

大熊猫国家公园县域片区固碳量时空交互特征研究

路迎香

成都理工大学地理与规划学院，四川成都，610000；

摘要：本文采用探索性空间数据分析和探索性时空数据分析大熊猫国家公园不同片区局部空间上的格局分异与时间上的演化特征展开研究。结果表明研究区固碳量存在较强的集聚现象，2002-2022 年间固碳格局从动态增强转向稳态演化。同时由于复杂的地理环境，片区间又具有明显的空间聚集特征。探索性时空数据分析表明研究区整体具有较高的时空凝聚度，大部分片区具有明显的路径依赖特征。60.87%的片区局部空间波动性较弱，波动性较强的地区集中在岷山周围且强度由南向北递增。移动方向主要以同向为主，呈现“赢-赢”趋势的片区占比为 34.78%，呈现“输-输”趋势的占比为 26.09%，整体呈现“高稳态-低固化”的宏观模式。

关键词：大熊猫国家公园；固碳量；时空交互特征

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.099

近年来，随着全球二氧化碳及温室气体排放量不断增高，导致全球温度急速上升(Siqin et al., 2022; Zou and Zhang, 2020; Giersch et al., 2016)，在当前背景下，碳中和显得尤为重要，它不仅是应对气候变化的关键手段，更是维护生态安全、促进可持续发展的必然选择(Jin et al., 2023)。固碳是指生态系统通过吸收和存储大气中的二氧化碳的过程，它是衡量一个生态系统或区域碳汇功能强弱的重要指标，一个区域的固碳量越高，对缓解全球气候变暖的贡献也就越大(Wang et al., 2023)。研究表明，森林、草地等生态系统是自然界中最重要的碳汇之一，在固碳方面具有巨大的潜力(郝蕾等, 2023; 谢立军等, 2023)。

地理学第一定律表明任何事物都是空间相关的，因此某一地区的固碳量不仅取决于其内部状态，地区之间也可通过空间外溢效应对彼此的固碳量产生影响(付伟等, 2023)。在以往的固碳量空间关联性研究中，主要采用栅格数据或矢量数据来估算固碳量的空间分布特征及其聚类情况。这种方法的核心在于揭示固碳量在空间上的相关性和聚集性，常用的方法为探索性空间数据分析(ESDA)(Li et al., 2022)。其中，全局 Moran's I 指数用于衡量固碳量在整个研究区域内的空间自相关性，而局部 Moran's I 指数则进一步识别固碳量在特定区域内的空间聚集模式(刘凯等, 2015)。探索性空间数据分析在揭示地理要素空间格局分异及其动态演化规律方面具有显著优势，然而，既有实证研究多囿于静态截面分析框架，对地理变量时空耦合机制的探讨尚存不足，导致空间关联性与时间动态性之间的整合性解析面临显著局限。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

大熊猫国家公园地理坐标为东经 102° 11' 06" -105° 40' 00"、北纬 28° 51' 03" -33° 12' 50"，东起陕西省宁强县青木川镇广坪河、西至四川省石棉县栗子坪彝族乡伊牛河南山、南起四川省石棉县栗子坪彝族乡、北至四川省九寨沟县勿角镇双池，地处青藏高原东缘、岷山、邛崃山、大小相岭等高山峡谷地带。研究区土地利用类型主要为森林(83.3%)和草地(13.0%)，植被覆盖率高达 97.4%。

1.2 数据来源

采用 2002-2022 的年度净初级生产力(NPP)来计算大熊猫国家公园的年度固碳量，年度 NPP 数据来自于美国国家宇航局(NASA)官网(<https://earthdata.nasa.gov/>)公布的 MOD17A3H 产品，此数据覆盖范围广，支持全球和区域的植被研究，时间分辨率为年，空间分辨率为 500 米。大熊猫国家公园边界数据以及县域分区数据是根据文件《大熊猫国家公园总体规划(2023-2030 年)》绘制而成，此文件在 2024 年 4 月 12 日由国家林业和草原局发布。文件对大熊猫国家公园的边界以及在每个行政区的覆盖范围做了重新的调整。

2 方法

2.1 固碳量计算

研究表明 1kg 碳元素相当于 2.2kg 的有机物质(陈明辉等, 2012; 王艳艳等, 2005)，而根据绿色植被光合作用化学方程式可知植被每生产 1.00 kg 有机物质能固定 1.63kg 的 CO₂，且 1 kg CO₂ 中包含 0.27 kg 的

碳元素。据此关系大熊猫国家公园每年的固碳量可以通过 NPP 的年度总量得到。

$$W_C = NPP \times 1.63 \times 0.27 \quad (1)$$

式中, W_C 表示单位面积年固碳量 ($t/(ha \cdot yr)$); NPP 表示净初级生产力 ($t/(ha \cdot yr)$)。

2.2 LISA 时间路径分析

LISA 时间路径分析通过引入时间维度,从时间演化的角度研究在 Moran 散点图中局部自相关的动态迁移规律。LISA 时间路径一般通过下述相对长度 Γ_i 、弯曲度 Δ_i 、以及平均移动方向 θ_i 来描述 (Gao et al., 2016):

相对长度 Γ_i :

$$\Gamma_i = \frac{n \times \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{\sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (2)$$

弯曲度 Δ_i :

$$\Delta_i = \frac{\sum_{t=1}^{T-1} d(L_{i,t}, L_{i,t+1})}{d(L_{i,t}, L_{i,t+1})} \quad (3)$$

平均移动方向 θ_i :

$$\theta_i = \arctan \frac{\sum_j \sin \theta_j}{\sum_j \cos \theta_j} \quad (4)$$

2.3 LISA 时空迁跃分析

Rey 改进了经典的 Markov 链,将 Moran's I 散点图中各测度单元迁移的路径、方位、聚集等因子纳入 Markov 链,定义了局部 Markov 迁移和时空跃迁的概念 (Ye and Rey, 2013)。具体公式如下:

时空流动 (SF):

$$SF = \frac{F_I + F_{II}}{m} \quad (3-17)$$

时空凝聚 (SC):

$$SC = \frac{F_0 + F_{III(1)}}{m} \quad (3-18)$$

3 结果

3.1 LISA 时间路径分析

3.1.1 相对长度

结合手动分类法 (临界值 1) 与自然断点法将 LISA 时间路径的相对长度划分为低等级,较低等级,中等等级,较高等级,高等级。LISA 时间路径相对长度处于高等级的片区有都江堰片和宁强县片区;处于较高等级的有武都区片区、汶川县片区、崇州市片区、洪雅县片区、

石棉县片区;处于中等等级的有荣经县片区、芦山县片区、大邑县片区、彭州市片区、松潘县片区、九寨沟片区以及青川县片区;处于较低等级的有文县片区、平武县片区、北川县片区、安州区片区以及宝兴县片区;处于低等级的有茂县片区、绵竹市片区、什邡市片区以及天全县片区。

3.1.2 弯曲度

LISA 时间路径弯曲度通过量化局部空间关联模式的方向波动性,揭示了地理单元在时间维度受周围区域的影响程度。弯曲度越大,表明固碳量受周围片区空间作用越大。将路径弯曲度进按自然断点法进行分级,分为低等级,较低等级,中等等级,较高等级,高等级。处于低等级的片区共 9 个片区;处于中等等级的片区有 7 个片区;处于较高等级的为平武县片区;处于高等级的片区有九寨沟片区。

3.1.3 移动方向

LISA 时间路径的移动方向分为四类:“赢-赢 ($0^\circ - 90^\circ$)”、“输-赢 ($90^\circ - 180^\circ$)”、“输-输 ($180^\circ - 270^\circ$)”和“赢-输 ($270^\circ - 360^\circ$)”,大熊猫国家公园内这四种方向均有出现 (图 4-4),主要以“赢-赢”和“输-输”为主流方向,呈现这两种移动方向的片区共有 14 个,占整个研究区片区总量的 60.869%。其中,呈现“赢-赢”方向的片区有 8 个,占研究区片区总数的 34.783%,呈现“输-输”方向的片区有 6 个,占研究区片区总数的 26.087%,表明相邻片区之间的迁移总体以正向协同增长模式为主,负向协同增长模式为辅。

呈现“赢-赢”正向协同增长模式的片区集中分布在白水江-岷山范围内的片区群和邛崃山-大相岭范围内的片区群的最南部和最北部地区。“输-输”负向协同增长趋势的片区有宝兴县片区和白水江-岷山范围内的片区群的中部的多个相邻片区,这些片区在空间上存在负向空间整合性,即这些片区及其邻域固碳量都呈现低增长模式。“输-赢”反向增长趋势的片区在固碳量上呈现自身低邻域高的竞争态势。“赢-输”反向增长的片区在固碳量上呈现自身高邻域低的竞争态势,即自身固碳量增长较快,而周围片区提升速度缓慢。

3.2 LISA 时空迁跃分析

基于马尔可夫链模型,通过构建空间权重转移概率矩阵 (表 3-1),系统解析 Moran 散点图中局域空间关联模式的转移过程,进而量化 2002-2022 年间研究区固碳格局的时空跃迁概率、时空流动性及空间集聚强。

表 3-1 Moran 散点图的时空迁跃矩阵

t-t+1	HH	HL	LH	LL	类型	比例	SF	SC
-------	----	----	----	----	----	----	----	----

HH	21.739%	4.348%	4.348%	0	I	69.565%	26.087%	73.913%
HL	8.696%	13.043%	0	4.348%	II	8.696%		
LH	0	0	13.043%	0	III	17.391%		
LL	4.348%	0	4.348%	21.739%	IV	4.348%		

3.2.1 转移概率分析

研究区内迁跃类型占比较高的是 Type I，占总迁跃类型的 69.569%，即大部分情况下，研究期间大熊猫国家公园片区逐年跃迁后的空间结构与上一年相同。由此可见，大熊猫国家公园片区之间很少发生明显的固碳量时空迁跃行为，大熊猫国家公园固碳量的具有高度稳定的聚集特征。进一步揭示了大熊猫国家公园固碳量在时空演化中存在一定的锁定效应或路径依赖。

3.2.2 迁跃类型分析

2002-2022 年大熊猫国家公园共有 10 种迁跃类型，其中，迁跃概率最大的类型为 HHt-HH t+1 和 LLt-LLt+1，占比都达到了 21.739%，这表明研究区固碳量时空演化呈“两极分化、路径依赖”的格局特征

3.2.3 迁跃指数分析

大熊猫国家公园各片区在时空迁跃中一直保持和自身相同的迁跃类型的概率为 73.913%，因此固碳量的时空凝聚度为 73.913%，时空流动度为 26.087%。整体而言，固碳量的空间分布存在较强的转移惰性，在一定程度上反映了研究区的局部空间关联关系在未来仍将持续，短时间内不可能出现较大的空间格局变动。

4 结论

通过 LISA 时间路径分析，揭示了大熊猫国家公园固碳量的时空交互特征。弯曲度分级表明，60.869%的片区局部空间波动性较弱，而岷山周围片区波动性显著且呈南北递增趋势。LISA 时空迁跃分析表明大熊猫国家公园固碳量时空演化具有显著的路径依赖特征。迁跃类型分析表明，69.569%的片区保持年度空间结构稳定，印证“高值极化、低值锁定”的两极分化格局。HLt-HL t+1 与 LHt-LHt+1 的持续低值化反映过渡带生态脆弱性与政策执行梯度差异，加剧空间异质性。局部恢复成效显著，但高值区仍面临邻域衰退风险。

参考文献

[1]陈明辉,陈颖彪,郭冠华,等.2012.快速城市化地区生态资产遥感定量评估——以广东省东莞市为例[J].自然资源学报,27(04):601-613.
[2]王艳艳,杨明川,潘耀忠,等.2005.中国陆地植被生态系统生产有机物质价值遥感估算[J].生态环境,14(04):455-459.
[3]郝蕾,翟涌光,戚文超,等.2023.2001-2020 年内蒙

古植被碳源/碳汇时空动态及对气候因子的响应[J].生态环境学报,32(05):825-834.

[4]谢立军,白中科,杨博宇,等.2023.碳中和背景下国内外陆地生态系统碳汇评估方法研究进展[J].地学前缘,30(02):447-462.

[5]付伟,李龙,罗明灿,等.2023.省域视角下中国森林碳汇空间外溢效应与影响因素.生态学报,43(10):4074-4085.

[6]Li C, Zhang L, Gu Q Y, et al.2022. Spatio-Temporal Differentiation Characteristics and Urbanization Factors of Urban Household Carbon Emissions in China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(8): 4451-4451.

[7]Siqin Z, Niu D, Li M, et al.2022. Carbon dioxide emissions, urbanization level, and industrial structure: empirical evidence from North China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 29(23): 34528-34545.

[8]Zou S, Zhang T.2020. Cross-correlation analysis between energy and carbon markets in China based on multifractal theory[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 15(3): 389-397.

[9]Giersch J J, Hotelling S, Kovach R P, et al.2016. Climate-induced glacier and snow loss imperils alpine stream insects[J]. Global Change Biology, 23(7): 2577-2589.

[10]Jin C, Lv Z, Li Z, et al.2023. Green finance, renewable energy and carbon neutrality in OECD countries[J]. Renewable Energy, 211(7): 279-284.

[11]Ye X, Rey S.2013. A framework for exploratory space-time analysis of economic data[J]. The Annals of Regional Science, 50(1): 315-339.

[12]Wang J, Zhao D, Liu X a, et al.2023. Spatio-Temporal Evolution of Forest Landscape in China's Giant Panda National Park: A Case Study of Jiudingshan Nature Reserve[J]. Forests, 14(8): 724-740.