北京市通州区公园绿地生物多样性保护与碳汇的多效益统计分析

魏 嘉

北京林业大学经济管理学院 北京

【摘要】在全球气候变化与城市可持续发展的背景下，生物多样性保护与碳汇能力提升的协同效益成为生态保护研究的重要课题。北京通州区作为北京城市副中心，肩负着优化生态服务功能与实现碳中和目标的双重使命。本研究基于基于 2009 年生物多样性群落调查数据、2000—2023 年经济统计与碳汇监测数据，运用统计分析方法，量化生物多样性与碳汇能力对经济的影响，揭示二者之间的协同关系及其驱动机制；同时通过构建生物多样性评价体系、碳汇评价体系以及多效益统计分析模型等，全面评估了生物多样性保护与碳汇的多重效益，包括生态效益、经济效益和社会效益。研究结果为通州区生态保护策略的优化提供科学依据，也为全球城市区域协同治理提供参考。研究建议通过优化产业结构、推广混交林与技术创新、构建生态廊道等措施，进一步提升通州区的生物多样性保护与碳汇能力，推动区域可持续发展。

【关键词】生物多样性；公园绿地；碳汇；经济；多效益协同

【基金项目】华南植物资源研发中心技术推广平台科技创新专项-城市森林生物多样性提升技术研究与示范应用项目

【收稿日期】2026 年 2 月 5 日 【出刊日期】2026 年 6 月 3 日 【DOI】10.12208/j.aee.20260001

Multi-benefit statistical analysis of biodiversity conservation and carbon sink in parks and green spaces of Tongzhou District, Beijing

Jia Wei

School of Economics and Management, Beijing Forestry University, Beijing

【**Abstract**】In the context of global climate change and sustainable urban development, the synergistic benefits of biodiversity conservation and carbon sink capacity improvement have become an important topic in ecological protection research. As the sub-center of Beijing, Tongzhou District of Beijing shoulders the dual mission of optimizing ecological service functions and achieving the goal of carbon neutrality. Based on the 2009 biodiversity community survey data, along with economic statistics and carbon sink monitoring data from 2000 to 2023, this study uses statistical analysis methods to quantify the impacts of biodiversity and carbon sink capacity on the economy, and reveals the synergistic relationship between the two and their driving mechanisms. Simultaneously, by constructing a biodiversity evaluation system, a carbon sink evaluation system, as well as a multi-benefit statistical analysis model, this study comprehensively assessed the multiple benefits of biodiversity conservation and carbon sink, including ecological, economic, and social benefits. The results of this study provide a scientific basis for the optimization of ecological protection strategies in Tongzhou District, and also provide a reference for global urban-regional collaborative governance. It is suggested that the biodiversity conservation and carbon sink capacity of Tongzhou District should be further improved by optimizing the industrial structure, promoting mixed forests and technological innovation, and building ecological corridors, so as to promote the sustainable development of the region.

【**Keywords**】Biodiversity; Park green spaces; Carbon sink; Economy; Multi-benefit synergy

作者简介：魏嘉，女，本科生，主要研究方向：经济统计学。

1 引言

在当今全球气候变化的大背景下，生物多样性保护与碳汇功能提升已成为国际社会广泛关注的焦点议题[1]。生物多样性是地球生命的基石，它不仅维持着生态系统的稳定性和可持续性，还为物种生存与演化提供着保障。城市公园绿地生态系统作为城市生态系统的关键组成部分以及城市中唯一的自然碳汇，不仅能够为城市居民提供休闲游憩空间，更在生物多样性保护、碳汇等生态系统服务方面发挥着不可替代的作用[2,3]。

北京市通州区在城市建设过程中高度重视生态环境保护与建设，不断加大公园绿地的建设力度，积极推动生态环境质量改善。截至 2024 年，通州区已初步构建起比较完善的公园绿地体系，城市绿化覆盖率显著提升，人均公园绿地面积不断增加，为生物多样性保护与碳汇功能提升创造了良好条件[4,5]。然而近些年来全球的气候变化导致极端天气频发、物种灭绝加速——IPCC 第六次评估报告中指出，如果全球气温升高超过 1.5℃，那么将有25%的物种面临灭绝风险。除此之外，随着城市化进程的加速推进，通州区公园绿地在生物多样性保护与碳汇方面仍面临诸多挑战。一方面，城市扩张导致自然栖息地碎片化，生物多样性受到严重威胁；另一方面，气候变化背景下，城市热岛效应加剧，对公园绿地碳汇功能产生负面影响。在此背景下，深入开展通州区公园绿地生物多样性保护与碳汇的多效益统计分析，对于优化公园绿地规划设计、提升生态系统服务功能、推动城市绿色可持续发展具有重要的现实意义。

目前，国内外学者针对城市公园绿地生态系统服务功能已开展大量研究。部分研究聚焦于公园绿地生物多样性保护，通过物种多样性调查、栖息地评估等方法，分析公园绿地生物多样性现状及影响因素[6,7]。还有部分研究则侧重于公园绿地碳汇功能，利用模型模拟、实地观测等手段，探讨公园绿地碳储量及碳汇能力[8,9]。但将生物多样性保护与碳汇功能相结合，进行多效益综合统计分析的研究相对较少，尤其在通州区这一特定区域的相关研究更为匮乏。因此，本研究将以北京市通州区公园绿地为对象，综合运用统计学方法与生态系统服务评估技术，深入剖析公园绿地生物多样性保护与碳汇的多效益，以期为通州区公园绿地生态建设与管理提供科学依据与决策支持。

2 理论分析

2.1 概念及界定

《城市绿地分类标准》（CJJ/T 85-2017）中规定，公园绿地是指向公众开放，以游憩为主要功能，兼具生态、美化、防灾等作用的绿地。包括综合公园、社区公园、专类公园、带状公园和街旁绿地等。

生物多样性是动物、植物、微生物与环境形成的生态复合体以及与此相关的各种生态过程的总和，包括物种多样性、遗传多样性和生态系统多样性三个层次。生物多样性可以在任意空间尺度上，根据遗传多样性、不同类型物种的特性和数量、物种组合、生物群落、生物过程以及数量（如丰度、生物量、覆盖度、比率）和结构等进行观察和测量。

“碳汇”一词来源于《联合国气候变化框架公约》缔约国签订的《京都议定书》，后被国际气候变化专门委员会(IPCC)所采纳。碳汇是指通过植树造林、植被恢复等措施，吸收大气中的二氧化碳，从而减少温室气体在大气中浓度的过程、活动或机制。与碳汇相对的是碳源，碳源是指产生二氧化碳的源头，既来自自然界，也来自人类生产和生活过程。若是从来源角度来分，碳汇可分为自然碳汇和人工碳汇两种类型：自然碳汇主要包括森林碳汇、草地碳汇、耕地碳汇、土壤碳汇与海洋碳汇等类型；人工碳汇包括碳捕获与储存（CCUS）、植树造林与再造林、生物质能源与碳汇等类型。若是从海陆生态系统角度来看，碳汇可分为海洋碳汇和陆地碳汇两大类：海洋碳汇包括沿海生态碳汇、海水生态碳汇和人工海洋碳汇；陆地碳汇包括陆地植被碳汇、自然地质碳汇和人工地质碳汇。

本研究着重关注的是林木碳汇。林木碳汇主要强调树木个体或群体通过光合作用吸收和固定二氧化碳的能力及过程，是森林碳汇的重要组成部分，侧重于从树木本身的生理生态过程来描述碳汇功能。森林碳汇是指森林植物通过光合作用将大气中的二氧化碳吸收并固定在植被与土壤当中，从而减少大气中二氧化碳浓度的过程。有关资料表明，森林面积虽然只占陆地总面积的三分之一，但森林植被区的碳储量几乎占到了陆地碳库总量的一半。

生物多样性与碳汇的协同关系体现为一种双向作用——“生物多样性-碳汇”的正向循环：

（1）生物多样性可以增强碳汇功能：生物多样性丰富的生态系统（如混交林、红树林）通过其复杂

的物种组成与结构，能显著提升其资源利用的效率，进而增强其碳汇功能。此外，生物多样性通过提升生态系统的稳定性，能增强对干旱、病虫害等不利因素的抵抗力，从而保障碳汇功能的长期可持续性。

（2）碳汇可巩固生物多样性保护：健康的碳汇生态系统（如湿地、珊瑚礁）通过维持水循环、土壤肥力和微气候环境，可以为野生动植物提供栖息地与繁殖条件。

2.2 理论基础

《中国的生物多样性保护》白皮书指出，生物多样性与人类福祉紧密相连，是人类生存和发展的重要基石。在通州区公园绿地的研究中，该理论指导我们认识到保护不同层次生物多样性的重要性。例如，丰富的物种多样性有助于维持生态系统的稳定，多样的基因库为物种适应环境变化提供了更多可能，而稳定且多样的生态系统能够更好地发挥其生态服务功能。通过对公园绿地内物种组成、分布及生态系统类型的调查，依据此理论可评估生物多样性现状，识别需要重点保护的区域与物种，进而制定针对性的保护策略，维护通州区公园绿地生态系统的完整性与稳定性。

生物多样性保护与碳汇能力的协同关系是生态系统服务理论的核心议题。生态系统服务功能包括供给服务（如食物、水等）、调节服务（如气候调节、洪水控制）、文化服务（如休闲、美学价值）和支持服务（如土壤形成、养分循环）。城市公园绿地生态系统作为城市生态系统的关键组成部分，在调节城市气候、净化空气、提供休闲空间等方面发挥着重要作用。在通州区，公园绿地的生态系统服务功能对于缓解城市热岛效应、改善空气质量、提升居民生活质量具有不可忽视的价值。以碳汇功能为例，它属于调节服务的重要内容，研究公园绿地的生态系统服务功能，有助于全面认识其对城市生态环境和居民生活的综合影响，为合理规划和管理公园绿地提供科学依据。

森林培育与经营理论主要研究如何通过科学的培育措施，营造、抚育和管理森林，以实现森林的可持续发展。在通州区公园绿地建设与管理中，森林培育与经营理论具有重要指导意义。合理的树种选择和配置，能够提高公园绿地的生态稳定性和生物多样性。例如，选择乡土树种不仅有利于提高树木的成活率和适应性，还能更好地为本地生物提供栖息地，促进生物多样性保护。同时，科学的抚育管理措施，如适时修剪、施肥、病虫害防治等，有助于促进林木生长，提高碳汇能力，提升公园绿地的整体生态功能。

此外，在研究中可以运用主成分分析，将多个复杂的原始变量转化为少数几个综合指标，即主成分，从而简化数据结构，提取关键信息，找出对生物多样性和碳汇影响较大的主要成分。运用空间异质性理论，还能得出“城市化梯度与土地利用类型会显著影响生态效益的空间分异特征”的结论。

3 数据来源与核算方程

3.1 数据来源

生物多样性数据包括森林群落数据——调查时间为 2009 年 7 月，根据公园绿地的面积，选择有代表性的群落，设立 10m×10m 的样地。共涉及 10 个公园绿地，42 个森林群落[10]。在通州区所有抽样的公园绿地群落中，乔木有 40 种，灌木有 16 种，地被有 16 种。还有鸟类种数数据——只有近三年的数据，数据来源于新闻报道。

社会经济数据——数据包括 2000 年至 2023 年的通州区 GDP、第一、二、三产业生产总值；2010 年至 2023 年的工业生产总值、交通运输业生产总值和城镇人口数据；2005 年至 2023 年的常住人口数据、能源消费总量、第一产业能源消费总量、第二产业能源消费总量、第三产业能源消费总量、居民生活能源消费总量；2014 年至 2023 年环保节能支出额。来源于北京市通州区人民政府统计年鉴。

碳排放量数据——数据范围为 2000 年至 2021 年，来源于中国统计数据库。

森林资源数据——数据包括 2011 年至 2023 年的森林蓄积量、森林面积、森林覆盖率、城市绿地面积、2005 年至 2023 年的农作物总播种面积。来源于北京市园林绿化统计年鉴。

3.2 核算方程

3.2.1 生物多样性数据统计

不同层植物的重要值：

$$\text{乔木的重要值} = \frac{\text{相对多度} + \text{相对显著度} + \text{相对频度}}{3} \quad (1)$$

$$\text{灌木的重要值} = \frac{\text{相对多度} + \text{相对盖度} + \text{相对频度}}{3} \quad (2)$$

$$\text{地被层重要值} = \text{相对盖度} \quad (3)$$

优势度指数是以群落中各物种重要值为基础，

用来表示群落内优势种的集中程度：

$$C=\sum_{i=1}^{s}\left(\frac{n_i}{N}\right)^2 \tag{4}$$

式（4）中：s 为每一样方中的物种总数，n_i为第 i 个物种的重要值，N 为全部物种的重要值。

物种丰富度即一定地域面积内物种的数量，本研究采用 Margalef 丰富度指数：

$$R=\frac{s-1}{\ln N} \tag{5}$$

物种多样性指数用来反映群落中物种的数量、结构和各物种均匀程度的综合指标：

Simpson 指数：

$$D=1-\sum_{i=1}^{s}{p_i}^2 \tag{6}$$

Shannon-Wiener 指数：

$$H=-\sum_{i=1}^{s}p_i\ln p_i \tag{7}$$

Pielou 均匀度指数

$$E=\left(-\sum_{i=1}^{s}p_i\ln p_i\right)/\ln s \tag{8}$$

式中p_i是第 i 个物种的个体数占群落总个数的比例。

3.2.2 森林碳汇的计算

$$C_F=V_F\delta\rho\gamma+\alpha V_F\delta\rho\gamma+\beta V_F\delta\rho\gamma \tag{9}$$

式中：C_F为森林碳汇量；V_F为森林蓄积量；δ为森林蓄积量换算成生物量蓄积的系数，也称生物量扩大系数，一般取 1.90；ρ为将森林生物量蓄积转换成生物干重的系数，即容积密度，一般取 0.45～0.50，本文取 0.5；γ为将生物干重转换成固碳量的系数，即含碳率，一般取 0.5；α为林下植物固碳量换算系数，即根据林木生物量计算林下植物（含凋落物）固碳量，一般取 0.195；β为林地固碳量换算系数，即根据森林生物量计算林地固碳量，一般取 1.244[11]。

经过式（9）计算得到的森林碳汇量见表 1。

表 1 森林碳汇量计算结果

年份	森林蓄积量（万立方米）	碳汇量（万吨）
2023	197.68	229.0172
2022	188.60	218.4978
2021	178.08	206.3101
2020	162.34	188.0749
2019	152.25	176.3854
2018	147.92	171.3690
2017	143.90	166.7117
2016	141.15	163.5258
2015	138.45	160.3978
2014	135.07	156.4820
2013	139.17	161.2319
2012	133.82	155.0338
2011	128.57	148.9516

4 实证分析与结果

4.1 生物多样性分析

4.1.1 群落优势种

优势种是指在生态系统中具有最大生物量、最广泛分布和最重要生态作用的物种。通常是那些个体数量多、投影盖度大、生物量高、体积较大、生活能力较强，即优势度较大的物种。通州区各公园绿地群落的优势种可以通过各物种重要值看出来。表 2 展示出了排名前 10 的乔木树种，分别为：圆柏（*Sabina chinensis*）、毛白杨（*Populus tomentosa*）、绦柳（*Salix matsudana* ‘*Pendula*’）、海棠（*Malus spectabilis*）、银杏（*Ginkgo biloba*）、国槐（*Sophora japonica*）、龙爪槐（*Sophora pendula*）、紫叶李（*Prunus cerasifera* ‘*Atropurpurea*’）、五角枫（*Acer mono*）、栾树（*Koelreuteria paniculata*），表 3 展示出了排名前 5 的灌木树种，分别为：棣棠（*Kerria*

japonica）、月季（*Rosa hybrida*）、黄刺玫（*Rosa xanthina*）、连翘（*Forsythia suspensa*）、大叶黄杨（*Euonymus japonicus*）。由各个乔木树种重要值结合式（4）计算得到的 10 个公园绿地群落乔木层树种的优势度见表 4。优势度指数越高，则优势种地位越突出。

通常来说，公园中规划良好的、管理制度更为完善的植物群落也会受到比较严重的人为干预，这会导致乔木层的优势度指数偏低。例如运河城市绿地、生态公园以及齐天乐园机关绿地的乔木层优势度指数偏低，运河城市绿地的乔木层优势度指数最低，优势种相对来说较为分散，以绦柳、圆柏为主；而大光园和万春园的乔木层优势度指数偏高，优势种较为集中，分别以龙爪槐和绦柳、紫叶李为主。

4.1.2 物种丰富度

计算得到通州区 10 个公园不同类型的公园绿地群落的 Margalef 指数如表 5 所示，以柱形图可表示为图 1。图中序号代表公园为：1.西海子公园、2.运河文化广场、3.漫春园、4.万春园、5.玉春园、6.奥体公园、7.生态公园、8.运河城市绿地、9.大光园、10.齐天乐园机关绿地；本文中其余柱形图与此处相同。由二者可以看出来：通州区不同类型的公园绿地中乔木和灌木的物种丰富度较为接近，在总体上乔木的物种丰富度总体略大于灌木。自然形成的植物群落的物种丰富度总体水平高于人工干预的植物群落的物种丰富度。

表 2　通州区公园绿地群落重要值前十名的乔木树种

乔木树种	圆柏	毛白杨	绦柳	海棠	银杏	国槐	龙爪槐	紫叶李	五角枫	栾树
重要值	0.861	0.851	0.794	0.791	0.629	0.563	0.542	0.413	0.321	0.312

表 3　通州区公园绿地群落重要值前五位的灌木树种

灌木树种	棣棠	月季	黄刺玫	连翘	大叶黄杨
重要值	0.602	0.576	0.549	0.524	0.367

表 4　通州区 10 个公园绿地群落乔木层树种优势度

公园	万春园	大光园	漫春园	玉春园	西海子公园	运河文化广场	奥体公园	齐天乐园机关绿地	生态公园	运河城市绿地
乔木层优势度	0.44	0.31	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.12	0.11	0.08

表 5　通州区 10 个公园绿地群落物种丰富度指数

公园	西海子公园	运河文化广场	漫春园	万春园	玉春园	奥体公园	生态公园	运河城市绿地	大光园	齐天乐园机关绿地
乔木	2.13	2.09	1.41	0.76	1.66	1.87	3.79	3.75	1.44	2.16
灌木	1.95	2.50	2.16	1.44	2.15	2.57	1.90	3.88	0.00	1.24
草本	1.56	1.32	0.00	0.00	0.00	1.55	0.45	1.56	0.00	1.45

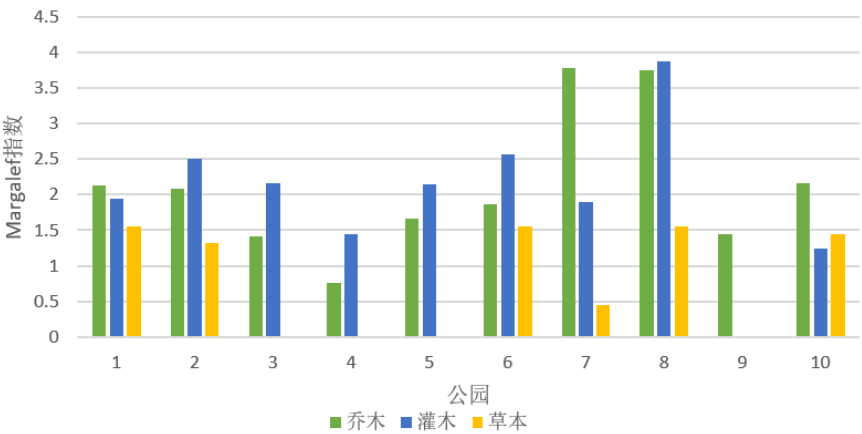


图 1　不同类型公园绿地群落的 Margalef 指数

4.1.3 物种多样性

物种多样性指数是衡量一个群落稳定性和健康程度的重要指标。物种多样性指数低的群落应对外界环境的影响的能力也普遍较低。经计算得到的通州区 10 个公园不同类型公园绿地群落的 Simpson 指数见表 6，柱形图表示为图 2；Shannon-Wiener 指数见表 7，柱形图表示为图 3。由图 2 和图 3 可以看出：Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数的趋势大致一致，且乔木的多样性指数都略高于灌木的多样性指数，草本地被的多样性指数普遍较低，物种相对较少。

表 6　不同类型公园绿地群落 Simpson 指数

公园	西海子公园	运河文化广场	漫春园	万春园	玉春园	奥体公园	生态公园	运河城市绿地	大光园	齐天乐园机关绿地
乔木	0.84	0.77	0.79	0.36	0.76	0.87	0.86	0.91	0.85	0.88
灌木	0.77	0.83	0.75	0.50	0.74	0.82	0.77	0.90	0.00	0.56
草本	0.74	0.58	0.00	0.00	0.00	0.61	0.32	0.55	0.00	0.63

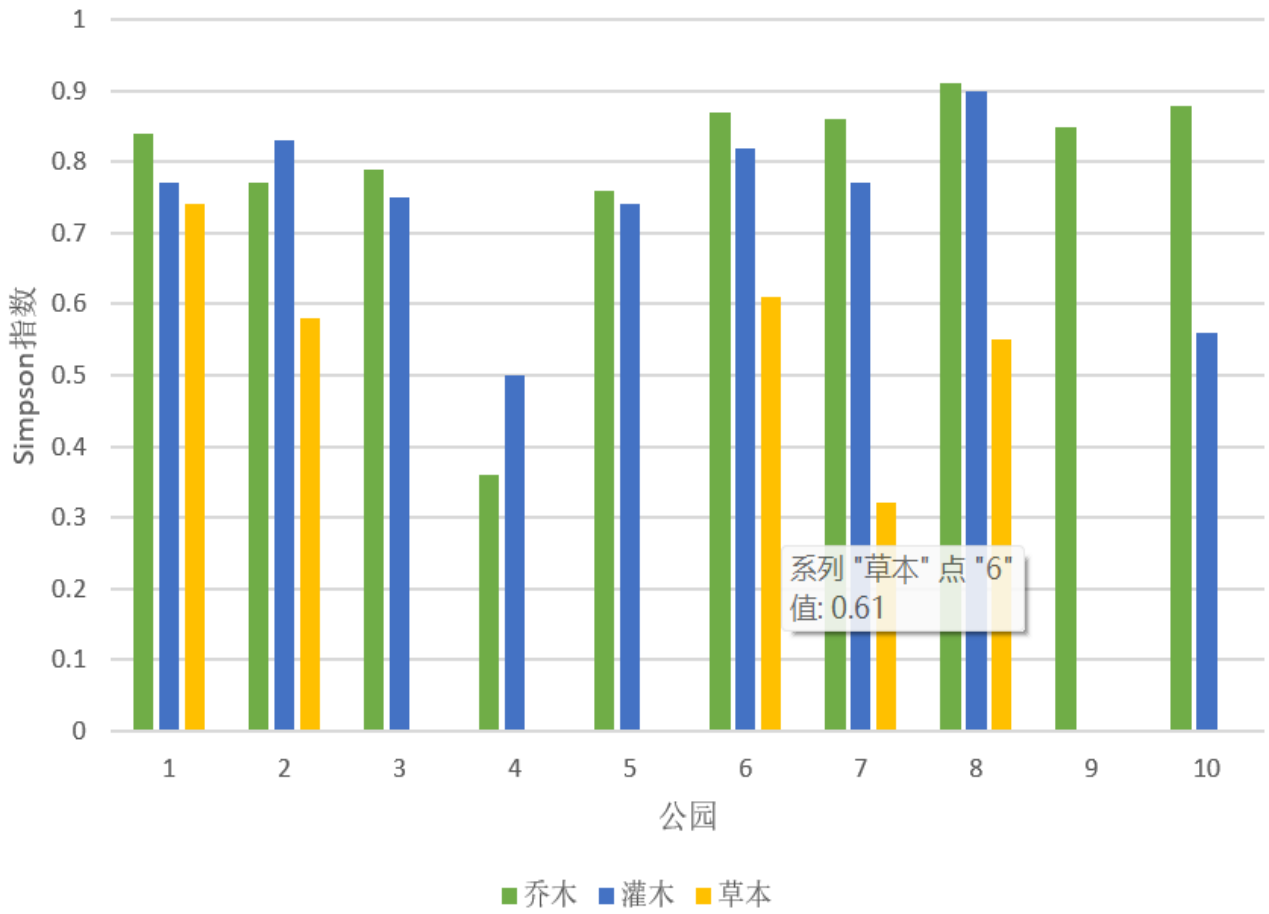


图 2　不同类型公园绿地群落 Simpson 指数

表 7　不同类型公园绿地群落的 Shannon-Wiener 指数

公园	西海子公园	运河文化广场	漫春园	万春园	玉春园	奥体公园	生态公园	运河城市绿地	大光园	齐天乐园机关绿地
乔木	1.96	1.77	1.47	0.65	1.61	2.06	2.35	2.71	1.08	2.20
灌木	1.63	1.85	1.38	0.69	1.39	1.75	1.60	2.41	0.00	0.95
草本	1.35	1.10	0.00	0.00	0.00	1.55	0.50	1.14	0.00	1.05

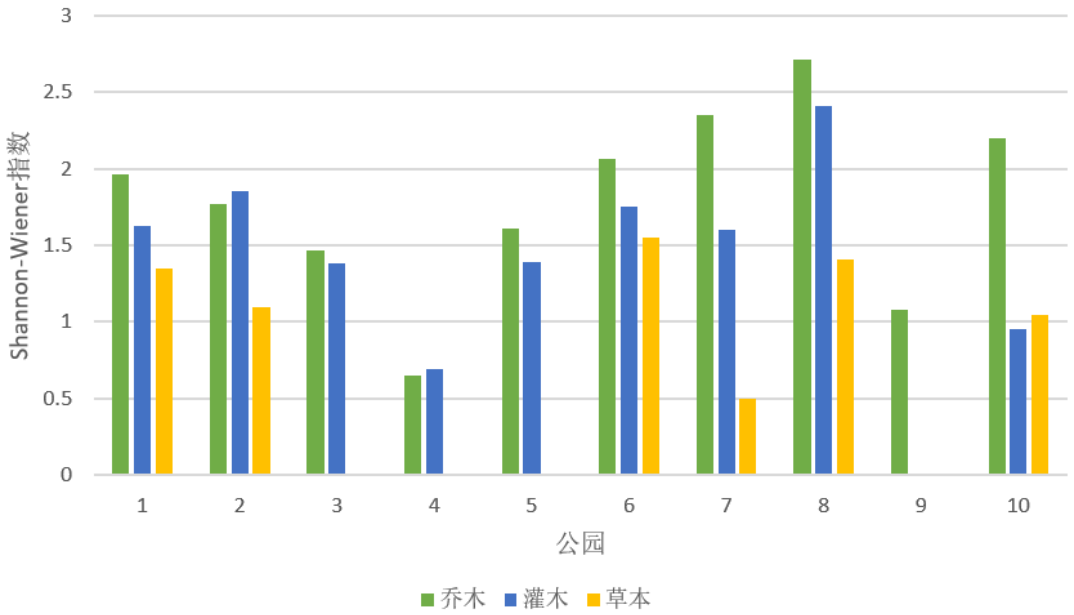


图 3　不同类型公园绿地群落的 Shannon-Wiener 指数

4.1.4 物种均匀度

物种均匀度是指生态系统中不同物种是否均匀，反映了物种之间适量的分配情况。物种均匀度高的生态系统意味着各种物种的数量相对平衡，这有助于提高生态系统的稳定性和生物多样性维护。物种数目越多且分布越均匀，生态系统的多样性越丰富。计算得到的通州区不同类型公园绿地群落的 Pielou 指数如表 8 所示，柱形图如图 4 所示。由图 4 可以看出研究到的公园绿地之间的物种均匀度指数差别不大，其中大光园、万春园、玉春园、漫春园的草本地被的均匀度指数极低，这是因为其草本层中有单以物种的大量密植，此结果与多样性指数显示的结果一致。从结果来看，总体乔木层和灌木层均匀度较高，这是因为城区绿地的乔木、灌木大多是人工栽种的，人为筛选了种类和数量以达到园林美化的效果，所以种类较为均匀。齐天乐园机关绿地、西海子公园、奥体公园等均匀度较高，且三个种类均匀度较为一致，是因人工干预力度大，创造了更多的活动空间。

4.2 经济-生态关系分析

4.2.1 经济发展与环境保护的关系

由图 5 可以看出，GDP 与碳排放的相关系数高达 0.85（p=0.000），表明经济增长会导致碳排放量增长。曲线的斜率反映了增长速度的变化。在 2000 年至 2007 年左右，GDP 每增加一定量，碳排放量的增加幅度相对较大，曲线斜率较陡；到了 2014 年到 2021 年左右，GDP 增长带来的碳排放量增长幅度相对变小，曲线斜率变缓。这也符合 EKC（Environmental Kuznets Curve）假说中“先污染、后治理”的典型特征。

环境库兹涅茨曲线理论认为，在经济发展的初期阶段，环境污染（如碳排放）会随着经济增长而增加；但当经济发展到一定水平后，环境污染会随着经济进一步增长而减少。从图 5 来看，目前通州区还处于曲线的上升阶段，即随着 GDP 增长，碳排放量持续增加，尚未达到转折点。这可能意味着通州区在经济发展过程中，还未实现经济增长与碳排放脱钩，仍需要进一步探索绿色发展模式，以在未来实现经济发展与环境改善的双赢。

表 8　不同类型公园绿地群落的 Pielou 指数

公园	西海子公园	运河文化广场	漫春园	万春园	玉春园	奥体公园	生态公园	运河城市绿地	大光园	齐天乐园机关绿地
乔木	0.90	0.78	0.76	0.60	0.83	1.00	0.8	0.93	1.18	0.96
灌木	0.91	1.34	1.00	1.00	1.00	0.98	0.89	0.95	0.00	0.86
草本	0.99	0.57	0.00	0.00	0.00	0.84	0.73	0.43	0.00	0.95

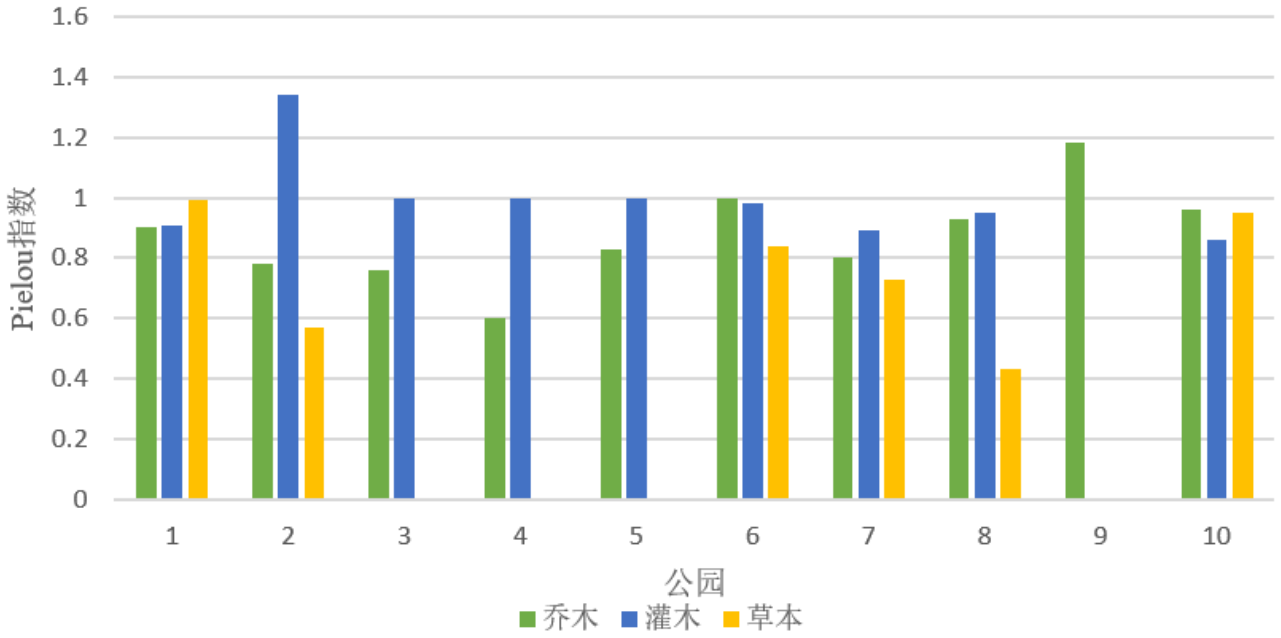


图 4　不同类型公园绿地群落的 Pielou 指数

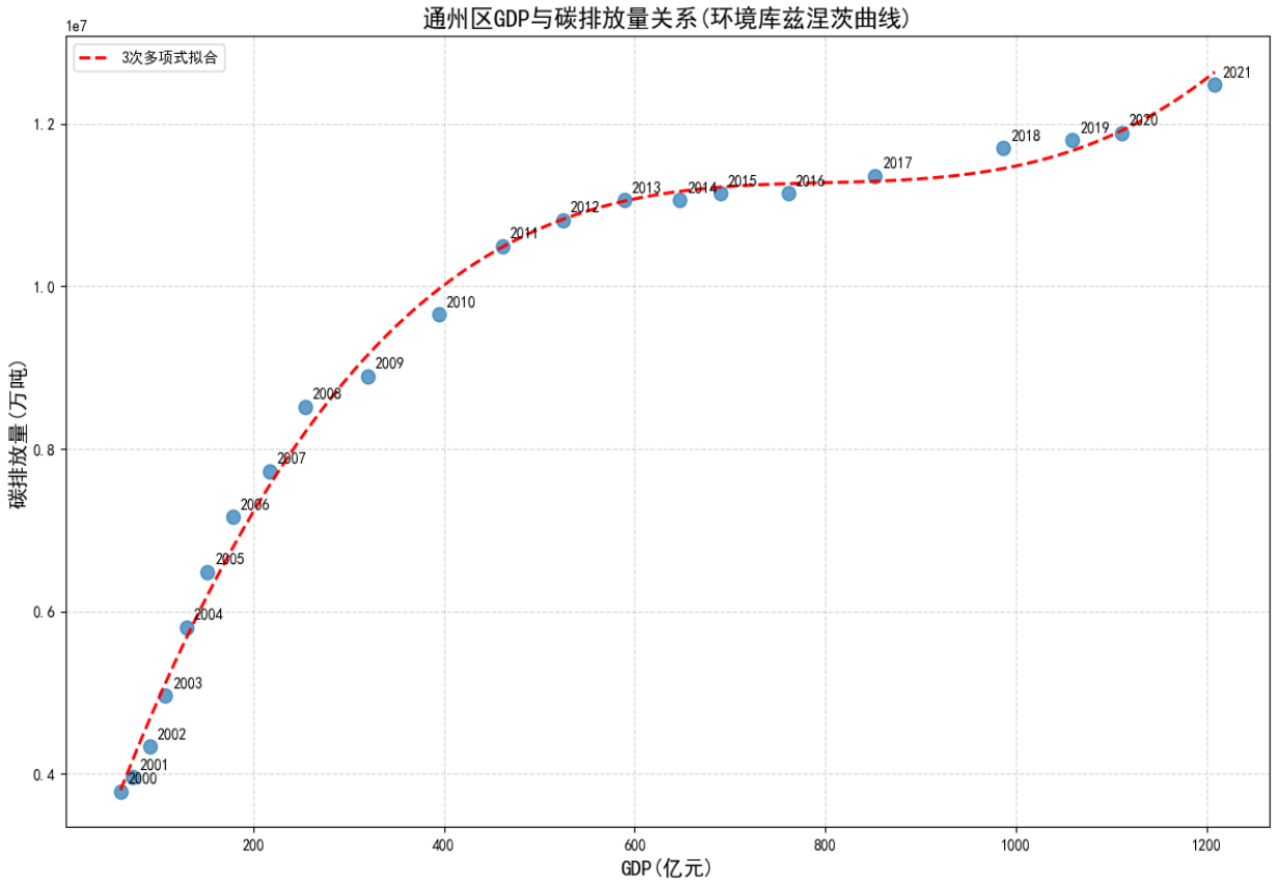


图 5　通州区 GDP 与碳排放量关系

4.2.2 产业结构与碳排放关系

由图 6 可以看出，通州区产业结构发生了显著变化：第一产业占比持续下降，第二产业占比呈现先波动后下降的趋势，第三产业占比则持续上升。

第一产业在 2000 年占比约 17%，之后逐年稳步下降，到了 2020 年占比已降至 1%以下。这表明在这 20 年间，通州区第一产业在经济中的比重不断降低，经济发展对农业等第一产业的依赖逐渐减弱。

第二产业在 2000 年到 2005 年期间，占比有所上升，从约 43%上升到接近 50%，之后出现波动，在 2010 年左右有一次明显下降，后续又有一定起伏，但整体呈下降趋势，到 2020 年占比降至 35%左右。这说明通州区的工业等第二产业在发展过程中经历了调整，其在经济中的地位有所变化。

第三产业的占比从 2000 年约 40%持续上升，在 2005 年到 2010 年间上升较为明显，2015 年之后占比稳定在 60%左右，到了 2020 年占比超过 60%。第三产业占比的持续增长反映出通州区服务业等第三产业的快速发展，逐渐成为经济的主导力量。

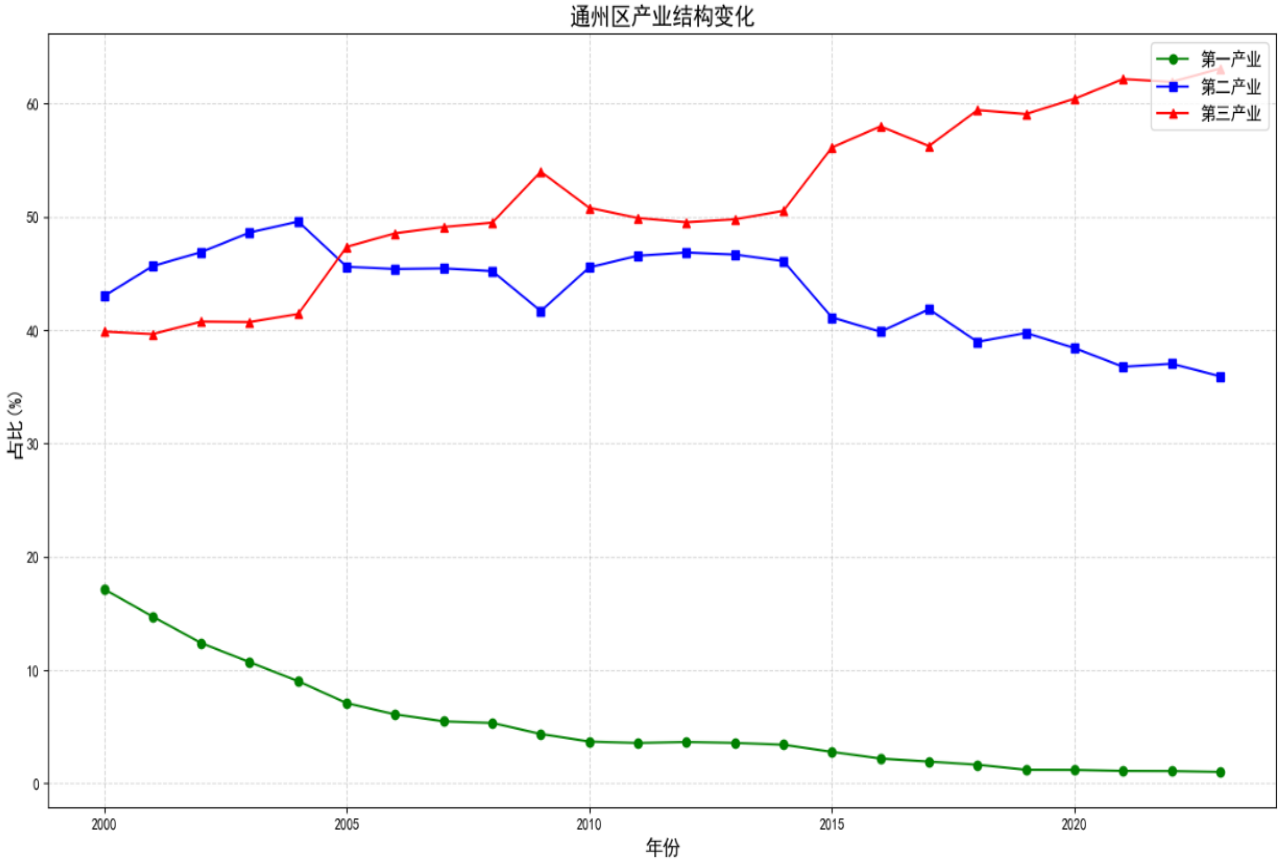


图 6　通州区产业结构变化

图 7 中每个方格内的数值为对应两个变量的相关系数，取值范围在-1 到 1 之间。系数越接近 1，表示两个变量之间的正相关性越强；系数越接近-1，表示负相关性越强；系数接近 0，则表示相关性较弱。

第一产业与碳排放量的相关系数为 0.68，说明第一产业产值增长与碳排放量增长有一定关联，但关联程度中等。

第二产业与碳排放量的相关系数为 0.93，表明第二产业产值的增长与碳排放量的增长高度相关，即第二产业产值增加时，碳排放量很可能也会显著增加。

第三产业与碳排放量的相关系数为 0.86，说明第三产业产值增长与碳排放量增长也存在较强的正相关关系，但相比第二产业产值与碳排放量的相关性略弱。

从整体来看，第二产业与碳排放量的相关性最强，说明在通州区，第二产业的发展对碳排放的影响较为显著，可能是因为工业生产等第二产业活动通常能源消耗较大，从而导致碳排放较多。第三产业产值与碳排放量也有较强的正相关关系，不过其能源利用效率等可能相对第二产业更优。第一产业

产值与碳排放量的相关性相对较弱。这些相关性分析可以为通州区制定产业发展和碳排放控制政策提供参考。

4.2.3 城市化进程与生态环境建设

图 8 展示了通州区从约 2010 年至 2023 年间人口和绿地面积的变化趋势，可以看出：在 2010 年至 2016 年，通州区人口稳步增长；到了 2016 年至 2019 年，人口增长明显加速，特别是 2018 年至 2019 年间出现陡增；而在 2019 年至 2023 年，人口增长趋于平缓。城市绿地面积在 2011 年至 2014 年增长缓慢；在 2014 年至 2015 年短期内显著增加；在 2015 年至 2019 年，与人口增长同步；到了 2019 年至 2023 年，即使在人口增长放缓后，绿地面积仍继续增加。

两者总体呈现正相关关系，反映了城市扩张过程中的协同发展。2019 年后绿地面积持续增长而人口趋于稳定，可能反映出城市建设重点从人口扩张转向环境品质提升。这一趋势表明通州区在城市化过程中注重生态环境建设，尤其是在人口增长放缓后，仍然保持对城市绿地的持续投入，体现了可持续发展理念在城市规划中的应用。

图 9 展示了通州区人口数量与绿地面积之间的关系，相关系数高达 0.98，表明两者之间存在极强的正相关关系，人口增长与绿地面积扩张几乎完全同步。这反映了通州区城市规划政策的有效实施，特别是在确保城市扩张与生态环境建设同步发展的方面，该区在提升城市宜居性和生态环境质量方面做出了超出人口增长需求的投入。这种发展模式代表了一种可持续的城市化路径，值得其他快速城市化地区借鉴。

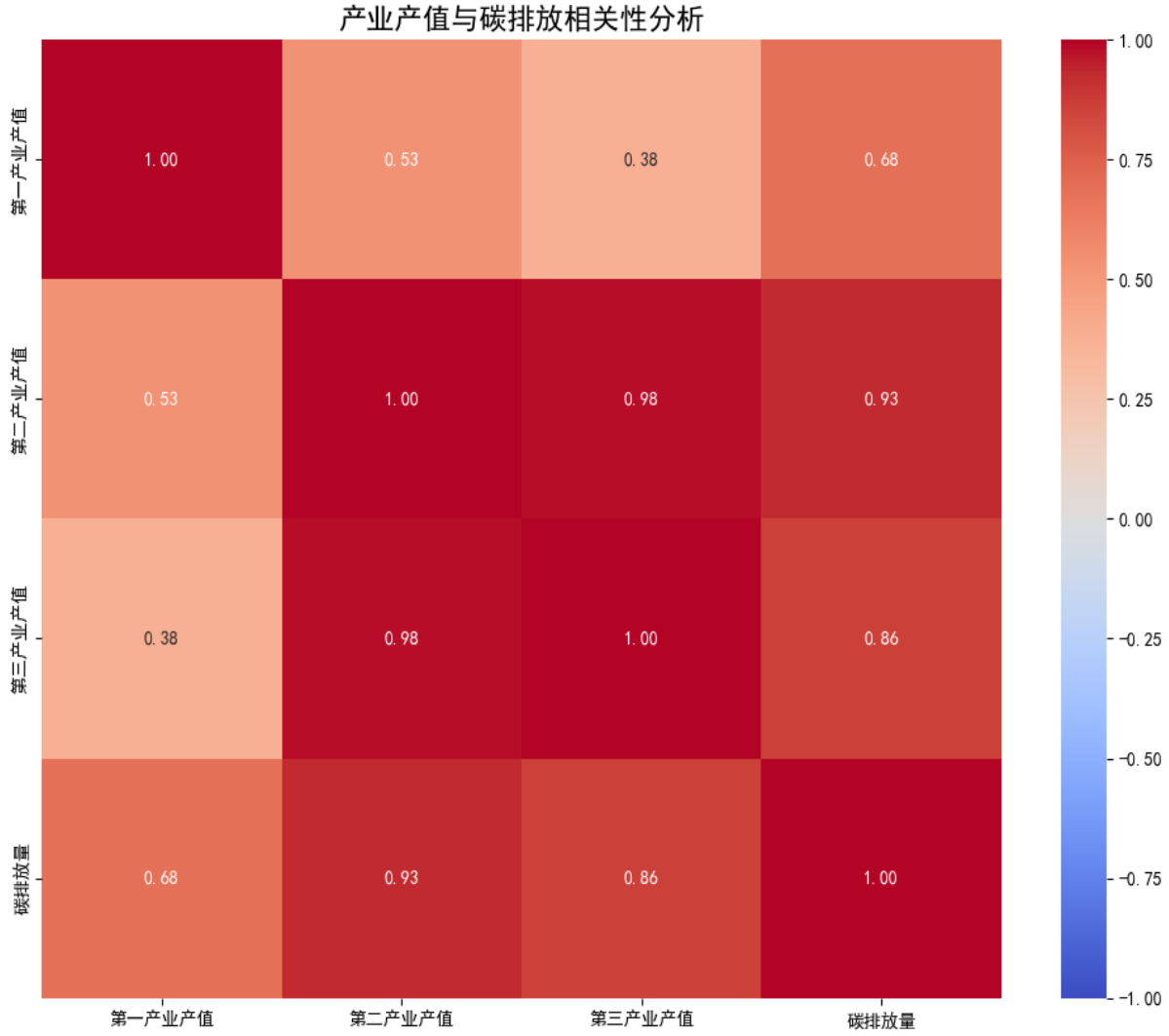


图 7 产业结构与碳排放的相关性分析

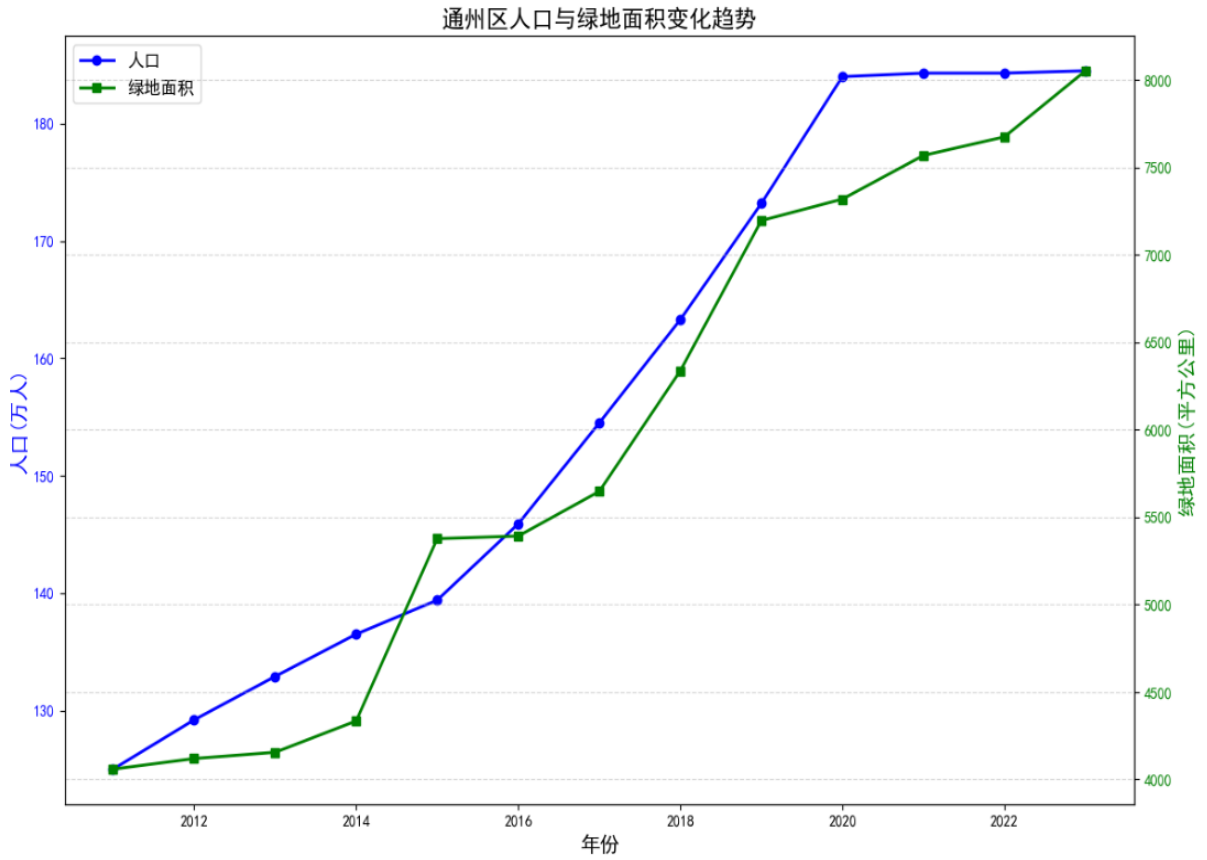


图 8　通州区常住人口与绿地面积变化趋势

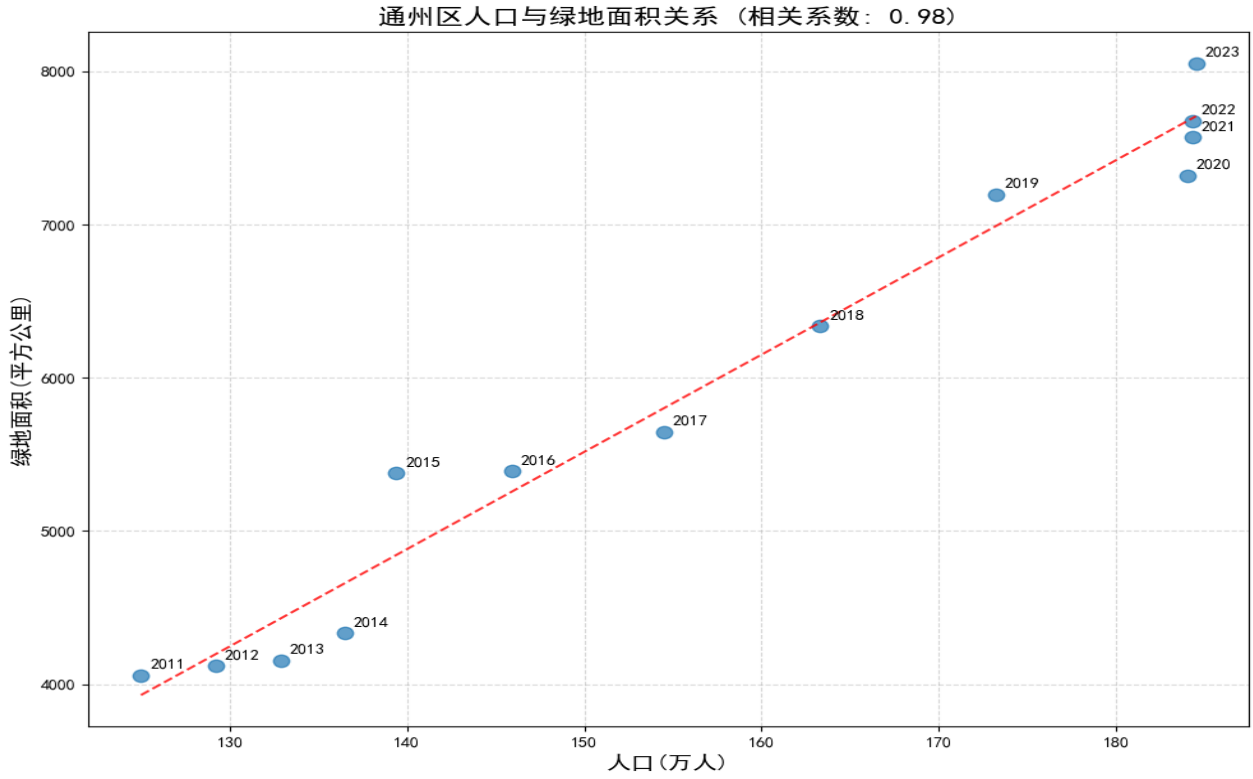


图 9　通州区常住人口与城市绿地面积的关系

图 10 展示了通州区 2010 年至 2023 年间城镇化率（城镇人口占常住人口的比例）与森林覆盖率的关系，两者具有高达 0.93 的相关系数，表明城镇化进程与森林覆盖增长几乎同步发展。这说明通州区在城市化过程中采取的“绿色发展”策略，成功实现了城镇化与生态环境保护的双赢。尤其值得注意的是，森林覆盖率的相对增幅（约 70%）远超城镇化率的增幅（约 17%），表明生态建设的力度大于城市扩张。这一发展模式代表了高质量城镇化的范例，体现了“生态优先、绿色发展”理念在城市规划中的成功实践。通州区的经验表明，通过科学规划和政策引导，城市化与生态建设可以协同推进而非此消彼长。

4.2.4 环境经济指标之间的相关性

图 11 展示了通州区关键环境经济指标间的相关关系，通过热力图的颜色深浅和数值可以直观地呈现指标间的关联强度。GDP 与森林覆盖率（0.94）、城市建设面积（0.97）和常住人口（0.99）均呈高度正相关，表明通州区实现了经济增长、城市扩张与生态保护的良性协同；城市建设面积与绿地规模（0.92）高度正相关，说明城市扩张与绿地建设同步推进；常住人口与森林覆盖率（0.97）、绿地规模（0.94）高度正相关。

但是节能环保支出与几乎所有发展和生态指标呈负相关，尤其与森林指标（-0.29）和能源消费总量（-0.57）相关度较高。可能说明节能环保支出没有投资在这部分，或者存在滞后性，环保投入效率可能随时间大幅提升。

能源消费总量与发展指标呈现中等正相关（0.44-0.65），其中与城市建设面积相关性最高（0.65），能源消费与节能环保支出的负相关（-0.57）表明能源效率可能有所提高。

GDP 与能源消费的适度相关（0.49）而非高度相关，表明经济增长与资源消耗实现了一定程度的脱钩。

4.3 生物多样性-生态保护关系分析

4.3.1 森林覆盖率与碳汇量

由图 12 可以看出，森林覆盖率与碳汇量同步增长，森林覆盖率从 2011 年的 19.74%持续上升至 2023 年的 34.19%，碳汇量从 148.9516 万吨增至 229.0172 万吨。这表明两者存在显著正相关关系，验证了森林作为核心碳汇载体的生态功能。2016 年至 2018 年增速放缓：此期间碳汇量增幅减小，可能是因为新造林尚未进入碳汇高峰期，或遭遇极端气候（如干旱）导致了林木生长缓慢。2020 年后加速增长，数据斜率增大，可能与“碳中和”政策强化、森林管理优化（如科学间伐、病虫害防治）相关。

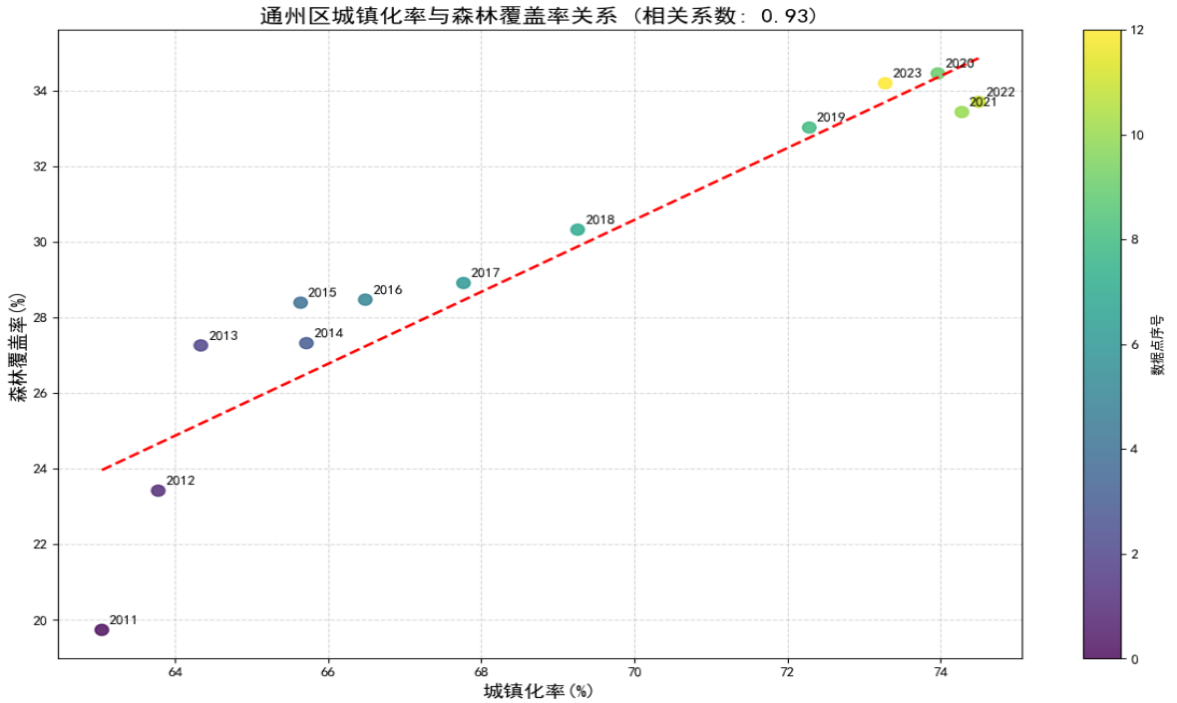


图 10 通州区城镇化率与森林覆盖率关系

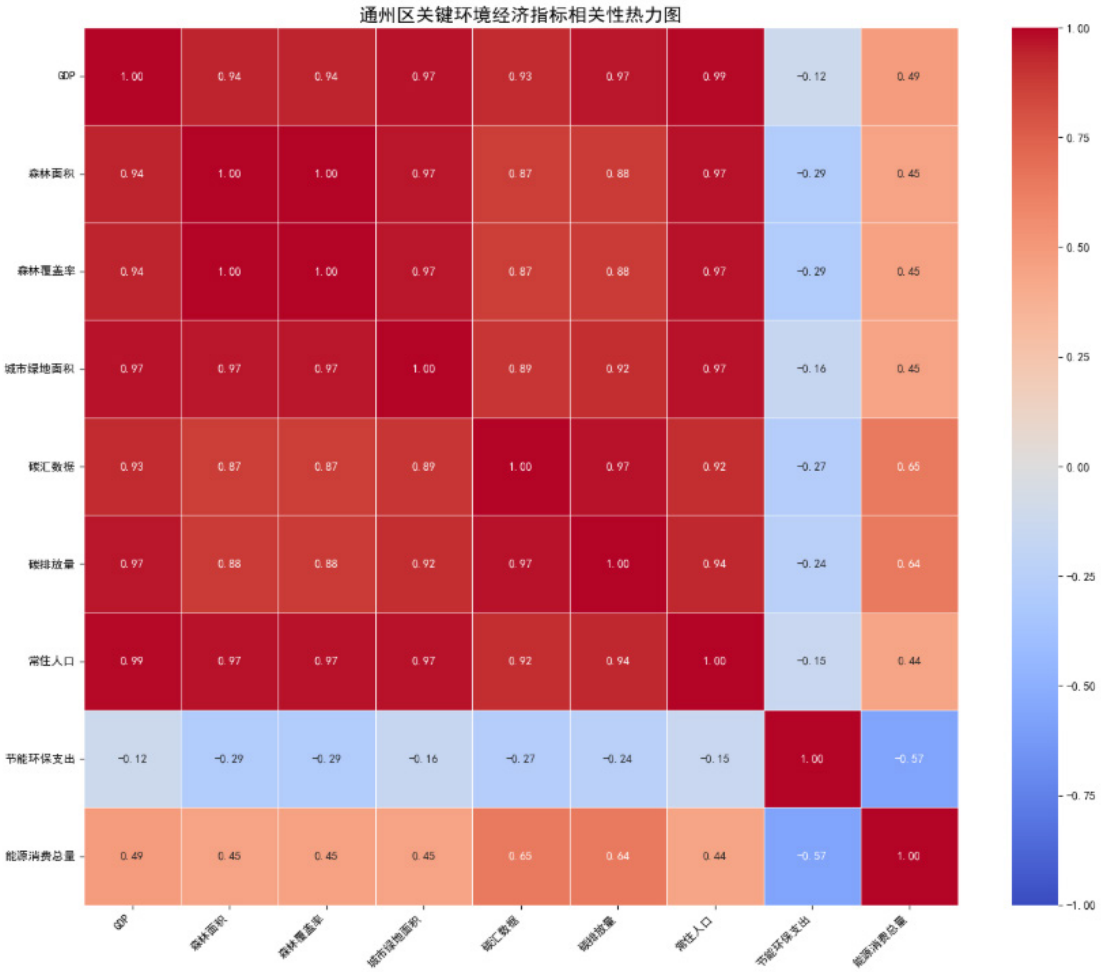


图 11　环境经济指标相关性分析

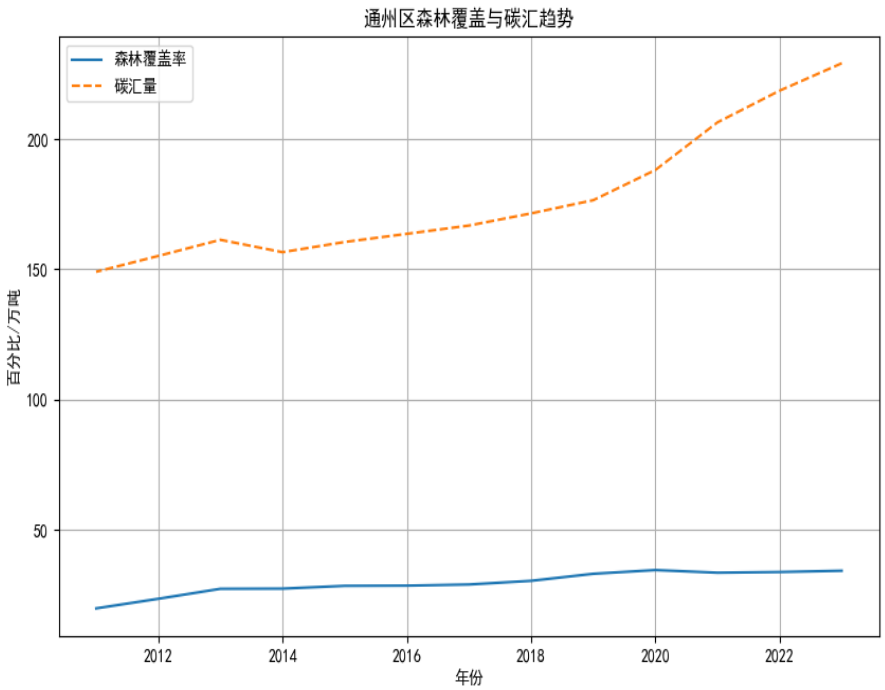


图 12　通州区森林覆盖率与碳汇的关系

4.3.2 森林面积鸟类多样性

图 13 中显示森林面积与鸟类多样性的相关性系数为 0.971，这表明森林面积与鸟类多样性之间存在非常强的正相关关系。相关性系数接近 1，意味着随着森林面积的增加，鸟类种类数也显著增加。但受限于数据量，该相关性未通过显著性检验，且无法得到两者关系确切的增长趋势，鸟类多样性应有增长上限，不会一味的随着森林面积的扩大而增加。

4.3.3 碳汇量与鸟类多样性

图 14 中显示的相关性系数为 0.999，p 值为 0.0257，这表明碳汇量与鸟类多样性之间存在非常强的正相关关系。相关性系数接近 1，意味着随着碳汇量的增加，鸟类多样性也显著增加。图中的数据点沿着回归线分布，显示出一致的趋势，进一步支持了碳汇量与鸟类多样性之间的强正相关关系。这更说明了保护森林对生物多样性的维持至关重要。

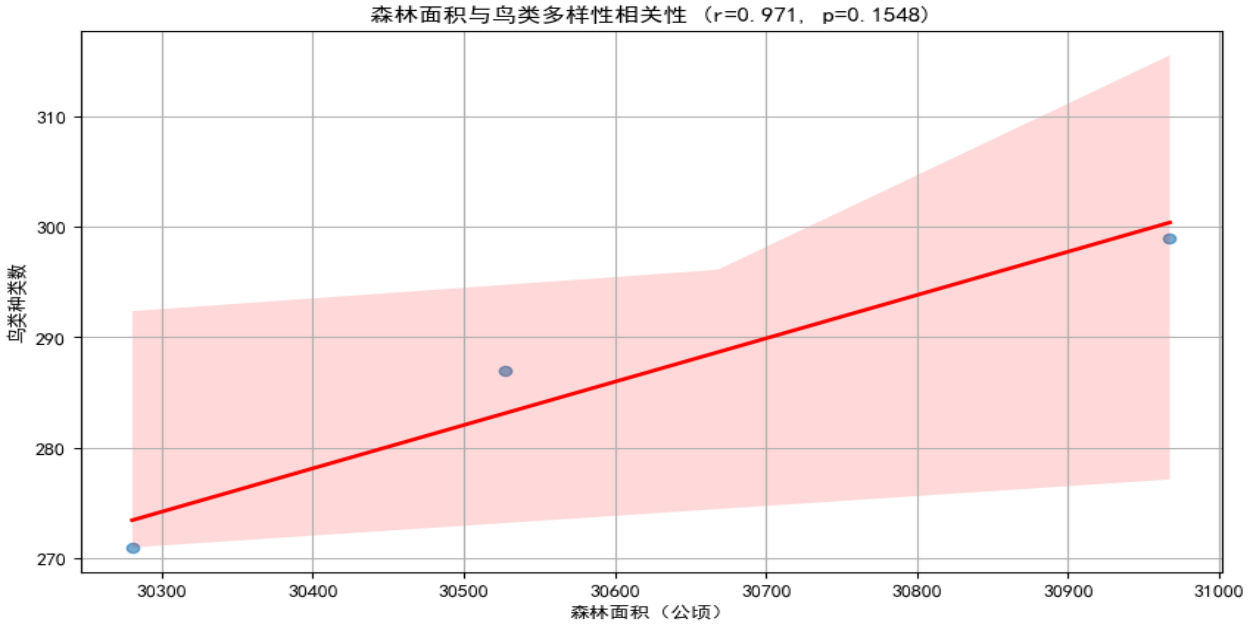


图 13 森林面积与鸟类多样性的关系

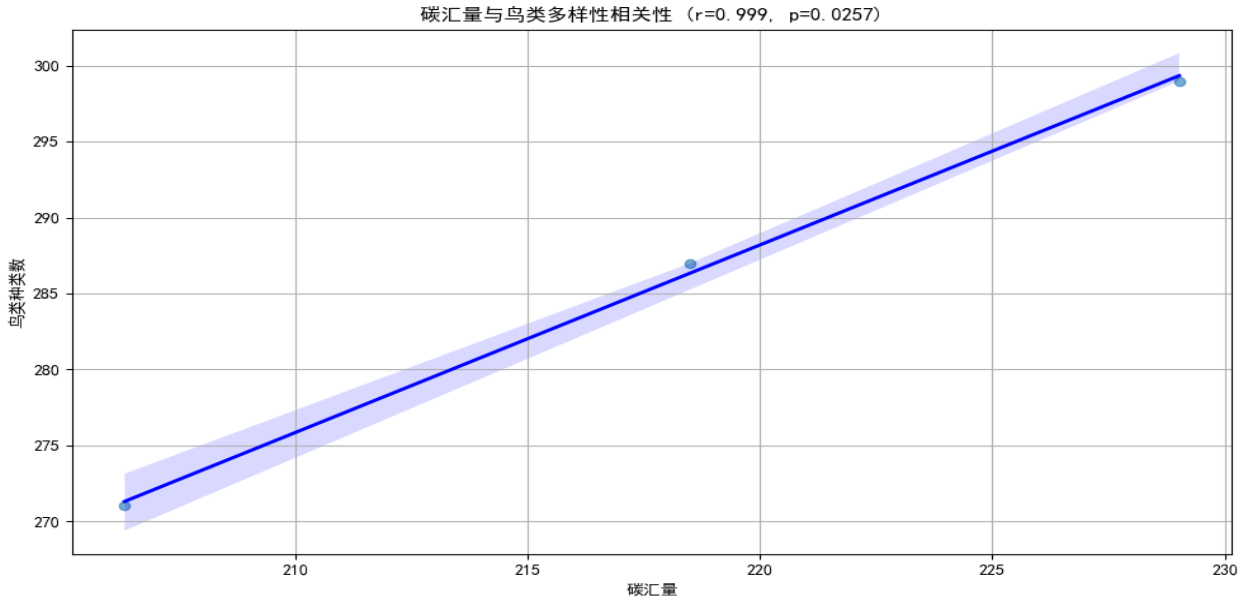


图 14 碳汇量与鸟类多样性相关性

4.4 碳汇的滞后性分析

4.4.1 森林蓄积量与碳汇的滞后性

图 15 和图 16 展示了通州区 2011 年至 2023 年森林蓄积量与碳汇的滞后性关系，可以看出森林蓄积量与碳汇在当年（滞后 0 年）表现出完美相关（r=1.000，p=0.000），这说明森林蓄积的碳汇计量具有高度可预测性。且各滞后期相关性均达到统计显著水平，相关系数随滞后期增加而缓慢降低，形成平缓下降曲线，即使在滞后 5 年后，相关系数仍高达 0.9139，表明森林碳汇效应具有长期稳定性。

这一现象说明：森林蓄积量增加对碳汇有即时和显著的直接贡献，体现了森林生物量与碳捕获的内在联系。森林生态系统的碳汇能力具有时间持续性，一次性的森林蓄积增长可产生至少 5 年的碳汇效应。这说明增加森林蓄积量是碳中和策略中最可靠且预测性最强的碳汇途径之一。

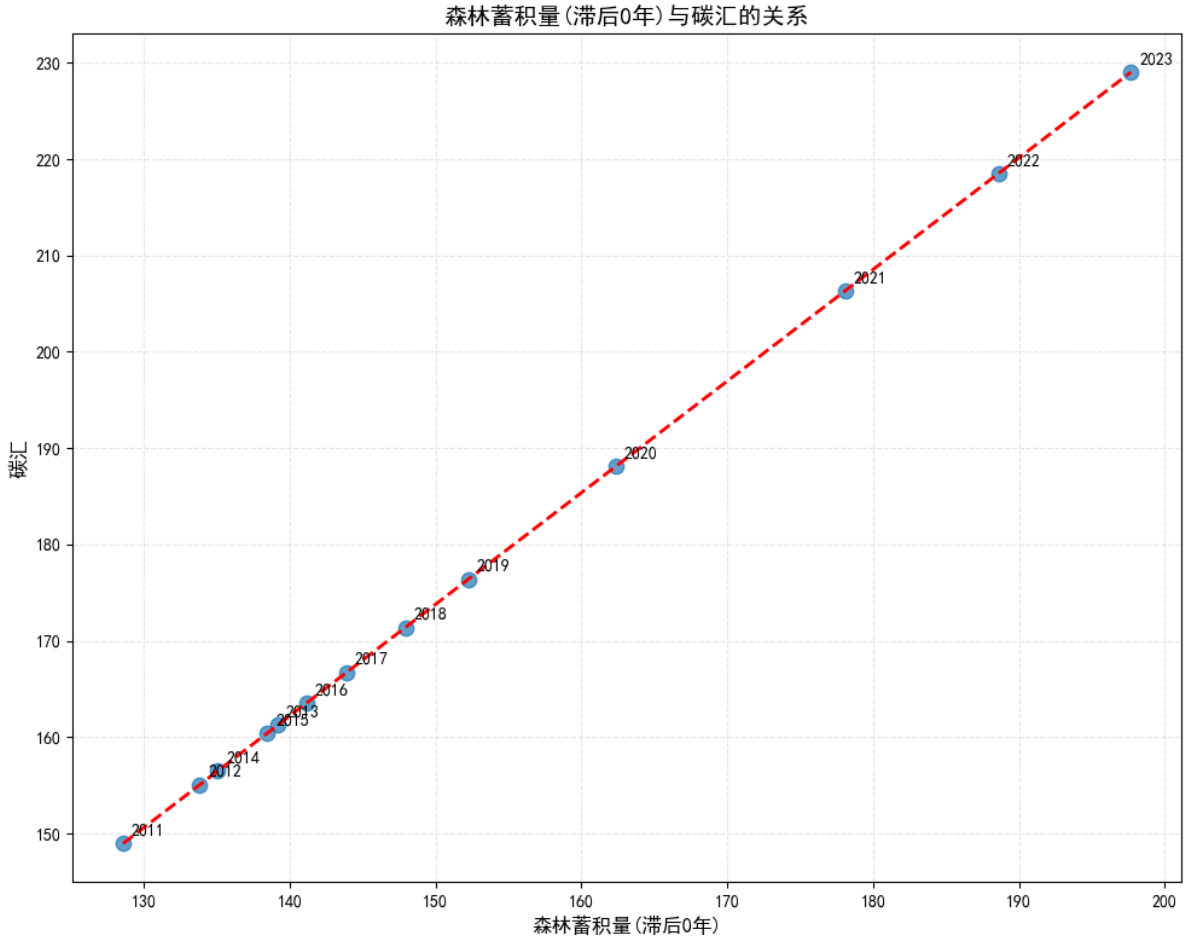


图 15　森林蓄积量与碳汇关系的滞后效应分析 1

```
分析变量：森林蓄积量
  森林蓄积量数据年份范围：2011 - 2023
  滞后0年：相关系数 = 1.0000，p值 = 0.0000，样本数 = 13
  滞后1年：相关系数 = 0.9835，p值 = 0.0000，样本数 = 12
  滞后2年：相关系数 = 0.9569，p值 = 0.0000，样本数 = 11
  滞后3年：相关系数 = 0.9634，p值 = 0.0000，样本数 = 10
  滞后4年：相关系数 = 0.9452，p值 = 0.0001，样本数 = 9
  滞后5年：相关系数 = 0.9139，p值 = 0.0015，样本数 = 8
  最优滞后期：0年，相关系数：1.0000，p值：0.0000
```

图 16　森林蓄积量与碳汇关系的滞后效应分析 2

4.4.2 森林面积与碳汇的滞后性

图 17 和图 18 展示了通州区 2011-2023 年森林面积与碳汇关系的滞后相关分析，可以看出：森林面积碳汇效应具有明显的时间滞后性，各滞后期均达到统计显著性，最佳滞后期为 3 年。滞后 3 年的相关系数最高（0.8833），p 值最小（0.0007）。

这种滞后模式反映了森林生态系统碳吸收的生物物理过程：新增的森林面积需要 1-2 年时间适应生长环境，此时碳吸收能力逐步提升；在滞后 3 年时，森林达到快速生长期，光合作用和生物量积累最活跃，碳吸收达到峰值；3 年后，森林生长速度逐渐放缓，碳吸收能力相对下降但仍维持较高水平。

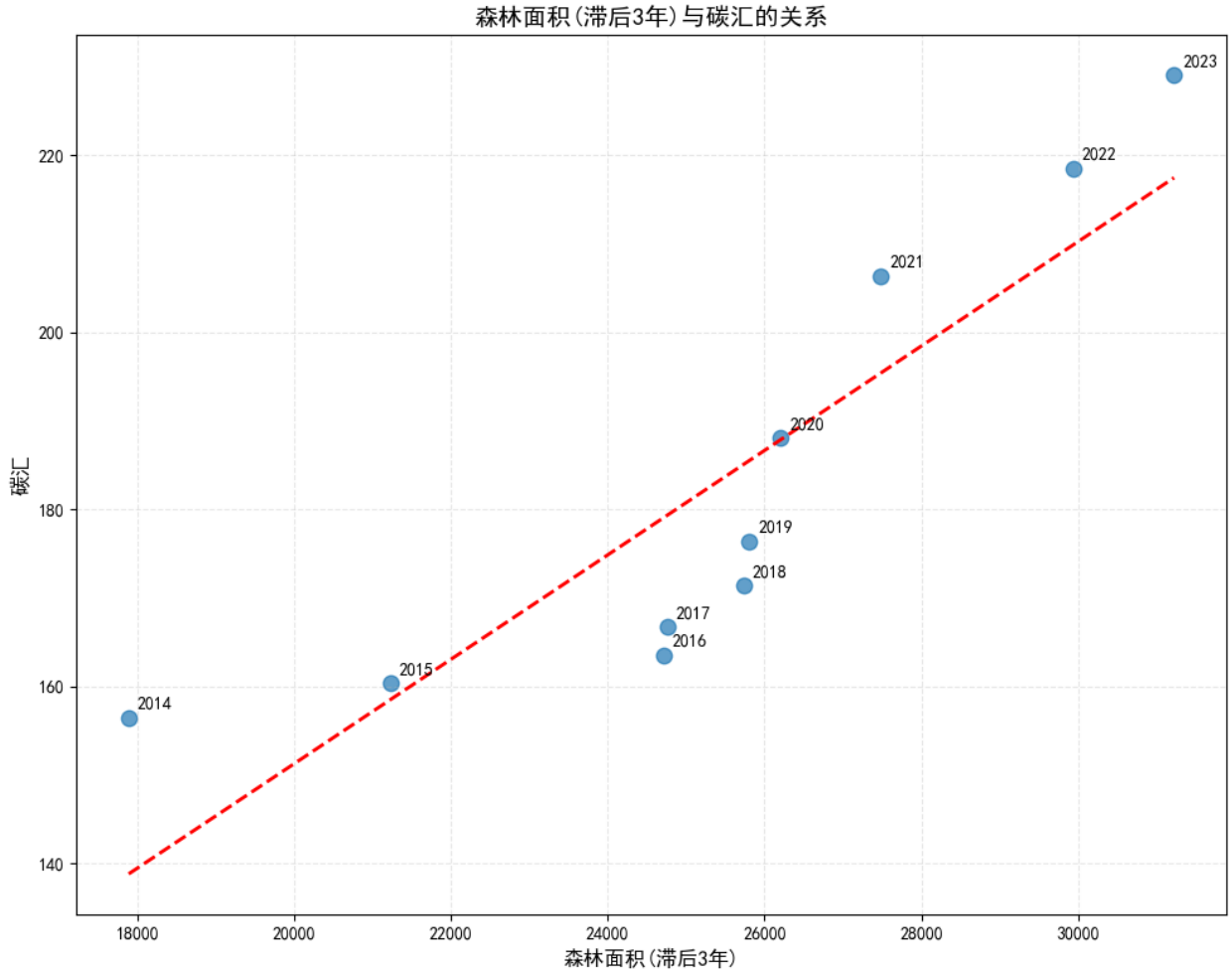


图 17 森林面积与碳汇的滞后性分析 1

```
分析变量：森林面积
  森林面积数据年份范围：2011 - 2023
  滞后0年：相关系数 = 0.8055，p值 = 0.0009，样本数 = 13
  滞后1年：相关系数 = 0.8135，p值 = 0.0013，样本数 = 12
  滞后2年：相关系数 = 0.8427，p值 = 0.0011，样本数 = 11
  滞后3年：相关系数 = 0.8833，p值 = 0.0007，样本数 = 10
  滞后4年：相关系数 = 0.8286，p值 = 0.0058，样本数 = 9
  滞后5年：相关系数 = 0.7782，p值 = 0.0230，样本数 = 8
  最优滞后期：3年，相关系数：0.8833，p值：0.0007
```

图 18 森林面积与碳汇的滞后性分析 2

4.4.3 城市绿地面积与碳汇的滞后性

图 19 和图 20 展示了通州区 2011-2023 年城市绿地面积与碳汇关系的滞后相关性分析，发现城市绿地对碳汇存在明显的时间滞后效应，在当年（滞后 0 年）已达到 0.8958，表明绿地建设与碳汇有直接关联；各滞后期均维持极高相关，且全部达到高度统计显著性，相关强度随滞后时间呈现“先增强后轻微减弱”的趋势。

最优滞后期为 3 年，滞后 3 年时相关系数达到峰值 0.9744，为所有变量中最高值。2020 年-2023 年数据点表现尤为突出，表明近年绿地建设碳汇效益显著提升。

滞后 4-5 年仍保持高相关，且相关系数从滞后 3 年到滞后 5 年仅下降约 0.01，表明城市绿地的碳汇效应有持久性。

城市绿地的碳汇效应强于一般森林面积，这反映了城市绿地的精细化管理和优质树种选择带来的高效碳吸收。

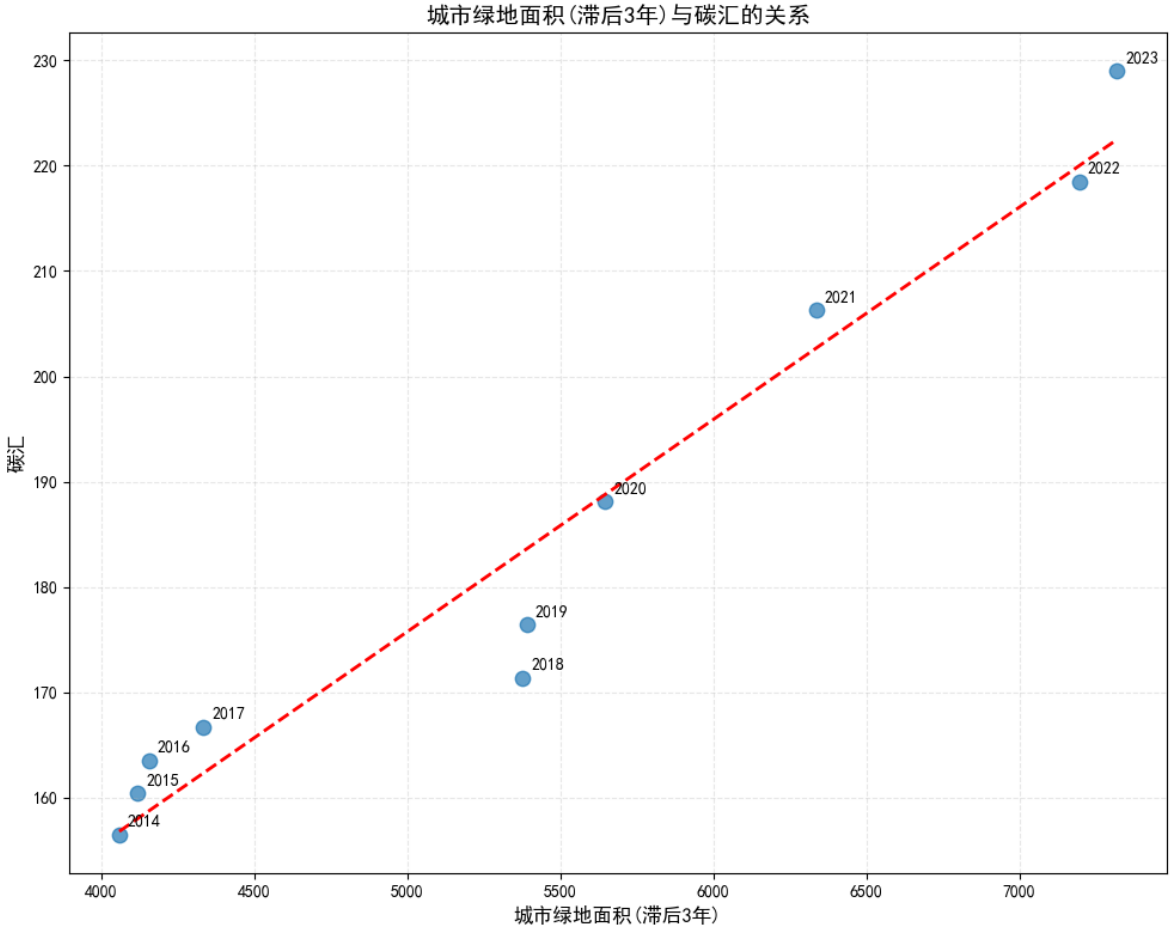


图 19 城市绿地面积与碳汇的滞后性分析 1

```
分析变量：城市绿地面积
  城市绿地面积数据年份范围：2011 - 2023
滞后0年：相关系数 = 0.8958，p值 = 0.0000，样本数 = 13
滞后1年：相关系数 = 0.9196，p值 = 0.0000，样本数 = 12
滞后2年：相关系数 = 0.9571，p值 = 0.0000，样本数 = 11
滞后3年：相关系数 = 0.9744，p值 = 0.0000，样本数 = 10
滞后4年：相关系数 = 0.9628，p值 = 0.0000，样本数 = 9
滞后5年：相关系数 = 0.9635，p值 = 0.0001，样本数 = 8
最优滞后期：3年，相关系数：0.9744，p值：0.0000
```

图 20 城市绿地面积与碳汇的滞后性分析 2

4.4.4 节能环保支出与碳汇的滞后性

图 21 和图 22 展示了通州区节能环保支出与碳汇之间的滞后性关系，二者呈现出显著的“先负后正”转变模式，体现了环保投入的复杂长期影响机制。最优滞后期为 5 年，滞后 5 年时相关系数达到最高值 0.7207。这一分析揭示了节能环保投入与碳汇效益之间存在显著的时间滞后效应，强调了环境政策应具备长期视角。通州区的经验表明，环保投入虽短期内可能未见明显成效，但长期坚持将产生实质性碳汇贡献。

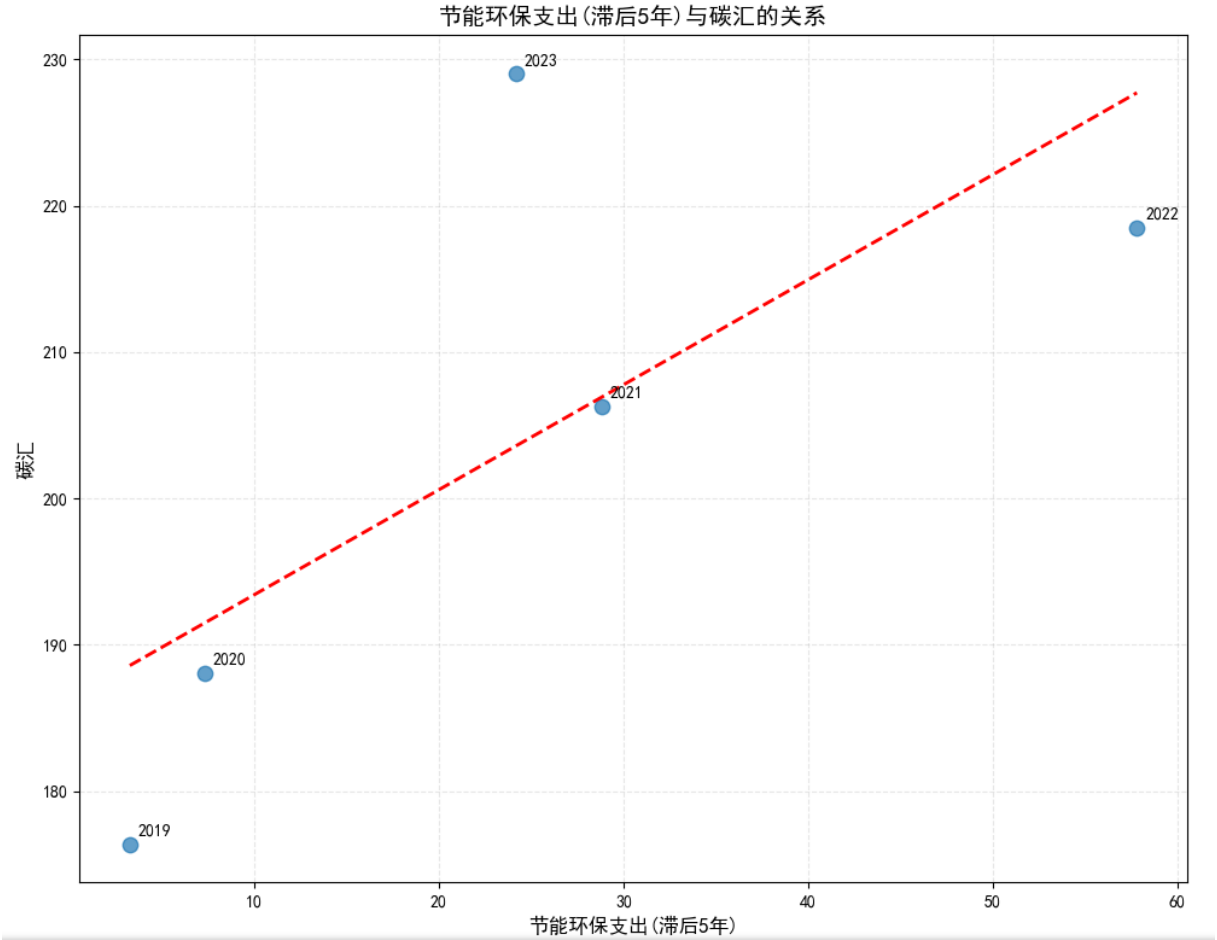


图 21 节能环保支出与碳汇的滞后性分析 1

```
分析变量：节能环保支出
  节能环保支出数据年份范围：2014 - 2023
  滞后0年：相关系数 = -0.3385，p值 = 0.3386，样本数 = 10
  滞后1年：相关系数 = -0.3594，p值 = 0.3422，样本数 = 9
  滞后2年：相关系数 = -0.2896，p值 = 0.4866，样本数 = 8
  滞后3年：相关系数 = -0.0418，p值 = 0.9291，样本数 = 7
  滞后4年：相关系数 = 0.4061，p值 = 0.4244，样本数 = 6
  滞后5年：相关系数 = 0.7207，p值 = 0.1695，样本数 = 5
  最优滞后期：5年，相关系数：0.7207，p值：0.1695
```

图 22 节能环保支出与碳汇的滞后性分析 2

5 研究结论及政策建议

5.1 研究结论

（1）通州区生态效益的空间不均衡性

通州区的东南部作为产业的集聚区，建设用地

快速扩张侵占森林、绿地，导致植被部分碎片化，削弱了生态系统的连续性与稳定性。同时，通州区在政策执行程度上也存在明显差异：生态保护政策（如生态红线划定）在西北部执行力度较高，而东南部因经济发展压力存在“重开发、轻保护”的倾向。

除人为因素外，也存在自然条件的限制：通州区的东南部存在土壤贫瘠、水资源短缺等问题，这些都限制了植被的恢复能力与碳汇能力的提升。

（2）多效益协同的阈值效应

研究进一步发现，生物多样性保护与碳汇能力提升的协同效益存在非线性的阈值效应。例如，由于边际效益递减，当森林覆盖率超过 30%时，碳汇效率增幅趋于平缓，但生物多样性（如鸟类物种数）仍随森林面积增加显著提升。这表明：生态保护需要权衡利弊，在资源有限条件下，优先保护高碳汇与高生物多样性重叠区域（如潮白河湿地），以最大化协同效益。同时，要聚焦结构升级：通过混交林改造、林分密度调控等手段提升单位面积碳汇能力，而非单纯依赖面积扩张。这一发现为破解“生态效益天花板”提供了理论支持，强调从“量”到“质”的转型路径。

（3）碳汇林的营建和树种选择

城市的碳排放量通常是高于其他地区的，因此城市是碳达峰、碳中和的“主要战场”。在城市空间中，城市绿地湿地生态系统是唯一的自然碳汇，随着生态文明的绿色经济理念深入人心，绿地的生态系统功能日益受到关注，如防风固沙、固碳释氧、减缓热岛效应、净化环境以及生物多样性保护等。其中最主要的就是营建碳汇林，碳汇林是一种人工林。如果像过去营造速生林那样营造碳汇林，只选那些碳汇能力强的少数物种，甚至选择单个树种营造纯林，这样营建的城市绿地很可能是低多样性的生态系统，还没有考虑气候变化对碳汇功能的影响。这与生态文明建设、保护生物多样性的宗旨是不符合的。

5.2 政策建议

（1）生态保护策略

优化产业结构：重点发展低碳的第三产业，限制高污染的第二产业的扩张。推动高耗能产业（如制造业）向低碳技术转型，推广清洁能源如太阳能、风能，和碳捕集技术（CCUS）。

绿色 GDP 考核：将碳排放强度，即单位 GDP 碳排放量纳入绩效考核，促进经济高质量发展。同时推动林业碳汇交易，将生态价值转化为经济收益。

加强风险防控：加强对森林火灾、病虫害的监测预警力度，保障碳汇稳定性。

实施优先保护：将潮白河湿地等高协同效益区域纳入生态保护优先清单，实施“零开发”管控，严禁商业开发与污染性产业入驻。与此同时建立生态补偿基金，对周边社区因生态保护造成的经济损失进行合理补偿。

构建生态廊道：在城市化挤压严重的东南部，沿河道、交通干线建设生态廊道，种植乡土树种（如油松、白蜡）以连通碎片化生境。同步推进“退工还绿”工程，逐步迁移高污染企业，将土地用于生态修复。维持森林面积扩张趋势，重点通过增加乡土树种、优化林分结构等方法提升森林质量。

（2）碳汇提升策略

推广混交林与技术创新：在现有纯林中引入阔叶树种，形成“针阔混交”模式，提升碳汇密度。同时对试点应用无人机播种、智能滴灌等精准林业技术，降低管护成本。

调整城市绿地物种组成：根据不同植物的碳汇能力与应对气候变化能力关系，并根据未来气候变化的趋势和易发的极端事件，因地制宜筛选出恰当物种组合营建城市绿地；控制绿地建成后管护的碳排放，如灌溉、施肥、喷药及运输中的能源消耗，或者采取近自然方式营建和管养城市绿地植被。这样，多样性组合有望更好地实现城市绿地的碳汇功能，环境稳定时碳汇能力更强，环境变化时碳汇能力更稳，出现极端事件时碳汇损失更小。

设计生态补偿机制：对参与碳汇林建设的农户，按碳汇增量发放补贴；对高耗能企业征收生态税，资金专项用于环境修复与物种保护。探索“碳汇质押贷款”模式，鼓励中小企业以碳汇资产融资。

（3）数据驱动管理

建设生态大数据平台：整合林业、环保、气象等多部门数据，扩展已有的城市绿地物种库信息，建立生态大数据平台，实现土地利用变化、碳汇动态、物种分布的实时监测。引入 AI 算法（如卷积神经网络）预测生态风险，以及植物遭遇极端环境变化时的碳汇能力。

促进公众参与科学传播：开发生态类软件，开放碳汇地图、物种观测数据查询功能，鼓励公众参

与“公民科学家”计划（如上传鸟类照片）。通过VR技术模拟生态修复场景，增强公众对政策支持的认同感。

（4）碳汇规划策略

通州区森林碳汇规划可基于碳汇具有滞后性进行优化：森林增植项目应采用至少3年的评估周期，避免过早判断碳汇效益。同时为实现稳定碳汇增长，理想的造林节奏应保持年度连续性，形成滚动式碳汇贡献。在选择碳汇监测的指标时森林覆盖面积可作为碳汇即时监测的替代指标，而其他指标则适合作为未来碳汇潜力的预测因子。而环保支出与碳汇的长期滞后关系提示需要建立持续稳定的生态投入机制，而非短期项目。环保支出应保持稳定连续性，避免短视行为；绩效评估应采用至少5年周期，而非年度考核。

参考文献

[1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge University Press, 2021.

[2] Bolund P, Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas [J]. Ecological Economics, 1999, 29 (2): 293-301.

[3] Gómez-Baggethun E, Barton D N. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning [J]. Ecological Economics, 2013, 86: 235-245.

[4] 北京市通州区人民政府.副中心52项措施推进碳增汇减排到2025年,副中心森林覆盖率达到34.6%[EB/OL]. (2024-06-03)[2024-10-10]. http://www.bjtzh.gov.cn/bjtz/home/202406/1714998.shtml

[5] 北京市通州区人民政府.通州湿地面积达5574公顷[EB/OL]. (2024-09-25)[2024-10-10]. https://www.beijing.gov.cn/ywdt/zwzt/jjtz/lsjnhbfz/202409/t20240925_3905970.html.

[6] McKinney M L. Effects of urbanization on species richness: a review of plants and animals [J]. Urban Ecosystems, 2002, 6 (1): 161-176.

[7] Shochat E, Warren P S, Faeth S H, et al. From patterns to emerging processes in urban biodiversity [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25 (11): 610-618.

[8] Chen J M, Black T A, Cihlar J, et al. Estimating forest carbon budgets from measured tree growth and eddy covariance flux data [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113 (1-4): 33-53.

[9] 王成,郄光发,彭镇华.城市森林生态系统服务功能价值评估 [J]. 生态学报,2002, 22 (8): 1258-1265.

[10] 赵莉,戴思兰.北京市通州区不同类型公园绿地植物群落特征比较[J].黑龙江农业科学,2010,(10):80-83.

[11] 张颖, 吴丽莉, 苏帆, 等. 我国森林碳汇核算的计量模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(2): 194-200.

版权声明：©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

OPEN ACCESS