

DOI: 10.20103/j.stxb.202410302655

刘亦文, 李桢泉, 颜建军. 长株潭城市群蓝绿空间碳汇时空演化与组态提升路径. 生态学报, 2025, 45(15): - .

Liu Y W, Li Z X, Yan J J. The spatiotemporal evolution and configuration improvement path of blue-green carbon sinks in the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(15): - .

长株潭城市群蓝绿空间碳汇时空演化与组态提升路径

刘亦文¹, 李桢泉², 颜建军^{3,*}

¹ 湖南工商大学国际商学院, 长沙 410205

² 湖南工商大学资源环境学院, 长沙 410205

³ 湖南工商大学经济与贸易学院, 长沙 410205

摘要: 蓝绿空间作为城市生态空间的基本骨架与生态安全的重要保障载体, 因其显著的碳汇潜力与增汇效能, 在城市减排增汇体系中具有不可替代的生态价值。在积极推进国家“双碳”战略目标的背景下, 揭示蓝绿空间碳汇时空演变规律及其驱动机制, 构建碳汇提升路径, 已成为区域可持续发展研究的重要命题。以长株潭城市群为研究对象, 基于 2008—2022 年土地利用数据和碳密度系数, 系统分析蓝绿空间碳汇时空演变特征及驱动机制。研究发现: (1) 区域碳汇总量均值为 151.56 万 t, 整体呈现波动趋势。其中, 蓝色空间碳汇量在研究期内平均值为 1.34 万 t, 整体呈现持续下降趋势, 绿色空间作为主导性碳汇来源, 其动态变化趋势与区域碳汇总量的演变特征呈现显著一致性; (2) 碳汇量的变动保持了一定程度的稳定性, 空间分析显示其空间格局呈现“东北-西南”轴向分布, 其中西南区域的空间影响力在研究期内呈现显著增强态势; (3) 路径分析揭示土地利用程度和人口密度分别主导了两条核心碳汇提升路径, 且其变动受到多因素组态影响, 其中城市开发强度与经济水平的协同作用、人口聚集与经济交互效应对碳汇影响尤为显著。

关键词: 长株潭城市群; 蓝绿空间; 碳汇; 模糊集定性比较分析 (fsQCA)

The spatiotemporal evolution and configuration improvement path of blue-green carbon sinks in the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration

LIU Yiwen¹, LI Zhenxiao², YAN Jianjun^{3,*}

¹ International Business School, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

² School of Resource and Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

³ School of Economics and Trade, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

Abstract: As the basic skeleton of the urban ecological space and an important carrier of ecological security, blue-green space has irreplaceable ecological value in the urban emission reduction and sink enhancement system due to its significant carbon sink potential and sink enhancement efficiency. Under the background of positive response to the national “carbon peaking and carbon neutrality” strategic goal, revealing the spatial and temporal evolution law of carbon sinks in blue-green space and its driven mechanism, as well as constructing the path of carbon sink enhancement, has become an important proposition in the study of regional sustainable development. This study takes Changzhutan city cluster as the research object, and analyzes the spatial and temporal evolution characteristics of the blue-green space carbon sink and its driving mechanism based on the land use data and carbon density coefficients from 2008 to 2022. It is found that: (1) the average value of the total regional carbon sink is 1,151,600,000t, with an overall fluctuating trend. The mean value of the blue space carbon sink in the study period was 1.34 million t, showing a continuous downward trend, and the green space, as

基金项目: 国家社会科学基金一般项目(24BTJ032)

收稿日期: 2024-10-30; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yan751225@163.com

the dominant source of carbon sinks, showed a significant consistency between its dynamic trend and the evolution of the total regional carbon sinks; (2) the changes in carbon sinks maintained a certain degree of stability, and the spatial analysis showed that the spatial pattern showed a “northeast-southwest” axial distribution, of which the spatial and temporal evolution characteristics and driving mechanisms were the same as those of the regional carbon sinks. The spatial analysis shows that its spatial pattern shows a “northeast-southwest” axial distribution, in which the spatial influence of the southwest region shows a significant enhancement during the study period; (3) the path analysis reveals that the degree of land use and the population density dominate the two core paths of carbon sink enhancement, and their changes are affected by multi-factors, among which the synergistic effect of the intensity of urban development and the level of the economy, and the interaction effect of the population aggregation and the economic development are particularly significant to the carbon sinks. The synergistic effect between urban development intensity and economic level, and the interactive effect between population concentration and economic development have a particularly significant impact on carbon sinks.

Key Words: changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration; blue-green space; carbon sink; fsQCA (fuzzy set qualitative comparative analysis)

良好的生态环境是人类健康生存的坚固基石,也是人类走向未来的根本依托,但第一次工业革命以来,伴随着机器的轰鸣声和经济社会的高速发展,西方资本主义国家在加速对自然资源攫取和生态环境破坏的基础上创造了巨量的社会财富,由此造成了严峻的环境污染问题,地球生态系统原有的循环和平衡遭到了肆意破坏,人与自然之间诸多方面的深层次矛盾日益显现,特别是长期以来的高消耗、高排放的生产生活方式导致全球气候变暖加速演进,极端天气气候事件呈现频发、强发、广发特征,严重影响全球经济社会和自然生态环境。气候变化已成为不容忽视的全球性问题,已成为人类社会面临的最紧迫和最严峻的挑战。中国气象局发布的《中国气候变化蓝皮书(2024)》提到,全球气候系统持续变暖,中国已成为全球气候变化的敏感区。如何应对气候变化已成为当前完整准确全面贯彻新发展理念,探索以生态优先、绿色发展为导向的高质量发展进程中的关键议题。在全球气候变化的严峻挑战面前,中国政府明确提出 2030 年前实现二氧化碳排放达到峰值,到 2060 年前实现碳中和的长远目标,不仅体现了大国的责任与担当,也是助推我国实现经济社会高质量发展的关键路径。相关研究表明,中国的碳排放量约有 85% 在城市产生^[1],因此,城市作为实现“双碳”目标的重要单元与具体呈现,在降低碳足迹、推动可持续发展中扮演着至关重要的角色。由绿地、水域、湿地等构成的蓝绿空间作为城市生态系统的重要组成部分,是城市空间中唯一的直接碳汇途径^[2],不仅能够通过扩大城市绿地和水域面积来提高碳汇效能,还能够在提升居民生活质量的同时,促进生态系统的恢复与保护,在城市减排增汇中发挥着重要作用。因此,科学构筑蓝绿空间并合理利用城市蓝绿资源,已成为应对气候变化挑战、推动可持续发展的关键策略之一。

2019 年中国自然资源部发布的《关于全面开展国土空间规划工作的通知》从国家层面明确了城市蓝绿空间的基本范畴,强调了蓝绿空间对城市关键性生态资源进行有效保护与合理利用的重要性,有效引导了蓝绿空间分类细化和建设实施。从更广泛的理论视角来看,城市蓝绿空间则被定义为覆盖都市区域的一系列相互联系且功能互补的自然及半自然区域组成的系统^[3-5],包括但不限于森林、公园、社区绿化带等绿色开放地带,以及河流、湖泊、湿地乃至小型溪流等蓝色水域部分。这些蓝绿空间共同为城市空间提供了多样的生态系统服务,在促进城市可持续发展、改善城市微气候、支持社会经济繁荣以及达成环境目标等方面发挥着重要作用,特别是在减少碳排放与提升城市的碳汇能力上尤为突出。研究表明,尽管湿地在全球陆地表面所占比例仅为 5% 到 8%,但其碳储存能力却相当显著,大约占据了全球陆地土壤总碳储量的 20% 至 30%^[6-7]。此外,城市中的绿色空间作为重要的“碳汇者”,在吸收和固定二氧化碳方面发挥着关键的“绿碳”作用,能够抵消大约 28% 到 37% 的城市二氧化碳排放量^[8]。这些研究结论无一不凸显了不论是自然湿地还是城市绿地,均在缓解气候变化影响及促进环境可持续性方面展现出巨大潜力与重要价值。因此,城市蓝绿空间以其独有的碳

汇潜力在城市碳减排策略中占据着核心地位,加强城市蓝绿空间建设对于实现“双碳”目标具有极其重要的意义,加大对这类稀缺“蓝绿”资源的投资力度、加强管理和维护工作显得尤为迫切^[9-10]。

当前学术界关于城市蓝绿空间的碳汇研究主要集中在城市蓝绿空间碳汇的效益评估与影响机制分析两个方面。城市蓝绿空间的碳汇效益评估研究聚焦于运用多种模型来量化城市或城市群中蓝绿空间所带来的碳汇效果,包括但不限于城市蓝绿空间的增汇减碳、固碳释氧以及增强碳储存能力等方面^[11-12],大部分学者选用生物量法、样地勘测法、微气象学法等较为成熟的碳储量估算方法^[13-15]。还有学者在此基础上考察了不同区域的蓝绿空间减碳潜力,并对特殊环境下蓝绿空间的碳汇进行研究^[16-17],如选用中国北方寒冷地区的典型特大城市(天津中心城区)研究城市蓝绿空间的降温效应,量化蓝绿空间间接减碳排的生态效益^[18],或是利用 InVEST 碳储量模型与 ArcGIS 空间可视化分析工具等常用工具通过辅助计算来对城市蓝绿系统碳储量进行评估及分区^[19-20]。在当前深度学习领域不断发展的背景下,有学者创新性地将机器学习算法与传统碳储量估算模型相融合,就城市蓝绿空间格局对碳固存的影响及其关键指标进行了测度与深入解译^[21-22]。城市蓝绿空间的碳汇影响机制研究方面,学界重点关注不同生态系统如何吸收和储存二氧化碳^[23],并探索影响这一过程的各种自然和社会经济因素^[24-25],进一步发现城市蓝色空间和绿色空间在碳吸收能力和储碳潜力表现出一定的差异性,且蓝绿空间的合理布局也被认为是提高碳汇效率的重要因素之一^[26-28]。还有研究发现原有的城市蓝绿空间被建筑物或其他人工设施等城市扩张行为所挤占,这直接减少了可用于碳封存的土地面积^[29],对城市碳汇效能造成了较为严重的影响。而除了直接的碳封存外,部分学者主要围绕蓝绿空间所提供的一系列其他重要的生态系统服务进行研究,比如改善空气质量、调节微气候等,这些服务间接地促进了城市的可持续发展,有助于构建更加宜居的城市环境^[30-31]。

长株潭城市群作为国内唯一拥有“绿心”规划的城市群,具有用地类型多样、生态系统相对完整和用地管理复杂等特点,其独特的地理环境和生态布局为研究提供了极具价值的实例,同时,对该区域蓝绿空间碳汇效能进行时空演变研究也将对推动区域实现“双碳”目标具有重要意义^[32]。目前针对长株潭城市群蓝绿空间的研究主要集中在以下几个方面:一方面是碳汇用地类型与时空变化,此类研究多基于土地利用数据来展开,将用地类型划分为碳汇用地(如林地、草地、湿地等)与非碳汇用地(如建设用地、农业用地等),分析不同时间段内碳汇用地的面积变化及其驱动因素^[33-34]。另一方面是碳盈亏空间格局及其影响因素,着重揭示了长株潭城市群碳盈亏的空间格局及其影响因素^[35]。还有学者利用改进后的碳汇模型对自然碳源汇进行估算^[36-37],通过真实碳排放量约束改进估算过程,探究碳源碳汇和碳盈亏的时空分布及影响因素。以上研究表明,长株潭城市群的蓝绿空间碳汇效能时空演化中展现出独特的区位特征,同时上述研究着重强调了长株潭城市群蓝绿空间作为提升碳汇效益关键载体的作用,为长株潭地区制定有效的低碳发展策略提供了科学依据。

当前针对长株潭城市群蓝绿空间碳汇的研究已取得一定成果,但仍存在一定的局限性:一方面是驱动因素分析,现有研究多使用土地利用数据对碳汇用地类型与时空变化进行分析,而从土地利用变化出发探究地区碳汇效能的驱动因素分析方面研究较少。另一方面是空间差异性的研究,研究仅发现长株潭城市群的碳效应空间分异明显,但对于这种空间差异的具体影响机制分析研究尤显不足。基于上述背景,本研究旨在建立一套针对长株潭城市群蓝绿空间碳汇效能的综合评价体系,从多视角出发客观呈现长株潭城市群蓝绿空间的碳汇效能发展特征及其效能水平。研究聚焦于长株潭城市群“绿心”地区,以城市公共绿地和水体作为主要评估对象,从中微观层面上展开深入的实证研究,力求提高关键数据收集及指标计算过程中的可行性和代表性。最终,通过对评估结果进行对比分析,探索优化城市蓝绿空间碳汇效能的设计策略,从而为城市规划与管理决策提供科学、量化的参考依据。

1 研究区域概况及数据来源

1.1 研究区域概况

长株潭城市群位于湖南省中东部,作为长江中游城市群的战略支点和湖南省“三高四新”战略的主阵地,

承载着区域经济增长与生态文明建设的双重使命^[38]。依托“一江联三市”的地理格局,区域内长沙、株洲、湘潭三市协同发展,积极推动经济增长的同时实施减碳减排战略任务。因此,深入分析长株潭城市群蓝绿空间碳汇的时空分布特征及其影响因素,对促进该地区的“减碳增汇”工作以及实现绿色可持续发展目标具有重要意义^[39]。

1.2 数据来源

土地覆盖数据源自武汉大学杨杰教授和黄昕教授发布的 1990—2022 年中国 30 m 分辨率年度土地覆盖栅格数据集。该数据集依托 Google Earth Engine (GEE) 云平台,利用 Landsat 卫星数据,实现了多年连续的土地利用分类。相较于其他数据集,该数据集在时间与空间分辨率上均展现出显著优势,提供了更为精细连贯的土地覆盖变化信息。

2 研究方法

2.1 碳核算系数法

碳核算系数法主要通过将土地利用类型面积与其碳汇系数相乘计算碳汇量^[40]。此研究选取森林、草地、水域、灌木及人类活动频繁的耕地五种碳汇用地进行计算,计算公式如下:

$$E_a = \sum e_i = \sum S_i \times \beta_i \quad (1)$$

式中, E_a 为碳排放总量; e_i 为第 i 种土地利用类型的碳汇量; S_i 第 i 种土地利用类型的面积; β_i 为第 i 种土地利用类型对应的碳汇系数。碳汇系数综合国内外研究,结合长株潭城市群特征调整,具体数值见表 1。

表 1 土地利用类型对应碳汇系数

Table 1 Carbon sink coefficient corresponding to land use type

土地利用类型 Land-use type	耕地 Cropland	森林 Forest	草地 Grassland	灌木 Shrub	水域 Water	未利用地 Unused land
碳吸收系数 Carbon absorption coefficient/(t hm ⁻² a ⁻¹)	0.13	0.87	0.41	0.23	0.3	0.003

耕地、森林、草地、灌木、水域及未利用地的碳汇系数在长株潭城市群中各不相同。耕地因作物和管理方式差异,采用良好农业实践可提高碳汇,参考相关研究成果^[41]并结合长株潭城市群水稻种植情况,耕地碳汇系数设为 0.13 t hm⁻² a⁻¹。森林作为重要碳汇,通过光合作用吸收大量二氧化碳,结合亚热带湿润气候区特征^[42-43],森林碳汇系数定为 0.87 t hm⁻² a⁻¹。草地虽单位面积碳汇量较小,但仍能有效移除二氧化碳,结合当地情况及相关研究^[44],草地碳汇系数为 0.41 t hm⁻² a⁻¹。灌木丛介于森林与草地之间,也具备一定的碳汇能力,结合地区研究成果及灌木种类,灌木碳汇系数设定为 0.23 t hm⁻² a⁻¹^[45]。水域通过水生植物实现碳封存,鉴于长株潭城市群水系发达且与洞庭湖相邻,水域碳汇系数设定为 0.3 t hm⁻² a⁻¹^[46]。未利用地几乎无碳汇贡献,基于相关研究成果,其碳汇系数设为 0.003 t hm⁻² a⁻¹^[47]。这些系数的确定综合考量了国内外研究、自然条件及土地使用特点,为评估长株潭城市群蓝绿空间碳汇效能提供了科学基础。

2.2 标准差椭圆分析

标准差椭圆分析是一种经典的空间统计方法,用于分析地理要素的空间分布方向性。其主要元素的计算公式如下:

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n w_i x_i, \bar{Y} = \sum_{i=1}^n w_i y_i \quad (2)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 y_i^2 \right)^2 + 4 \left(\sum_{i=1}^n w_i^2 x_i y_i \right)^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 x_i y_i} \right) \quad (3)$$

$$\bar{x} = x_i - \bar{X}, \bar{y} = y_i - \bar{Y} \quad (4)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \cos\theta - w_i \bar{y}_i \sin\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}}, \sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \bar{x}_i \sin\theta - w_i \bar{y}_i \cos\theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \quad (5)$$

式中, x_i, y_i 分别表示第 i 个地理单元的经度和纬度坐标; \bar{X}, \bar{Y} 分别代表标准差椭圆中心的横坐标和纵坐标, 用于确定椭圆的重心位置; w_i 表示不同地理单元的权重; θ 表示标准差椭圆的方向角, 即正北方向顺时针到椭圆长轴的夹角; 而 σ_x 和 σ_y 则分别代表标准差椭圆长轴和短轴的长度。

2.3 模糊集定性比较分析

模糊集定性比较分析 (fsQCA) 融合了定性与定量分析的优势, 既兼顾案例的深度, 又确保分析的广度, 有效弥补了单一案例缺乏普适性和多案例定性分析不足的缺陷^[48]。长株潭城市群在经济发展、人口密度、产业结构及土地利用强度等维度差异显著, 这些因素对城市“减碳增汇”产生复杂的非线性影响。因此, 此研究采用 fsQCA 方法, 通过分析一致性和覆盖率指标, 探究多因素组合与城市碳汇之间的因果关联, 进而揭示提升城市碳汇的多元路径。fsQCA 通过一致性和覆盖率来检测驱动因子及其组合与协同效应之间的因果关系, 其计算公式如下:

$$\text{Coverage}(A_i \leq B_i) = \frac{\sum [\min(A_i, B_i)]}{\sum (B_i)} \quad (6)$$

$$\text{Consistency}(A_i \leq B_i) = \frac{\sum [\min(A_i, B_i)]}{\sum (A_i)} \quad (7)$$

式中, A_i 为城市 i 的协同作用对前因组合的隶属度; B_i 为城市 i 的协同作用对结果变量的隶属度。

此研究选取经济水平、产业结构、土地利用程度和人口密度作为核心解释变量, 其影响机制如下: ① 经济发展: 技术进步推动农业低碳转型, 间接增强碳汇能力。例如, 通过推广高效节水灌溉技术、精准施肥技术等, 可以减少农业生产中的碳排放, 同时提高农作物产量和质量, 进而增加土地碳汇能力。② 产业结构: 优化升级促进绿色产业发展, 减少高污染产业碳排放。这些产业在生产和消费过程中更加注重节能减排和环境保护, 有助于减少碳排放并促进碳汇的增加^[49]。③ 土地利用程度: 相关研究表明土地利用程度越低, 碳汇量通常越高。随着城市建设用地的不断扩张, 自然植被和湿地等碳汇区域被侵占, 导致整体碳汇量减少^[50]。④ 人口密度: 人口密度高的城市通常意味着更多的居民和更密集的经济活动, 这会导致能源消耗量的显著增加。能源消耗是碳排放的主要来源之一, 因此高人口密度城市的碳排放量往往也较高^[51]。

3 空间演化特征分析

3.1 长株潭城市群蓝绿空间碳汇测度结果及分布特征

根据长株潭城市群土地利用类型分析, 研究区域内的蓝绿空间主要由城市绿地和水域构成。其中, 水域作为城市蓝色空间的一部分, 而森林、草地、灌木则构成了城市绿色空间。值得注意的是, 未利用地并不属于蓝绿空间的范畴。基于上述分类, 本研究采用直接碳排放系数法, 并结合相关数据资料, 对长株潭城市群蓝绿空间的碳汇能力进行了评估。具体的测度结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 长株潭城市群碳汇量在 2008 年至 2022 年期间呈现出以下特征: 长沙地区碳汇量在观察期内总体保持相对稳定, 有小幅波动但整体在 2017 年后有所回升。从 2008 年的 63.592 万 t 至 2022 年的 60.055 万 t, 末期数值略低于初期, 这可能受到气候变化、土地利用变化以及人类活动等多种因素影响。然而长沙地区碳汇量在多数年份中仍能维持在较高水平, 显示出其生态系统在碳汇维持方面的稳定性和韧性。株洲地区碳汇量在观察期内波动较为明显。2008 年至 2017 年, 株洲地区的碳汇量从 72.905 万 t 下降至 2017 年的 63.229 万 t, 呈现显著的下降趋势。但自 2018 年起, 碳汇量开始回升, 并保持稳定增长, 2022 年达到 69.573 万

t。这一变化可能反映了株洲地区在生态保护方面的政策调整和实施效果,如退耕还林、植树造林等措施的推进以及城市化进程中土地利用方式的转变。湘潭地区碳汇量在观察期内相对稳定,波动幅度较小。尽管某些年份出现小幅下降,但整体上保持了平稳趋势。在 2008—2022 年期间,湘潭地区的碳汇量稳定维持在 22 万 t 至 23 万 t 的区间内,彰显了其生态系统在碳汇维持方面的稳定性和可持续性。从区域间的比较来看,株洲地区的碳汇量在长株潭城市群中始终保持领先地位,这一优势可能与株洲丰富的植被覆盖、独特的土地利用方式以及有效的生态保护政策密切相关。长沙地区的碳汇量紧随其后,而湘潭地区则相对较低。这种地区间的碳汇能力差异,表明了长沙、株洲和湘潭各区域在自然地理条件、经济发展水平以及人类活动强度等方面的不同特征。

表 2 2008—2022 年长株潭城市群蓝绿空间碳汇量

Table 2 Carbon sequestration of blue-green spaces in the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration from 2008 to 2022

年份 Year	长沙市蓝绿空间碳汇 Changsha blue-green space carbon sink/($\times 10^4$ t)			株洲市蓝绿空间碳汇 Zhuzhou blue-green space carbon sink/($\times 10^4$ t)			湘潭市蓝绿空间碳汇 Xiangtan blue-green space carbon sink/($\times 10^4$ t)		
	总计 Total	绿色空间 Blue space	蓝色空间 Green space	总计 Total	绿色空间 Blue space	蓝色空间 Green space	总计 Total	绿色空间 Blue space	蓝色空间 Green space
	2022	60.055	59.519	0.537	69.573	69.168	0.404	22.069	21.763
2021	59.972	59.409	0.563	68.926	68.503	0.424	21.862	21.536	0.326
2020	59.889	59.325	0.564	68.844	68.419	0.425	21.840	21.512	0.328
2019	59.813	59.246	0.567	68.761	68.335	0.426	21.859	21.531	0.328
2018	59.731	59.160	0.570	68.489	68.062	0.427	21.841	21.511	0.330
2017	59.611	59.027	0.584	53.229	52.878	0.350	21.903	21.565	0.337
2016	59.758	59.166	0.592	68.946	68.505	0.441	21.942	21.594	0.348
2015	59.725	59.129	0.596	69.375	68.931	0.444	21.939	21.586	0.353
2014	59.673	59.085	0.589	69.611	69.170	0.441	21.910	21.556	0.354
2013	59.878	59.293	0.585	69.931	69.493	0.438	20.814	20.464	0.349
2012	60.486	59.910	0.575	70.775	70.344	0.431	22.229	21.875	0.354
2011	61.198	60.623	0.575	71.235	70.804	0.431	22.405	22.045	0.361
2010	61.694	61.124	0.570	71.698	71.268	0.430	22.505	22.143	0.361
2009	62.784	62.212	0.572	72.274	71.843	0.431	22.710	22.350	0.360
2008	63.592	63.020	0.571	72.905	72.475	0.430	23.073	22.714	0.359

表 3 2008 年、2013 年、2018 年和 2022 年长株潭城市群不同空间的碳汇情况

Table 3 Carbon sequestration in different spaces of the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration in 2008, 2013, 2018, and 2022

年份 Year	2008	2013	2018	2022
总碳汇 Total carbon sink/($\times 10^4$ t)	159.569	150.623	150.061	151.697
蓝色空间碳汇 Blue space carbon sink/($\times 10^4$ t)	1.360	1.373	1.327	1.247
绿色空间碳汇 Green space carbon sink/($\times 10^4$ t)	158.209	149.250	148.734	150.450

长株潭城市群蓝绿空间和总体碳汇量在不同年份的变动情况如表 3 可知,总体碳汇量在 2008 年至 2022 年间呈现波动趋势。具体而言,2008 年总体碳汇量为 159.569 万 t,随后逐年下降至 2013 年总体碳汇量为 150.623 万 t,2018 年进一步降至 150.061 万 t。但到了 2022 年有所回升,总体碳汇量达到 151.697 万 t。而蓝色空间碳汇量则呈现出不同的变化:2008 年至 2013 年略有增长,从 1.360 万 t 增至 1.373 万 t,随后逐年下降,2018 年降至 1.327 万 t,2022 年继续下降至 1.247 万 t。相比之下,绿色空间碳汇量作为总体碳汇量的核心构成部分,其变化趋势与总体碳汇量呈现出高度的相似性。自 2008 年的 158.209 万 t 起,绿色空间碳汇量逐年下降至 2013 年的 149.250 万 t,继而在 2018 年进一步微调至 148.734 万 t,最终在 2022 年实现回升,达到 150.450 万 t。值得注意的是,蓝色空间碳汇量在 2013 年攀至峰值 1.373 万 t 后,便持续下跌,至 2022 年已下降约

9.177%,这表明蓝色空间在碳汇贡献上的逐渐减弱。而绿色空间碳汇量,尽管也经历了一定的波动,但始终保持在高位,对总体碳汇量的贡献稳居主导地位。

水域、灌木、草地、森林和耕地这五大土地利用类型的碳汇贡献率随时间起伏各异,图 1 展示了不同类型土地碳汇量在不同年份间的显著变动情况。首先,水域作为一类特殊的土地利用类型,其碳汇量在 2008 年达到了 4.534 万 t,但至 2022 年已经显著下降至 4.156 万 t,这表明水域的碳汇功能可能在逐渐减弱,可能与水资源管理、气候变化或人类活动等因素有关。森林碳汇量则展现出相对稳定的态势,虽在不同年份间有所波动,但整体变化幅度不大,始终保持在一定范围内,凸显了森林在维持生态系统碳汇功能中的核心作用。然而,在 2008—2022 年间,长株潭城市群的灌木碳汇量却呈现出逐年减少的趋势,这可能与长株潭城市群快速城镇化进程中灌木林地被侵占现象有关。草原和耕地的碳汇量则更为复杂多变。草原在 2008—2013 年间碳汇量有所增加,随后又呈现下降趋势;而耕地碳汇量则呈现出逐步上升的趋势,尤其在 2018—2022 年间,上升幅度尤为明显,这表明耕地在吸收和储存碳方面具有较大潜力和稳定性,是应对气候变化的重要资源。

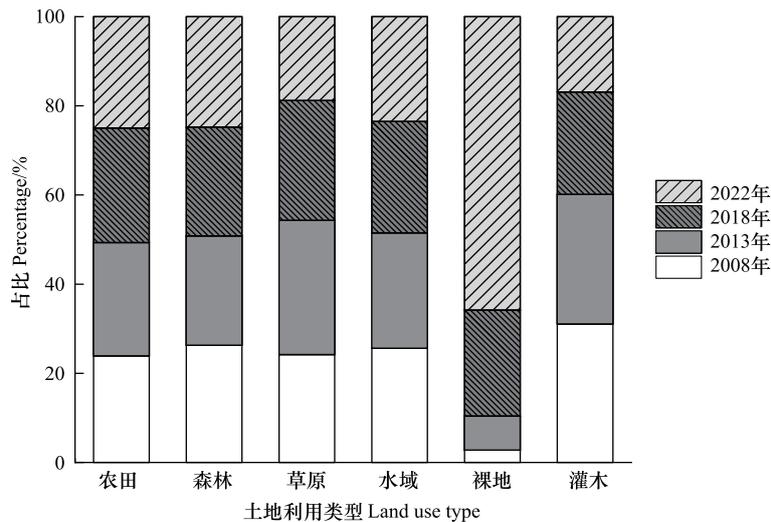


图 1 长株潭城市群各地类在 2008 年、2013 年、2018 年和 2022 年碳汇占比

Fig.1 The proportion of carbon sinks by different regions in the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration in 2008, 2013, 2018, and 2022

3.2 长株潭城市群蓝绿空间碳汇的空间格局

图 2 展示了 2008 年、2013 年、2018 年以及 2022 年长株潭城市群蓝绿空间碳汇水平的空间分布状况。从图 2 可以观察到,长株潭城市群的蓝绿空间碳汇量在 2008—2022 年间经历了显著的动态演变过程。2008 年,碳汇高值区集中分布于湘江沿岸湿地、昭山绿心及西部山区,连片特征明显,城市建成区内的碳汇高值区仅局

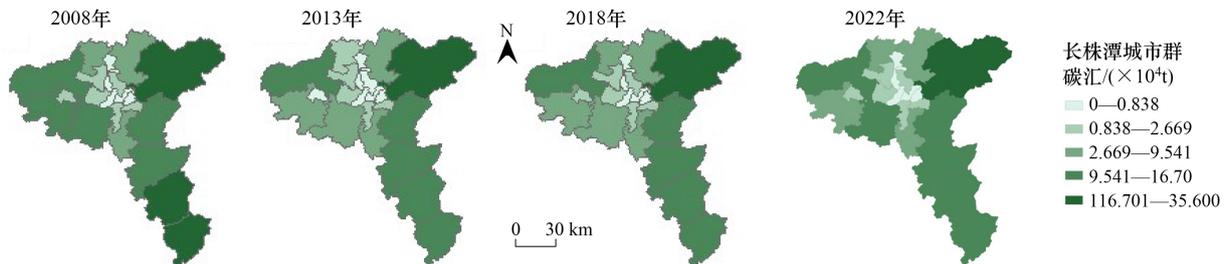


图 2 2008 年、2013 年、2018 年和 2022 年长株潭城市群蓝绿空间碳汇测度水平的空间分布图

Fig.2 Spatial distribution map of carbon sink measurement level in blue-green spaces of the changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration in 2008, 2013, 2018, and 2022

限于长沙、株洲核心区。至 2013 年,低碳汇区域加速大幅扩张,由长沙、株洲、湘潭主城区不断向外蔓延。同时湘潭东部湿地及西部山区深色区域明显缩减,表明该地区自然生态空间可能受到了挤压。2018 年,长沙南部绿心与浏阳河流域湿地地区颜色加深,但株洲周边浅色范围持续扩大,可能受到了产业污染的持续性影响。2022 年,碳汇空间分异进一步加剧,长沙部分区域形成深色斑块,而株洲与湘潭交界处逐渐形成浅色走廊。整体来看,碳汇高值区逐渐从连片自然空间转向人工修复斑块,低值区沿城市扩张轴带延伸,未来需强化湘江生态廊道连通性修复,并严格管控城市增长边界以平衡开发与保护矛盾。

此研究采用标准差椭圆(Standard Deviational Ellipse,简称 SDE)这一空间分析技术,分析碳汇水平在长株潭城市群蓝绿空间中的空间分布特性,包括其中心性、方向性和聚集性等关键要素。图 3 为长株潭城市群碳汇水平标准差椭圆图示。

依据表 4 所示的长株潭城市群碳汇的标准差椭圆分析参数,表明 2008—2022 年,长株潭城市群的碳汇空间分布格局展现出高度的稳定性。碳汇的核心区域始终牢牢地集聚在城市群内部,其空间重心的经纬度坐标并未发生显著的偏移;同时,碳汇活动在“东北-西南”方向上的分布范围以及与其垂直方向上的覆盖范围均保持着稳定,未见明显的收缩或扩张迹象,椭圆的扁率也维持在一个相对恒定的水平,这充分说明了碳汇空间分布的方向性强度并未发生根本性的变化。

但值得注意的是,标准差椭圆的偏移角呈现出微弱的顺时针旋转趋势,由 2008 年的 151.558°旋转至 2022 年的 151.752°,这一细微的变化表明风向、水系等自然地理要素可能对长株潭城市群碳汇空间格局产生了某种微妙的影响。然而,这种影响并未突破原有的分布框架,长株潭城市群的碳汇空间结构依然保持着较强的韧性,未来优化应基于现有核心区域,重点提升空间利用效率,而非大规模调整格局。

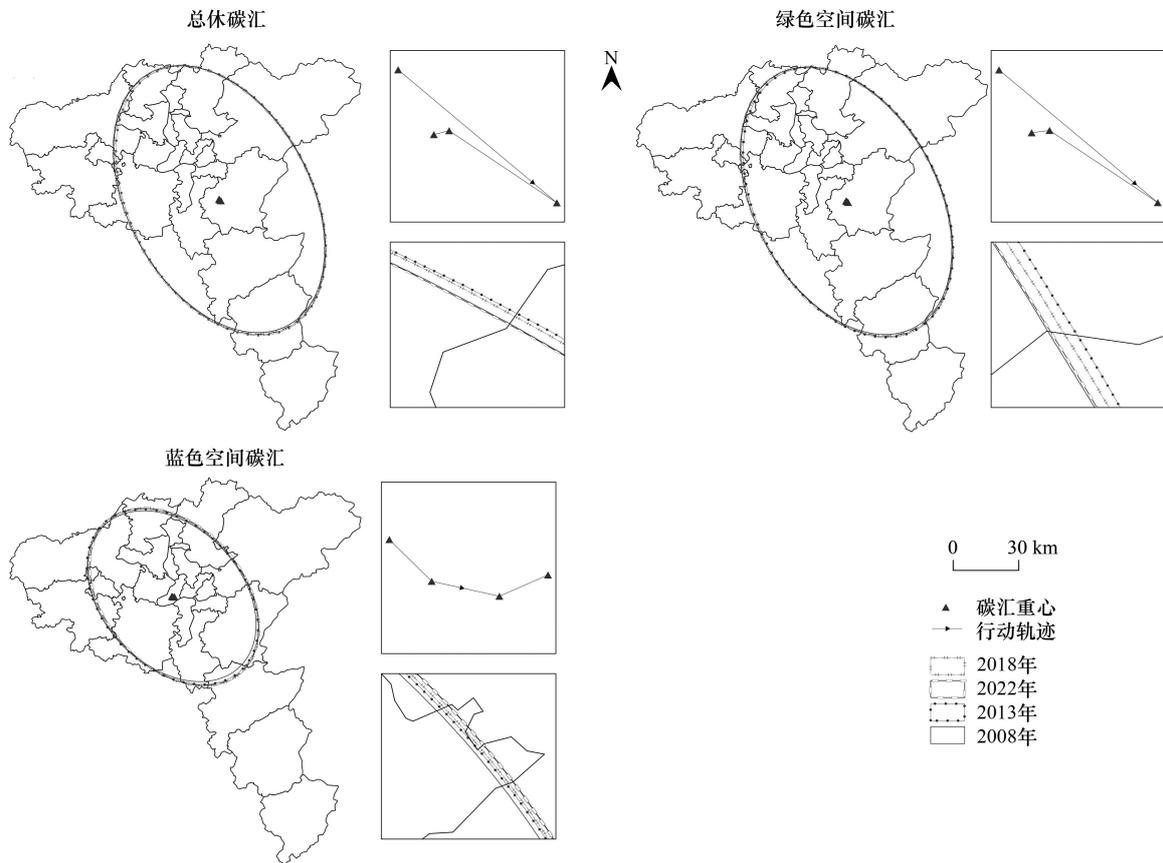


图 3 长株潭城市群蓝绿空间碳汇水平的标准差椭圆分布图

Fig.3 Standard deviation elliptical distribution of carbon sequestration levels in blue - green spaces of changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration

表 4 长株潭城市群蓝绿空间碳汇水平的标准差椭圆中心参数

Table 4 Standard deviation ellipse center parameter of carbon sink level in blue-green space of changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration

蓝绿空间总碳汇/($\times 10^4$ t) Total carbon sink	周长 Perimeter/km	面积/ km^2 Area	中心经度/($^\circ$) Central longitude	中心纬度/($^\circ$) Central latitude	偏移角度/($^\circ$) Offset angle
2022	5.061	1.885	113.302	27.609	151.752
2018	5.072	1.893	113.304	27.610	151.900
2013	5.059	1.882	113.313	27.604	152.602
2008	5.045	1.875	113.300	27.615	151.558
绿色空间总碳汇/($\times 10^4$ t) Green space carbon sink	周长/km Perimeter	面积/ km^2 Area	中心经度/($^\circ$) Central longitude	中心纬度/($^\circ$) Central latitude	偏移角度/($^\circ$) Offset angle
2022	5.066	1.889	113.305	27.607	151.885
2018	5.077	1.897	113.307	27.608	152.052
2013	5.064	1.886	113.316	27.601	152.778
2008	5.051	1.879	113.302	27.613	151.710
蓝色空间总碳汇/($\times 10^4$ t) Blue space carbon sink	周长/km Perimeter	面积/ km^2 Area	中心经度/($^\circ$) Central longitude	中心纬度/($^\circ$) Central latitude	偏移角度/($^\circ$) Offset angle
2022	3.637	1.000	112.998	27.859	139.030
2018	3.662	1.012	112.993	27.857	138.595
2013	3.645	1.006	112.986	27.859	137.342
2008	3.570	0.970	112.982	27.863	136.643

3.3 组态提升路径分析

3.3.1 组态变量选择与校准

本文采用直接碳核算系数法,选用 2008—2022 年间长株潭城市群城市蓝绿空间的碳汇均值作为结果变量。同时,选取经济水平、人口密度、产业结构和土地利用强度这四个因素作为解释条件。各变量的定义如下:

经济发展选取人均地区生产总值来衡量。产业结构选取第二产业占地区生产总值的比重来衡量。人口密度选取地区人口密度来衡量人口因素。土地利用程度选用长株潭城市建设用地面积和长株潭城市群总面积的比值表征土地利用程度。

区别于传统回归模型,fsQCA 需对变量进行模糊集校准以支持组态分析。本研究将前因与结果变量数据按三个阈值(上四分位数 25%、中位数 50%、下四分位数 75%)转换为“完全不隶属-交叉点-完全隶属”状态,如表 5 所示。此校准方法参考相关研究^[52],通过四分位点划分变量隶属度,结合模糊集处理增强数据间非线性关系的解析能力,使多因素组合效应分析更贴合现实复杂情境,提升结论解释力与决策参考价值。

表 5 变量校准锚点

Table 5 Calibrated anchor point for variables

集合 Collection	模糊集校准 Fuzzy-set calibration		
	完全隶属 Affiliated	交叉点 Intersection	完全不隶属 Unaffiliated
经济发展 Economic development	131362.500	66443.000	31842.500
人口密度 Population density	6830.687	2930.000	1257.700
产业结构 Industrial structure	60.061	52.440	39.516
土地利用度 Land utilization rate	0.651	0.275	0.157
碳汇 Carbon sink	71.281	59.813	21.841

3.3.2 必要性检验

fsQCA 的必要性检验通过一致性与覆盖率判断变量是否为结果的必要条件,当某一变量的一致性大于 0.

9 时,变量是结果发生的必要条件,须存在于所有因果路径中,并纳入路径分析。其次是用覆盖率衡量条件组合对结果的解释范围,由案例占比计算。本文分别对提升城市群蓝绿空间碳汇的路径和非提升城市群蓝绿空间碳汇的路径进行了必要性检验,以确定是否存在某些前因条件属于必要条件。表 6 显示,在提升碳汇的路径中以及非提升碳汇的路径中,均没有发现某个前因条件达到必要条件的标准。这说明无论是提升还是非提升碳汇的路径,都是由多个前因条件组合而成的。因此,有必要进一步进行组态分析,以揭示这些条件组合的具体作用机制。

表 6 单因子必要性分析结果

Table 6 The results of single factor necessity

条件变量 Conditional variable	高条件变量 High conditional variable		非高条件变量 Non-high conditional variable	
	一致性 Consistency level	覆盖度 Coverage	一致性 Consistency level	覆盖度 Coverage
	经济发展 Economic development	0.580	0.653	0.639
人口密度 Population density	0.652	0.867	0.641	0.647
产业结构 Industrial structure	0.709	0.758	0.523	0.647
土地利用效率 Land utilization rate	0.658	0.873	0.654	0.661

3.3.3 驱动路径识别与分类

本研究采用 fsQCA3.0 软件,设定一致性阈值为 0.75,剔除低效案例。通过分析中间解与简约解的布尔组合,识别出提升城市蓝绿空间碳汇的 2 条核心路径,涉及 4 个前因变量组合(经济水平、产业结构、土地利用程度及人口密度),其覆盖率为 0.608,这意味着这 4 个前因变量能够解释 60.8% 的案例。同时,一致性达到 0.902,表明这两条作用路径对结果变量具有较强的解释力。此结论为优化城市生态空间布局及低碳政策设计提供了关键依据。

表 7 长株潭城市群蓝绿空间碳汇组态结果

Table 7 Carbon sink configuration results of blue-green space in changsha zhuzhou xiangtan urban agglomeration

解释因子 Explanatory factor	组态 Configuration	
	组态 1 Configuration 1	组态 2 Configuration 2
经济发展 Economic development	●	●
人口密度 Population density	⊗	⊕
产业结构 Industrial structure	⊗	⊗
土地利用效率 Land utilization rate	⊕	⊗
一致率 Consistency rate	0.910	0.903
原始覆盖率 Raw coverage rate	0.597	0.591
唯一覆盖率 Unique coverage rate	0.017	0.011
总体一致率 Overall consistency rate		0.902
总体覆盖率 Overall coverage rate		0.608

●和⊕分别表示核心条件存在与不存在;○和⊗分别表示边缘条件存在与不存在

(1) 土地利用效率主导的碳汇提升路径

此路径以经济发展水平与土地利用程度为核心条件。经济发展水平提升可通过技术进步和资金投入支持生态修复与低碳技术应用,从而正向促进碳汇能力;而土地利用程度过高(如建设用地扩张、绿地缩减)则直接削弱生态系统的固碳功能,形成对碳汇的负向作用。路径中所有要素的联动表现为:经济发展驱动产业结构升级(如降低高耗能产业占比)和人口集聚,但过度城市化导致土地利用强度超过生态阈值,反而抑制碳汇增长。因此,该路径需通过优化用地结构(如划定生态红线、增加绿地比例)平衡发展需求与生态承载力。

(2) 人口密度主导的耦合协调度提升路径

此路径的核心在于经济发展水平与人口密度的交互作用。经济发展通过提高资源利用效率和环境治理能力为碳汇提升提供基础,但人口密度过高会加剧能源消耗、交通排放和建筑占地,导致碳汇空间被压缩。具体表现为:人口集聚虽能推动产业集约化发展(如服务业占比提升),但若超出城市生态容量,会通过热岛效应、绿地碎片化等机制降低碳汇效能。该路径的关键在于通过智慧城市规划(如立体绿化等)实现人口分布与生态空间的动态适配。

综上两条路径均需协调多要素的系统性影响:经济发展是双刃剑,既提供技术资本支持,也可能通过粗放扩张破坏生态;人口密度与土地利用程度作为空间载体指标,其负向作用凸显人类活动与自然系统的冲突。碳汇提升需以“低冲击开发”为导向,通过国土空间规划约束土地利用强度,利用经济杠杆引导低碳产业布局,同时通过生态廊道建设抵消高密度建成区的碳汇损失。长株潭城市群需在“紧凑型城市”与“生态网络修复”的双重策略下,建立动态监测机制,确保核心条件的正向协同效应最大化。

3.3.4 稳健性检验

为检验研究结果的稳健性,本研究将一致性阈值调整至 0.7 进行敏感性分析,表 8 结果显示长株潭城市群碳汇提升的前因组合路径仍为原有组态的子集,验证了核心结论的可靠性。相较于传统基于单一因素的对策研究,本文通过 fsQCA 方法揭示驱动因子间的协同效应,系统解析“经济-产业-土地-人口”多维联动的碳汇提升路径,为制定差异化政策组合提供了理论依据。

表 8 fsQCA 稳健性检验组态结果

Table 8 FsQCA robustness test configuration results

解释因子 Explanatory factor	组态 Configuration	
	组态 1 Configuration 1	组态 2 Configuration 2
经济发展 Economic development	●	●
人口密度 Population density	⊗	⊕
产业结构 Industrial structure	⊗	⊗
土地利用效率 Land utilization rate	⊕	⊗
一致率 Consistency rate	0.770	0.773
原始覆盖率 Raw coverage rate	0.891	0.896
唯一覆盖率 Unique coverage rate	0.015	0.020
总体一致率 Overall consistency rate	0.911	
总体覆盖率 Overall coverage rate	0.768	

4 研究结论与建议

4.1 研究结论

通过对 2008—2022 年长株潭城市群蓝绿空间碳汇总量时空格局进行分析,基于标准差椭圆和组态提升路径分析方法,探析长株潭城市群蓝绿空间碳汇的时空分异特征及影响因素,其主要结论如下:

(1) 2008—2022 年,长株潭城市群蓝绿空间碳汇总量呈现“先降后升”的波动特征,多年均值为 151.56 万 t。其中,2018 年为关键转折点:2008—2018 年蓝绿空间碳汇总量持续下降,2018 年后逐步回升。从土地利用类型看,绿色空间(森林、草地、耕地)是主要碳汇来源,其变化与总体趋势基本一致,但内部差异显著:森林碳汇量最为稳定,始终维持在 15 万 t 左右;草地碳汇量在 2008—2013 年短暂增长后转为下降;耕地则表现突出,碳汇量持续上升且 2018 年后增速加快,成为驱动总量回升的重要力量。相较之下,蓝色空间(水域)碳汇量持续衰减,从 2008 年的 4.534 万 t 降至 2022 年的 4.156 万 t。

(2) 研究期内,长株潭城市群蓝绿空间碳汇在空间上存在一定差异。株洲地区蓝绿空间碳汇量在三个地区中始终保持最高水平,多年平均碳汇总量为 68.971 万 t;长沙地区蓝绿空间碳汇量次之,多年平均碳汇总量为 60.524 万 t;而湘潭地区蓝绿空间碳汇量相对较低,多年平均碳汇总量为 22.060 万 t。研究期内长株潭城市

群蓝绿空间碳汇的变动保持了一定程度的稳定性,空间分布中心呈现“东北-西南”的空间分布格局,西南地区对蓝绿空间碳汇空间格局的影响逐渐增强。

(3)从组态分析结果来看,不论是社会因素、经济因素还是自然因素均对长株潭城市群蓝绿空间碳汇变化有显著影响,且多因素组态对碳汇的影响力要强于单因子。通过 fsQCA 组态提升路径分析可以发现,土地利用程度和人口密度分别主导了两条长株潭城市群碳汇的提升路径,尤其是城市土地利用程度与经济发展、城市人口密度与经济发展的共同作用对城市碳汇的影响最为显著。其中,长株潭城市群的经济对区域碳汇产生了较强的正向影响,而人口密度和土地利用程度则对碳汇产生了较强的负向影响。

4.2 政策建议

结合上述关于长株潭城市群蓝绿空间碳汇总量时空格局的研究结论,本文提出如下相关政策建议:

第一,深化“三区三线”空间管控体系改革,着力构建国土开发与生态保护协同增效的新机制。具体而言,各级政府需严格执行生态保护红线、永久基本农田、城镇开发边界三条控制线的协同管控机制,依托国土空间规划的系统性统筹功能,科学布局生态、农业、城镇三类空间结构。同时生态环境部门应逐步开展实施生态空间碳汇效能提升工程,积极推进湿地生态系统修复、森林质量精准提升等生态固碳工程,确保区域蓝绿空间面积增长率持续高于建设用地扩张速度。此基础上,各级政府应加快完善基于“三区三线”的空间治理政策工具组合,例如对生态保护红线区内实施的低碳农业技术推广项目、林业碳汇项目开发给予专项财政奖补,同时严格实施城镇开发边界内新建产业项目的单位 GDP 碳排放强度准入管控。而自然资源主管部门应构建“三线”动态监测预警系统,重点防范城镇空间无序扩张导致的生态空间碳汇能力衰减风险,通过建立产业绿色转型与碳汇效能提升的协同机制,确保产业结构绿色化调整与生态系统碳汇能力提升形成良性互动。

第二,强化蓝绿空间碳汇导向的空间治理体系,协同构建多维度智慧补偿机制。各级政府各部门需以 TOD 4.0 模式为实施框架,通过系统集成站城融合开发与碳汇增益功能,例如交通管理部门在轨道交通沿线植入需求响应式公交系统,金融监管机构联动碳汇交易市场实现减碳增汇的双重收益等。针对高密度建成区的特殊需求,相关部门须建立包含碳汇效能、人口密度与经济强度的三维动态模型,对超载区域实施基于生态占补平衡与碳配额交易的智能调控机制。当前数字孪生与区块链技术是识别绿地碎片化热点以及修复生态廊道的最新范式,这要求各级部门通过嵌入生物多样性碳汇增益指标,实现碎片化碳汇资产化;并同步推进零碳产业园与服务产业集群融合,以屋顶光伏、微电网和碳捕集技术打造负碳园区,配套碳足迹标签制度和碳汇司法赔偿机制,结合碳汇质押贷款等绿色金融工具,形成“技术迭代-市场交易-司法保障”全链条闭环。

第三,构建气候适应型发展-保护协同治理体系,创新自然受益型经济模式。各级政府部门应首先创建“碳减排-生物多样性保护-经济高质量发展”三维政策集成框架。其一,应试点转型金融工具(如可持续发展挂钩债券)引导传统产业绿色跃迁。其二,建立生态产品价值实现机制,通过碳汇交易、生态银行等市场化手段激活自然资本。其三,搭建数字孪生驱动的全域生态资产监测网络,应用区块链技术实现城市紧凑度指数与生态韧性指标的实时耦合分析,构建基于人工智能算法的产业准入负面清单动态优化模型。在此基础上,相关部门应实施“空间精准调控 2.0”计划,空间维度上采用“零碳智慧园区+生物多样性增益区”组合布局模式,技术创新维度上重点推广蓝碳增汇、生物碳封存等负排放技术应用,通过空间-技术双轮驱动构建城市代谢补偿系统。通过上述系统性改革,最终实现区域发展模式从被动式碳汇损失补偿向主动型碳中和与自然资本正向增长的范式转变。

参考文献(References):

- [1] 刘亦文, 邓楠. 碳排放权交易制度对减污降碳协同治理的影响研究. 湖南工业大学学报, 2024, 38(2): 65-74.
- [2] 王敏, 石乔莎. 城市高密度地区绿色碳汇效能评价指标体系及实证研究——以上海市黄浦区为例. 中国园林, 2016, 32(8): 18-24.
- [3] 杜红玉. 特大型城市“蓝绿空间”冷岛效应及其影响因素研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- [4] Veerkamp C, Schipper A M, Hedlund K, Lazarova T, Nordin A, Hanson H I. A review of studies assessing ecosystem services provided by urban green and blue infrastructure. Ecosystem Services, 2021, 52: 101367.

- [5] Yang G Y, Yu Z W, Jrgensen G, Vejre H. How can urban blue-green space be planned for climate adaption in high-latitude cities? a seasonal perspective. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101932.
- [6] 杨元合, 石岳, 孙文娟, 常锦峰, 朱剑霄, 陈蕾伊, 王欣, 郭焱培, 张宏图, 于凌飞, 赵淑清, 徐亢, 朱江玲, 沈海花, 王媛媛, 彭云峰, 赵霞, 王襄平, 胡会峰, 陈世苹, 黄玫, 温学发, 王少鹏, 朱彪, 牛书丽, 唐志尧, 刘玲莉, 方精云. 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. *中国科学: 生命科学*, 2022, 52(4): 534-574.
- [7] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon and climate change. *Landscape Ecology*, 2013, 28(4): 583-597.
- [8] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458: 1009-1013.
- [9] Hu H F, Wang S P, Guo Z D, Xu B, Fang J Y. The stage-classified matrix models project a significant increase in biomass carbon stocks in China's forests between 2005 and 2050. *Scientific reports*, 2015, 5: 11203.
- [10] Zhang H Y, Feng Z K, Chen P P, Chen X F. Development of a tree growth difference equation and its application in forecasting the biomass carbon stocks of Chinese forests in 2050. *Forests*, 2019, 10(7): 582-582.
- [11] 王晶懋, 高洁, 孙婷, 韩都, 王一凡. 双碳目标导向下的绿色生态空间碳汇能力优化设计. *中国城市林业*, 2023, 21(4): 33-42.
- [12] 刘颂, 张浩鹏. 多尺度城市绿地碳汇实现机理及途径研究进展. *风景园林*, 2022, 29(12): 55-59.
- [13] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 周光益, 陈步峰. 我国热带天然林植被 C 贮存量的估算. *林业科学研究*, 1998(2): 41-47.
- [14] 胡砚秋, 苏志尧, 李佩瑗, 李文斌. 林分生物量碳计量模型的比较研究. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(1): 84-88.
- [15] Zhang Y, Meng W Q, Yun H F, Xu W B, Hu B B, He M X, Mo X Q, Zhang L. Is urban green space a carbon sink or source? —a case study of China based on LCA method. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 94: 106766.
- [16] 宋菊芳, 江雪妮, 郭贞妮, 吴金宁, 刘学军. 城市蓝绿空间特征参数与地表温度的关联量化分析. *中国城市林业*, 2023, 21(1): 20-26.
- [17] 李萱, 龚苑红, 覃盟琳, 朱梓铭. 海岸带城市蓝绿空间碳汇基础设施网络分析——以广西北部湾为例. *广西科学*, 2024, 31(2): 213-223.
- [18] Yang F, Yousefpour R, Hu Y K, Zhang Y, Li J Y, Wang H C. Assessing the efficiency of urban blue-green space in carbon-saving: take a high-density urban area in a cold region as an example. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 479: 144017.
- [19] 李建春, Wendy C Y, 袁文华. 城市蓝绿空间降温绩效评估及提升策略——以北京市为例. *地理科学*, 2024, 44(8): 1376-1386.
- [20] 钟彦萍, 张思凝, 宋昊翔, 臧家昕. 成都市城市蓝绿系统碳储量评估及优化策略研究. *广东园林*, 2024, 46(3): 69-74.
- [21] 袁旻洋, 郭蔚, 汤思琪, 杨明珠, 汪瑞军. 城市蓝绿空间格局对碳固存的影响测度及关键指标. *中国城市林业*, 2023, 21(6): 6-16.
- [22] 殷利华, 杭天, 徐亚如. 武汉园博园蓝绿空间碳汇绩效研究. *南方建筑*, 2020(3): 41-48.
- [23] 伍丹, 朱康文, 张晟, 黄昌前, 李剑. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的成渝经济区碳储量演化分析. *三峡生态环境监测*, 2022, 7(2): 85-96.
- [24] Francini G, Hui N, Jumpponen A, Kotze J, Setälä H. Vegetation type and age matter: How to optimize the provision of ecosystem services in urban parks. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 66: 127392.
- [25] 何侃, 林涛, 吴建芳, 随梦飞, 刘恋, 丁国昌. 基于空间优先级的福州市中心城区绿色基础设施网络构建. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1424-1432.
- [26] 宋加颖, 孟丹, 冯鹏, 刘勇洪, 胡非凡, 李小娟. 北京城市副中心及周边区域蓝绿空间景观格局及降温效应评估. *园林*, 2024, 41(4): 86-94.
- [27] 徐可西, 詹冰倩, 姜春, 鲍海君, 苏婕妤, 何旻宇. 碳排放约束下的城市空间格局优化: 理论框架、指标体系与实践路径. *自然资源学报*, 2024, 39(3): 682-696.
- [28] 屈子雅, 张青萍, 张瑞, 王雨洁, 李兰心. 基于双重绩效的城市蓝绿空间布局优化研究——以上海市普陀区为例. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(4): 235-243.
- [29] 张芳源, 贾艳艳, 郑海燕. 沿黄城市蓝绿空间时空演变及驱动力分析——以泰安市为例. *西北林学院学报*, 2024, 39(2): 148-155.
- [30] 张趁, 张楠, 朱佩娟, 秦书茜, 张勇. 城市蓝绿空间公共性评价及影响因素——以湖南长沙为例. *热带地理*, 2025, 45(1): 128-142.
- [31] 王伟武, 梁爽, 杨涵涵. 城市滨水蓝绿空间冷岛效应的影响因素与分布特征——以武汉、南京和杭州为例. *西部人居环境学刊*, 2023, 38(6): 22-29.
- [32] 王本礼, 王也, 曾超群. 长株潭绿心地区碳汇用地时空演变研究. *经济地理*, 2023, 43(6): 176-182.
- [33] 吴炳伦, 成明, 全思湘, 施招, 孙华, 温仕彬, 饶宸. 长株潭城市群生态绿心地区森林生态系统碳储量评估分析. *西北林学院学报*, 2024, 39(6): 135-144.
- [34] 田一豆, 赵先超. 基于 Markov-PLUS 模型的长株潭城市群建设用地扩张模拟及碳排放响应分析. *生态学报*, 2024, 44(1): 129-142.
- [35] 刘贤赵, 王一笛, 肖海, 陈铸, 王天浩, 罗政英. 长株潭都市圈碳盈亏时空变化及其驱动因素. *生态学报*, 2025, 45(2): 669-684.
- [36] 周姝含, 曹永强, 么嘉棋, 王菲, 常志冬. 东北三省碳源/汇和碳盈亏时空分布与影响因素. *生态学报*, 2023, 43(22): 9266-9280.

- [37] 欧阳晓, 贺清云, 朱翔. 多情景下模拟城市群土地利用变化对生态系统服务价值的影响——以长株潭城市群为例. 经济地理, 2020, 40(1): 93-102.
- [38] 李键, 毛德华, 蒋子良, 李科. 长株潭城市群土地利用碳排放因素分解及脱钩效应研究. 生态经济, 2019, 35(8): 28-34, 66.
- [39] 欧阳晓, 朱翔, 贺清云. 基于空间区位条件的长株潭城市群城市用地扩张研究. 经济地理, 2020, 40(5): 183-190.
- [40] 胡国霞, 雷国平, 周浩, 路昌, 赵宇辉. 黑龙江省土地利用变化的碳排放效应研究. 水土保持研究, 2015, 22(6): 287-292.
- [41] 李硕硕, 李汝资, 刘耀彬, 邓伟凤, 刘澄浩, 魏国恩. 环鄱阳湖区县域城镇化对碳收支平衡的影响. 地理研究, 2023, 42(8): 2245-2263.
- [42] 方精云, 郭兆迪, 朴世龙, 陈安平. 1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007(6): 804-812.
- [43] 魏燕茹, 陈松林. 福建省土地利用碳排放空间关联性与碳平衡分区. 生态学报, 2021, 41(14): 5814-5824.
- [44] 张赫, 彭千芮, 王睿, 强文丽, 张建勋. 中国县域碳汇时空格局及影响因素. 生态学报, 2020, 40(24): 8988-8998.
- [45] 孔东升, 张灏. 张掖黑河湿地自然保护区生态服务功能价值评估. 生态学报, 2015, 35(4): 972-983.
- [46] 谭德明, 谭卓成, 李家裕, 吴大维, 张彩平. 基于碳平衡分区的多目标土地利用格局优化——以长株潭城市群为例. 水土保持通报, 2025, 45(1): 276-285.
- [47] 黄汉志, 贾俊松, 刘淑婷, 陈地兰. 2000—2020年长江经济带碳汇时空演变及影响因素分析. 环境科学研究, 2023, 36(8): 1564-1576.
- [48] 彭永涛, 侯彦超. 区域创新能力提升条件组态路径研究——基于中国内地29个省市的QCA分析. 科技进步与对策, 2020, 37(23): 54-62.
- [49] 姜乐恒, 韩笑, 龙天娥, 马涛, 张家川. 黄河三角洲植被碳汇时空格局及其影响因素. 东北林业大学学报, 2024, 52(8): 95-104.
- [50] 刘耀彬, 邓伟凤, 李硕硕, 柏玲. 基于碳汇潜力的碳排放空间关联网络结构特征及影响因素——以长江中游城市群为例. 中国人口·资源与环境, 2024, 34(3): 1-15.
- [51] 李建豹, 揣小伟, 周艳. 江苏省县域碳排放时空演化及影响因素分析. 生态经济, 2023, 39(7): 36-44.
- [52] 昂昊, 吴成颂. 内生环境如何决定商业银行绿色信贷发展——基于NCA与fsQCA方法. 金融经济研究, 2024, 39(2): 42-57.