国土空间碳汇网络的空间组织机理与规划干预研究

苗 颖 韩 雪

摘 要：为优化国土空间格局中的碳汇功能，实现生态系统碳汇能力的协同增效，研究提出构建以“源地－廊道”为核心的碳汇网络，并分析其空间组织机理与关键影响因素。在此基础上，运用图论与地理探测方法识别关键节点与脆弱区域，提出空间分区管控、节点功能提升及生态廊道修复等干预策略，为碳中和目标下的空间规划与政策制定提供科学支撑。

关键词：国土空间；碳汇网络；空间组织激励；规划干预

一、引 言

在“双碳”战略目标引导下，提升国土空间中碳汇系统的结构效率与功能完整性成为关键议题[1]。长三角地区作为典型的高城镇化区域，其碳汇格局呈现出碎片化、连通性差的特征，亟需从整体网络角度出发，探索多源数据驱动下的碳汇组织机制与干预路径，以构建稳定高效的生态空间系统，支撑低碳发展与生态安全并重的空间转型方向。

二、研究区概况与数据方法

1.区域概况与数据来源

研究区位于中国东部沿海，北纬 30.5° 至 31.8° ，东经 120.3° 至 121.9° 间，属长江三角洲冲积平原。地势平坦，河网密布，气候为亚热带季风气候，年均温 16℃，年降水 1100mm。区域内土地利用包括城市建成区、农田、林地、湿地和水域。经济发达，人口密集，工业化和城市化进程对生态环境造成压力。碳汇功能主要体现在林地、农田和湿地生态系统中[1]。目前碳汇格局呈零散分布，规模不一：城市绿地斑块化，农田生态系统功能单一，自然湿地面积减少。城市内部的零星绿地在吸碳固碳方面表现出一定的局限性，其服务半径有限，难以形成连续的碳汇流，传统农业模式还降低了土壤的碳储存能力。

数据来源方面，本研究使用的土地利用数据主要来源于中国科学院资源环境科学与数据中心，空间分辨率为 30m，涵盖 2000 年、2010 年和 2020 年三个时间节点。植被指数数据来自美国地质调查局，空间分辨率为 250m。数字高程模型数据同样来源于 USGS，空间分辨率为 30m，用于地形因子分析。气象数据，包括年平均气温和年降水量，来源于国家气象科学数据中心，通过空间插值方法获得区域尺度的气候变量数据。社会经济统计数据，如人口密度和国内生产总值，则来源于区域统计年鉴，并进行空间化处理[2]。

2.研究框架与技术路线

此次研究框架主要围绕国土空间碳汇网络的“识别－机理－干预”逻辑展开，具体如下：

（1）整合多源数据并进行空间分析，识别区域碳汇源地与生态廊道，构建初步碳汇网络格局，量化土地利用类型的碳汇能力；

（2）分析碳汇网络的空间组织特征与复杂性，探究自然地理、社会经济与政策等因子对网络结构的影响机制；

（3）提出空间干预策略，从空间管制、功能提升与连通性修复三方面优化碳汇网络，实现协同增效。

技术路线具体为：第一步是数据预处理，包括对不同来源数据的格式统一、投影转换、重采样以及缺失值处理等，确保数据的一致性和可用性。第二步是碳汇源地的识别与量化，通过估算不同植被类型的净初级生产力或碳储量来确定碳汇强度。第三步是生态廊道的提取，运用最小累积阻力模型或其他景观连通性分析方法，识别连接碳汇源地的潜在流线。第四步是对碳汇网络进行拓扑结构和空间格局分析，如利用图论指标评价网络的连通性、稳健性等。第五步是采用地理探测器或多元回归分析等方法，探究自然因素和人文因素对碳汇网络格局的影响程度和作用机制[3]。第六步是

基于分析结果，结合国土空间规划的原则，制定具体的规划干预措施，并对不同情景下的干预效果进行模拟评估。

三、国土空间碳汇网络格局识别与机理分析

1.识别碳汇源地，构建网络廊道

碳汇网络“源地－廊道”体系的构建，核心在于识别具有高碳吸收能力的区域，即碳汇源地。这一过程综合考虑土地利用类型、植被覆盖度与植被净初级生产力等关键指标，以筛选出森林、农田、湿地等潜在的碳汇核心区。其中，植被净初级生产力是衡量植物在单位时间内通过光合作用固定有机碳量的核心指标，反映了生态系统的碳汇强度，其数值通常可借助遥感数据与生态模型进行估算。为提升碳汇廊道识别的精度，研究引入了图论方法，并基于最小累积阻力模型来构建“源地－廊道”的拓扑网络。在这个网络中，各个碳汇源地代表“节点”，而连接它们的潜在路径则构成“边”。通过计算网络的连通度、平均最短路径等结构性指标，可以系统地评估网络结构的稳定性与功能的完整性，从而为优化碳汇在空间中的流通路径以及实施精准的生态干预措施提供科学的理论支撑[4]。

2.解析空间格局，评价网络特征

为提升碳汇廊道识别精度，研究引入图论方法构建“源地－廊道”拓扑网络，基于最小累积阻力模型识别碳汇流通路径。网络中，节点代表碳汇源地，边表示连接路径，反映碳汇在空间上的潜在通达性。进一步计算网络连通度、平均最短路径等结构指标，以量化整体网络的连贯性与传输效率，识别主导通路与关键连接点。该方法可揭示碳汇网络中的潜在瓶颈与脆弱环节，为优化空间布局、增强生态连通性以及制定精准干预措施提供理论支持。

3.探寻组织机理，辨识关键因子

碳汇网络空间组织结构受自然地理格局与人类活动梯度双重驱动。研究基于 30?m 分辨率 DEM 构建地形因子栅格，叠加坡度与高程计算地形起伏指数，评估自然阻力强度。结合 NDVI 时序、湿地与林地分布识别生态边界收缩风险，结果显示滨水缓坡区源地连片性强，路径稳定；而高起伏地带斑块化明显，网络稳定性较低。在人类干扰方面，构建城镇建设强度与人口密度图层，利用回归模型分析其与网络连通度、节点平均度的关系，识别城郊扩展区与产业边缘为关键阻断单元。地理探测器分析表明，LUI 等人类干扰因子削弱碳通量连续性，尤其在人口密度超过 1500 人 /km2 区域内，斑块聚合度显著下降。最终构建多因子指标体系并测算 q 值，定量识别自然与人文因子的作用强度，结果见表 1。

四、国土空间碳汇网络的规划干预策略

1.优化网络布局，实施分区管控

基于网络优化的国土空间分区管控策略，旨在通过精细化管理提升碳汇网络整体功能。该策略首先识别碳汇网络中的高价值碳汇源地、重要生态廊道及连通性提升区域。根据这些识别结果，将国土空间划分为不同管控区并制定差异化要求。例如，将高碳汇能力的森林、湿地划定为“碳汇核心保护区”，实施严格保护，禁止与碳汇功能相悖的开发活动，优先进行生态修复和碳汇增量提升，如补植本地树种。对于介数中心性较高的碳汇源地，即在网络中具有重要连接作用的斑块，设为“碳汇战略节点区”，加强内部管理，提升碳汇能力，并强化与周边区域的联系，防止功能退化影响网络连通性[5]。碳汇廊道则划定为“碳汇连通优化区”，重点维护和提升其连接功能，包括拓宽、绿化现有廊道，清除障碍物，并在连通性弱或断裂区域规划建设新生态廊道，如农田防护林带，以增强网络整体性和韧性。碳汇能力较低但具增汇潜力的区域，如退化农田，设为“碳汇功能提升区”，鼓励生态恢复工程和生态农业模式，逐步提升碳汇能力。

2.聚焦关键节点，提升源地功能

面向关键节点的碳汇功能提升，需对网络中结构或功能重要的源地实施精细化管理。对高碳汇能力区域，如成熟森林与低营养化湿地，采取“维持与增效”策略，加强管护、防治病虫害、优化树种结构，引入速生乡土树种提升碳效。对高介数中心性节点，重点执行“强化连接与阻力降低”策略，提升节点碳汇能力并优化其与周边的连通性，如建设缓冲带、生态过渡(下转第 30 页)

表 1 碳汇网络空间组织影响因子分析结果

驱动因子	与连通度的相关性（R^2）	地理探测器 q 值	影响方向
地形起伏指数（TRI）	0.42	0.31	正向
湿地分布密度	0.38	0.27	正向
NDVI 均值	0.35	0.29	正向
建设用地强度（LUI）	-0.44	0.46	负向
人口密度（人/km^2）	-0.41	0.43	负向
GDP 密度（万元/km^2）	-0.39	0.41	负向
交通通达性指数	-0.33	0.34	负向
水系密度（km/km^2）	0.36	0.28	正向

参考文献：

[1]王梁，刘晓煌，刘玖芬，等.全国自然资源要素综合观测标准体系构建[J].2021.

[2]自然资源部.自然资源调查监测体系构建总体方案[Z].2020.

[3]中国地质调查局.地质调查项目预算标准（2021）[Z].2021.

[4]吴宝和，杨晓迪，欧阳靖，等.自然资源要素综合观测预算标准研究成果报告[R].中国地质科学院探矿工艺研究所，2023.

[5]国务院.关于进一步深化预算管理制度改革的意见（国发〔2021〕5号）[Z].2021.

[6]自然资源部.自然资源调查监测体系构建总体方案.

[7]自然资源部.自然资源科技创新发展规划纲要[B10L].2018-11-06.

[8]Global Terrestrial Observing System (GTOS).http://www.fao. org/gtos/index.html.

[9]International Long-term Ecological Research Network (ILER).

[10]张莹，吕玉霞，张玉贤，等.自然资源标准体系现状分析[J].测绘标准化，2020，36(2)：1-5.

[11]祝海龙，张丹武，刘建钊，等.基于霍尔三维结构的建筑垃圾综合利用标准体系构建研究[J].中国建材科技，2019，28(2)：13-14.

[12]陈丽，王启现，刘娟，等.农业科研试验基地数据管理标准体系构建[J].农业工程学报，2020，36(4)：193-201.

[13] 中华人民共和国自然资源部.关于印发自然资源科技创新发展规划纲要的通知 [EB/OL].(2018-10-16)[2020-06-01]

[14]刘晓煌，刘晓洁，程书波，等. 中国自然资源要素综合观测网络构建与关键技术 [J]. 资源科学，2020，42(10)：1849-1859.

[15]刘玖芬，高阳，冯欣，等.自然资源要素综合观测质量管理体系构建[J].资源科学，2020，42(10)：1944-1952 2020，42(10)：1944-1952

作者单位：中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心

本文受中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心项目“自然资源调查预算标准制修订”（编号DD20230533）资助。

（上接第32页）区，降低干扰。对被城市或农田包围的孤立节点，可构建绿带或线性廊道，实现网络再融合，配套实施土壤改良、植被更新和水文恢复等措施。

3.修复生态廊道，增强网络连通

面向生态廊道的连通性修复，旨在增强不同碳汇源地间的物质、能量与信息流动，提升整体碳汇功能与生态服务能力。修复重点在于识别并干预阻碍碳汇流动的断裂点或脆弱环节，需评估廊道的空间分布、宽度、植被组成及干扰程度。具体措施包括两方面：其一，断裂点修复与拓宽，针对被道路、建筑或密集农田切割的廊道，可通过生态涵洞、绿桥等手段恢复连通；对于宽度不足的区域，采用退耕还林、滨水湿地构建等方式扩增绿地面积，形成连续生态通道，兼顾水质净化与生物多样性保护。其二，植被优化与物种多样性提升，应选择适宜本地、固碳能力强的乔灌木混交种群，避免单一树种配置，增强生态系统稳定性与抗逆性，同时在廊道中引入蜜源植物等，促进动植物迁徙与定居，提升廊道整体生态功能。

五、结　语

国土空间碳汇网络的稳定性受自然地理与人类活动双重影响，通过识别源地与廊道、评估网络结构特征，可揭示其空间耦合机制。关键节点与廊道的功能提升是实现网络优化的核心，通过精准识别与差异化干预，可有效增强碳汇系统的整体连通性与适应性，为区域尺度碳中和战略实施提供实践依据与空间规划支持。□

参考文献：

[1]覃盟琳，罗丁丁，蒋红波，等.基于“斑块—基质—廊道”的南宁市碳汇空间格局构建研究[J].西部人居环境学刊，2025，40(02)：141-147.

[2]李燕，张垒，赵星烁. 美丽城市视域下促进国土空间格局绿色低碳转型的国际经验与启示[J].城乡规划，2025，(01)：1-11.

[3]朱宇婷，丁一，白炜旭，等. 多目标协同下农产品主产区县域国土空间格局优化 [J]. 农业工程学报，2025，41(02)：281-290.

[4]马天峥，安正.“双碳”目标下国土空间规划的重点内容及优化策略[J].城市建筑，2024，21(22)：97-100.

[5]熊健，卢柯，姜紫莹，等.上海落实“双碳”目标的国土空间发展战略与实施策略研究[J].上海城市规划，2024，(04)：1-8.

作者单位：江苏省中为（江苏）城建设计有限公司