黑龙江省生态用地格局特征对碳汇的影响*

潘宥承 吴远翔 孟德惠 李婷婷

哈尔滨工业大学建筑与设计学院 自然资源部寒地国土空间规划与生态保护修复重点实验室 哈尔滨 150006

摘要:【目的】明确黑龙江省生态用地碳汇研究的最佳网格精度,总结在该精度下景观格局特征对碳汇量的影响规律,为优化国土空间格局、提升陆地生态系统碳汇功能提供科学依据。【方法】以净生态系统生产力(NEP)作为碳汇绩效指标,通过 Fragstats 软件计算 15 个景观格局指数,利用 GS+软件的半变异函数方法确定林地、耕地和草地各自的最佳网格精度;在最佳精度下,采用相关性分析方法系统揭示省级尺度的景观格局特征对碳汇量的影响。【结果】1)黑龙江省年总 NEP 呈现明显碳汇,林地贡献 90.63 TgC,耕地贡献 40.4 TgC,草地贡献 1.45 TgC。2)确定省级尺度下生态用地景观格局与 NEP 相关性研究的最佳网格精度为林地 30 km,耕地 25 km,草地 35 km。3)黑龙江省林地与耕地各 6 个格局指标、草地的 11 个格局指标与碳汇量显著相关,其中面积、连通性、聚集度 3 类格局特征是影响生态用地碳汇量的主要因素。【结论】黑龙江省林地、耕地和草地的年总 NEP 整体为明显碳汇;林地、耕地、草地各格局指标与碳汇量均显著相关;在省级尺度下,应按地类分尺度探寻最佳网格精度;通过扩大碳汇区域面积、增强生态系统连通性、提升生态聚集度可有效提高生态系统的碳汇能力。

关键词:景观格局;净生态系统生产力;空间异质性;最佳网格精度

DOI:10.12169/zgcsly.2024.07.04.0003

Impact of Ecological Land Patterns on Carbon Sequestration in Heilongjiang Province

Pan Youcheng Wu Yuanxiang Meng Dehui Li Tingting

(School of Architecture and Design, Harbin Institute of Technology/Key Laboratory of Ministry of Natural Resources for National Territory Spatial Planning and Ecological Restoration in Cold Regions, Harbin 150006, China)

Abstract:【Objective】To identify the optimal grid resolution for quantifying carbon sink of ecological land in Heilongjiang Province and elucidate how landscape pattern characteristics influence carbon sink magnitude at that resolution, with the expectation to provide a scientific basis for optimizing spatial layout of land and enhancing the carbon sequestration of terrestrial ecosystems. 【Method】 Net ecosystem productivity (NEP) is adopted as the carbon sink performance indicator. Fifteen landscape pattern indicators are calculated with Fragstats, and semivariogram analysis in GS+ is employed to determine the optimal grid resolutions for forest, cropland, and grassland, respectively. At these resolutions, correlation analyses are conducted to reveal the effects of landscape pattern attributes on carbon sink magnitude. 【Result】1) The annual NEP in Heilongjiang Province significantly functions as a carbon sink, while forests, croplands and grasslands contribute 90.63 TgC, 40.4 TgC, and 1.45 TgC, respectively; 2) The optimal grid resolutions for landscape patterns of ecological lands and the NEP research at the provincial level are identified as 30 km for forests, 25 km for croplands, and 35 km for grasslands; and 3) In

收稿日期:2024-07-04

*基金项目:国家自然科学基金(52078160)

第一作者:潘宥承(1995-),男,博士生,研究方向为生态系统碳汇。E-mail:youcheng_ pan@163.com

通信作者:吴远翔(1971-),男,博士,副教授,研究方向为城市绿色基础设施及生态系统服务。E-mail:745417816@qq.com

Heilongjiang Province, 6 landscape metrics for forestland, 6 for cropland, and 11 for grassland are found to be significantly correlated with carbon sequestration capacity. These metrics can be grouped into three principal landscape attributes—area, connectivity, and aggregation—which are the main factors influencing the carbon sequestration capacity of ecological land.【Conclusion】 In Heilongjiang, the annual NEP aggregates of forestland, cropland and grassland function as a carbon sink, and the pattern indices of forestland, cropland and grasslands are significantly correlated with carbon sink. On the provincial scale, the carbon sequestration capacity of terrestrial ecosystems could be effectively improved by enlarging carbon-sink areas, improving ecosystem connectivity, and enhancing landscape aggregation.
Keywords: landscape pattern; net ecosystem productivity; spatial heterogeneity; optimal grid resolution

实现碳中和的路径总体上可分为碳减排和碳增汇两种方式，其中陆地碳汇是基于自然的碳增汇的重要解决方案[1]。全球排放的 31%的碳被陆地固定[2]，中国陆地生态系统占全球陆地面积的 6.4%，其净 CO_2 吸收量占全球吸收量的 10%～30%[3]。林地、耕地、草地是生态系统植被覆盖的主要区域，其中森林占中国陆地面积的 22.9%，是陆地碳汇的主体；耕地占 13.3%，总体表现为明显碳汇；草地占 27.6%，碳源汇功能尚不明确[4]。黑龙江省是中国生态省建设试点之一，全省陆地生态系统丰富，省域森林覆盖率近 50%，耕地面积位居中国第一[5]，具有较高生态系统碳循环研究价值。生态系统净生产力（Net Ecosystem Productivity，NEP）是指陆地生态系统与大气的净碳交换，NEP>0 为碳汇，反之为碳源[6]。NEP 考虑了植被呼吸作用释放的碳，相比净初级生产量（Net Primary Production，NPP）能够提供更精确的评估。

生态系统通常在空间、时间和组织尺度上表现出特征的可变性，任何尺度范围内独特的景观格局特征都有独特的原因和后果[7]。空间异质性与景观格局、生物多样性、群落结构等生态过程密切相关，是自然界最普遍的特征[8]。因此，当前对于景观格局与碳汇关系的研究通常侧重于探索其在时间和空间尺度变化上的耦合效应。在时间尺度变化的研究中，邱陈澜等[9]以京津冀城市群为例，选择 1998—2018 年 4 个时间点，从土地利用的角度探讨不同用地类型固碳服务功能与景观格局的关联；李和平等[10]选择成渝地区为研究对象，运用景观生态学和 BP 神经网络结合的方法，探讨该地区碳汇用地的景观形态、构成、分布等对植被固碳的影响，并预测未来不同景观格局优化方案对地区碳汇的提升效果。此类研究的目的是理解景观格局随时间的变化及其对碳汇功能的影响，通过管理和优化景观格局来增强地区的碳汇能力。

在空间尺度变化的研究中，洪歌等[11]以武汉市为研究对象，对城市绿色基础设施（UGI）景观格局进行多尺度量化，采用改进的 CASA 模型评估碳汇绩效，通过半变异函数识别研究的本征尺度，并在此尺度上进行了景观格局与碳汇绩效的相关性分析，明确城市 UGI 景观格局对碳汇绩效的影响因素；Shi 等[12]以西安市为例，将城市绿地中的森林划分为多种类型，通过半变异函数确定城市各生态功能区适宜的网格尺度，进一步使用多元线性回归和地理加权回归模型揭示景观格局对碳汇绩效的关键影响。此类研究通过识别适宜的研究网格精度，减少由于空间异质性带来的干扰，从而更准确地分析不同景观特征如何影响碳汇能力。

但目前的研究仍存在以下问题：1）相关领域学者多以 NPP 为指标探究某个生态系统或区域的植被固碳情况，但对 NEP 的研究不多[13]；2）生态用地不同空间尺度中景观元素存在空间异质性[14]，当前研究尺度多为城市尺度，且将城市生态用地视作整体来探寻研究的最佳网格精度，未仔细探讨不同地类的最佳研究精度；3）当前大部分研究只阐述了景观格局和碳汇量相关性分析的结果，停留在现象层面，还需深层挖掘其本质。因此，本研究旨在以 NEP 作为碳汇绩效指标，量化林地、耕地、草地景观格局的空间异质性，深入探索最佳网格精度下的黑龙江省不同生态用地景观格局与碳汇绩效的差异性，进而总结出省级尺度下格局特征影响碳汇的规律，为制定有效的

生态用地碳汇管理措施提供科学依据。

1 研究区概况

黑龙江省总面积约 47.3 万 km^2，位于中国东北部，属于寒温带和温带大陆性气候，年均降水量 400~700 mm，年均气温 0~5 ℃，地形以山脉为主，海拔多在 300~1 000 m。

鉴于 NEP 对气候变量尤其是温度和降水的高度敏感性[15]，为确保研究结果可靠，本文选择 2014 年作为案例年份，该年在 2001—2022 年黑龙江省的温度和降水数据中最接近平均值。选取气候条件稳定的年份有助于准确分析景观格局特征对碳汇能力的影响，避免极端气候条件造成的偏差，使研究结果更真实地反映景观格局对碳汇的影响规律。

参考《土地利用现状分类》（GB/T21010-2007）将用地类型主要分为耕地、林地、草地、水域、未利用地和建设用地 6 类。黑龙江省生态用地以林地及耕地为主，其中林地面积约 22.1 万 km^2，占比 46.7%；耕地面积约 20.2 万 km^2，占比 42.7%；草地面积约 0.7 万 km^2，占比 0.015%。

2 研究方法

2.1 数据来源

NPP 数据来源于美国地质调查局旗下 LP DAAC数据中心的 MOD17A3HGF 产品（https://lpdaac.usgs.gov/products/mod17a3hgfv061/）；土地利用数据来源于武汉大学 CLCD 土地利用数据集；气候数据来源于欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布的 ERA5-Land 数据集（https://www.ecmwf.int/）；0~20 cm 土壤碳密度数据来源于中国陆地土壤碳储量及土地管理碳汇核算。

2.2 景观格局指数

使用 Fragstats 4.2 软件进行景观格局指数量化计算。选取景观面积百分比（PLAND）、总斑块数（NP）、斑块密度（PD）、最大斑块指数（LPI）、总边缘（TE）、边缘密度（ED）、景观形状指数（LSI）、平均形状指数（SHAPE_ MN）、平均分形维数（FRAC_ MN）、平均周长面积比（PARA_ MN）、斑块邻接度（PLADJ）、邻接斑块均匀性（IJI）、连通度（COHESION）、景观破碎度（DIVISION）、聚集度（AI）、香农多样性指数（SHDI）、辛普森均匀度指数（SIEI）17 个格局特征指标表征黑龙江省生态用地的景观结构特征[16]，为分析其对碳汇量的影响提供量化依据。

2.3 NEP 模型估算

生态系统净生产力（NEP）被定义为植被净初生产力（NPP）与土壤异氧呼吸（*Rh*）的差值，其中 *Rh* 是由 *Rh* 和土壤自养呼（*Rs*）之间关系的拟合方程来确定[15]。根据中国地区的多年数据，Chuai 等[17]计算出适合中国的 *Rh* 和 *Rs* 的线性拟合方程。*Rs* 则利用 Yu 等[18]基于土壤碳密度、年均气温及年均降水构建的 GSMSR 模型进行计算。年总碳汇量计算公式如下：

$$Total\ NEP = NEP_{annual} \times A \tag{1}$$

$$NEP_{annual} = NPP - Rh \tag{2}$$

$$Rh = 0.467\ 9Rs + 114.42 \tag{3}$$

$$Rs_{month} = (0.588 + 0.118 \times SOC)e^{\ln(1.83\times e^{-0.006\times T})\times T\div 10} \times (P + 2.972) \div (P + 5.657) \times 30 \tag{4}$$

$$Rs_{annual} = \sum_{i=1}^{12} Rs_{month} \tag{5}$$

式（1）~（5）中：*A* 为研究区域面积（m^2）；*SOC* 为 0~20 cm 土壤有机碳密度（kg C·m^{-2}）；*P* 为月降水量（cm）；*T* 为月平均温度（℃）。

2.4 最佳网格精度

景观格局指标对空间幅度和粒度表现出高度敏感性，因此在特定研究区域进行景观分析时，选择适当的网格精度至关重要[19]。本文使用网格分析法以 5 km、10 km、15 km、20 km、25 km、30 km、35 km、40 km 共计 8 个网格精度对研究区域进行划分，探寻可以捕捉更多景观格局特征的网格精度。

半变异函数作为统计学中的一个核心工具，用于量化空间数据的空间异质性。利用 GS+软件通过计算样本点之间的半方差，理解空间变异的结构和尺度。使用块金基台比 C/（C_0+C）评估随机因素和尺度效应的贡献，其中 C 表示偏基台值，C_0代表块金值[20]。网格精度的块金比值越接近 1，表示随机因素和尺度效应的影响越小。

为确定研究的最佳网格精度，基于各网格精度块金比值寻找其中的拐点。块金比随着网格尺

度变化上升，达到峰值后开始下降，这个峰值即代表拐点，在拐点之前，空间景观异质性逐渐变小，达到拐点下降后，随机性和尺度效应对空间数据的影响逐渐增强。

3　结果与分析

3.1　黑龙江省 NEP 空间分布特征

由图 1 可知，黑龙江省林地、耕地、草地 NEP 总体为碳汇区，极少数区域为碳源区。林地单位面积年固碳量为 367.95 gC · m^{-2}，年总碳汇量达到 90.63 TgC，在全省碳汇绩效中处于核心地位；耕地单位面积年均固碳量为 216.45 gC · m^{-2}，年总碳汇量为 40.4 TgC，虽然耕地的碳汇效率不及林地，但在碳汇系统中仍扮演重要角色；草地单位面积年均固碳量为 187.9 gC · m^{-2}，由于其面积较小，年总碳汇量仅为 1.45 TgC（图 1）。

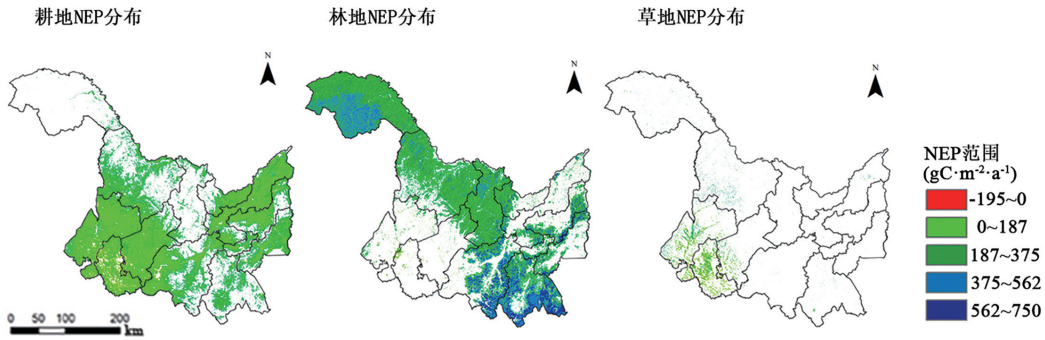


图 1　黑龙江省耕地、林地、草地 NEP 分布

由图 2 可知，黑龙江省林地、耕地、草地 NEP 分布在地理上呈现多样性，可分为碳源、低碳汇、中等碳汇、较高碳汇、高碳汇 5 个区域。西南部主要为低碳汇区，包含极小部分碳源区；东北部总体呈低碳汇区，但局部区域中有高碳汇区的分布；东南部则主要为高碳汇区；西北部属于较高碳汇区；中部地区主要呈现为中等碳汇区。可见，在全省 NEP 分布中，中等碳汇区域占据了主导地位，其次为低碳汇区和较高碳汇区，共同构成全省碳循环的重要组成部分。

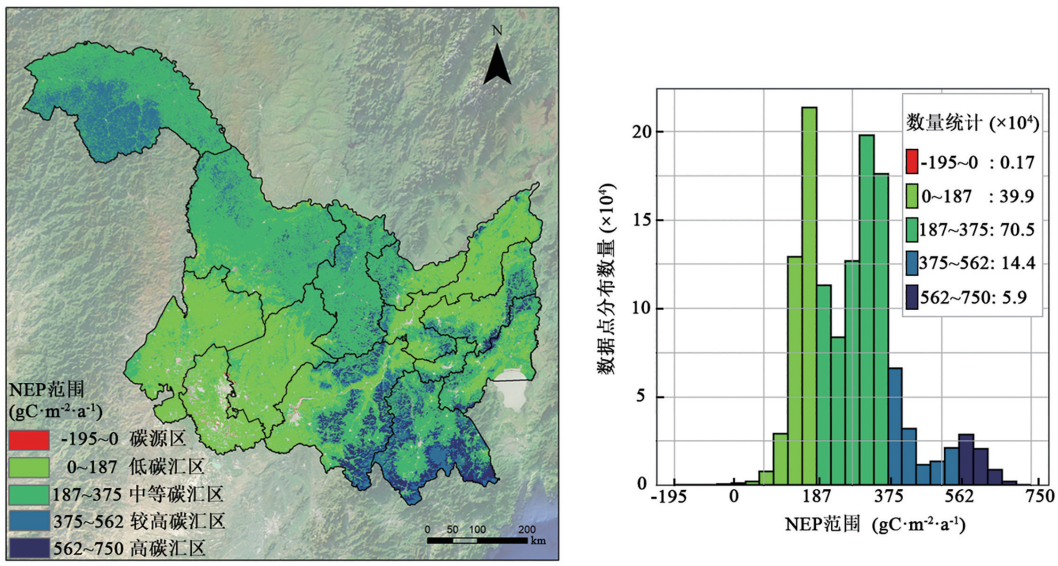


图 2　黑龙江省生态用地 NEP 分布及数量统计

3.2　生态用地最佳网格精度

3.2.1　空间自相关分析

各网格精度下全局空间自相关分析结果如图 3 所示。对格局特征指标进行全局莫兰指数计算，评估各指标在空间分布中的自相关性，挑选持续高水平自相关性且在不同尺度下变化平稳的指标。林地格局指标选择 PLAND、LPI、LSI、PLADJ、DIVISION、AI；耕地格局指标选择 PLAND、NP、

LSI、PLADJ、IJI、AI；草地格局指标选择 PD、NP、TE、ED、LSI、PLADJ；总生态用地格局指标选择 NP、TE、ED、LSI、SHDI、SHEI。上述选择的格局特征指标中，在各网格精度下具备较高自相关性及稳定性，表明相似的景观特征倾向于在地理空间中聚集，揭示了格局特征的分布不是随机的，而是表现出一定的空间依赖性，即相近地区倾向于具有相似的生态和景观特性。因此，上述指标的高自相关性及稳定性意味着其可作为有效的指标来评估生态系统的空间结构及其动态变化。接下来进行半变异函数分析，进一步探讨格局特征指标在不同网格精度下的空间异质性。

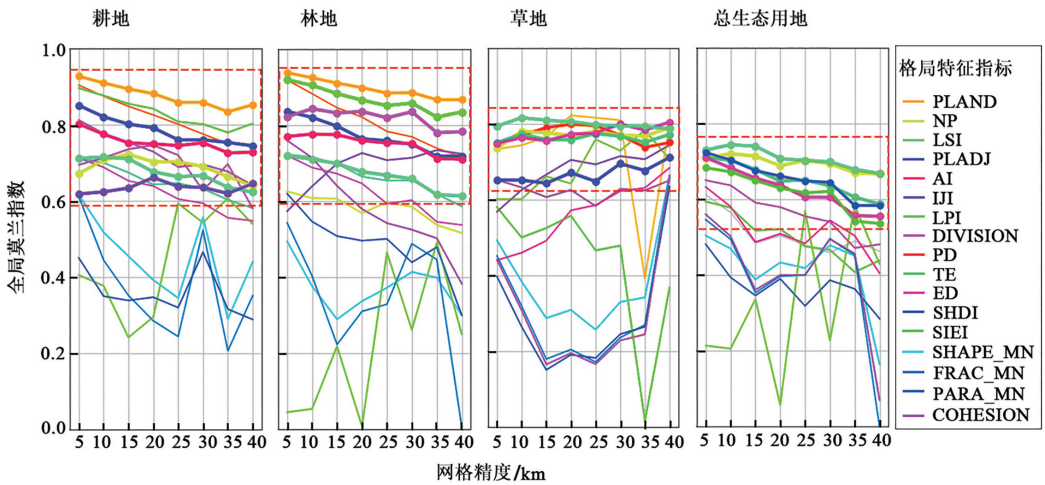


图 3 生态用地各网格精度全局莫兰指数

3.2.2 最佳网格精度确定

块金基台比可以直接反映空间异质性占总空间异质性的比例[21]，各网格精度块金比值的拐点如图 4 所示。总体来看，林地、草地的景观格局随着网格精度的提升，其空间异质性显著下降；耕地的景观格局空间异质性较为波动，特别在网格精度上升至 30～40 km 时波动显著；总生态用地景观格局在 5 km 网格精度上各项指标空间异质性非常明显，随着网格精度增加，空间异质性呈显著波动降低的态势。此外，由图 5 可知，林地、耕地、草地格局的块金基台比值整体较高，而总生态用地的块金基台比值相对较低，说明不同生态用地网格精度存在空间异质性。这种差异说明，应该按地类分尺度进行研究，更精确地捕捉每种生态用地的独特空间特性。因此，在省级尺度下，林地、草地景观格局研究适合选择较大网格精度；耕地景观格局研究适合选择中小网格精度；总生态用地在较小网格精度时空间异质性高，且在各网格精度呈现出剧烈波动，不适合进行最佳网格精度的研究。

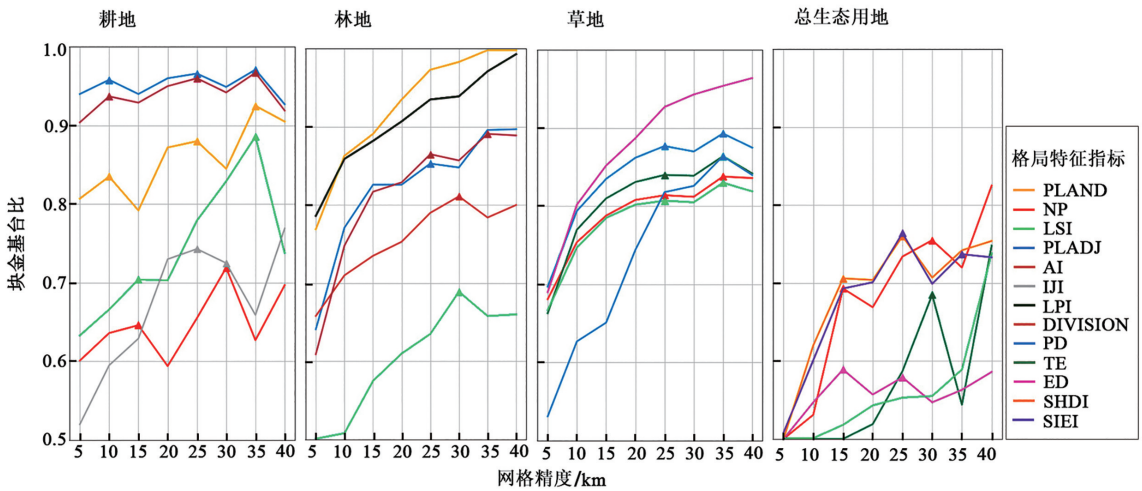


图 4 生态用地景观格局半变异函数折线图

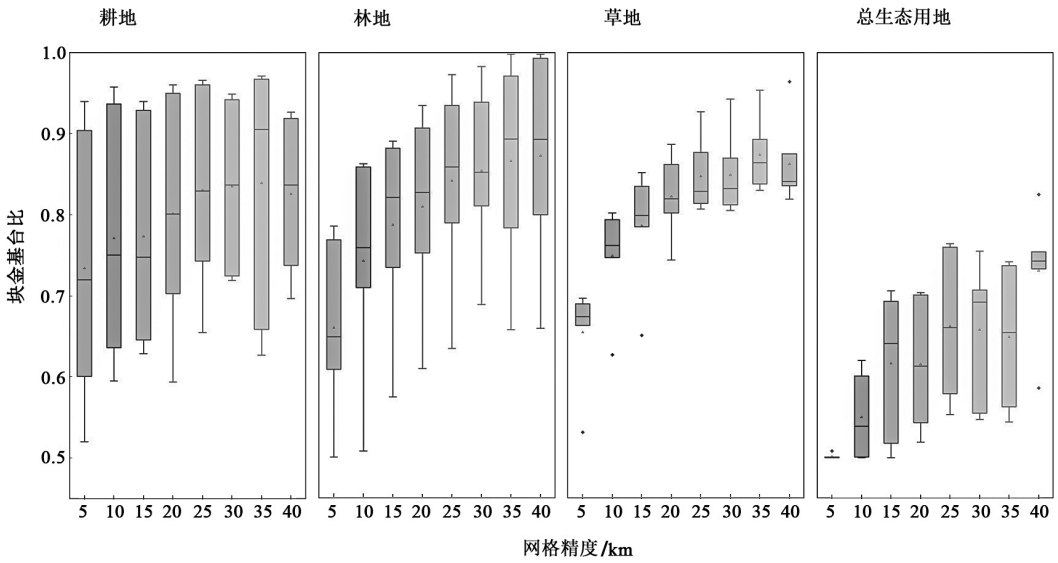


图 5　生态用地各网格精度半变异函数箱型图

具体来看，耕地在 10 km 网格精度下 PLADJ、AI、PLAND 处于拐点位置，在 25 km 下 PLADJ、AI、PLAND、IJI 处于拐点，35 km 下 PLADJ、AI、PLAND、LSI 处于明显拐点，由于耕地在大网格精度下空间异质性波动较大，因此选择包含 4 处拐点 25 km 作为耕地景观格局最佳网格精度。林地在 25 km、30 km 网格精度时分别存在两个拐点，25 km 下 AI、PLADJ 处于拐点，30 km 下 DIVISION、LSI 处于明显拐点，因此选择较大的 30 km 作为黑龙江省林地景观格局研究的最佳网格精度。草地在 25 km、35 km 的网格精度上均存在 PD、TE、NP、LSI 4 个拐点，同等条件下选择较大的 35 km 作为草地景观格局研究的最佳网格精度。综上所述，本文选择耕地 25 km、林地 30 km、草地 35 km 作为研究的最佳网格精度，最佳网格精度下年总 NEP 分布特征如图 6 所示。

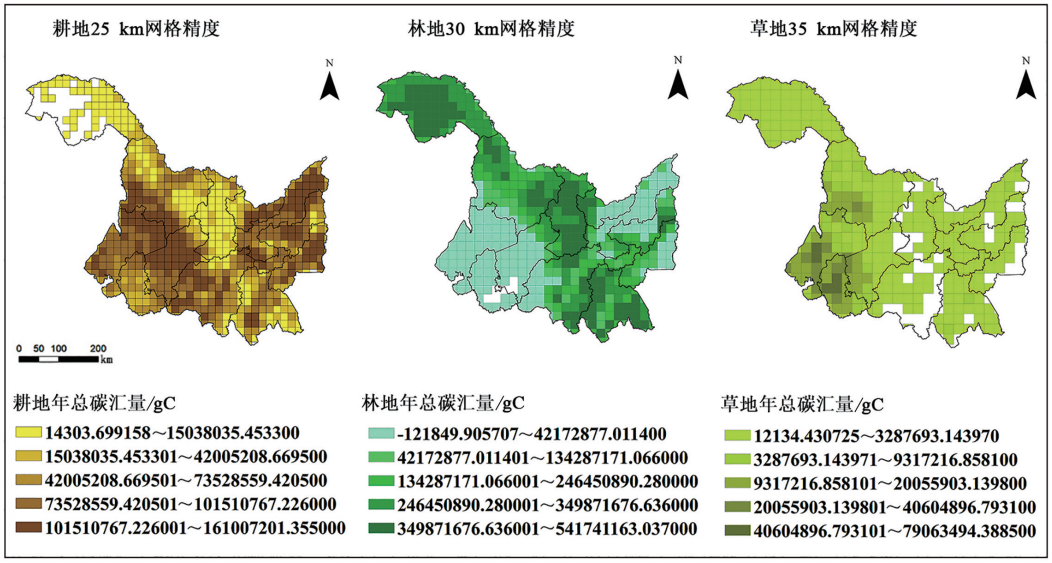


图 6　最佳网格精度下耕地、林地、草地年总 NEP 分布特征

3.3　景观格局与 NEP 相关性

3.3.1　耕地

在 25 km 网格精度下，对 789 个有效网格样本中耕地景观格局与年总 NEP 进行相关性分析（表 1）发现，耕地碳汇量受多个景观指标的显著影响，其中 COHESION（0.870）、PLADJ（0.831）、AI（0.810）、LPI（0.776）、PLAND（0.751）表现为正相关，反映了耕地碳汇量与更

好的景观连通性、更高的斑块聚集度、更集中的土地配置、增加耕地总体面积及单一最大斑块的相对面积之间的呈密切正相关关系；同时 DIVISION（-0.775）显示出耕地总碳汇量与景观破碎化程度成反比。

此外，TE（0.438）、FRAC_MN（-0.419）呈现出中等相关程度，表明耕地的总边缘长度提升、配置较为简单的耕地斑块形状，可以在一定程度上提升耕地碳汇量。

3.3.2 林地

在 30 km 网格精度下，对 547 个林地有效网格样本进行分析（表 1）发现，多项林地景观格局与 NEP 之间呈显著相关，相关的指标与耕地类似，且相关性普遍高于耕地。主要的景观格局因素包括 COHESION（0.871）、PLADJ（0.873）、AI（0.857）、DIVISION（-0.831）、LPI（0.834）、PLAND（0.823），中等相关性的格局因素包括 FRAC_MN（-0.461）。这表明林地的碳汇量同样与景观的连通性、聚集度、配置集中性等指标正相关，而与景观的破碎化程度负相关。不同于耕地的是，林地还包括 LSI（-0.417）及 PD（-0.415）两个中等负相关指标，这意味着减少林地越复杂的形状、降低林地内斑块密度，有助于增加林地碳汇量。

3.3.3 草地

在 35 km 网格精度下，对草地 347 个有效网格样本的分析（表 1）发现，TE（0.985）、NP（0.952）、LSI（0.956）显示极强相关性，表明草地的总边缘长度、斑块总数和景观形状的复杂性在很大程度上影响其碳汇能力。PLAND（0.877）、PD（0.832）、ED（0.872）、LPI（0.775）、AI（0.717）、COHESION（0.803）、PLADJ（0.745）和 SHAPE_MN（0.732）表现为强相关，这些指标反映了草地面积的占比、斑块的密集度、边缘的分布、最大斑块的相对大小、斑块的聚集度、区域的连通性、邻接斑块的相似度和平均斑块形状对增强碳汇能力具有重要影响。FRAC_MN（0.671）则显示了中等相关性，说明斑块形状复杂性同样对碳汇量有一定的正向影响。

此外，DIVISION（-0.506）和 PARA_MN（-0.465）表现为中等负相关，揭示了草地的分割程度和斑块的周长面积比越高，可能对碳汇产生不利影响，高度分割的景观和不规则的斑块形状可能导致生物量积累和碳固定能力的下降。

表 1 格局指标与 NEP 斯皮尔曼相关性

指标	耕地 25 km 网格精度	林地 30 km 网格精度	草地 35 km 网格精度
PLAND	0.751**	0.823**	0.877**
NP	0.160**	-0.200**	0.952**
PD	-0.113**	-0.415**	0.832**
LPI	0.776**	0.834**	0.775**
TE	0.438**	0.279**	0.985**
ED	0.222**	0.092*	0.872**
LSI	-0.006	-0.417**	0.956**
SHAPE_MN	-0.389**	-0.257**	0.732**
FRAC_MN	-0.419**	-0.461**	0.671**
PARA_MN	0.280**	0.167**	-0.465**
PLADJ	0.831**	0.873**	0.745**
IJI	0.173**	0.122**	-0.218**
COHESION	0.870**	0.871**	0.803**
DIVISION	-0.775**	-0.831**	-0.506**
AI	0.810**	0.857**	0.717**
网格样本量	789	547	347

注：** 表示在 0.01 水平上（双尾）显著相关；* 表示在 0.05 水平上（双尾）显著相关。

4 讨论

4.1 生态用地网格精度的空间异质性

在以往景观格局和碳汇耦合关系的研究中，探讨景观空间异质性时，往往将生态用地视作一个整体来探寻研究的最佳网格精度[11-12]。本研究表明，林地、耕地、草地格局的块金比值整体较高，而总生态用地的块金比值相对较低，这一现象源于不同生态用地类型在空间分布和生态过程上的内在差异。这是因为单一类型的生态用地在空间上能表现出更高的同质性和连续性，使得其景观格局指数在单一生态用地中更为集中，因此块金基台比值较高。相反，总生态用地包含多种用地类型组合，其空间异质性显著增加[22]。这种差异说明，在进行生态用地的最佳网格精度分析时，应该按地类分尺度进行研究，更精确地捕捉每种生态用地的独特空间特性。

4.2 格局特征对碳汇的影响规律

省域尺度下，景观格局指标景观面积百分比（PLAND）、最大斑块指数（LPI）、斑块邻接度（PLADJ）、连通性（COHESION）、聚集度（AI）在林地、耕地、草地中均表现出对 NEP 的正向显

著相关性，可归纳为面积、连通性、聚集度这 3 类格局特征，它们通过影响某些核心生态过程进而对碳汇产生积极作用。

4.2.1　直接改变碳汇区域面积

上文揭示黑龙江省林地、耕地和草地在省级尺度下均表现出显著的碳汇能力，强调生态系统景观格局的面积类指标对总碳汇量具有显著的直接影响，表明扩大生态用地规模对于增强碳汇功能的普适性效应。然而，对比其他地区的研究结果发现，格局面积特征与碳汇量的相关性存在地域差异，成渝地区碳汇量与 3 种地类面积指标相关性较低[10]；武汉市林地、耕地显著相关，草地相关性低[11]；京津冀城市群林地、草地具有较强相关性，而耕地不相关[9]。研究结果的不同可能由地区间的气候条件、土地利用策略及研究方法差异引起，表明进一步研究需着重关注地域差异。

4.2.2　增强生态连通性促进碳循环

生态连通性的增强有助于维持更大范围的生态平衡，使得生物群落更加稳定[23]。构建生态廊道是提高整个生态系统连通性的一种有效方法，廊道通常包括原生植物的植被带，能够提供必要的生态服务，如水土保持和养分循环，进而增加了土壤的碳固定能力。此外，生态廊道作为碳汇的一部分，有助于连接分散的碳汇源，形成更广泛的碳汇网络，对于区域碳汇增加具有积极影响。

4.2.3　增强生态聚集度稳定碳汇环境

高聚集度的格局特征表明生态用地在空间上的紧密连接，有助于减少人类活动对环境的干扰，提高生态系统内部微环境的稳定性[24]。生态用地的高聚集度有助于维护更稳定的温湿度条件，大面积且连续的生态用地可以缓冲外部气候变化的影响，减少温度波动，保持土壤湿度，从而保护生态用地内部的自然条件，促进植被健康发展并提升碳固定能力。

5　结论

黑龙江省林地、耕地和草地的年总 NEP 整体表现为明显碳汇，其中林地是主要的碳汇贡献者。在省域尺度下，确定黑龙江省林地、耕地和草地的最佳景观格局研究网格精度分别为 30 km、25 km及 35 km，并提出精确分析生态用地与碳汇能力关系的方法，即按地类分尺度探寻最佳网格精度。黑龙江省林地与耕地各 6 个格局指标、草地的 11 个格局指标与碳汇量均显著相关。面积、连通性、聚集度 3 类格局特征对提升碳汇量的规律性影响，即直接改变碳汇区域面积、增强生态连通性促进碳循环、增强生态聚集度稳定碳汇环境。

参考文献

[1]于贵瑞,朱剑兴,徐丽,等.中国生态系统碳汇功能提升的技术途径:基于自然解决方案[J].中国科学院院刊,2022,37(4):490-501.

[2]PIERRE F,JONES MATTHEW W,MICHAEL O,et al.Global carbon budget 2021[J].Earth System Science Data,2022,14(4):1917-2005.

[3]于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(4):423-434.

[4]杨元合,石岳,孙文娟,等.中国及全球陆地生态系统碳源汇特征及其对碳中和的贡献[J].中国科学:生命科学,2022,52(4):534-574.

[5]王诗雨,刘学伟,崔鸿鹏,等.农田生态系统碳源/汇时空演变因素分析:以黑龙江省为例[J].中国国土资源经济,2024,37(5):4-13,88.

[6]ZHANG L,WYLIE B K,JI L,et al.Upscalingcarbon fluxes over the great Plains grasslands:sinks and sources[J].Journal of Geophysical Research:Biogeosciences,2011,116:G00J03.

[7]LEVIN S A.The problem of pattern and scale in ecology:the Robert H.MacArthur award lecture[J].Ecology,1992,73(6):1943-1967.

[8]BLOOR J M G,TARDIF A,POTTIER J.Spatial heterogeneity of vegetation structure,plant N pools and soil N content in relation to grassland management[J].Agronomy,2020,10(5):716.

[9]邱陈澜,王彩侠,章瑞,等.京津冀城市群生态空间固碳服务功能及其与景观格局的关系特征[J].生态学报,2022,42(23):9590-9603.

[10]李和平,谢鑫,李聪聪.成渝双城地区景观格局的碳汇效应与优化建议:基于 BP 神经网络的分析和预测[J].城市发展研究,2023,30(1):92-102.

[11]洪歌,吴雪飞,蔡锐鸿.最佳网格分析尺度下城市绿色基础设施的景观格局对碳汇绩效的影响研究[J].中国园林,2023,39(3):138-144.

[12]SHI N,YU Y,LIANG S T,et al.Effects ofurban green spaces landscape pattern on carbon sink among urban ecological function areas at the appropriate scale:a case study in Xi'an[J].Ecological Indicators,2024,158:111427.

（下转第 116 页）