] 刘畅, 李凤日, 贾炜玮, 等. 基于局域统计量的黑龙江省多尺度森林碳储量空间分布变化 [J]. 应用生态学报, 2014, 25(9): 2493−2500.
Liu C, Li F R, Jia W W, et al. Multiple-scale analysis on spatial distribution changes of forest carbon storage in Heilongjiang Province, Northeast China based on local statistics [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(9): 2493−2500.

[33] 黄晓芬, 白鸥. 浙江省森林乡村空间分布特征及其影响因素 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(4): 884−893.
Huang X F, Bai O. Spatial distribution characteristics and influencing factors of forest villages in Zhejiang Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(4): 884−893.

[34] 马月伟, 潘健峰, 蔡思青, 等. 生态系统服务社会价值与生态价值的权衡与协同关系: 以普达措国家公园为例 [J]. 地理科学, 2022, 42(7): 1283−1294.
Ma Y W, Pan J F, Cai S Q, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: a case study of the Potatso national park [J]. Geographical Science, 2022, 42(7): 1283−1294.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孟　平）