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

河北省廊坊市北三县生态系统服务价值与居民福祉耦合协调演变

李永杰 马馨悦 武亚楠 莫丽春

Spatiotemporal evolution of coupling coordination between ecosystem service value and residents' well-being in the northern three counties of Langfang City, Hebei Province of northern China

Li Yongjie, Ma Xinyue, Wu Yanan, Mo Lichun

引用本文:
李永杰, 马馨悦, 武亚楠, 莫丽春. 河北省廊坊市北三县生态系统服务价值与居民福祉耦合协调演变[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(8):142–153. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260008
Li Yongjie, Ma Xinyue, Wu Yanan, Mo Lichun. Spatiotemporal evolution of coupling coordination between ecosystem service value and residents' well–being in the northern three counties of Langfang City, Hebei Province of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8):142–153. doi: 10.12171/j.1000–1522.20260008

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20260008

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于GTWR模型的济南都市圈生态系统服务价值对城市扩张时空响应
Spatiotemporal response of ecosystem service value in Jinan metropolitan area to urban expansion based on GTWR model
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 104–118. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220489

京津冀地区生态基础设施生境质量产业发展耦合协调性分析与预测
Coupling coordination and prediction analysis of ecological infrastructure, habitat quality and industrial development in the Beijing–Tianjin–Hebei region of northern China
北京林业大学学报, 2021, 43(3): 96–105. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200346

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析
Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

土地利用情景对北京市生态系统服务价值及景观生态风险的影响
Impacts of land use scenarios on ecosystem service value and landscape ecological risk in Beijing
北京林业大学学报, 2025, 47(7): 129–141. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240226

上海大都市圈城镇化与生态环境耦合协调关系
Coupling and coordination relationship between urbanization and eco–environment in Shanghai metropolitan area: empirical analysis based on panel data from 2011 to 2020
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 101–111. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230216

基于InVEST模型云南省生态系统服务功能综合评估
Comprehensive evaluation of ecosystem service functions in Yunnan Province of southwestern China based on InVEST model
北京林业大学学报, 2024, 46(11): 103–112. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240123

DOI:10.12171/j.1000−1522.20260008

河北省廊坊市北三县生态系统服务价值与居民福祉耦合协调演变

李永杰[1]　马馨悦[1]　武亚楠[1]　莫丽春[2]
（1. 北京林业大学生态与自然保护学院，北京 100083；2. 应急管理大学应急经济与物资保障学院，河北 三河 065201）

摘要:【目的】分析京津冀城市群城镇化承接区生态系统服务价值（ESV）与居民福祉的时序变化和县域差异，探讨二者耦合协调关系的演变特征，为区域生态保护与民生改善统筹决策提供参考。**【方法】**以廊坊市北三县（三河市、大厂回族自治县和香河县）为例，基于 1999—2023 年土地利用、气象、土壤及社会经济等多元数据，利用 InVEST 模型评估产水、土壤保持、固碳、水质净化与生境质量等生态系统服务，综合影子工程法、替代成本法和市场价值法核算生态系统服务价值；构建居民福祉多维评价指标体系并采用熵权法确定权重；运用耦合协调度模型刻画两系统协同演变特征，同时在整体尺度开展分项 ESV 与福祉维度的相关性分析。**【结果】**（1）1999—2023 年北三县生态系统服务价值总体呈波动上升趋势，ESV 总值由 88.133 亿元增至 332.213 亿元。（2）居民福祉综合指数总体上升，由 0.357 增至 0.697，但 2011 年前后出现阶段性回落，2015 年后增速加快。（3）耦合度 C 介于 0.484～0.997，耦合协调度 D 介于 0.303～0.897，整体由轻度失调向协调水平提升，但城镇化加速阶段存在阶段性波动；县域尺度呈现明显梯度，2023 年三河市耦合协调度显著高于香河县与大厂回族自治县，且香河县后期出现 ESV 回落与福祉上升的错位组合。（4）维度关联结果表明，固碳、水质净化与生境质量等分项与“基本物质需求”维度呈显著正相关，而与“健康与安全”维度相关性较弱或呈负相关；“良好社会关系”维度与生境质量、水质净化的相关性较强。**【结论】**北三县生态系统服务与居民福祉总体呈协同改善，但存在阶段性波动与县域分化。承接区协同治理应面向县域异质性，在稳定关键生态系统服务供给的同时加强公共服务与风险治理能力建设，促进生态保护与民生改善的协同提升。

关键词：生态系统服务价值；居民福祉；耦合协调度；InVEST 模型
中图分类号：F062.2　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2026)08−0142−12
引文格式：李永杰，马馨悦，武亚楠，等. 河北省廊坊市北三县生态系统服务价值与居民福祉耦合协调演变［J］. 北京林业大学学报，2026，48(8)：142−153. Li Yongjie, Ma Xinyue, Wu Yanan, et al. Spatiotemporal evolution of coupling coordination between ecosystem service value and residents' well-being in the northern three counties of Langfang City, Hebei Province of northern China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(8): 142−153.

Spatiotemporal evolution of coupling coordination between ecosystem service value and residents' well-being in the northern three counties of Langfang City, Hebei Province of northern China

Li Yongjie[1]　Ma Xinyue[1]　Wu Yanan[1]　Mo Lichun[2]
(1. School of Ecology and Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. School of Emergency Economics and Material Support, University of Emergency Management, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract:［**Objective**］To analyze the temporal variation and county-level differences in ecosystem service value and residents' well-being in urbanization spillover-receiving areas of the Beijing-Tianjin-Hebei urban

收稿日期: 2026−01−08　**修回日期:** 2026−04−27
基金项目: 廊坊市科技支撑计划（2025013107）。
第一作者: 李永杰。主要研究方向：生态系统服务价值与居民福祉。Email: Lyj0521@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学生态与自然保护学院。
责任作者: 莫丽春，讲师。主要研究方向：资源环境会计与灾害损失评估。Email: lichunmo@ncist.edu.cn　地址：065201 应急管理大学应急经济与物资保障学院。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

agglomeration, to explore the evolution of their coupling coordination relationship, and to provide a reference for regional ecological conservation and coordinated improvement of human well-being. [**Method**] Taking the Northern Three Counties of Langfang (Sanhe City, Dachang Hui Autonomous County, and Xianghe County) as a case study, and based on multi-source data on land use, meteorology, soil, and socioeconomic conditions from 1999 to 2023, this study assessed ecosystem services including water yield, soil conservation, carbon storage, water purification, and habitat quality using the InVEST model. The shadow engineering method, replacement cost method, and market value method were then integrated to estimate ecosystem service value. A multidimensional evaluation index system for residents' well-being was constructed, with indicator weights determined by the entropy weight method. The coupling coordination degree model was used to characterize the coordinated evolution of the two systems, and correlations between ESV components and well-being dimensions were further analyzed at the overall scale. [**Result**] (1) From 1999 to 2023, total ESV in the Northern Three Counties of Langfang showed a fluctuating upward trend, increasing from 8.813 to 33.221 billion yuan. (2) The composite well-being index rose from 0.357 to 0.697, with a temporary decline around 2011 and a faster rise after 2015. (3) The coupling degree (*C*) ranged from 0.484 to 0.997 and the coupling coordination degree (*D*) ranged from 0.303 to 0.897, indicating an overall transition from mild maladjustment toward coordination, while exhibiting phase-specific fluctuations during the period of accelerated urbanization. Clear county-level gradients were observed: in 2023, Sanhe City had a markedly higher D than Xianghe County and Dachang Hui Autonomous County, and Xianghe County showed a mismatch in the later period characterized by declining ESV alongside rising well-being. (4) Dimension-specific associations showed that carbon sequestration, water purification, and habitat quality were significantly positively correlated with the "basic material needs" dimension, whereas correlations with "health and safety" were weak or negative; the "good social relations" dimension was more strongly correlated with habitat quality and water purification. [**Conclusion**] Overall, ecosystem services and residents' well-being in the Northern Three Counties of Langfang improved in coordination, but with stage-dependent fluctuations and county-level differentiation. Collaborative governance in urbanization receiving zones should adopt place-based strategies: stabilizing the supply of key ecosystem services while strengthening public services and risk-governance capacity, so as to promote synergies between ecological conservation and livelihood improvement.

Key words: ecosystem service value; residents' well-being; coupling coordination degree; InVEST model

生态系统服务(ecosystem services，ES)是自然生态系统通过其结构、过程和功能为人类社会提供的多种物质与非物质收益，其最终指向是人类福祉的提升[1]。随着城镇化和区域一体化进程的持续推进，人类活动强度不断增强，土地利用格局发生显著变化，生态系统服务供给能力在部分区域呈现下降趋势，并通过资源供给、生态调节和环境风险等途径对居民福祉产生深刻影响[2]。在此背景下，如何在区域尺度上协调生态系统保护与居民福祉改善，已成为当前地理学、生态学与可持续发展研究中的重要议题。

居民福祉(human well-being，HWB)具有显著的多维属性，既包括物质生活保障，也涵盖健康、安全、教育和良好社会关系等方面。近年来，国内外研究逐步突破以单一经济指标衡量福祉的局限，转而构建多维评价体系，从系统视角探讨生态系统服务与居民福祉之间的交互关系[3]。在方法层面，生态系统服务评估逐渐由等价因子法向基于生态过程的模型方法转变，其中 InVEST 模型因其空间显式性强、模块体系较为完善，被广泛应用于产水量、土壤保持、固碳、生境质量和水质净化等生态系统服务的区域尺度评估[4]。研究[5]表明，InVEST 模型在多尺度生态系统服务评估中具有较高的稳定性和适用性，能够有效支撑生态系统服务变化分析与自然资源管理决策。同时，耦合协调度模型被引入用于刻画生态系统服务与社会经济或居民福祉之间的协调状态及其演变特征[6]。然而，现有研究多集中于省域或城市尺度，县域尺度研究较为缺乏。县域作为土地利用变化与政策调控的关键单元，更利于识别生态–社会过程的细尺度差异。同时针对快速城镇化承接区的长时间序列耦合演变研究也相对不足，难以系统揭示生态系统服务与居民福祉耦合关系的阶段性演变

特征与关键驱动因素。

近年来，首都都市圈空间协同与跨界一体化治理持续深化，通州−北三县被作为首都都市圈协同发展的重要单元加快推进。相关政策与规划明确将通州−北三县（三河市、大厂回族自治县和香河县）作为首都都市圈空间协同的重要单元[7]，强调在空间格局优化、公共服务共建共享、跨界交通组织与生态空间协同管控等方面推进一体化发展[8]。在此背景下，北三县既承担人口与产业承接、功能疏解配套与公共服务协同提升任务，也面临城镇化加速引致的土地利用转型与生态空间挤压压力，生态系统服务供给与居民福祉改善之间可能出现阶段性波动与错位。因而，从县域尺度识别生态系统服务价值（ecosystem service valuation，ESV）与居民福祉的耦合协调演变及其阶段性波动规律，对于支撑首都都市圈空间协同治理高质量发展具有现实意义。

北三县位于河北省廊坊市东北部，是通州−北三县跨界协同发展的关键承接单元，也是首都都市圈建设背景下典型的城镇化承接区。近年来，随着非首都功能疏解、人口转移和产业布局调整，北三县城镇化水平快速提升，土地利用结构发生显著变化，生态系统服务供给能力与居民福祉改善面临新的协调压力[9]。已有研究指出，在快速城镇化承载区，人口集聚、建设用地扩张等过程往往通过改变土地利用/覆盖格局，影响生态系统服务供给，进而对区域可持续发展约束机制产生重要作用[10]。基于此，本研究以北三县为研究区，构建 1999—2023 年长时间序列数据体系，系统分析生态系统服务价值与居民福祉的演变特征及其耦合协调关系，采用基于生态过程的模型方法评估典型生态系统服务并核算其价值，构建多维居民福祉评价体系，分析生态系统服务价值与居民福祉之间的时空耦合特征。研究旨在从县域尺度揭示城镇化承接区生态系统服务与居民福祉协同演变规律，为首都都市圈空间协同治理与通州−北三县一体化高质量发展背景下的生态保护与民生改善统筹提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

北三县由三河市、大厂回族自治县和香河县组成，位于河北省廊坊市东北部（39°36′ ~ 40°02′N，116°51′ ~ 117°14′E），毗邻北京市通州区、顺义区、平谷区及天津市武清区。研究区总面积约 1 277 km^2，地貌以冲积平原为主，地势平坦，海拔约 20 ~ 35 m；属温带半湿润大陆性季风气候，年均气温约 11.5 ℃，年降水量 550 ~ 650 mm，降水主要集中于 6—9 月。区内主要河流包括潮白河、大黑河和鲍邱河，水系格局与区域供水及水质调节功能密切相关。土地利用类型以耕地和建设用地为主，林地、水域和草地占比较低。

1.2 数据来源与处理

本研究构建 1999—2023 年多期数据集，研究单元为廊坊市北三县行政区尺度。

自然生态数据方面，土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心发布的多期遥感解译土地利用数据，时间节点包括 1999、2003、2007、2011、2015、2019 和 2023 年。气象数据来源于中国气象数据网，包括年降水量、气温及参考蒸散量等，采用克里金插值方法生成栅格数据。土壤数据来自中国土壤数据库，DEM 数据采用 ASTER GDEM v2（30 m），用于坡度和地形因子计算。所有栅格数据统一投影坐标系、空间分辨率及研究区范围，以保证不同年份结果的可比性。

社会经济数据主要来源于《河北省统计年鉴》《廊坊统计年鉴》及三河市、大厂回族自治县和香河县历年统计公报。涉及货币量指标均按某一基准年价格进行平减处理，以消除价格因素影响。

1.3 生态系统服务价值评估方法

考虑到北三县的生态状况以及数据的可获得性，采用 InVEST 模型对北三县 1999—2023 年生态系统服务物质量进行评估，包括产水、土壤保持、固碳、水质净化和生境质量等服务[11]。在此基础上，分别采用影子工程法、替代成本法和市场价值法对各项生态系统服务进行价值化核算，各项服务价值相加得到生态系统服务的总价值。为保证跨期可比性，本研究将价值化核算中涉及的货币参数统一折算为 2023 年不变价。对于来源于标准、文献或定额的单位成本参数（如单位蓄水成本、清淤成本、污染物处理成本及生态保护修复投入折算单价等），采用河北省居民消费价格指数（consumer price index，CPI，上年为 100）进行价格口径折算，从而剔除通货膨胀影响，使 ESV 时序变化主要反映生态系统服务物质量变化。

1.3.1 产水服务价值

利用 InVEST 模型中的年产水量模块进行计算，具体计算过程[11]如下。

$$Y(x) = (1 - E(x)) \times P(x) \tag{1}$$

式中：$Y(x)$为每个单元栅格 x 的年产水量（mm）；$E(x)$为每个单元栅格的年实际蒸发量（mm），由参考作物蒸散量、土地利用类型对应的蒸散系数以及气候−土壤参数共同确定。

在此基础上，采用影子工程法对 产水服务进行价值化评估[12]，以水库库容造价作为替代成本，产水服务价值(V_w)计算公式为

$$V_w = \sum Q_w P_w \tag{2}$$

式中：$\sum Q_w$为研究区年产水量总量(m^3)，P_w 为单位蓄水成本，根据 GB/T 38582—2020《森林生态系统服务功能评估规范》，P_w 折算为 15.6 元/m^3。

1.3.2　土壤保持服务价值

基于 InVEST SDR 模块估算土壤保持量(A_c)，该模块通过比较潜在侵蚀量与实际侵蚀量，计算植被和土地利用对土壤侵蚀的削减作用[11]。土壤保持服务价值主要从减少泥沙淤积和减少面源污染两个方面进行核算，其计算方法如下。

$$A_c = RKL_S(1-CP) \tag{3}$$

$$V_{sr} = V_{sd} + V_{dpd} \tag{4}$$

$$V_{sd} = \lambda\left(\frac{A_c}{\rho}\right)P_c \tag{5}$$

$$V_{dpd} = \sum_{m=1}^{4}(A_c C_m P_m) \tag{6}$$

式中：A_c 为土壤保持量(t)；R 为降雨可蚀性因子；K 为土壤可蚀性因子；L_S 为坡度坡长因子；C 为植被覆盖因子；P 为水土保持因子；V_{sr} 为土壤保持价值(元)；V_{sd} 为减少泥沙淤积价值(元)；V_{dpd} 为减少面源污染价值(元)；λ 为泥沙淤积系数；ρ 为土体密度(t/m^3)；P_c 为单位水库清淤工程费用(元/m^3)；C_m 为土壤中 N、P、K 和有机质的纯含量(kg/t)；P_m 为各污染物处理成本(元/kg)；m 为土壤中 N、P、K 和有机质的代号，m = 1，2，3，4。

1.3.3　生境质量维持服务功能价值评估方法

生境质量反映生态系统维持生物多样性与生态安全的能力，属于重要的支持服务类型。本研究基于 InVEST 生境质量模块输出的 30 m 分辨率生境质量指数 H_{Qx}(取值 0 ~ 1)，采用替代成本法进行价值化表征[12]。参考河北省内生态保护与修复工程投入强度信息，并统一折算至 2023 年价格水平，确定单位面积生境维护成本 $C_h = 8.9 \times 10^4$ 元/hm^2。据此，生境质量维持服务价值 V_{hab} 表达如下。

$$V_{hab} = \sum_x (H_{Q_x} A_x) C_h \tag{7}$$

式中：H_{Qx} 为栅格 x 的生境质量指数；A_x 为栅格面积(hm^2)；C_h 为单位面积生境维护成本(元/hm^2，2023 年价格水平)。

1.3.4　碳储量价值

利用 InVEST 模型中得出的碳储量作为研究年份的评估依据，碳交易价值选择对应年份碳市场交易价格[11−12]，计算公式如下

$$N_T = N_a + N_b + N_S + N_d \tag{8}$$

$$V_c = N_T P_f \tag{9}$$

式中：N_T 为碳储量(t)，N_a 为地上碳储量(t)，N_b 为地下碳储量(t)，N_s 为土壤碳储量(t)，N_d 为凋落物碳储量(t)，V_c 为碳储量价值(元)，P_f 为碳交易价格(元/t)。

1.3.5　水质净化服务价值

利用 InVEST 模型的水质净化模块，获取水质中 N、P 总持留量，采用替代成本法将生态系统水质净化服务价值用处理污染水质中的 N、P 净化成本替代，按照以下公式计算生态系统水质净化服务的价值[12]。

$$E_d = \sum(TZ) \tag{10}$$

式中：E_d 为生态系统水质净化价值(元)；T 为 N、P 总持留量(kg)；Z 为 N、P 的净化单价(元/kg)。

1.4　居民福祉评价指标体系

《千年生态系统评估报告》提出，福祉主要指人类在物质、精神和健康方面的需求，包括基础生活材料、安全、健康、良好的社会关系和选择与行动的自由等 5 方面[13]。根据京津冀区域地理特征与数据的可获得性，本研究从基本物质需求、健康与安全、教育和良好社会关系 4 个维度构建居民福祉评价指标体系。各个评价指标之间的量纲和数量级的差异可能对评价结果产生干扰，要消除这种影响需要标准化各评价指标。

$$Y_{mn} = \frac{X_n - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \tag{11}$$

式中：X_n 是第 n 项评价指标值，X_{max} 是第 n 项评价指标的最大值，X_{min} 为第 n 项评价指标的最小值，Y_{mn} 是标准化值。

运用熵权法确定各指标权重，并通过加权求和分别计算各类居民福祉指标指数，作为居民福祉子系统的综合表征指标(S_1)，用于后续生态系统服务价值与居民福祉耦合协调度分析，各指标信息如表 1 所示。

1.5　理论框架与耦合逻辑

1999—2023 年北三县生态系统服务价值与居民福祉共同构成典型的“生态−社会”耦合系统。依据千年生态系统评估(millennium ecosystem assessment，MA)框架[13]，生态系统通过供给、调节与支持服务改变居民的生产生活条件、风险暴露水平与环境宜

表 1 居民福祉指标体系及权重

Tab. 1 Index system and weight of residents' well-being

一级指标	二级指标	单位	熵权	权重/%
基本物质需求	人均GDP	元/人	0.101	10.056
	人均储蓄	元/人	0.143	14.254
	第三产业占比	%	0.132	13.162
健康与安全	医院床位	张/千人	0.061	6.137
	耕地面积	hm^2/万人	0.067	6.673
	农业机械总动力	kW/人	0.051	5.110
教育	中学在校生	人/万人	0.073	7.317
	小学在校生	人/万人	0.068	6.782
良好社会关系	福利床位	张/万人	0.235	23.480
	福利机构	个/万人	0.070	7.028

居性，从而影响福祉的多维结构。结合北三县城镇化承接区的资源环境特征与本研究可量化的服务类型，本研究将生态系统服务向福祉转化过程细化为3条作用路径，并明确其指标对应关系。

（1）供给与生产支撑路径：产水等供给服务通过提升生活用水保障、农业/产业用水稳定性与用水成本可得性，进而支撑经济产出与家庭资产积累，主要对应并推动“基本物质需求”维度提升。

（2）风险缓冲与健康保障路径：土壤保持、水质净化与固碳等调节服务通过降低水土流失、面源污染与极端气候相关风险，减少环境治理与健康损失成本，主要作用于“健康与安全”维度；但该维度同时高度受公共卫生供给、人口集聚与治理能力影响，因此可能出现“生态改善但健康安全未同步改善/甚至波动”的阶段性错位。

（3）环境宜居与公共服务承载路径：生境质量与环境质量改善提升区域宜居性与生态空间供给，间接影响教育资源可达、社会交往与社会福利承载，主要对应“教育”与“良好社会关系”维度，并通过吸引人口与产业集聚进一步改变公共服务配置结构。

同时，城镇化（人口集聚、建设用地扩张、产业活动）与治理投入（生态修复、污染治理、公共服务供给）对生态系统服务供给与福祉提升均具有显著反馈效应：一方面，城镇化可能挤占生态空间、改变下垫面与生态过程，使关键服务（如产水、土壤保持）波动；另一方面，公共服务改善可在一定时期内抵消生态系统服务下降对福祉的负向影响，从而形成“同步提升”或“错位演变”两类典型情景。基于上述逻辑，本研究后续采用耦合度与耦合协调度模型刻画两子系统发展水平的相对同步性与均衡性，并在结果部分结合分项ESV、HWB维度变化解释阶段性错位来源。

1.6 耦合度与耦合协调度模型的构建

考虑到两子系统指标量纲不同（ESV为货币量，HWB为无量纲指数），以各年份生态系统服务价值分项为基础，采用极值标准化方法进行无量纲化处理，计算生态系统服务总价值指数 S_2。

在此基础上，借鉴已有耦合协调分析研究[3]，耦合度 C、综合发展指数 T 与耦合协调度 D 的计算公式为

$$C = 2\left[\frac{S_1 S_2}{(S_1 + S_2)^2}\right]^{1/2} \tag{12}$$

$$T = \alpha S_1 + \beta S_2 \tag{13}$$

$$D = \sqrt{CT} \tag{14}$$

式中：α 与 β 为待定系数，考虑两子系统同等重要性，取 $\alpha = \beta = 0.5$。C 反映两子系统的耦合强度，D 反映综合协调水平。根据既有研究[3]对 C 与 D 进行等级划分（表2、3）。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务价值时序变化与结构特征

1999—2023年，北三县生态系统服务总价值（ESV）整体呈波动上升变化特征（表4）。研究期内，ESV由1999年的88.133亿元上升至2023年的332.213亿元，但在不同阶段表现出明显差异：1999—2007年ESV增长较快，2007—2011年达到阶段性高值，2011—2019年出现回落，2019—2023年再度回升。

为刻画不同阶段ESV空间格局的典型特征，选取1999、2011和2023年3个典型年份进行对比分析（图1）。其中，1999年为研究期起始基线年，2011年对应ESV阶段性高值并处于由升转降的关键节点，2023年为研究期末的最新状态。从空间分布特

表 2　生态系统服务与居民福祉耦合度划分标准

Tab. 2　Classification criteria of coupling degree of ecosystem services and human well-being

耦合度(C)	耦合水平	耦合表现
$C=0$	最小耦合	两子系统无关联，处于无序状态
$0<C\leqslant 0.1$	极低水平耦合	两子系统关联程度较弱，交互作用不显著
$0.1<C\leqslant 0.3$	低水平耦合	两子系统相互作用有所增强，矛盾关系仍较突出
$0.3<C\leqslant 0.5$	拮抗阶段	两子系统矛盾逐渐消减
$0.5<C\leqslant 0.7$	磨合阶段	两子系统逐渐良性耦合
$0.7<C\leqslant 0.9$	中水平耦合	两子系统耦合较强，互动明显
$0.9<C<1$	高水平耦合	两子系统彼此促进、共同发展
$C=1$	最大耦合	系统高度关联有序，并趋向新的秩序

表 3　生态系统服务与居民福祉协调度划分标准

Tab. 3　Classification criteria of coupling coordination degree of ecosystem services and human well-being

耦合协调度(D)	协调程度	协调表现
$D=0$	不协调	两子系统都在衰退
$0<D\leqslant 0.2$	中度失调	一个子系统较快发展，另一子系统相对滞后
$0.2<D\leqslant 0.4$	轻度失调	一个子系统较快发展，另一子系统需要改善
$0.4<D\leqslant 0.6$	勉强协调	两子系统之间勉强发展协调
$0.6<D\leqslant 0.8$	初级协调	两子系统之间大致发展协调
$0.8<D<1$	中级协调	两子系统之间接近发展均衡
$D=1$	良好协调	两子系统彼此促进，实现协调发展

征看，1999 年北三县 ESV 整体以低、中值为主，高值区分布相对零散，主要集中于水域和生态用地占比较高的区域。2011 年生态系统服务价值空间格局发生明显变化，高值区范围有所扩大，局部区域呈现集聚特征，反映出该阶段 产水服务和土壤保持服务功能的增强。到 2023 年，高值区分布格局进一步调整，在部分区域保持相对稳定，但整体空间异质性有所增强，表明生态系统服务供给能力在不同区域之间出现分化。

从服务类型构成看，各年份 ESV 均以 产水服务和土壤保持服务为主，两者合计贡献率长期保持在 80% 以上；固碳、水质净化和生境质量服务价值占比较低，但在不同年份间亦呈现一定波动。2011 年 ESV 达到高值主要体现在 产水服务和土壤保持服务同步增加，而 2011—2019 年 ESV 下降阶段则表现为上述两类服务价值的共同回落。

2.2　居民福祉水平时序变化与维度分解

1999—2023 年，北三县居民福祉综合指数总体呈上升趋势(图 2)，但不同阶段变化幅度存在差异。其中，1999—2011 年北三县居民福祉综合指数呈波动下降态势，其中 1999—2003 年小幅上升，2003—2007 年略有回落，2007—2011 年进一步明显下降，并于 2011 年形成阶段性低值拐点；2011 年以后，居民福祉综合指数提升幅度明显加快。这一拐点反映了承接区城镇化加速期“人口与建设活动集聚、公共服务供给与治理能力相对滞后、福祉结构波动”的阶

表 4　生态系统服务价值分项及总值

Tab. 4　Breakdown and total value of ecosystem services　　亿元

指标	1999年	2003年	2007年	2011年	2015年	2019年	2023年
产水价值	44.491	133.002	151.510	266.238	155.145	133.006	188.574
土壤保持价值	41.777	77.233	94.580	131.945	96.675	89.483	141.100
固碳价值	1.445	1.433	1.557	1.781	1.747	1.828	1.920
生境质量价值	0.323	0.313	0.311	0.357	0.400	0.436	0.483
水质净化价值	0.096	0.095	0.106	0.117	0.121	0.129	0.136
总值	88.133	212.076	248.062	400.437	254.088	224.881	332.213

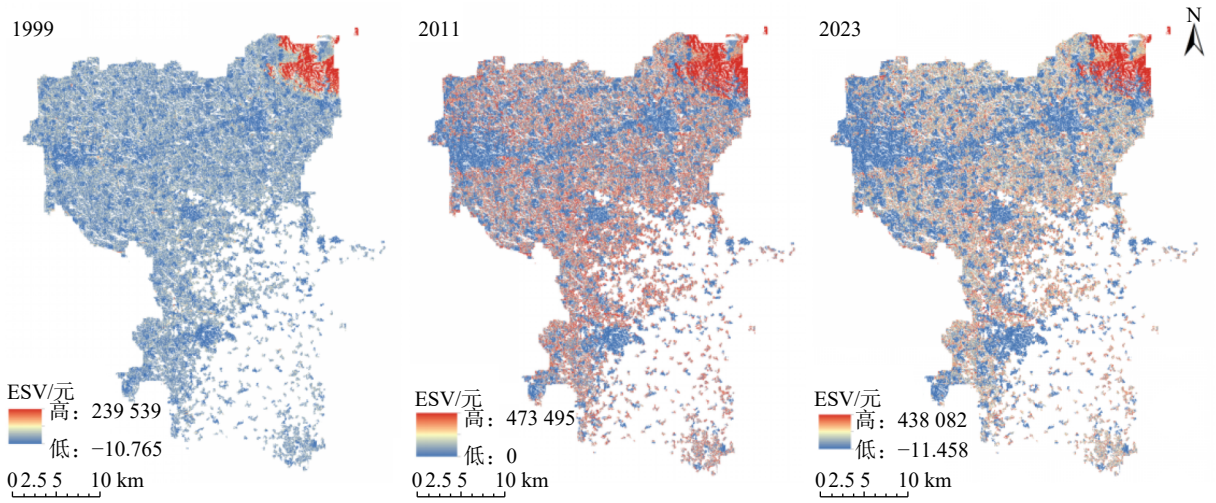


图 1 1999、2011 和 2023 年生态系统服务价值(ESV)空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of ecosystem service value(ESV) in 1999, 2011 and 2023

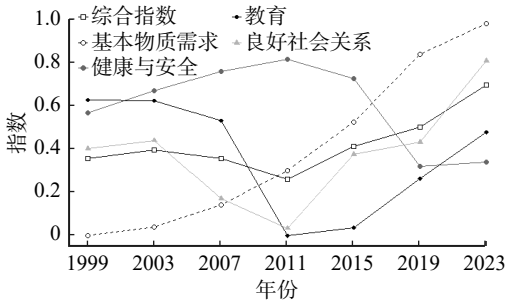


图 2 北三县居民福祉指数(HWB)时序变化

Fig. 2 Tmporal variation of human well-being indices (HWB) in the northern three counties

段性矛盾，使综合福祉在短期内表现为回落而非线性上升。

分维度结果表明，各维度对居民福祉改善的贡献存在明显差异与时序错位(图 2)。基本物质需求维度持续提升且较为稳定，是综合福祉上升的主要支撑；健康与安全维度波动较大，2011 年前后相对较高，说明综合福祉的阶段性回落并非由健康安全维度单独驱动；教育维度总体呈“先降后升”，2015 年后改善加快，2019—2023 年增幅更为明显；良好社会关系维度波动幅度较大，2015 年后快速提升并维持较高水平。总体上，居民福祉提升并非各维度同步驱动，2011 年前后综合指数回落更可能来源于教育与社会关系等维度的阶段性波动，而 2015 年后多维度共同改善推动综合福祉快速上升。

2.3 耦合协调度时序演变与类型划分

1999—2023 年，北三县生态系统服务价值与居民福祉之间的耦合度整体呈波动上升趋势，但不同阶段差异明显(表 5)。1999 年耦合度处于拮抗阶段，说明两系统间的协调联动程度较弱；2003 年耦合度快速提升并进入中水平耦合阶段；2007 年耦合关系进一步增强，达到高水平耦合。此后，2011 年耦合度回落至中水平耦合，表明两系统同步性在该阶段有所减弱。这一阶段性回落与居民福祉水平的同步下降有关：同期居民福祉综合指数 S_1 由 2007 年的 0.358 降至 2011 年的 0.262(表 5)，而 ESV 处于阶段性高位，反映两子系统在该阶段出现“生态系统服务高位、福祉回落”的错位发展，从而降低了系统间匹配程度。2015 年以后耦合度再次回升并维持在高水平耦合状态，2019 年与 2023 年均表现为较强的耦

表 5 1999—2023 年 ESV-HWB 耦合协调

Tab. 5 Coupling coordination between ESV and HWB from 1999 to 2023

年份	ESV总值/亿元	HWB综合指数(S_1)	ESV综合指数(S_2)	耦合度(C)	耦合阶段	耦合协调度(D)	协调类型
1999	88.133	0.357	0.024	0.484	拮抗阶段	0.303	轻度失调
2003	212.076	0.398	0.154	0.896	中水平耦合	0.497	勉强协调
2007	248.062	0.358	0.307	0.997	高水平耦合	0.576	勉强协调
2011	400.437	0.262	0.685	0.895	中水平耦合	0.651	初级协调
2015	254.088	0.413	0.570	0.987	高水平耦合	0.696	初级协调
2019	224.881	0.503	0.649	0.992	高水平耦合	0.756	初级协调
2023	332.213	0.697	0.930	0.990	高水平耦合	0.897	中级协调

合关联。

从耦合协调度看，研究期内耦合协调度整体呈上升趋势，早期处于较低水平，随后逐步提升并在后期明显改善。1999 年协调度处于失调状态；2003—2007 年提升至勉强协调水平；2007—2011 年系统出现阶段性波动，耦合度有所回落，两子系统的匹配同步性发生短期扰动，但受生态系统服务价值指数大幅增长带动，耦合协调度仍保持持续升高态势(表 5)，表明协同水平在城镇化承接加速期存在短期不稳定；2011—2019 年进一步进入初级协调并持续改善；2023 年耦合协调度达到中级协调水平。总体上，生态系统服务价值提升与居民福祉改善在研究期内呈协同增强态势，但阶段性波动表明二者仍存在不同步发展的情形。

2.4　县域尺度生态系统服务价值与居民福祉的差异化特征

三河市、大厂回族自治县与香河县在生态系统服务价值、居民福祉综合指数及生态系统服务价值与居民福祉的耦合协调水平上存在明显差异。表 6 汇总了 1999、2011 与 2023 年北三县各自 ESV 总价值、各县居民福祉指数(S)与耦合协调度(D)的结果。

从 ESV 合计看，三县总体呈增长态势，但县际变化不同。1999 年三河市 ESV 为 47.248 亿元，香河县为 30.063 亿元，大厂回族自治县为 10.821 亿元；2011 年分别升至 196.361 亿元、152.163 亿元和 51.915 亿元。2011—2023 年三河市 ESV 继续维持高位并升至 198.662 亿元，而香河县由 152.163 亿元降至 84.160 亿元，大厂回族自治县小幅降至 49.392 亿元，形成“三河市高位增强、香河县回落、大厂回族自治县低位改善”的格局(表 6)。

居民福祉综合指数在三县均呈上升趋势，但提升节奏存在差别。1999 年大厂回族自治县 S1 为 0.265，略高于香河县(0.229)与三河市(0.203)；到 2011 年三河市升至 0.271，大厂回族自治县与香河县分别为 0.246 和 0.220；2023 年三河市达到 0.704，明显高于香河县(0.516)与大厂回族自治县(0.512)(表 6)，后期差距拉大。

耦合协调度随时间总体提高，同时呈现较清晰的县际梯度。1999 年三河市耦合协调度为 0.469，香河县为 0.431，大厂回族自治县为 0.346；2011 年分别为 0.720、0.640 和 0.504；2023 年进一步提升至 0.916、0.684 和 0.597(表 6)。总体来看，三河市的协同提升更快，香河县在后期受生态系统服务供给下降影响，协调提升趋缓，大厂回族自治县则表现为稳步改善但整体水平相对偏低。三县差异表明，北三县全域层面的系统协同演化是在县域发展分化格局下逐步形成的。

2.5　分项 ESV 与分维度居民福祉的相关性分析

为刻画生态系统服务价值与居民福祉在不同维度上的对应关系，本研究在研究区整体尺度(北三县)上对分项生态系统服务价值与不同维度居民福祉指数开展相关性分析(表 7)。选取产水、土壤保持、固碳、水质净化与生境质量 5 个生态系统服务价值分项，将居民福祉分为基本物质需求、健康与安全、教育与良好社会关系 4 个维度指数，计算 1999—2023 年各指标间的皮尔逊相关系数($n = 7$)。鉴于样本量有限，结果用于描述统计关联特征，并作为后续讨论的补充证据，不作因果推断。

表 7 结果显示，生境质量、水质净化与固碳等分项与“基本物质需求”维度呈极显著正相关($P < 0.01$)；“健康与安全”仅与生境质量呈显著负相关($P < 0.05$)，与其余分项的相关性较弱且不显著；“良好社会关系”与生境质量显著相关($P < 0.01$)，与水质净化价值存在边际关联趋势($P < 0.10$)。总体而言，不同生态系统服务分项与福祉各维度的关联程度存

表 6　研究区各县域关键年份指标

Tab. 6　Key indicators in selected years for each county in the study area

县(市)	年份	ESV/亿元	居民福祉指数(S)	耦合协调度(D)
三河市	1999	47.248	0.203	0.469
	2011	196.361	0.271	0.720
	2023	198.662	0.704	0.916
大厂回族自治县	1999	10.821	0.265	0.346
	2011	51.915	0.246	0.504
	2023	49.392	0.512	0.597
香河县	1999	30.063	0.229	0.431
	2011	152.163	0.220	0.640
	2023	84.160	0.516	0.684

表 7 研究区分项 ESV 与分维度居民福祉指数皮尔逊相关系数

Tab. 7 Correlations between ESV components and well-being dimensions in the study area

分项ESV	基本物质需求	健康与安全	教育	良好社会关系
产水价值	0.310	0.299	−0.642	−0.093
固碳价值	0.910***	−0.472	−0.586	0.636
土壤保持价值	0.606	−0.032	−0.487	0.258
水质净化价值	0.961***	−0.577	−0.491	0.746*
生境质量价值	0.985***	−0.757**	−0.303	0.887***

注：*、**、***分别表示在$P < 0.10$、$P < 0.05$、$P < 0.01$水平上显著相关。样本量$n = 7$。

在明显差异，提示生态系统服务对福祉的作用具有维度分化特征：一方面，生态系统服务变化与物质生活条件、社会福利改善的协同性较强；另一方面，健康与安全维度的时序波动受公共服务供给、人口集聚与风险暴露等多因素共同作用，与生态系统服务变化的一致性较弱。

县域尺度的对比结果亦提供了相互印证的事实基础（表 6）。例如，香河县在 2011—2023 年出现生态系统服务供给回落而福祉继续提升的现象，表明在城镇化推进与公共服务改善并行的背景下，生态供给波动可能对协同提升形成约束；相对而言，生态系统服务维持高位且福祉提升更快的县域，更容易实现更高水平的协同改善。

3 讨 论

3.1 北三县生态系统服务价值变化的阶段性特征及其原因

1999—2023 年，北三县生态系统服务价值总体呈上升趋势，但在城镇化不同阶段，其变化幅度和主导服务类型存在明显差异。这种阶段性变化并非随机波动，而是与区域城镇化进程、土地利用结构调整及生态管理方式变化密切相关[14]。

在研究初期，北三县城镇化水平相对较低，耕地和生态用地占比较高，土地利用结构整体较为稳定。该阶段农业生产条件改善以及植被覆盖状况的提升，在一定程度上增强了区域 产水和土壤保持功能，使生态系统服务价值呈现较快增长趋势[15]。随着城镇化水平持续提高，建设用地扩张逐渐成为土地利用变化的主导过程，生态空间受到挤占，产水服务和土壤保持服务对土地利用变化的敏感性增强，导致 ESV 在部分阶段出现回落[16]。近年来，随着生态保护与修复措施逐步加强，区域生态系统服务供给能力呈现一定恢复趋势，ESV 再次呈现回升态势[17]。

从服务类型构成看，产水服务和土壤保持服务在研究期内始终占据主导地位，是驱动 ESV 总量变化的关键类型。这一特征与北三县地处平原区、水资源调节与水土保持功能在区域生态系统中具有基础性地位的自然背景相一致[18]。相比之下，固碳、水质净化和生境质量服务价值占比较低，但其变化对土地利用结构调整和人类活动强度变化具有较高敏感性，反映出城镇化过程对生态系统服务结构的差异化影响。类似结果在京津冀及其他快速城镇化地区已有研究[19]中亦有报道，表明城镇化进程对生态系统服务价值的阶段性影响具有一定普遍性。

3.2 居民福祉水平提升特征及其与区域发展的关系

1999—2023 年，北三县居民福祉综合指数总体呈持续上升趋势，但不同阶段和不同维度的提升幅度存在明显差异。这一变化过程反映了区域社会经济发展模式由以要素投入和产业扩张为主，逐步向公共服务改善和社会保障体系完善转变的演进特征[20]。

从时间维度看，研究初期居民福祉水平波动较大，表明区域发展尚处于不稳定阶段；随着经济发展水平提升和产业结构逐步优化，居民福祉综合指数进入相对平稳上升阶段；2015 年以后，随着公共服务投入增加和社会治理能力提升，居民福祉改善速度明显加快。从分维度结果看，基本物质需求维度在整个研究期内持续改善，是居民福祉提升的稳定基础；教育和良好社会关系维度在后期提升更为显著，表明教育资源供给和社会福利体系建设对居民福祉的边际贡献不断增强；健康与安全维度在不同年份间存在一定波动，可能与统计口径调整、数据缺失或公共卫生资源配置变化有关。

总体而言，研究期内北三县居民福祉提升主要受社会经济发展和公共服务供给改善驱动，生态系统服务更多通过间接方式对居民福祉产生支撑作用。这一特征也在一定程度上解释了生态系统服务价值与居民福祉在不同阶段未能保持完全同步演进的现象[21]。这一点也体现在维度层面的对应关系上，不同生态系统服务分项与福祉各维度的相关性差异明显，提示生态系统服务对福祉改善的影响具有维度分化特征（表 7）。

3.3　生态系统服务价值与居民福祉耦合关系的演变特征

耦合协调度分析表明，1999—2023 年北三县生态系统服务价值(ESV)与居民福祉(HWB)之间的交互关系整体呈波动改善特征。耦合度 C 介于 0.484 ~ 0.997，表明两系统间关联程度整体较强；但耦合协调度 D 仅在 0.303 ~ 0.897 之间波动，以勉强协调、初级协调为主，至研究末期首次进入中级协调阶段。整体来看，城镇化承接区的 ESV 与 HWB 呈现“耦合强度高、协调水平偏低”的结构性特征：两者相互作用显著，但协同水平仍受土地利用转型节奏与发展阶段影响。在城镇化加速阶段，建设用地扩张与人口集聚对生态空间产生挤压，生态系统服务供给的阶段性下降或结构性调整容易与福祉改善的持续上升出现错位，从而引发耦合协调度的阶段性波动[22]。

从机制上看，HWB 的提升更直接受经济增长、公共服务供给与社会保障改善驱动，而 ESV 对土地利用变化的响应具有滞后性与空间异质性[23]：一方面，建设用地扩张改变下垫面格局与生态过程路径，使 产水调节、土壤保持等关键服务对土地利用变化更为敏感；另一方面，生态保护投入与修复工程往往在城镇化高强度扰动之后逐步显效，导致 ESV 与 HWB 的变化并非同步推进。县域尺度结果(表 6)显示，三河市后期协同提升更快，而香河县在 2011—2023 年出现生态供给回落并对协同提升形成约束，说明整体演变是在县际分化背景下推进的。进入城镇化相对成熟阶段后，生态修复与空间管控力度增强、土地利用结构趋于优化，同时公共服务体系持续完善，使生态系统服务对福祉的支撑能力有所恢复，进而推动耦合协调水平总体改善[24]。该特征在京津冀城市群及其他快速城镇化地区的相关研究中亦有所体现[25]，说明在高强度人类活动干扰下，生态、社会系统协同发展仍面临现实约束。结合维度关联与县域差异结果(表 6、7)，北三县生态系统服务与居民福祉协同演化总体呈“改善中波动、分化中提升”的特征：城镇化加速期生态供给更易波动并对协调提升形成约束，生态修复与空间管控强化后协同水平回升。维度层面上，生态系统服务分项与“基本物质需求”“良好社会关系”等维度的对应性相对更强，而与“健康与安全”维度的相关性更不稳定，反映出福祉内部结构变化与生态系统服务变化之间存在阶段性不同步，从而塑造了整体“高耦合–中级协调”的结构特征。与既有多在城市/流域尺度强调单调改善的研究[3]相比，本研究进一步揭示了承接区县域内部梯度及“错位约束”现象(表 6、7)。

3.4　不确定性分析与研究启示

需要指出的是，本研究仍存在一定不确定性。首先，生态系统服务价值评估依赖于 InVEST 模型及相关参数设定，模型对生态过程的表达具有一定简化性，不同参数假设可能对结果产生影响[26]；其次，居民福祉评价指标体系受限于统计数据可获得性，未能纳入“选择与行动自由”等主观福祉维度，可能低估居民福祉的部分内涵；此外，耦合协调度模型主要用于刻画系统间的相对协调状态，难以直接揭示因果关系[27]。后续研究可在更长时间序列或更高频面板数据基础上，引入结构方程模型、fsQCA 等方法，对“生态系统服务向福祉转化”作用路径与多条件组态机制开展进一步识别与检验[28]。

尽管存在上述不确定性，本研究在统一参数设定和数据处理规则的前提下，重点关注不同年份之间的相对变化特征，并通过多项生态系统服务指标与多维福祉指标的综合分析，提高了研究结论的稳健性。同时，县域尺度结果(表 6)显示承接区内部存在明显梯度，提示仅依靠全域均值解读会掩盖县域间的系统分异特征。此外，已有研究表明，京津冀地区生态系统服务供给与需求之间存在一定程度的空间错配与权衡关系，这一特征在快速城镇化背景下具有普遍性[29]。本研究从县域尺度补充了城镇化承接区二者长期耦合演变的实证依据，治理上需要面向县域异质性实施差异化协同提升策略。

从实践启示看，城镇化承接区推进高质量发展，应坚持生态系统服务供给能力提升与居民福祉改善协同推进，避免单一发展目标导向引发生态-社会系统失衡[30]。宏观层面可通过优化土地利用结构、加大生态修复投入、完善公共服务体系三类路径，推动生态保护与民生改善协同增效。具体落地中，公共服务领域重点强化“健康与安全“等波动维度对应的医疗卫生与风险治理能力建设，生态领域优先稳定产水调节、土壤保持等对城镇化扰动敏感的关键服务，以此缓解两子系统错位波动对协同提升进程形成的约束。

4　结　　论

(1)1999—2023 年期间北三县生态系统服务价值总体表现为波动上升趋势，其中 产水服务和土壤保持服务长期占据主导地位，是影响生态系统服务价值总量变化的关键类型；固碳、水质净化和生境质量服务价值占比较低，但对城镇化扰动与生态空间调整具有较高敏感性，体现出生态系统服务供给的结构性响应特征。

(2)研究期内北三县居民福祉综合水平总体呈

改善趋势，但存在阶段性波动，整体表现为“前期波动–2011 年阶段性回落–后期加快提升”的演变特征。分维度看，基本物质需求改善相对稳定，教育与良好社会关系维度在后期提升更为明显；健康与安全维度波动相对较大，表明福祉改善具有显著的维度差异与阶段性特征。

（3）耦合协调分析表明，北三县 ESV 与居民福祉之间整体呈“高耦合–中级协调并逐步改善”的结构特征，协同演化表现为“波动改善、梯度提升”。城镇化加速期生态供给更易波动并对协调提升形成约束，生态修复与空间管控强化后协同水平回升。县域尺度结果显示，整体演变是在县际分化背景下推进的：2023 年形成“三河市较高、香河县居中、大厂回族自治县相对较低”的梯度格局，其中香河县在 2011—2023 年出现生态系统服务供给回落而福祉继续提升的错位组合，提示生态供给波动可能成为协同提升的重要约束线索。

（4）整体尺度分项关联结果进一步表明，生态系统服务对福祉改善的作用具有维度分化特征：生态系统服务分项与“基本物质需求”“良好社会关系”等维度的对应性相对更强，而与“健康与安全”维度的相关性更不稳定，反映出福祉内部结构变化与生态系统服务变化之间可能存在阶段性不同步。同时，县域尺度结果显示承接区内部协同水平存在明显梯度与分化，应据县域差异实施差异化协同提升策略。据此，承接区统筹推进生态保护与民生改善，应在巩固公共服务改善的同时稳定关键生态系统服务供给，重点关注生态供给波动对协同提升的约束，并加强与健康安全相关的公共服务与风险治理能力建设，以促进生态系统服务与居民福祉的协同改善。

参 考 文 献

[1] Fisher B, Turner R K, Morling P. Defining and classifying ecosystem services for decision making [J]. Ecological Economics, 2009, 68(3): 643−653.

[2] 邱坚坚, 刘毅华, 袁利, 等. 人地系统耦合下生态系统服务与人类福祉关系研究进展与展望 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(6): 1060−1072.
Qiu J J, Liu Y H, Yuan L, et al. Progress and prospects of ecosystem services and human well-being under coupled human-natural systems [J]. Progress in Geography, 2021, 40(6): 1060−1072.

[3] 邱坚坚, 刘毅华, 陈澄静, 等. 生态系统服务与人类福祉耦合的空间格局及其驱动方式-以广州市为例 [J]. 自然资源学报, 2023, 38(3): 760−778.
Qiu J J, Liu Y H, Chen C J, et al. Spatial structure and driving pathways of coupling between ecosystem services and human well-being: A case study of Guangzhou [J]. Journal of Natural Resources, 2023, 38(3): 760−778.

[4] 任胤铭, 刘小平, 许晓聪, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的京津冀多情景土地利用变化模拟及其对生态系统服务功能的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(11): 4473−4487.
Ren Y M, Liu X P, Xu X C, et al. Multi-scenario simulation of land use change and its impact on ecosystem services in Beijing-Tianjin-Hebei region based on the FLUS-InVEST Model. [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4473−4487.

[5] Mukhopadhyay A, Hati J P, Acharyya R, et al. Global trends in using the InVEST model suite and related research: a systematic review [J]. Ecohydrology and Hydrobiology, 2025, 25(2): 389−405.

[6] 刘芦萌, 邬建国. 生态系统服务与人类福祉关系的研究框架、途径与方法 [J]. 自然资源学报, 2024, 39(9): 2044−2065.
Liu L M, Wu J G. Frameworks, approaches and methods for studying ecosystem services and human well-being [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(9): 2044−2065.

[7] 北京市人民政府. 现代化首都都市圈空间协同规划 (2023—2035 年)[EB/OL]. (2026−02−03)[2026−02−27]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202602/t20260203_4487743.html.
Beijing Municipal People's Government. Spatial Synergy Plan for the Modern Capital Metropolitan Area (2023–2035)[EB/OL]. (2026−02−03)[2026−02−27]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202602/t20260203_4487743.html.

[8] 国家发展改革委. 北京市通州区与河北省三河、大厂、香河三县市协同发展规划 [EB/OL]. (2020−03−17)[2026−02−27]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202003/t20200317_1223417_ext.html.
National Development and Reform Commission (NDRC). Coordinated development plan for Beijing's Tongzhou District and Sanhe, Dachang and Xianghe counties/cities in Hebei Province [EB/OL]. (2020−03−17)[2026−02−27]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202003/t20200317_1223417_ext.html.

[9] Cui X, Zeng J, Wu J, et al. The nexus between urbanization and ecosystem services balance in China: a coupling perspective [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2024, 196(7): 638.

[10] Wang Y, Fu Q, Guo J, et al. Unveiling the Dynamics of Urbanization and Ecosystem Services: Insights from the Su-Xi-Chang Region, China [J]. npj Urban Sustainability, 2024, 4(1): 36.

[11] 杨君, 周鹏全, 袁淑君, 等. 基于 InVEST 模型的洞庭湖生态经济区生态系统服务功能研究 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 267−272.
Yang J, Zhou P Q, Yuan S J, et al. Land ecosystem service functions for Dongting Lake ecological economic zone based on InVEST model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 267−272.

[12] Lin X, Fu H. Optimization of tropical rainforest ecosystem management: implications from the responses of ecosystem service values to landscape pattern changes in Hainan Tropical Rainforest National Park, China, over the past 40 years [J]. Frontiers in Forests and Global Change, 2023, 6: 1242068.

[13] Kibria A S M G, Costanza R, Gasparatos A, et al. A composite human wellbeing index for ecosystem-dependent communities: a case study in the Sundarbans, Bangladesh [J]. Ecosystem Services, 2022, 53: 101389.

[14] 潘梅, 陈天伟, 黄麟, 等. 京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素 [J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5151−5167.
Pan M, Chen T W, Huang L, et al. Spatiotemporal variation and driving factors of ecosystem services in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5151−5167.

[15] 唐秀美, 刘玉, 任艳敏, 等. 基于需求的京津冀地区生态系统服务价值时空变化研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2021, 57(1): 173−180.
Tang X M, Liu Y, Ren Y M, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem service value based on demand in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2021, 57(1): 173−180.

[16] 娄佩卿, 付波霖, 林星辰, 等. 基于 GEE 的 1998-2018 年京津冀土地利用变化对生态系统服务价值的影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5473−5483.
Lou P Q, Fu B L, Lin X C, et al. Influence of land use change on ecosystem service value based on GEE in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 1998 to 2018 [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5473−5483.

[17] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰, 等. 京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析 [J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1114−1122.
Li K M, Wang X Y, Yao L L, et al. Spatio-temporal change and driving factor analysis of ecosystem service value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(4): 1114−1122.

[18] Wang C, Wang X, Zhan J, et al. Spatio-temporal analysis of human wellbeing and its coupling relationship with ecosystem services in Shandong Province, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33: 392−412.

[19] 杜峯屹, 陈松林, 蒲佳豪. 闽东南地区城镇化与生态系统服务的时空耦合分析 [J]. 环境科学, 2024, 45(7): 4152−4163.
Du F Y, Chen S L, Pu J H. Spatiotemporal coupling analysis of urbanization and ecosystem services in Southeast Fujian [J]. Environmental Science, 2024, 45(7): 4152−4163.

[20] Yang J, Ma X, Zhao X, et al. Spatiotemporal of the coupling relationship between ecosystem services and human well-being in Guanzhong plain urban agglomeration [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(19): 12535.

[21] Liu L , Wu J. Ecosystem services-human well-being relationships vary with spatial scales and indicators: the case of China [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2021, 172: 105662.

[22] Zhang F, Xu N, Wang C, et al. Multi-scale coupling analysis of urbanization and ecosystem services supply-demand budget in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(2): 340−356.

[23] Chen W, Chi G. Urbanization and ecosystem services: the multi-scale spatial spillover effects and spatial variations [J]. Land Use Policy, 2022, 114: 105964.

[24] Zhang J, Zhang Z, Liu L, et al. The coupling relationship and driving mechanism between urbanization and ecosystem services in the Yellow River Basin from a multi-spatial scale perspective [J]. PLoS ONE, 2023, 18(12): e0293319.

[25] 程宪波, 陶宇, 欧维新. 生态系统服务与人类福祉关系研究进展 [J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(7): 885−893.
Cheng X B, Tao Y, Ou W X. Progress in research on the relationship between ecosystem services and human well-being [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(7): 885−893.

[26] Redhead J W , May L, Oliver T H, et al. National scale evaluation of the InVEST nutrient retention model in the United Kingdom [J]. Science of the Total Environment, 2018, 610−611: 666−677.

[27] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正 [J]. 自然资源学报, 2021, 36(3): 793−810.
Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Misunderstandings and corrections of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(3): 793−810.

[28] 陈春谛. 基于文献计量分析的生态系统服务研究: 从理论研究到实践应用 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 6030−6039.
Chen C D. Ecosystem services research based on bibliometric analysis: From theoretical research to practical application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 6030−6039.

[29] 张蓬涛, 刘双嘉, 周智, 等. 京津冀地区生态系统服务供需测度及时空演变 [J]. 生态学报, 2021, 41(9): 3354−3367.
Zhang P T, Liu S J, Zhou Z, et al. Measurement and spatiotemporal evolution of ecosystem service supply and demand in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9): 3354−3367.

[30] Zhai Y P, Zhai G Q, Yu Z J, et al. Coupling coordination between urbanization and ecosystem services value in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 113: 105715.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　臧润国）