北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

北京大兴区典型生态系统服务评价及其权衡协同关系

王思元 胡梓莹 程瑜佳 李禾 刘昕洋

Typical ecosystem service assessment and its trade-off synergy relationship in Daxing District, Beijing

Wang Siyuan, Hu Ziying, Cheng Yujia, Li He, Liu Xinyang

引用本文:
王思元, 胡梓莹, 程瑜佳, 李禾, 刘昕洋. 北京大兴区典型生态系统服务评价及其权衡协同关系[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):142–151. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240362
Wang Siyuan, Hu Ziying, Cheng Yujia, Li He, Liu Xinyang. Typical ecosystem service assessment and its trade–off synergy relationship in Daxing District, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):142–151. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240362

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240362

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南湾库区森林生态系统服务时空变化特征及其权衡协同关系

Spatiotemporal variation characteristics and their trade–offs and synergies of forest ecosystem services in Nanwan Reservoir Area, Henan Province of central China

北京林业大学学报, 2025, 47(5): 142–155. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240395

不同土地利用情景下天津市生态系统服务及权衡与协同分析

Ecosystem services, trade–offs and synergy analysis in Tianjin under different land use scenarios

北京林业大学学报, 2022, 44(5): 77–85. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210008

辽宁仙人洞国家级自然保护区森林生态服务物质量评估及权衡与协同

Material quality assessment and trade–off synergies of forest ecological service in Xianrendong National Nature Reserve, Liaoning Province of northeastern China

北京林业大学学报, 2023, 45(9): 83–94. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220055

基于生态系统服务的永定河流域北京段生态网络构建与优化

Construction and optimization of ecological network in Beijing section of Yongding River Basin based on ecosystem services

北京林业大学学报, 2022, 44(3): 106–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200272

基于LUCC的承德市域生态系统服务价值演变分析与优化研究

Evolution analysis and optimization research of ecosystem service value in Chengde City, Hebei Province of northern China based on land use/land cover change (LUCC)

北京林业大学学报, 2021, 43(3): 106–116. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190480

黑龙江丰林国家级自然保护区生态系统服务价值评估与分析

Evaluation and analysis on ecosystem service value of Fenglin National Nature Reserve in Heilongjiang Province of northeastern China

北京林业大学学报, 2021, 43(7): 100–110. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210041

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240362

北京大兴区典型生态系统服务评价及其权衡协同关系

王思元[1,2] 胡梓莹[1] 程瑜佳[3] 李 禾[4] 刘昕洋[1]
（1. 北京林业大学园林学院，北京 100083；2. 城乡生态环境北京实验室，北京 100083；3. 北京市建筑设计研究院股份有限公司，北京 100045；4. 北京清华同衡规划设计研究院有限公司，北京 100085）

摘要:【目的】生态系统服务对于提升城市人居环境质量和促进生态平衡具有重要意义，探究其评价方法及权衡协同关系，以期为城市规划和管理策略的科学制定提供有力支持。**【方法】**本研究以北京市大兴区为研究区，利用指标评价法与模型模拟法，选取粮食供给、碳固存、水源涵养、生物多样性维护和休闲游憩 5 项指标，分别对研究区生态系统服务进行综合评价；利用空间叠置法识别热点区域，采用 Spearman 指数与双变量局部空间自相关分析法探讨生态系统服务权衡协同关系，选用自组织映射法识别生态系统服务簇，划分不同生态功能区并提出相应的生态优化策略。**【结果】**(1)大兴区单项生态系统服务的分布在西北和东南方向存在差异，其中供给、调节、支持服务都呈现西北低东南高的分布规律，而文化服务呈现北高南低的分布格局。热点区以供给−调节−支持服务协同聚集为主，集中分布于长子营镇、采育镇及永定河流域。(2)大兴区生态系统服务间权衡与协同关系复杂，生物多样性维护−水源涵养及碳固存−粮食供给协同关系最强，休闲游憩与其他服务多呈权衡关系。(3)大兴区存在 6 类生态系统服务簇，并据此划分为水域生态保育区、都市生态修复区、农业生态供给区、碳汇生态保育区、绿地生态涵养区、均衡生态体验区 6 个功能区。**【结论】**本研究构建了北京市大兴区生态系统服务评价的多元指标体系，深入探讨其生态系统服务权衡与协同关系，并识别功能聚类，研究结果能够为大中型城市的生态服务评价方法提供参考，为现状问题相似、发展目标相同的区域提供规划基础及发展建议。

关键词：生态系统服务；生态系统服务簇；权衡与协同；大兴区；城市规划
中图分类号： S731.2；X826 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)07−0142−10
引文格式：王思元，胡梓莹，程瑜佳，等. 北京大兴区典型生态系统服务评价及其权衡协同关系［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：142−151. Wang Siyuan, Hu Ziying, Cheng Yujia, et al. Typical ecosystem service assessment and its trade-off synergy relationship in Daxing District, Beijing[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 142−151.

Typical ecosystem service assessment and its trade-off synergy relationship in Daxing District, Beijing

Wang Siyuan[1,2] Hu Ziying[1] Cheng Yujia[3] Li He[4] Liu Xinyang[1]
(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecology and Environment, Beijing 100083, China;
3. Beijing Institute of Architectural Design, Beijing 100045, China;
4. Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning & Design Institute, Beijing 100085, China)

Abstract: [**Objective**] Ecosystem services are important for improving the quality of urban habitat and promoting ecological balance. The study of their assessment and synergistic trade-offs will help to develop more scientific and rational urban planning and management strategies. [**Method**] Daxing District of Beijing was taken as the study area. Five indicators, i.e., food supply, carbon fixation, water conservation, biodiversity maintenance and recreation, were selected to comprehensively evaluate the ecosystem services in the study area using the indicator evaluation method and model simulation method. The spatial overlay

收稿日期: 2024−11−04 **修回日期:** 2024−11−27
基金项目: 国家自然科学基金项目(521083038)，北京市核心区绿色公共空间更新研究(2022HXFWYL13)。
作者简介: 王思元，博士，教授。主要研究方向：城乡生态网络规划，城市公共空间更新，当代风景园林发展与理论。Email: wangsyuan@bjfu.edu.cn 地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

method was used to identify hotspot areas, and the Spearman's index and bivariate local spatial autocorrelation were used to explore the synergistic relationship between ecosystem service trade-offs. The Spearman index and bivariate local spatial autocorrelation analysis were used to explore the synergistic relationship between ecosystem service trade-offs, and the self-organized mapping method was used to identify ecosystem service clusters to classify different ecological functional zones and put forward corresponding ecological optimization strategies. [**Result**] (1) The distribution of individual ecosystem services in Daxing District generally showed a pattern of northwest and southeast differentiation, with supply, regulation and support services showing a distribution pattern of low in the northwest and high in the southeast, and cultural services showing a high distribution pattern in the north and low in the south; hotspot areas were dominated by synergistic clustering of supply-regulation-support services, which were centrally located in Changziyang Town, Caiyu Town, and the Yongding River Basin. (2) The relationship of ecosystem service trade-offs and synergistic relationships in Daxing District was complex. The synergistic relationship between ecosystem services in Daxing District was complex, with the strongest synergistic relationship between biodiversity maintenance, water conservation, carbon sequestration and food supply, and the trade-off relationship between recreation and other services. (3) There were 6 types of ecosystem service clusters in Daxing District, which were classified into six functional districts, including watershed ecological conservation district, urban ecological restoration district, agro-ecological supply district, carbon sink ecological conservation district, greenland ecological nourishment district, and equilibrium ecological experience district. [**Conclusion**] This paper constructs a multivariate index system for evaluating ecosystem services in urban fringe areas, discusses ecosystem service trade-offs and synergies in depth and identifies functional clustering. The research results can provide reference for ecological service evaluation methods in large and medium-sized cities, and provide planning basis and development suggestions for regions with similar current problems and development goals.

Key words: ecosystem services; ecosystem service bundle; trade-offs and synergies; Daxing District; urban planning

生态系统服务(ecosystem services，ESs)是指人类通过生态系统结构、功能和过程直接或间接获取维持人类生存和生活所需的产品或惠益[1]。生态系统服务包括供给服务、支持服务、调节服务和文化服务 4 个方面，已被全球众多研究者广泛支持和应用[2]。鉴于生态系统服务空间分布的异质性和生态过程的复杂性，各类生态系统服务间或呈现出共同进退的协同关系或此消彼长的权衡关系[3]。厘清生态系统服务之间的权衡协同关系，对于明确生态系统服务权衡管理的优先区域、为生态修复规划分区提供科学依据具有重要意义[4]。

目前，生态系统服务的主要评价方法有价值评估法、模型模拟法、指标评价法。价值评估法是用于生态系统服务评估最早的方法，主要从单位面积价值或者单位服务功能方面对生态系统服务进行评估[5]。该方法数据要求少、易于获取，且适用于各种尺度，但存在定价来源不一致的问题，使得结果可比性较差。近年来基于遥感数据和 3S 技术支持的 ESs 功能模型发展迅速，模型模拟法的使用越来越广泛，如城市森林影响模型(urban forest effects，UFOR)[6]、生态系统服务社会价值模型(social values for ecosystem services，SolVES)[7]、城市绿地的福利模型(benefits of urban green spaces，BUGS)[8]、生态系统服务和权衡的综合评估模型(integrated valuation of ecosystem services and trade-offs，InVEST)[9]等。这些模型方法具备系统性强、可视化程度高、适应性强的优势，能够高效模拟不同类型生态系统服务的空间分布和变化趋势。但受限于数据需求，这种模型在较大尺度的空间应用上存在一定的局限性。指标评价法是生态系统服务评价的重要前提与基础。国外学者 Herreros-Cantis 等[10]将生态系统服务的供需指标空间化，用于揭示纽约市不同群体间的环境正义差异。Brzoska 等[11]在德国城市区案例中提出多指标综合评价方法，完成城市尺度下生态系统服务的多维度特征评估。国内也逐步形成了多维度、分层级的指标构建方法，黄从红等[12]系统梳理了生态系统服务功能模型与指标的演化过程，推动了城市生态系统服务评价的本土化发展。指标评价法可以根据评价目的及评价内容不同、可获取数据的差异、研究尺度的不同，建立适宜的生态系统服务指

标，但存在评价结果主观性较强的缺陷。而将指标评价法和模型模拟法结合使用，可以解决单一方法指标缺乏准则或尺度受限的问题，提高评价的准确性。

生态系统服务权衡关系的研究方法主要有相关系数法、统计学法、极值分析法、多目标决策分析法等，这些方法为揭示生态系统服务间的相互作用提供了有力工具[13]。研究[14−15]显示，不同研究区域的生态系统服务所表现出的权衡和协同关系各异，具有强烈的空间异质性。在城市生态系统中，由于社会经济的高度发达和人类活动的剧烈干扰，生态系统服务间的权衡与协同关系更为复杂[16−17]。刘小波等[18]研究发现，城市建设用地的快速扩张导致生态系统服务下降，尤其是对生境质量产生了显著的负面效应。因此，研究城市生态系统服务权衡与协同关系的空间异质性显得尤为迫切。

北京市大兴区处于平原地带，是距北京中心城区最近的城市发展新区，发展不受自然地理限制，在快速城镇化和乡村转型大背景下，有支撑北京市产业结构升级、城市空间结构转型和中心城区人口疏散等功能，是直接影响北京市土地资源配置效率和经济社会发展可持续性的重要区域。因此，研究大兴区生态系统服务空间分布特征十分必要。本研究拟将指标评价法与模型模拟法结合，选取粮食供给、碳固定、水源涵养、生物多样性维护及休闲游憩等生态系统服务指标，从供给、调节、支持、文化 4 方面综合评价北京市大兴区生态系统服务；应用空间叠置法识别热点区域，通过 Spearman 相关分析法、双变量局部空间自相关分析法以及自组织映射法，明确生态系统服务之间的权衡协同关系并识别生态系统服务簇，并提出相应的生态优化策略。研究结果将为大兴区生态系统服务功能的识别与优化提供科学依据，有助于推动区域土地资源的高效配置与生态环境的协同提升，为实现可持续发展目标奠定基础。同时将丰富城市生态系统服务评估的方法体系，为其他具备相似发展条件的区域提供技术路径与实践参考。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

大兴区位于中国北京市南郊平原，地跨 116°12′E ~ 116°43′E，39°26′N ~ 39°50′N，距离北京市区 20 km，包含 2 个新城单元、1 个临空经济区、11 个镇，各行政单元位置分布如图 1。研究区域总面积约 1 036 km^2，全区以农用地（包括耕地、采摘园、农业观光园等，占比 35.98%）及建设用地（包括居住用地、公共设施用地、公园绿地等，占比 60.02%）为主，林地、水域、草地、未建设用地比重较小（图 2）。地势自西北向东南缓倾，海拔 8 ~ 75 m。大兴区历年平均降雨量为 507.2 mm，年均气温 11.7 ℃，盛行东北风和西南风。西侧永定河自北向南经过是北京最重要的水源地，凤河自西北向东南穿过，两条河道及其支流为研究区域带来丰富的水源。

1.2 研究方法

1.2.1 生态系统服务评价

本研究基于多源数据，采用指标评价法与模型模拟法对生态系统服务进行评价，评价指标的选取基于 MA 评价体系[2]与《大兴分区规划（国土空间规划）》（2017—2035 年）[19]（下文简称大兴分区规划），同时兼顾生态与社会成分，筛选出来自供给、调节、支持、文化 4 种生态系统服务方面的 5 项评价指标，其中，供给服务中选取了粮食供给指标，调节服务中选取了碳固存和水源涵养指标，支持服务中选取了生物多样性维护指标，文化服务中选取了休闲游憩指标。北京市的农业用地隶属都市农业，它位于都

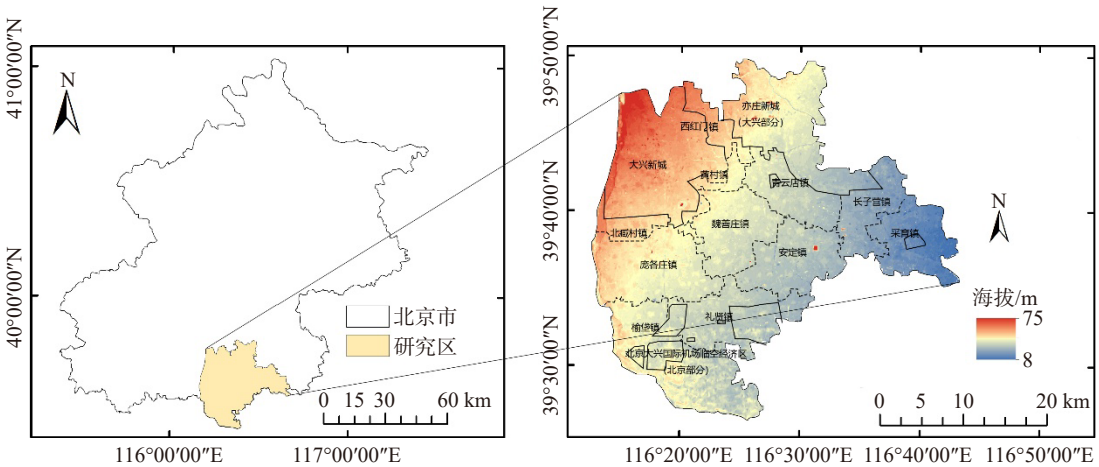
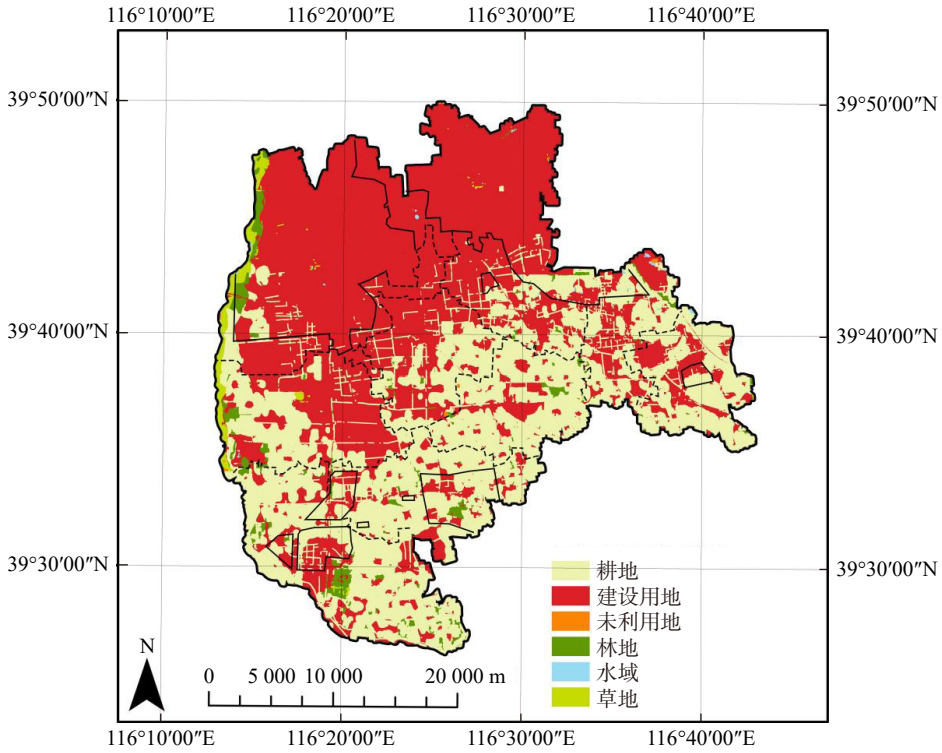


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of research area



图片数据来源于武汉大学杨杰与黄昕教授团队构建的 1985—2023 年中国逐年 30 m 分辨率土地覆盖数据集（CLDC）。

图 2　大兴区土地利用类型

Fig. 2　Land use types of Daxing District

市经济圈内，不仅为城市居民提供粮食而且其中的采摘园及农业观光园提供了休闲游憩场所，因此研究将农业用地视为城市生态系统的一部分参与指标选取与计算。各项指标具体的选取依据和数据来源见表 1，后续分析前已将各项生态系统服务原始数据栅格化处理。

1.2.2　生态系统服务综合热点识别

利用自然间断点法，将大兴区单项生态系统服务评价结果从最低到最高进行 5 级分类，单项评价结果为最高等级的地区为该服务的热点区。利用空间叠置法识别综合热点区域，将全局范围区域内存在 0 种、1 种、2 种、3 种、4 种、5 种单项生态系统服务热点区分别定义为 0 类、1 类、2 类、3 类、4 类、5 类综合热点区。

1.2.3　生态系统服务权衡协同关系分析

采用 Spearman 相关分析法对大兴区 5 种生态系统服务间的相关关系进行分析。相关系数范围为 −1 ~ 1，值为正则说明是协同关系，值为负是权衡关系，其绝对值越大代表相关程度越高。

以 250 m × 250 m 栅格尺度作为研究单元在 GeoDa 中进行双变量局部空间自相关分析，通过 LISA 聚类图来表现权衡与协同空间聚集效果。一般

表 1　指标选取依据及数据来源

Tab. 1　Index selection basis and data source

生态系统服务类型	选取指标	选取依据（来自大兴区规划[19]）	表征参数	数据来源	计算方法
供给服务	粮食供给	第四章第三节：对实现耕地数量质量三位一体保护要求	粮食生产密度[20]	《北京大兴年鉴》，地理空间数据云	NDVI定量指标法
调节服务	碳固存	第四章第一节：“推进森林城市建设”发展要求	碳固存密度[21]	地理空间数据云，中国陆地生态系统碳库中与研究区相近位置的数据	InVEST模型法
	水源涵养	第四章第二节：“构建多水源的水源保障体系”“推动永定河水系生态修复”“加强雨洪管理，建设海绵城市”等规划要点	水源涵养服务能力指数[22]	https://modis.gsfc.nasa.gov/，全国土壤数据集，寒旱区科学大数据中心，中国气象数据网，地理空间数据云	NPP 定量指标法
支持服务	生物多样性维护	第四章第一节：“打造集中连片的大型森林斑块，营造绿色廊道，搭建生物通道，优化区域生态环境品质，提升生物多样性”发展要求	生物多样性维护服务功能指数[22]	https://modis.gsfc.nasa.gov/，中国气象数据网，地理空间数据云	NPP 定量指标法
文化服务	休闲游憩	第三章第四节：“高品质构建绿地系统与游憩体系”及第七章“传承历史文脉培育新名片，塑造新国门城市风貌”发展要求	游憩服务得分[23]	http://web.ornl.gov/sci/landscan/，百度地图	游憩得分指标评价法

划分为 4 种聚类特征，其中高–高聚类和低–低聚类属于协同关系，高–低聚类和低–高聚类属于权衡关系[24]。

1.2.4 生态系统服务簇识别

基于自组织映射法的 *K*-均值聚类法对生态系统服务进行聚类，以 250 m × 250 m 栅格尺度作为研究单元，利用 R 语言和 Arcgis10.8 识别生态系统服务簇，并依据不同服务簇中起主导作用的服务类型，划分区域生态系统功能区，并根据其组成结构及特点得出针对性的优化建议。

2 结果与分析

2.1 大兴区生态系统服务单项指标空间分布

图 3 显示：大兴区单项生态系统服务的分布总体呈现西北和东南分异的格局。具体来说，在供给服务方面，粮食供给服务的高值区主要位于长子营镇北部、采育镇和榆垡镇南部等地，低值区域大部分分布在大兴区北部，少部分高值区与低值区相邻，总体呈现由西南向东北递减的分布情况。在调节服务方面，碳固存的空间分布格局呈现出由南向北递减的趋势，具有明显的南北差异，其高值区主要分布在榆垡镇、礼贤镇、安定镇、长子营镇等区域以及临空经济区，低值区大多分布在大兴区北侧，部分在南侧呈点状分布。另一指标水源涵养空间分布格局呈现高值区集中分布，低值区具有由点向外辐射的特点，其高值区主要分布在大兴区西部接近永定河的区域和东部长子营镇及采育镇，低值区主要分布在大兴新城、亦庄新城与南部临空经济区的城市建成区。在支持服务方面，生物多样性维护能力的总体呈现由中部向东西两侧逐渐升高的趋势，且大部分区域与水源涵养服务分布情况类似。临近永定河的北臧村及庞各庄部分区域支持服务水平明显高于周边地区，而在人口较为密集的大兴新城核心区及临近主城区的区域该服务水平相对低。在文化服务方面，休闲游憩指数的空间分布呈现出北高南低的分布状态，其高值区在大兴新城、亦庄新城、庞各庄东部、采育镇等区域组团状分布，总体有沿北京市中轴线及交通干道向外辐射的趋势。

2.2 大兴区生态系统服务综合热点分布

大兴区生态系统服务综合热点区较为集中，研究区无 5 类热点区，4 类热点区的栅格占比为 1.26%，3 类热点区的栅格占比为 6.54%，2 类热点区的栅格占比为 13.78%，1 类热点区域栅格占总栅格的 30.88%，0 类热点区的栅格占总栅格的 47.54%（图 4）。

结合图 3 和图 4 结果可知：在 4 类热点区中，供给服务、调节服务和支持服务呈现高水平聚集的特征，主要分布在长子营镇、采育镇等区域；2、3 类热点区主要呈现调节服务和支持服务高水平聚集特征，主要分布在永定河周边以及大兴区东部，包括青云店镇、魏善庄镇东部、安定镇北部、长子营镇和采育镇，且集中分布在古桑森林公园附近；1 类热点区

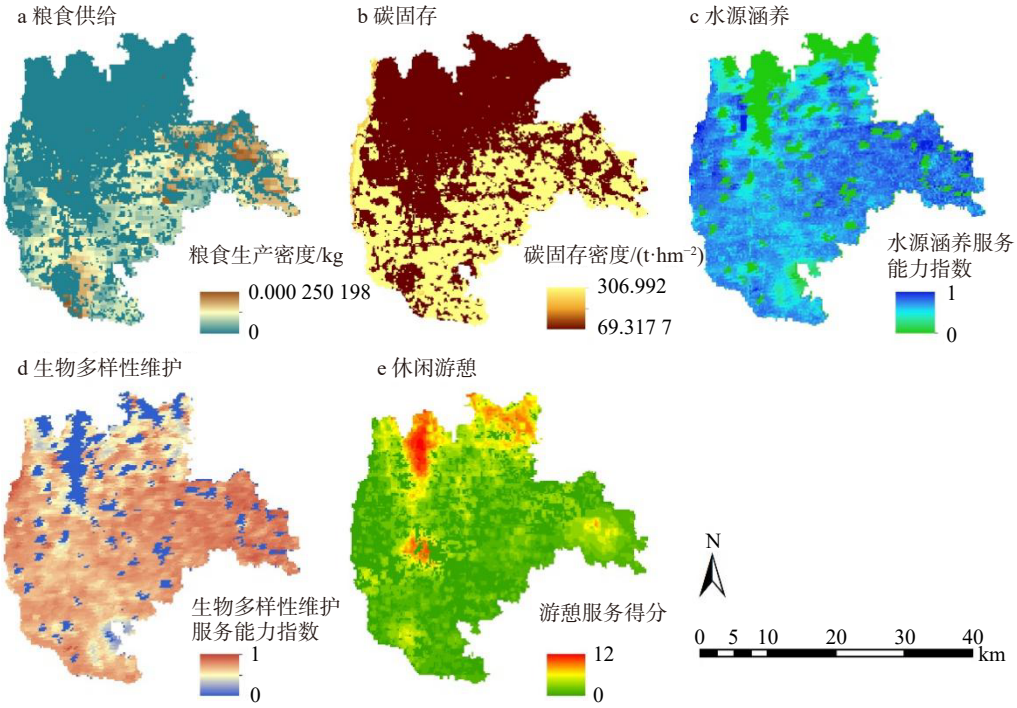


图 3 大兴区生态系统服务不同指标的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of varied indicators of ES in Daxing District

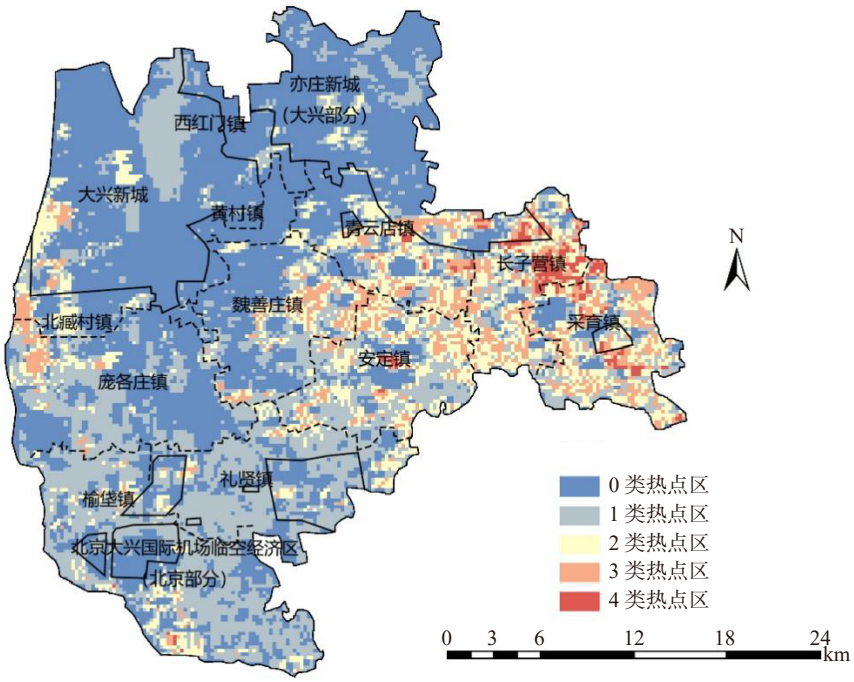


图 4　大兴区生态系统服务综合热点区分布

Fig. 4　Distribution of comprehensive hotspot area of ecosystem services in Daxing District

主要是供给服务或文化服务水平高的区域，文化服务高值分布在大兴新城高速集中的区域，供给服务高值集中在长子营镇北部、采育镇和榆垡镇南部等地；0 类热点区各类服务水平均不高，集中分布在大兴新城、亦庄新城和黄村镇、魏善庄镇西部、庞各庄镇东部区域。

2.3　大兴区生态系统服务权衡与协同

相关性结果（图 5）显示：大兴区 5 项生态系统服务指标之间同时存在协同与权衡关系，其中 6 对为正相关，表现为相互增益的协同关系，4 对为负相关，表现为此消彼长的权衡关系。其中，生物多样性维护–水源涵养（0.88）、碳固存–粮食供给（0.85）这两组相关系数最大，表明二者协同程度最大；休闲游憩

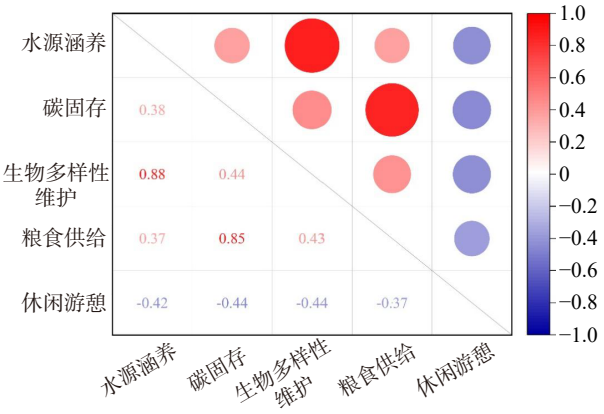


图 5　大兴区生态系统服务 Spearman 指数热力图

Fig. 5　Heat map of Spearman index of ecosystem services in Daxing District

与其他 4 类生态系统服务均呈现权衡关系。

大兴区生态系统服务权衡与协同空间分布结果如图 6 所示，为了更直观地了解不同生态服务指标间的协同与权衡关系，分别计算大兴区生态系统服务间权衡与协同关系的面积占比（图 7）。其中，碳固存–粮食供给协同面积占比高达 70.19%，远大于权衡面积；水源涵养–休闲游憩、碳固存–休闲游憩、生物多样性维护–休闲游憩和粮食供给–休闲游憩这 4 对权衡面积占比均显著大于协同面积；水源涵养–碳固存、水源涵养–生物多样性维护、水源涵养–粮食供给、碳固存–生物多样性维护、生物多样性维护–粮食供给这 5 对协同面积占比高于权衡面积，同时不显著面积占比也相对较大。以上结果表明在空间分布方面，大兴区各生态系统服务指标之间存在比较复杂的权衡与协同关系。

2.4　大兴区生态系统服务簇与功能分区

本研究利用自组织映射法聚类识别到 6 类生态系统服务簇（图 8a）。通过服务簇中生态系统服务组成结构以及主导服务类型，将大兴区生态系统划分为 6 个功能区，分别为水域生态保育区、都市生态修复区、农业生态供给区、碳汇生态保育区、绿地生态涵养区、均衡生态体验区（图 8b）。

服务簇 I 为水域生态保育区，约占区域总面积的 6.63%，该区域提供高水平的水源涵养、生物多样性维护、粮食生产等生态系统服务，提供少量碳固定和休闲娱乐生态服务，生态基底状况良好。该区域主要沿永定河、新天堂河、风河等水系分布，位于建

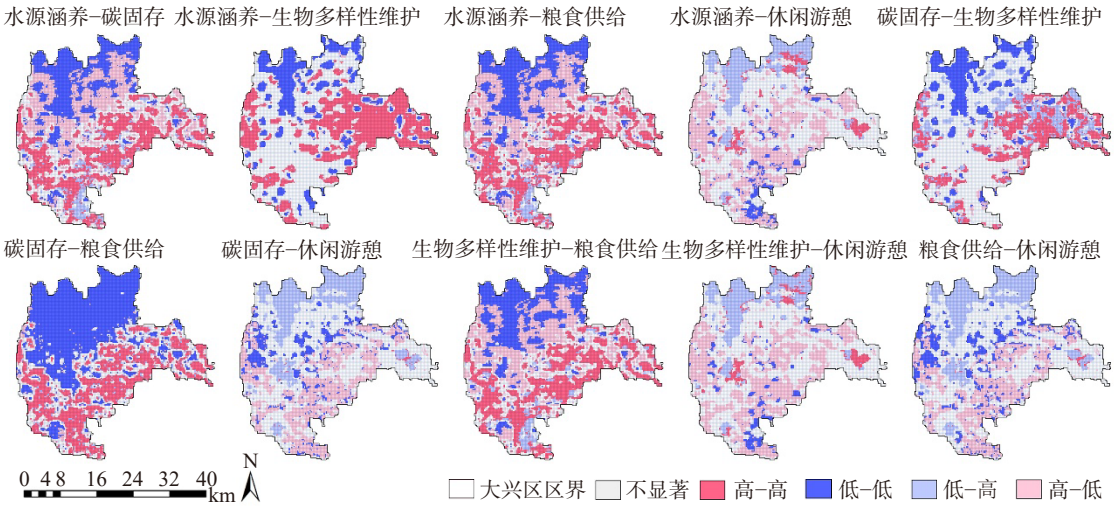


图 6 大兴区生态系统服务权衡与协同空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of trade-offs and synergies among ecosystem services in Daxing District

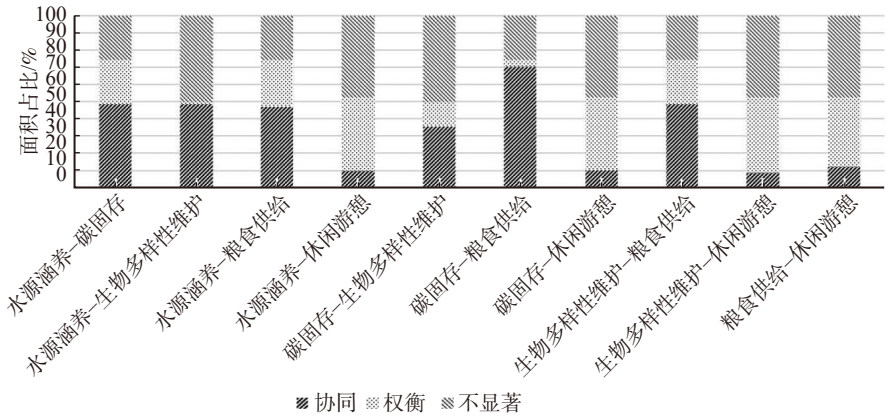


图 7 大兴区生态系统服务权衡与协同面积占比

Fig. 7 Proportion of area with trade-offs and synergistic relationships between ecosystem services in Daxing District

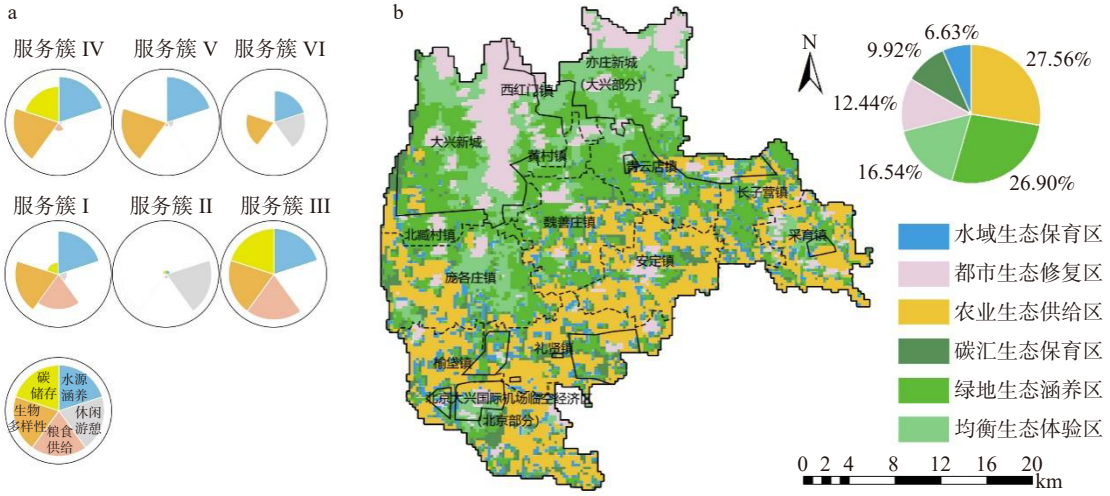


图 8 大兴区生态系统功能分区空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of trade-offs and synergies among ecosystem services in Daxing District

设用地、耕地和林地等土地利用类型的交界处。服务簇 II 为都市生态修复区，约占区域总面积的 12.44%，其主要提供的生态系统服务为休闲娱乐，且几乎不提供其他服务，服务基底较为薄弱。这些区域主要分布在亦庄地区北部、清源街道、林校路街道等地，这些地区均为建设用地。服务簇III为农业生态供给区，约占区域总面积的 27.56%，土地利用类型主要为耕地，在提供水源涵养、生物多样性维护、

粮食生产、碳固定等服务方面表现突出，为 4 类服务簇中的佼佼者，生态基底良好。其主要分布于礼贤镇、安定镇、庞各庄镇西部以及榆垡镇的大部分地区。服务簇Ⅳ为碳汇生态保育区，约占区域总面积的 9.92%，生态基底良好。这些区域土地利用类型主要为林地、草地，主要分布于大兴区西部永定河沿岸的北京市宝兴高尔夫俱乐部附近、榆垡镇中部的野生动物园、北京森林假日高尔夫俱乐部等地，具备较好的水源涵养和生物多样性维护条件。服务簇Ⅴ为绿地生态涵养区，约占区域总面积的 26.90%，它主要分布在团河行宫遗址、南海子公园、念坛公园、清源公园等地，这些区域多为建设用地，位于城市绿地周边。服务簇Ⅵ为均衡生态体验区，约占区域总面积的 16.54%，提供较为均等的中等水平的水源涵养、生物多样性维护、休闲娱乐等生态系统服务。该区域主要分布在南水北调亦庄调节池附近、念坛水库附近、新天堂河沿岸等地，这些地点多为建设用地，并与城市绿地和水系有一定的关联。

3　讨　　论

随着全球城市化进程不断加快，城市生态系统面临多重压力，生态系统服务作为自然向人类社会提供的生态功能的媒介，对保障城市生态安全与提升人居环境质量具有关键意义[25]。当前，如何科学评估生态系统服务的空间格局与服务关系，已成为生态规划与区域治理的重要研究方向。

本研究通过结合指标评价法与模型模拟法，构建了较为系统的生态系统服务综合评估框架。研究发现，大兴区生态系统服务在空间上呈现显著的异质性。单项生态系统服务空间格局受用地类型与分布影响较大，这一结果与 Latinopoulos 等[26]在土地利用变化驱动下生态系统服务空间分布差异的研究结果相符，进一步验证了土地利用格局是影响生态系统服务分布的重要因素。如粮食供给受农业用地分布影响较大，由于国家严格明确划分了耕地红线，建设用地可能与粮食产量高的区域相邻，因此会出现粮食供给数值为 0 的区域与高值区相邻的情况。碳固定量的指标选取与绿地、森林、水源等生物量有关，城市建成区总体上植被覆盖较低，生物量相对较少，因此碳固定数值较低。同时，由于建设用地分布有一定的城市公园及小微绿地，其碳固定量数值不为 0；耕地中的村庄多呈点状分布，因此大兴南侧有点状分布的低值区；耕地中既分布有一年生农作物，又分布有多年生的果树灌木等，因此固碳量也是不均衡的。大兴区主要建设用地集中在北部的大兴新城及亦庄新城位置，因此碳固定量总体出现北低南高的结果。近年来受城市扩张的影响，大兴区南部低值区也逐渐增多。生物多样性维护受林地分布影响较大。城市建设和人类的频繁活动，对生态环境破坏较为严重，致使生物多样性服务水平相对较低。永定河、凤河流域的周边地区以及中南部部分区域，因为有村落分布，建设密度不高，绿地分布均匀。南部地区的临空经济区正在开发建设中，具有良好的绿地系统规划布局，呈现出生物多样性维护的中、高水平。而大兴新城、亦庄新城由于近些年的城市快速发展，建设密度大，绿地分布不均，呈现出生物多样性维护的低水平。休闲游憩受人口聚集度及游憩设施分布影响较大。城市建成区如大兴区新城与亦庄新城，大部分居民点分布于此，人口相对集中，公园绿地建设较为完善，具有良好的游憩服务体系，因此文化服务呈现出较高的水平。此外南部区域虽然城镇建设相对较晚，但由于近两年政府扶持旅游业发展，兴起了一批农业采摘园、农业观光园，吸引了附近城镇居民前来游览体验，因此也出现了文化服务数值较高的集中区域。高值区的分布一定程度上受到交通可达性的影响，表明增强道路建设对提高文化服务水平有促进作用。

生物多样性维护与水源涵养之间、碳固存与粮食供给之间呈现较强的协同关系，而休闲游憩与碳固存、粮食供给等则存在显著的权衡关系。这类权衡−协同特征反映出城市边缘地区生态系统多功能集成的复杂性，与 Herreros-Cantis 等[27]在纽约市探讨生态服务不均衡供需关系下的环境正义问题形成一定呼应。此外，采用自组织映射法识别的 6 类生态系统服务簇，为不同生态功能区划定提供了科学依据，有助于实现差异化生态管理与优化策略制定，符合 Brzoska 等[11]提出的城市尺度下多准则服务识别与管理的理念。通过分析服务簇识别结果可知，服务簇之内的生态系统服务供给水平呈现类似的特征。基于此，提出以下生态系统服务提升意见。

水域生态保育区这些地区由于水系丰富，使得其在水源涵养和水文调节方面有着较强的服务能力。建议结合现有的生态保护规划，加大林地、草地和湿地的保护力度，并严格控制水资源和林地的开发活动。对于毁林、毁草、破坏湿地等破坏生态的行为，应依法予以严惩。此外，还应注重小流域的综合治理，积极推行生态保护治理工程，建立湿地生态保护区，确保生态系统的稳定与功能的发挥。都市生态修复区鉴于该区域的生态系统服务功能单一，应当针对现状提出改进，比如增加屋顶花园、垂直绿化等小微城市绿色空间，提升其生态服务功能。农业生态供给区在水源涵养和粮食生产等方面的服务能

力较强，然而由于土地利用类型主要为耕地，较为单一，可能存在一定的生物多样性单一、土壤肥力流失等生态风险。可根据现有的土地利用规划进一步加强对耕地资源的保护和管理，同时适度引入生态林地、草地等多元化的土地利用类型，以增强区域的生态稳定性；推广科学的农业耕作方式，保护土壤健康和生物多样性。此外，可以建立生态监测和预警系统，及时发现并应对潜在的生态风险，确保该区域的生态系统能够持续、稳定地提供服务。碳汇生态保育区主要提供高水平的水源涵养、生物多样性维护等生态系统服务，以及中等水平的碳固定服务，以维持林地、草地生态系统稳定为主要管理目标，应加强生态监测，定期对区域内的生物多样性、水源涵养能力、土壤质量、气候状况等进行监测和评估，为生态保护提供科学依据；通过树木补植、湿地保育等方式提高生态系统的碳固定能力，消减城市扩张对生态环境负面影响，促进城绿交融。绿地生态涵养区提供高水平的水源涵养、生物多样性维护等生态系统服务，以及少量休闲游憩服务。建议结合现有绿地规划加大对城市绿地的保护力度，提升城市绿地生态水平与生物多样性承载力，促进城市生态系统的健康发展。均衡生态体验区应参照现有的生态保护规划，避免建设活动对生态造成破坏。同时，应严格控制水源地的污染，确保水质安全。为提升生物多样性，可以考虑在适宜的地方增加植被种类，为野生动物提供栖息地。此外还可以在本区域加强科普教育，提升公众对生态保护的认识和参与度，共同促进生态平衡与可持续发展。

本研究在城市生态系统服务评估方法上具有一定创新性，结合定量模型、空间分析与多维指标体系，在服务识别、空间分区与权衡机制识别等方面构建了较为完整的技术路径，为大中型城市的生态管理提供了实证支持与方法参考。然而，本研究亦存在一定局限性。一方面，部分模型参数依赖外源数据，可能未能充分反映区域生态过程的差异性；另一方面，文化服务的量化仍面临数据可获取性与主观性评估方法缺乏的挑战。未来研究可在 3 个方面进一步拓展：其一，引入多时相遥感数据与生态遥感指数，实现生态系统服务动态变化监测；其二，融合社会经济数据，增强生态服务的供需匹配分析与服务公平性评价；其三，推动生态系统服务评估与国土空间规划深度融合，实现从科学评估向政策转化的有效落地。

4 结　　论

本研究将指标评价法与模型模拟法结合，选取粮食供给、碳固存、水源涵养、生物多样性维护及休闲游憩等生态系统服务指标，从供给、调节、支持、文化 4 方面综合评价北京市大兴区生态系统服务；应用空间叠置法识别热点区域，通过 Spearman 相关分析法、双变量局部空间自相关分析法以及自组织映射法，明确生态系统服务之间的权衡协同关系并识别生态系统服务簇。研究得到以下结论。

（1）大兴区单项生态系统服务的分布总体呈现西北和东南分异的格局，供给、调节、支持服务都呈现西北低东南高的分布规律，文化服务北高南低；热点区以供给−调节−支持服务协同聚集为主，集中分布于长子营镇、采育镇及永定河流域。

（2）大兴区生态系统服务间权衡与协同关系复杂，生物多样性维护−水源涵养及碳固存−粮食供给协同最强，休闲游憩与其他服务多呈权衡关系。

（3）大兴区存在 6 类生态系统服务簇，据此划分为 6 个功能区，分别为水域生态保育区、都市生态修复区、农业生态供给区、碳汇生态保育区、绿地生态涵养区、均衡生态体验区。

参 考 文 献

[1] Daily G C, Postel S, Bawa K, et al. Nature’s services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington: Island Press, 2012.

[2] 成超男, 胡杨, 赵鸣. 城市绿色空间格局时空演变及其生态系统服务评价的研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1770−1782.
Cheng C N, Hu Y, Zhao M. Research progress and prospects on the spatio-temporal evolution of urban green space patterns and their ecosystem service evaluations[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1770−1782.

[3] 邓煌炜, 廖振良. 生态系统服务驱动因素及供需研究进展 [J]. 环境科技, 2020, 33(1): 74−78.
Deng H W, Liao Z L. Environmental science and technology[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 33(1): 74−78.

[4] 聂名萱, 黄思华, 濮励杰, et al. 快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析——以苏锡常地区为例 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1088−1099.
Nie M X, Huang S H, Pu L J, et al. Spatial and temporal dynamics and trade-offs and synergies analysis of ecosystem services in rapidly urbanizing areas: a case study of the Su-Xi-Chang region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(5): 1088−1099.

[5] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进 [J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243−1254.
Xie G D, Zhang C X, Zhang L M, et al. Improvement of ecosystem service valuation method based on equivalent factor per unit area value[J]. The Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1243−1254.

[6] Jim C Y, Chen W Y. Ecosystem services and valuation of urban forests in China[J]. Cities, 2009, 26: 187−194.

[7] Sherrouse B C, Clement J M, Semmens D J. A GIS application for assessing, mapping, and quantifying the social values of ecosystem services[J]. Applied Geography, 2011, 31: 748−760.

[8] de Ridder K, Adamec V, Bañuelos A, et al. An integrated methodology to assess the benefits of urban green space[J]. Science of the Total Environment, 2004, 334−335: 489−497.

[9] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测 [J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1): 41−51.
Sun X X, Xue J H, Dong L N. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1): 41−51.

[10] Herreros-Cantis P, McPhearson T. Mapping supply of and demand for ecosystem services to assess environmental justice in New York City[J]. Ecological Applications, 2021, 31: e02390.

[11] Brzoska P, Grunewald K, Bastian O. A multi-criteria analytical method to assess ecosystem services at urban site level, exemplified by two German city districts[J]. Ecosystem Services, 2021, 49: 101268.

[12] 黄从红, 杨军, 张文娟. 生态系统服务功能评估模型研究进展 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(12): 3360−3367.
Huang C H, Yang J, Zhang W J. Advances in research on ecosystem service function assessment models[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(12): 3360−3367.

[13] 范静静. 多尺度生态系统服务时空格局变化与相互作用关系研究 [D]. 西安: 西北大学, 2021.
Fan J J. Study on spatio-temporal pattern changes and interaction relationships of multi-scale ecosystem services [D]. Xi'an: Northwest University, 2021.

[14] 高艳丽, 李红波, 侯蕊. 汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变 [J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(7): 1619−1630.
Gao Y L, Li H B, Hou R. Evolution analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in Hanjiang River Basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(7): 1619−1630.

[15] 祝萍, 刘鑫, 郑瑜晗, 等. 北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同 [J]. 生态学报, 2020, 40(23): 8694−8706.
Zhu P, Liu X, Zheng Y H, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in key ecological function zones in northern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8694−8706.

[16] Yuan Y J, Wu S H, Yu Y N, et al. Spatiotemporal interaction between ecosystem services and urbanization: case study of Nanjing City, China[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 917−929.

[17] Zhang X, Liu L, Chen X, et al. GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery[J]. Earth Syst Sci Data, 2021, 13: 2753−2776.

[18] 刘小波, 王玉宽, 刘勤, 等. 基于城市化梯度的中国西南地区生态系统服务权衡与协同 [J]. 生态学报, 2023, 43(22): 9416−9429.
Liu X B, Wang Y K, Liu Q, et al. Tradeoffs-synergies analysis of ecosystem services along urbanization gradient in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(22): 9416−9429.

[19] 北京市规划和自然资源委员会. 大兴分区规划 (国土空间规划)(2017 年—2035 年)[Z]. 北京, 2020−02−14.
Beijing Municipal Commission of Planning and Natural Resources. Daxing Sub-district Plan (Territorial Spatial Plan) (2017–2035) [Z]. Beijing, 2020−02−14.

[20] 吴平, 林浩曦, 田璐. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态安全格局构建 [J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(9): 5−11.
Wu P, Lin H X, Tian L. Construction of ecological security pattern based on: a case study in Xiongan New Area, Hebei Province, China[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 5−11.

[21] 蔚芳, 詹小稳. 基于生境质量与碳储量的城市刚性开发边界划定 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2019, 53(8): 1478−1487.
Wei F, Zhan X W. Delimitation of urban rigid development boundaries based on habitat quality and carbon storage[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2019, 53(8): 1478−1487.

[22] 中华人民共和国生态环境部. 生态保护红线划定指南 [Z]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2017−05−27.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Guidelines for delimiting ecological conservation redlines [Z]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2017−05−27.

[23] Qiao X N, Gu Y Y, Zou C X, et al. Temporal variation and spatial scale dependency of the trade-offs and synergies among multiple ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 218−229.

[24] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例 [J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1278−1288.
Gong J, Liu D Q, Gao B L, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: a case study of the Bailongjiang Watershed in Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1278−1288.

[25] Daily G C, Polasky S, Goldstein J, et al. Ecosystem services in decision making: time to deliver[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009, 7(1): 21−28.

[26] Latinopoulos D, Koulouri M, Kagalou I. How historical land use/land cover changes affected ecosystem services in Lake Pamvotis, Greece[J]. Human and Ecological Risk Assessment, 2021, 27(6): 1472−1491.

[27] Herreros-Cantis P, McPhearson T. Mapping supply of and demand for ecosystem services to assess environmental justice in New York City[J]. Ecological Applications, 2021, 31(1): e02390.

（责任编辑　赵田芸
责任编委　李　雄）