

马致远, 李锋, 许丁, 陈可为. 京津冀地区不同功能分区植被覆盖度变化对生态系统服务影响的阈值研究[J]. 风景园林, 2026, 33 (5): 43-50.

京津冀地区不同功能分区植被覆盖度变化对生态系统服务影响的阈值研究

马致远 李锋* 许丁 陈可为

摘要: 【目的】京津冀地区生态系统组成存在显著的空间异质性, 各功能分区植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 变化对生态系统服务 (ecosystem service, ES) 的影响阈值尚不明确, 尤其是在不同功能分区之间是否存在差异化阈值效应, 缺乏定量识别。【方法】以京津冀地区 (西北部生态涵养区、中部核心功能区、南部功能拓展区、东部滨海发展区) 4 个功能分区为研究区, 以 2000—2020 年为研究时段, 利用生态系统服务评估模型评估不同功能分区生态系统服务; 基于归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 估算 FVC, 进而通过弹性分析等方法, 识别不同功能分区 FVC 促进生态系统服务提升的阈值。【结果】2000—2020 年, 京津冀地区各功能分区产水量、固碳服务和土壤保持整体呈上升趋势, 而生境质量仅在东部滨海发展区得到改善, 在其他功能分区均下降。FVC 对生态系统服务的影响存在阈值效应, 各功能分区 FVC 阈值分别为西北部生态涵养区 0.946、中部核心功能区 0.824、南部功能拓展区 0.772 和东部滨海发展区 0.775。【结论】本研究揭示了京津冀地区各功能分区 FVC 对生态系统服务的影响存在阈值效应, 且阈值具有显著的空间异质性, 为理解京津冀地区 FVC 与生态系统服务的动态关系提供了新视角, 可为京津冀地区生态系统精准化管理及生态产品价值实现提供量化依据与科学支撑。

关键词: 生态系统评估; 生态系统服务; 生态产品; 阈值效应; 京津冀地区

基金项目: 京津冀环境综合治理国家科技重大专项 (编号 2025ZD1205200); 教育部基础学科和交叉学科突破计划 (编号 JYB2025XDXM901)

中图分类号: TU982.2

文章编号: 1673-1530(2026)05-0043-08

收稿日期: 2026-01-19

文献标识码: A

DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20260048

修回日期: 2026-04-19

文章亮点:

- 1、揭示了京津冀地区不同功能分区生态系统服务时空分异规律, 量化了不同功能分区植被覆盖度 (FVC) 变化影响生态系统服务的关键阈值。
- 2、针对不同功能分区生态本底与植被覆盖度 (FVC) 阈值特征, 提出了针对性的生态管理对策。

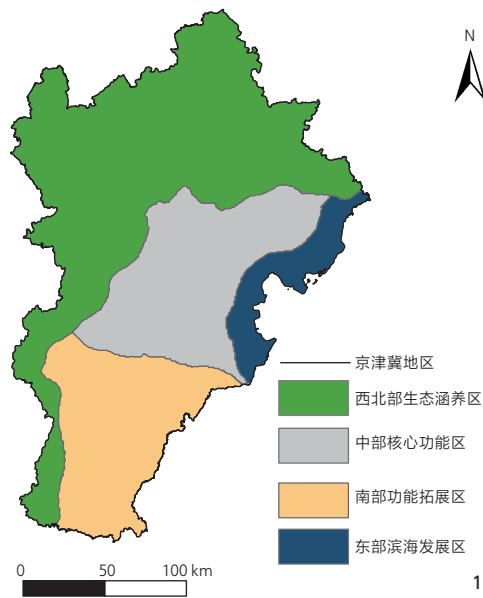
生态系统服务 (ecosystem service, ES) 是指人类从生态系统中直接或间接获得的惠益, 是人类福祉的基础^[1]。然而, 在气候变化、不可持续的资源开发与利用以及环境污染等多重压力下, 部分区域生态系统服务供给能力下降、生物多样性丧失^[2-4]。由于区域内部自然资源禀赋与人类活动强度差异显著, 生态系统服务呈现显著的空间异质性^[5]。因此, 揭示生态系统服务变化的驱动机制, 对制定区域精准化生态管理策略、促进区域生态系统服务提升至至关重要^[6-8]。

京津冀地区是中国政治与文化的核心承载地, 也是中国北方重要的经济核心区。京津冀协同发展是国家重大战略, 《京津冀协同发展规划纲要》明确提出要加强区域生态环境保护, 并按功能定位将京津冀地区划分为西北部生态涵养区、中部核心功能区、南部功能拓展区和东部滨海发展区。四大功能分区的划分明确了各区域的功能定位, 本质

上也是区域自然特征与人类活动强度空间分异的体现。其中, 西北部生态涵养区涵盖坝上高原及燕山—太行山脉, 以森林和草原生态系统为主; 中部核心功能区和南部功能拓展区主要以城镇及农业生态系统为主; 东部滨海发展区主要以城镇、湿地生态系统及农业生态系统为主。各功能分区生态定位与主导功能各异, 植被作为影响生态系统服务的关键因素, 其变化对生态系统服务的影响可能存在显著差异。因此, 揭示不同功能分区植被覆盖度和生态系统服务的时空分布特征及内在关系, 对于制定差异化的区域生态管理策略具有重要指导意义。

尽管已有大量研究从省、市、县等多尺度揭示了京津冀地区生态系统服务的时空动态^[9-13], 但基于功能分区视角探讨京津冀地区空间异质性与演变特征的研究尚缺乏。植被作为陆地生态系统的核心组成部分, 是影响生态系统服务功能的关键因素, 直接参与涵

养水源、土壤保持和固碳等多种服务过程^[14-16]。然而, 植被覆盖度 (fractional vegetation cover, FVC) 的提升对生态系统服务的影响并非简单的线性关系。植被能够发挥防风固沙和水土保持等功能, 但已有对中国北方人工林的研究发现, 在部分生态脆弱区中, 过高的 FVC 可能因植被过度耗水而导致土壤水分下降, 径流减少, 从而影响生态系统的水文调节功能^[17-18]。在人工林的研究中, 造林密度过高可能导致生态系统服务功能退化^[19-20]。因此, 适度的 FVC 对于维持稳定的生态系统服务供给具有重要意义。已有研究在生态系统服务变化驱动因素的分析中发现, FVC 对区域生态系统服务的促进作用存在阈值, 当超过该阈值后, 促进作用开始减弱^[21-23]。京津冀地区不同功能分区的生态系统类型结构差异显著, 各功能分区植被状况与生态系统服务的时空演变规律尚不明确。因此, 有必要系统揭示京津冀地区不同功能分区生态系统服



1 京津冀地区功能分区
Functional zones of the Beijing-Tianjin-Hebei region

务对 FVC 变化的响应规律。

基于上述现实需求与科学问题,本研究在评估 2000—2020 年京津冀地区 4 种功能分区的 FVC 与生境质量、产水量、土壤保持、固碳服务 4 项关键生态系统服务时空动态变化的基础上,分析量化 FVC 变化对生态系统服务的影响阈值,旨在揭示京津冀地区不同功能分区关键生态系统服务对 FVC 变化的非线性响应规律及阈值特征,从而为京津冀地区精准化生态系统管理和生态产品价值实现提供科学支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

京津冀地区包括北京市和天津市 2 个直辖市以及河北省的 11 个地级市、2 个省辖县级市和雄安新区,区域总面积约为 21.7 万 km² (图 1)。该地区位于温带季风气候区,四季分明,年均气温 10~13 °C,年均降水量 400~800 mm^[24-25],地形复杂多样,包含高原、山地、平原三大主要类型,西北部为坝上高原,西部为燕山—太行山脉、东部区域为华北平原。

1.2 数据来源

本研究使用的土地利用数据和数字高程模型 (digital elevation model, DEM) 数据来

源于中国科学院资源环境科学数据中心 (www.resdc.cn), 空间分辨率为 1 km; 气象数据 (降水、潜在蒸散发和气温)^[26-27] 来源于国家青藏高原科学数据中心 (data.tpd.ac.cn), 空间分辨率为 1 km; 土壤数据来源于世界土壤协调数据库 (Harmonized World Soil Database, HWSD), 空间分辨率为 1 km; 归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 数据^[28] 来源于美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 地球观测系统数据与信息系统 (Earth Observing System Data and Information System, EOSDIS) 陆地过程分布式主动存档中心 (Land Processes Distributed Active Archive Center, LPDAAC), 空间分辨率为 1 km; 京津冀功能分区边界数据来源于《京津冀协同发展规划纲要》。上述数据采用 ArcGIS 软件进行预处理, 将栅格数据统一转化为 1 km 分辨率, 投影坐标系为 WGS_1984_Albers。

1.3 生态系统服务评估方法

本研究基于数据可获取性和评估方法可行性, 聚焦于京津冀地区生态安全重要性, 选择生境质量、产水量、土壤保持、固碳服务 4 项关键生态系统服务开展研究。其中, 生境质量和产水量采用生态系统服务与权衡综合评估 (integrated valuation of ecosystem services and trade-offs, InVEST) 模型进行评估, 土壤保持采用修正通用土壤流失方程 (revised universal soil loss equation, RUSLE) 评估, 固碳服务采用卡内基-艾姆斯-斯坦福方法 (Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA) 模型评估, 模型参数参考相关研究^[29-31] 进行确定。

1.4 植被覆盖度评估

FVC 指植被 (包括叶片、枝条和茎干) 在地面上的垂直投影面积占区域总面积的百分比^[32], 被广泛用作地表植被状况的指示指标, 本研究基于 NDVI 的像元二分模型计算 FVC^[33]。

1.5 总生态系统服务指数

为消除不同生态系统服务之间的量纲差异, 本研究将各生态系统服务的物质质量标准化为无量纲数值。计算式

$$E_{ss} = (E_s - E_{smin}) / (E_{smax} - E_{smin})。$$

式中, E_{ss} 为标准化后的生态系统服务值, E_s 为生态系统服务物质质量值, E_{smax} 为生态系统服务物质质量最大值, E_{smin} 为生态系统服务物质质量最小值。

生境质量、产水量、土壤保持、固碳服务 4 项关键生态系统服务对维持区域生态安全均具有重要作用, 本研究采用相同权重计算总生态系统服务 (total ecosystem service, TES) 指数, 以表征京津冀地区生态系统服务的总体水平。计算式

$$T_{ES} = \sum_{i=1}^n E_{Ssi}。$$

式中, T_{ES} 为总生态系统服务指数, E_{Ssi} 为第 i 类生态系统服务的标准化值, n 为生态系统服务种类。

1.6 阈值识别

本研究结合分位数分割法与弹性系数 (elastic coefficient, EC), 识别京津冀地区不同功能分区 FVC 促进 TES 指数的阈值。EC 表示 FVC 每增加 1 个单位对 TES 指数带来的变化, 计算式

$$E_c = d(T_{ES}) / d(F_{VC})。$$

式中, E_c 为弹性系数, T_{ES} 为总生态系统服务指数, F_{VC} 为植被覆盖度。

为消除极值干扰, 本研究首先将像元按 FVC 排序并按大小分区, 提取每个区间内 TES 指数的 95% 分位数和 5% 分位数分别作为上下边界点。随后, 对上述 95% 分位数的上边界点进行最小二乘拟合, 构建 FVC 与 TES 指数上限的约束响应曲线。对拟合的约束响应曲线求取一阶导数, 计算不同 FVC 水平下的 EC。当 $E_c > 0$ 时, 表明 FVC 增加对 TES 指数具有正向促进作用; 当 $E_c = 0$ 时, 将对应的 FVC 作为促进 TES 指数提升的阈值。

2 结果与分析

2.1 京津冀地区生态系统服务时空变化

2000—2020 年, 京津冀地区生态系统服务呈现显著的时空分异特征, 各功能分区变化趋势差异明显 (图 2)。生境质量、产水量、土壤保持、固碳服务 4 项生态系统服务分别用生境质量指数、产水量、土壤保持量、固碳量进行计算。1) 生境质量方面, 西北部生态

涵养区的生境质量指数下降了 2.98%，中部核心功能区下降了 11.32%，南部功能拓展区下降了 8.14%。值得关注的是，东部滨海发展区生境质量指数在此期间呈现上升趋势，增幅为 10.62%。2) 土壤保持量在东部滨海发展区提升最显著，提升了 91.84%，西北部生态涵养区、中部核心功能区和南部功能拓展区均有提升，分别提升了 61.01%、55.22%、28.63%。3) 产水量方面，东部滨海发展区增幅最大，提升了 132.13%；西北部生态涵养区提升了 127.36%；中部核心功能区提升了 119.40%；南部功能拓展区提升了 43.19%。4) 固碳服务方面，西北部生态涵养区与南部功能拓展区固碳量的增幅最大，分别提升了 65.46% 和 65.99%，中部核心功能区和东部滨海发展区分别提升了 1.26% 和 24.12% (图 3)。

2.2 京津冀地区植被覆盖度时空变化

京津冀地区各功能分区 FVC 在 2000—2020 年总体呈上升趋势。从功能分区看，西北部生态涵养区增幅最大，由 0.733 提升至 0.840，上升了 14.60%；中部核心功能区 FVC 由 0.737 提升为 0.748，上升了 1.49%；南部功能拓展区 FVC 从 0.818 增至 0.821，上升了 0.37%；东部滨海发展区 FVC 由 0.676 提高至 0.694，上升了 2.66% (图 4)。

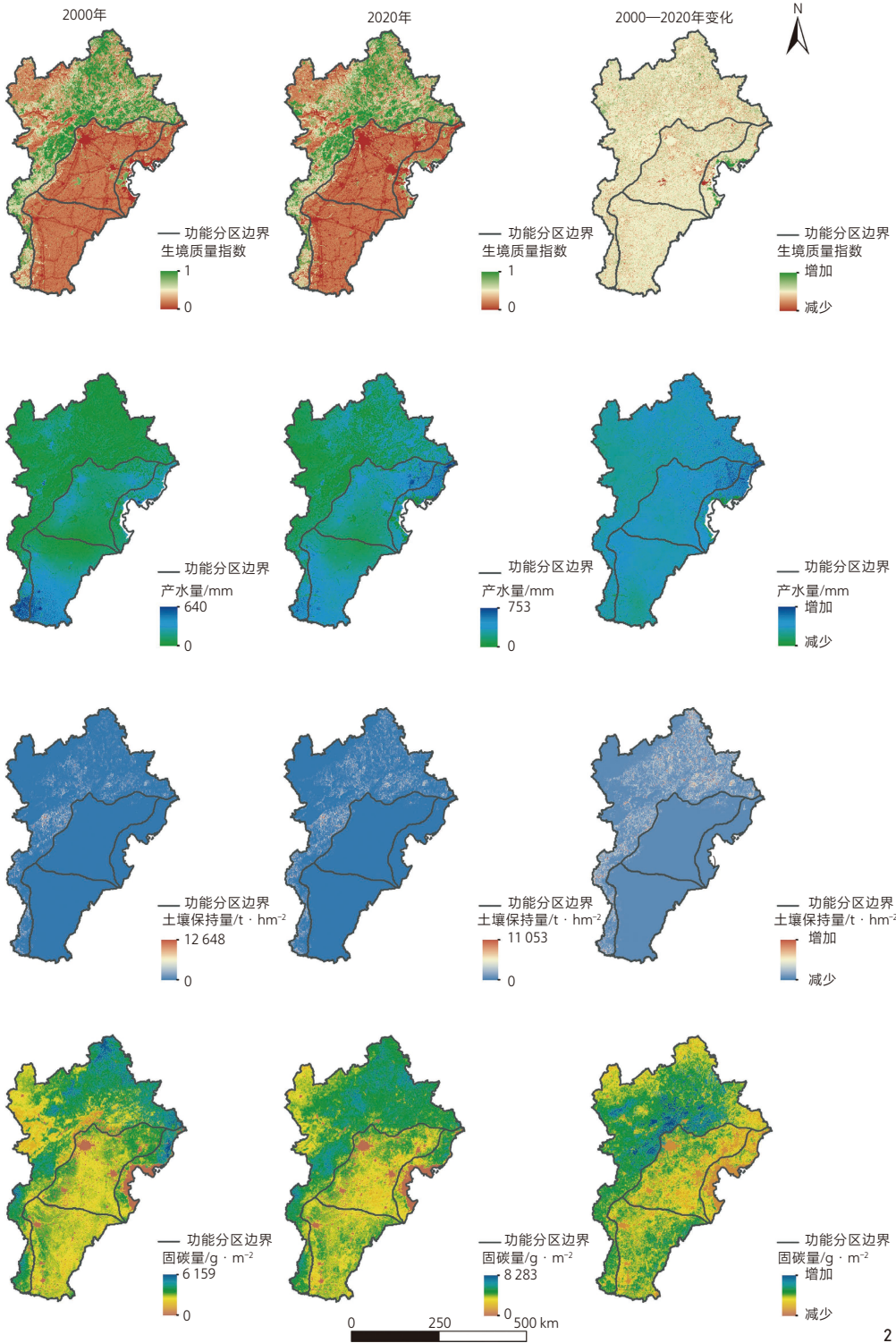
2.3 植被覆盖度对生态系统服务影响的阈值

本研究通过计算 2000—2020 年京津冀地区不同功能分区的 TES 指数和 FVC 的 EC，定量分析不同区域 FVC 变化对生态系统服务影响的趋势，通过 EC 来识别 FVC 的阈值。结果显示，不同功能分区下，FVC 变化对生态系统服务的促进作用都存在阈值 (图 5)。其中，西北部生态涵养区阈值为 0.946、中部核心功能区阈值为 0.824、南部功能拓展区阈值为 0.772、东部滨海发展区阈值为 0.775。

3 讨论

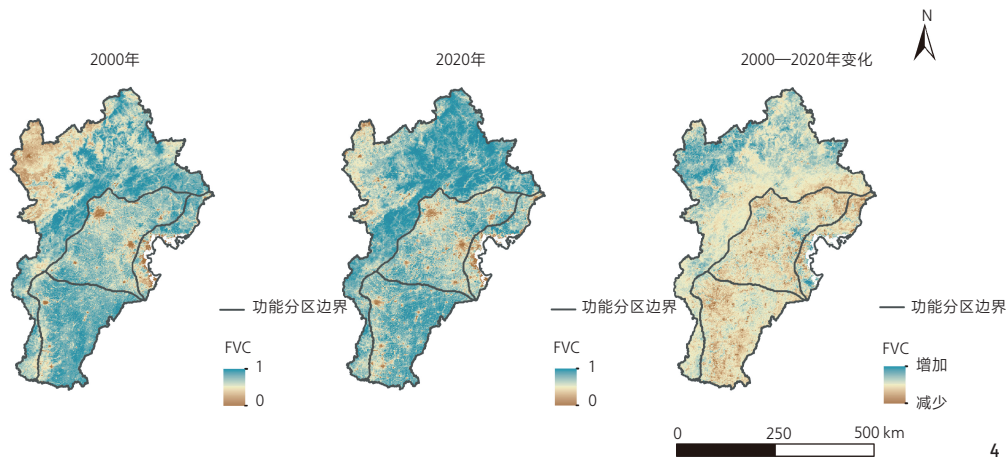
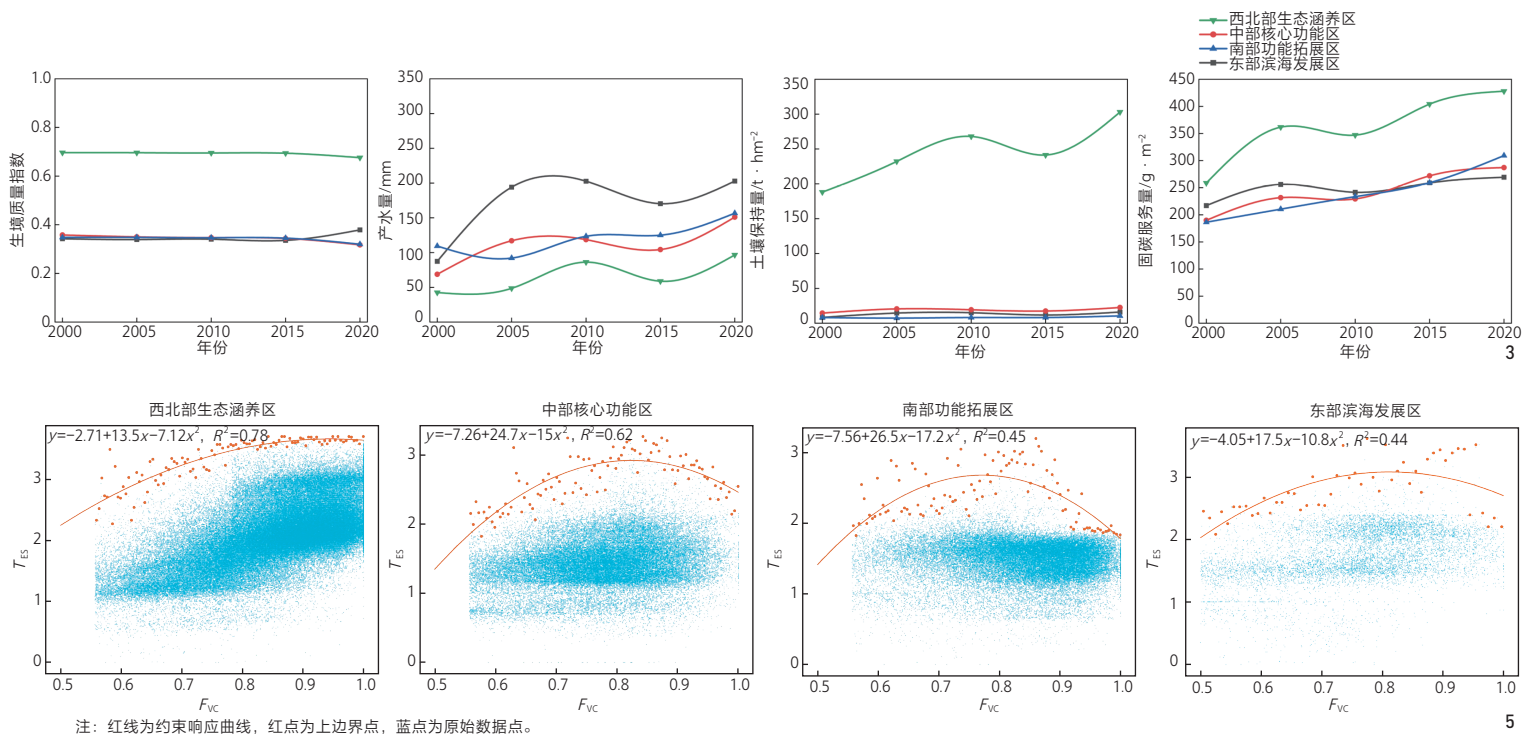
3.1 不同功能分区下的生态系统服务与植被覆盖度时空格局

2000—2020 年，京津冀地区西北部生态涵养区 FVC 增幅最为显著，升高区域主要位于京津冀西北部山区。该区域作为京津冀都市圈最重要的生态屏障，是“三北”工程等生



2 2000—2020 年京津冀地区不同功能分区生态系统服务时空变化
Spatiotemporal variations of ecosystem services across different functional zones in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

态工程覆盖的重点区域，生态工程建设可能是造成地区 FVC 显著提升的重要原因之一^[34-35]。部核心功能区和南部功能拓展区主要为城镇和农业生态系统，植被以农作物和城市植被为主。这 2 个区域同时表现出 FVC 降低与提



3 2000—2020 年京津冀地区不同功能分区生态系统服务变化趋势

Trends of ecosystem service in different functional zones of the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

4 2000—2020 年京津冀地区不同功能分区 FVC 时空变化
Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover across different functional zones in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

5 京津冀地区不同功能分区总生态系统服务指数随植被覆盖度变化的变化
Variation in total ecosystem service with fractional vegetation cover across different functional zones in the Beijing-Tianjin-Hebei region

升并存的空间分异特征，张滔等对京津冀地区 FVC 变化与城镇扩张的研究显示，FVC 降低主要归因于城市化扩张等人为活动^[36]；FVC 提升则主要得益于农业生产与管理方式的改变^[37]。

从生态系统服务上看，4 个功能分区呈现明显的时空分布差异。1) 生境质量方面，生境质量指数下降地区集中于中部核心功能区和东部滨海发展区，涵盖北京、天津、保定和廊坊的中心城区。生境质量下降主要由城市扩张等人为因素引起，导致生境破碎化和景观连通性降低，进而导致区域生境质量下降。东部滨海发展区先后制定并实施了一系列生态保护与修复措施，推动海岸带和湿

地得到有效保护与恢复，这可能是该区域生境质量提升的重要原因^[38]。2) 产水量受降水量影响显著，降水差异是产水量变化的重要原因。3) 水土保持方面，西北部生态涵养区是京津冀地区最主要的水土保持功能区域，植被状况的改善可能是造成该区域水土保持量表现出上升的重要原因^[39]。4) 固碳服务方面，西北部生态涵养区伴随 FVC 的增加，植被固碳能力得到明显提高^[40-41]。南部功能拓展区以农田生态系统为主，受耕地红线刚性约束，绿化空间受限，FVC 增幅最低，然而固碳量增幅却最大。有研究显示，免耕推广、土地整治等农田管理措施以及防护林带优化

能够有效提升生态系统固碳功能^[42-43]，这可能是该区域固碳服务显著提升的主要原因。

3.2 不同功能分区下生态系统服务对植被覆盖度变化的响应

植被变化是影响生态系统服务的重要因素，在区域尺度下，FVC 对生态系统服务的影响普遍存在阈值效应^[44-45]。阈值受到区域气候、地形等条件的综合影响，因此常表现出显著的空间差异^[46-47]。量化评估 FVC 对不同区域生态系统服务的影响阈值，对于科学实施大规模生态工程、优化区域生态系统管理具有重要意义^[48-50]。

本研究揭示了京津冀地区不同功能分区

FVC 增长促进生态系统服务提升的阈值效应及区域差异。研究结果显示,在生态本底较好、人类活动强度较低的西北部生态涵养区,FVC 阈值显著高于人类活动强度较大且生态本底相对较差的中部核心功能区、南部功能拓展区和东部滨海发展区。西北部生态涵养区生态系统以森林和草原为主,FVC 的增长有效促进了生态系统服务的提升;然而,FVC 的促进作用存在阈值效应,这可能受到水分条件的限制。水分条件是制约林地和草地生态系统服务提升的重要因素^[51-52],FVC 提升的同时加大了蒸散量,增加了耗水需求,进而导致土壤含水量下降,并使得区域产水量减少^[53-54]。西北部生态涵养区广泛分布山地地形,使得水分对生态系统服务提升的限制作用可能更为显著。而中部核心功能区、南部功能拓展区的植被以农田和城市植被等人工或半人工生态系统为主,其分布受到强烈的人为干预,FVC 的提升大多局限于固定区域,而非生态系统质量的整体提升。此外,中部核心功能区、南部功能拓展区植被结构单一,生态系统服务功能相对较弱,FVC 的提升难以促进生态系统服务的整体提升,这可能是该区域 FVC 较早到达阈值的原因。农田受人为干扰强烈易引起生境质量下降,因此在 FVC 增加的同时,生境质量可能出现一定程度的降低^[55-56]。此外,生态系统服务之间的权衡关系也可能影响植被对生态系统服务的促进作用^[57]。

3.3 基于阈值效应的京津冀地区差异化生态系统管理路径

基于各功能分区的生态本底与 FVC 阈值特征,本研究提出差异化的生态系统管理路径。对于 FVC 已接近或超过阈值的区域,管理重点在于林分结构优化而非规模扩张;对于 FVC 低于阈值的区域,应在提升 FVC 的同时注重质量与功能协同。1) 西北部生态涵养区整体 FVC 较高,管理重点应从增量转向提质。京津冀地区水资源缺乏问题突出^[58],西北部生态涵养区是京津冀地区的水源涵养核心功能区^[59],应在保障该区域水源涵养功能的同时,促进固碳服务等多项生态系统服务协同提升。在生态恢复中严格落实“以水定绿”

原则,依据区域水资源承载力等条件,科学确定植被恢复规模与类型,在高寒地区可选择樟子松、落叶松等耐寒树种,在干旱、半干旱地区可选择侧柏、栓皮栎等耐旱树种,并合理调控植被密度,避免因植被过密导致生态系统功能衰退;同时注重树种结构优化,通过近自然经营等方式,构建复层异龄混交林,提升森林生态系统稳定性与生态功能。2) 中部核心功能区 FVC 阈值虽较高,但可用于植被恢复的空间有限。在高度城市化区域,盲目追求过高的 FVC 不仅需要消耗大量的水资源,且对改善城市生境质量、缓解城市热岛效应等作用有限^[60-61]。因此,应注重生态系统质量的综合提升而非单纯增加植被面积,通过优化城市绿地景观格局等方式,在有限空间内促进生态系统服务提升^[62]。3) 针对以农业生态系统为主的南部功能拓展区,应增强农业生态系统的多功能性,科学调控农业生态系统的 FVC,推广节水灌溉与生态农业,协同提升供给类生态系统服务与生物多样性和水文调节功能^[63]。此外,在保持农业生态系统供给功能稳定的前提下,可通过增加土壤有机碳输入,充分发挥土壤碳汇功能^[64]。4) 对于东部滨海发展区,平均 FVC 低于该功能分区的阈值,是具有大规模增绿潜力的区域。但需注重植被质量与抗逆性的同步提升,避免单一化植被种植、注重抗盐碱能力,构建结构稳定、功能多样的生态系统^[65]。

4 结论

本研究评估了 2000—2020 年,京津冀地区 4 个功能分区(西北部生态涵养区、中部核心功能区、南部功能拓展区、东部滨海发展区)生态系统服务和 FVC 的时空变化特征,并识别了 FVC 对生态系统服务影响的阈值,得出 3 个方面主要结论。1) 京津冀地区各功能分区 FVC 在 2000—2020 年总体呈上升趋势。京津冀西北部生态涵养区 FVC 提升区域主要位于山区。中部核心功能区和南部功能拓展区主要以城镇和农业生态系统为主,植被以农作物和城市植被为主,2 个区域均表现出 FVC 降低与提升并存的空间分异特征,其中 FVC 降低区域与城市扩张相关,而提升区域

则与生态建设和农业生产相关,2) 2000—2020 年,东部滨海发展区生境质量呈现上升趋势,与生态保护与修复措施相关,而中部核心功能区、南部功能拓展区及西北部生态涵养区由于受到城市扩张等人为因素的影响,生境质量呈现下降趋势。产水量、土壤保持及固碳服务在各功能分区均呈现上升趋势,其中土壤保持和固碳服务的显著提升主要集中于西北部生态涵养区,这与该区域植被状况的改善有关。3) 研究结果进一步阐明了各功能分区 FVC 对生态系统服务的影响存在阈值效应,且阈值存在区域差异。各功能分区按阈值高低排序为西北部生态涵养区(0.946)、中部核心功能区(0.824)、东部滨海发展区(0.775)、南部功能拓展区(0.772)。基于上述阈值特征,应对不同功能分区制定差异化的区域生态管理策略。

京津冀地区各功能分区的定位和划分与区域生态系统服务供需密切相关,但本研究未纳入生态系统服务的需求分析。本研究评估仅考虑生境质量、产水量、土壤保持和固碳服务 4 项关键生态系统服务,未涵盖空气净化、休闲游憩、授粉等生态系统服务,无法全面反映各功能分区生态系统的实际状况。未来研究将拓展生态系统服务的评估类型,结合各功能分区的生态系统特征和社会经济状况,明确区域生态系统服务的供需匹配状况,识别主要受益人群及其需求。此外,本研究仅从 FVC 角度讨论其对生态系统服务的影响,未充分考虑植被类型、气候变化和人为因素等重要影响因子。未来应深入研究各功能分区多种影响因素对生态系统服务的影响机制,从而为制定区域精准生态管理策略和生态产品价值实现提供科学支撑。

参考文献 (References):

- [1] COSTANZA R, D'ARGE R, DE GROOT R, et al. The Value of the World's Ecosystem Services and Natural Capital[J]. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] 王军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J]. *生态学报*, 2019, 39 (23): 8702-8708. WANG J, ZHONG L N. Application of Ecosystem Service Theory for Ecological Protection and Restoration of Mountain-River-Forest-Field-Lake-Grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(23): 8702-8708.
- [3] SU B R, LIU M C. Coupling Management Ecosystem



- Service Supply-Supply Trade-Offs and Supply-Demand Trade-Offs: Framework and Practice[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112258.
- [4] YIN C C, ZHAO W W, PEREIRA P. Ecosystem Restoration Along the "Pattern-Process-Service-Sustainability" Path for Achieving Land Degradation Neutrality[J]. Landscape and Urban Planning, 2025, 253: 105227.
- [5] XIA H, YUAN S F, PRISHCHEPOV A V. Spatial-Temporal Heterogeneity of Ecosystem Service Interactions and Their Social-Ecological Drivers: Implications for Spatial Planning and Management[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 189: 106767.
- [6] WANG Y M, ZHANG Z X, CHEN X. Identification of Ecosystem Service Bundles and Social-Ecological Driving Factors in the Poyang Lake Basin, China[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2026, 29: 101095.
- [7] HUI L, WANG H, LIU J M, et al. Assessing the Spatiotemporal Changes and Drivers of Ecological Security by Integrating Ecosystem Health and Ecosystem Services in Loess Plateau, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2025, 35(3): 459-482.
- [8] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰. 京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45 (1): 218-227.
- LI K M, WANG X Y, YAO L L. Spatial-Temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Science, 2024, 45(1): 218-227.
- [9] 寻雅雯, 苏常红. 基于生态系统服务供需关系的京津冀可持续发展研究[J]. 生态科学, 2025, 44 (5): 109-120.
- XUN Y W, SU C H. Research on Sustainable Development in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on the Ecosystem Services Supply and Demand[J]. Ecological Science, 2025, 44(5): 109-120.
- [10] REN Y H, FANG G J, SUN X, et al. Agroecosystem Services and Disservices in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China: Spatial Heterogeneity, Trade-Off Relationships, and Driving Mechanisms[J]. Applied Geography, 2025, 184: 103767.
- [11] BI S T, LI Z, CHEN Y, et al. Identification of Priority Conservation Areas in Beijing-Tianjin-Hebei Using Multi-scenario Trade-Offs Based on Different Spatial Scales and Their Drivers[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112508.
- [12] 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.
- [13] 曹莹, 曾彪, 张富广, 等. 黄河上游水源涵养区植被恢复合理目标及恢复策略[J]. 生态学报, 2024, 44 (18): 8219-8233.
- CAO Y, ZENG B, ZHANG F G, et al. Reasonable Target and Restoration Strategies of Vegetation Restoration in a Water Conservation Area of the Upper Yellow River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8219-8233.
- [14] ZHAO Z X, DAI E F. Vegetation Cover Dynamics and Its Constraint Effect on Ecosystem Services on the Qinghai-Tibet Plateau Under Ecological Restoration Projects[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 356: 120535.
- [15] 田慧慧, 韩新宁, 王亦波, 等. 宁夏草地生态系统服务时空演变及权衡协同关系: 2000—2020年[J]. 草地学报, 2025, 33 (10): 3419-3429.
- TIAN H H, HAN X N, WANG Y B, et al. Spatio-temporal Evolution and Trade-Offs Synergies of Grassland Ecosystem Services in Ningxia: 2000—2020[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(10): 3419-3429.
- [16] CAO Y P, XIE Z Y, WOODGATE W, et al. Ecohydrological Decoupling of Water Storage and Vegetation Attributed to China's Large-Scale Ecological Restoration Programs[J]. Journal of Hydrology, 2022, 615: 128651.
- [17] WANG Q M, LIU H Y, LIANG B Y, et al. Will Large-Scale Forestation Lead to a Soil Water Deficit Crisis in China's Drylands?[J]. Science Bulletin, 2024, 69(10): 1506-1514.
- [18] LENG Q N, GONG X W, LI M Y, et al. Tree Density Reduction Mitigates the Decline of Larix Principis-Rupprechtii Plantations: Evidence from a Combination of Dendroclimatic and Physiological Measurements[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2023, 333: 109390.
- [19] 张佳凝, 张建军, 赖宗锐, 等. 林分密度对刺槐人工林土壤养分和微生物群落的影响[J]. 干旱区研究, 2025, 42 (2): 274-288.
- ZHANG J N, ZHANG J J, LAI Z R, et al. Effects of Stand Density on Soil Nutrients and Microbial Communities in Robinia Pseudoacacia Plantations[J]. Arid Zone Research, 2025, 42(2): 274-288.
- [20] 王晓峰, 白娟, 冯晓明, 等. 秦巴山区生态系统服务对植被覆盖变化的响应阈值[J]. 生态学报, 2024, 44 (15): 6811-6827.
- WANG X F, BAI J, FENG X M, et al. Thresholds for Ecosystem Service Response to Changes of Vegetation Cover in the Qinba Mountain Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(15): 6811-6827.
- [21] 员学锋, 施林童, 杨悦, 等. 陕北黄土丘陵沟壑区人类活动和植被覆盖对关键生态系统服务的影响[J]. 应用生态学报, 2024, 35 (12): 3235-3246.
- YUN X F, SHI L T, YANG Y, et al. Impacts of Human Activities and Vegetation Cover on Key Ecosystem Services in the Loess Hilly-Gully Region of Northern Shaanxi, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(12): 3235-3246.
- [22] LIN J Y, LIU S L, WANG W T, et al. Integrating Ecosystem Services and Ecological Sensitivity to Assess Ecological Restoration Potential and Determine Thresholds in the Wujiang River Basin, Southwest China[J]. Ecological Indicators, 2025, 179: 114233.
- [23] XU J, ZHANG J, QU C, et al. Spatiotemporal Evolution of Ecosystem Service Supply-Demand Shaped by Nonlinear Thresholds in Socio-ecological Drivers[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2025, 11: 451.
- [24] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (11): 3457-3466.
- WU J S, CAO Q W, SHI S Q, et al. Spatio-temporal Variability of Habitat Quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area Based on Land Use Change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(11): 3457-3466.
- [25] 刘梓晗, 蔡俊, 吴婧, 等. 京津冀地区生态系统服务价值时空演变与驱动力分析[J]. 地质通报, 2025, 44 (12): 2278-2290.
- LIU Z H, CAI J, WU J, et al. Spatiotemporal Evolution and Driving Forces of Ecosystem Service Value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Geological Bulletin of China, 2025, 44(12): 2278-2290.
- [26] 彭守璋. 中国1 km逐月潜在蒸散发数据集 (1901—2024) [DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心 (2022-01-26) [2026-02-01]. <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>.
- PENG S Z. 1 km Monthly Potential Evapotranspiration Dataset in China (1901—2024)[DS/OL]. National Tibetan Plateau Third Pole Environment Data Center (2022-01-26) [2026-02-01]. <https://doi.org/10.11866/db.loess.2021.001>.
- [27] 彭守璋. 中国1 km分辨率逐月降水量数据集 (1901—2024) [DS/OL]. 国家青藏高原科学数据中心 (2020-06-08) [2026-04-19]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194>.
- PENG S Z. 1km Monthly Precipitation Dataset for China (1901—2021)[DS/OL]. National Tibetan Plateau Third Pole Environment Data Center (2020-06-08) [2026-02-01]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3114194>.
- [28] DIDAN, K. MODIS/Terra Vegetation Indices Monthly L3 Global 1 km SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC[DS/OL]. (2015-08-19) [2026-04-19]. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13A3.006>.
- [29] WANG X Z, WU J Z, LIU Y L, et al. Driving Factors of Ecosystem Services and Their Spatiotemporal Change Assessment Based on Land Use Types in the Loess Plateau[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 311: 114835.
- [30] XIANG H X, WANG Z M, MAO D H, et al. What Did China's National Wetland Conservation Program Achieve? Observations of Changes in Land Cover and Ecosystem Services in the Sanjiang Plain[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 267: 110623.
- [31] TANG X L, ZHAO X, BAI Y F, et al. Carbon Pools in China's Terrestrial Ecosystems: New Estimates Based on an Intensive Field Survey[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4021-4026.
- [32] GITELSON A A, KAUFMAN Y J, STARK R, et al. Novel Algorithms for Remote Estimation of Vegetation Fraction[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80(1): 76-87.
- [33] CARLSON T N, RIPLEY D A. On the Relation Between NDVI, Fractional Vegetation Cover, and Leaf Area Index[J]. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(3): 241-252.
- [34] 鲁军景, 孙雷刚, 左璐, 等. 基于京津冀功能分区的植被覆盖度时空演变特征及其影响因子[J]. 自然资源遥感, 2024, 36 (4): 242-253.
- LU J J, SUN L G, ZUO L, et al. A Functional Zoning-Based Study of the Spatiotemporal Evolutionary Characteristics and Influencing Factors of Vegetation Fractional Cover in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 242-253.
- [35] 张鹏骞, 胡理乐, 白加德. 京津冀地区近20年NDVI时空变化特征[J]. 生态环境学报, 2021, 30 (1): 29-36.
- ZHANG P Q, HU L L, BAI J D. Spatiotemporal Variation of NDVI in Beijing-Tianjin-Hebei Region in the Past 20 Years[J]. Ecology and Environment Sciences, 2021, 30(1): 29-36.
- [36] 张滔, 唐宏. 基于Google Earth Engine的京津冀2001—2015年植被覆盖变化与城镇扩张研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33 (4): 593-599.
- ZHANG T, TANG H. Vegetation Cover Change and Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei During 2001—2015 Based on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 593-599.
- [37] 陈澍祺, 何玲, 闫丰. 京津冀植被覆盖度时空演变及其对自然人为变化的响应[J]. 中国环境科学, 2024, 44 (7): 3931-3944.
- CHEN S Q, HE L, YAN F. Spatiotemporal Evolution of Vegetation Coverage in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Response to Natural Anthropogenic Changes[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 3931-3944.

[38] 罗元, 王钧. 中国沿海三大城市群湿地时空演变及其驱动因素对比研究[J]. 湿地科学, 2024, 22 (5): 617-629.

LUO Y, WANG J. A Comparative Study on Spatial-Temporal Dynamics and Associated Driving Factors of Wetlands in the Three Coastal Urban Agglomerations of China[J]. Wetland Science, 2024, 22(5): 617-629.

[39] 朱梅涛, 王然, 邢莉圆, 等. InVEST-GTWR模型下京津冀地区土壤保持策略研究[J]. 环境科学与技术, 2025, 48 (7): 151-164.

ZHU M T, WANG R, XING L Y, et al. Research on Soil Conservation Strategies in Beijing-Tianjin-Hebei Region Under the InVEST-GTWR Model[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(7): 151-164.

[40] 王宗超, 闫丰, 田朋飞, 等. 2002—2020年京津冀植被固碳能力时空分异及其影响因素[J]. 环境科学, 2025, 46 (6): 3784-3796.

WANG Z C, YAN F, TIAN P F, et al. Spatial and Temporal Variability of Carbon Sequestration Capacity of Vegetation in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Influencing Factors from 2002 to 2020[J]. Environmental Science, 2025, 46(6): 3784-3796.

[41] 高旭旭, 于长文, 张婧, 等. 定量评估京津冀气候变化和人类活动对植被NPP变化的相对作用[J]. 中国农业气象, 2022, 43 (2): 124-136.

GAO X X, YU C W, ZHANG J, et al. Quantitative Assessment on the Relative Influence of Climatic Change and Human Activities on Net Primary Productivity in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(2): 124-136.

[42] ZHANG S, CHEN W, WANG Y N, et al. Human Interventions Have Enhanced the Net Ecosystem Productivity of Farmland in China[J]. Nature Communications, 2024, 15: 10523.

[43] MAMTIMIN A, ZHANG K, SAYIT H, et al. The Construction of Shelterbelts Along the Desert Highway Has Increased the Carbon Sequestration Capacity of the Taklimakan Desert, China[J]. Ecological Informatics, 2025, 86: 103027.

[44] HE J, LI Y, SHI X Y, et al. Integrating the Impacts of Vegetation Coverage on Ecosystem Services to Determine Ecological Restoration Targets for Adaptive Management on the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2023, 34(18): 5697-5712.

[45] BAI J, WANG X F, TU Y, et al. Integration of Ecosystem Service Composite Index and Driving Thresholds for Ecological Zoning Management: A Case Study of Qinling-Daba Mountain, China[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 384: 125309.

[46] 张琨, 吕一河, 傅伯杰, 等. 黄土高原植被覆盖变化对生态系统服务影响及其阈值[J]. 地理学报, 2020, 75 (5): 949-960.

ZHANG K, LYU Y H, FU B J, et al. The Effects of Vegetation Coverage Changes on Ecosystem Service and Their Threshold in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 949-960.

[47] MA S, WANG L J, YE L M, et al. Vegetation Restoration Thresholds Under Different Vegetation Types and Altitude Gradients in the Sichuan-Yunnan Ecological Shelter, China[J]. Journal of Environmental Management, 2023, 340: 117910.

[48] MA S, WANG L J, JIANG J, et al. Threshold Effect of Ecosystem Services in Response to Climate Change and Vegetation Coverage Change in the Qinghai-Tibet Plateau Ecological Shelter[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,

318: 128592.

[49] CAO S X, CHEN L, SHANKMAN D, et al. Excessive Reliance on Afforestation in China's Arid and Semi-arid Regions: Lessons in Ecological Restoration[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 104(4): 240-245.

[50] 石智宇, 董霁红. 北方干旱半干旱区植被覆盖时空变化及其对生态系统服务的影响[J]. 中国环境科学, 2026, 46 (1): 379-388.

SHI Z Y, DONG J H. Spatiotemporal Changes of Vegetation Cover in Arid and Semi-arid Regions of Northern China and Its Impact on Ecosystem Services[J]. China Environmental Science, 2026, 46(1): 379-388.

[51] ZHANG J Z, DING Z W, LUO M T. Risk Analysis of Water Scarcity in Artificial Woodlands of Semi-arid and Arid China[J]. Land Use Policy, 2017, 63: 324-330.

[52] LIU L B, WANG Z, WANG Y, et al. Trade-Off Analyses of Multiple Mountain Ecosystem Services Along Elevation, Vegetation Cover and Precipitation Gradients: A Case Study in the Taihang Mountains[J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 94-104.

[53] 吕昉颖, 赵媛媛, 省朝龙, 等. 中国北方风沙区典型植物适生区模拟与水资源植被承载力量化[J]. 干旱区研究, 2026, 43 (1): 74-85.

LYU F Y, ZHAO Y Y, XING C L, et al. Simulation of Suitable Habitats for Typical Plants and Quantification of Water Carrying Capacity of Vegetation in the Wind-Sand Region of Northern China[J]. Arid Zone Research, 2026, 43(1): 74-85.

[54] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2020, 28 (3): 594-606.

ZHANG B Q, SHAO R, ZHAO X N, et al. Effects of Large-Scale Vegetation Restoration on Eco-hydrological Processes over the Loess Plateau, China[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(3): 594-606.

[55] MA S, WANG L J, JIANG J, et al. Direct and Indirect Effects of Agricultural Expansion and Landscape Fragmentation Processes on Natural Habitats[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023, 353: 108555.

[56] 潘耀, 尹云鹤, 侯文娟, 等. 基于土地利用及植被覆盖变化的黄河源区生境质量时空变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42 (19): 7978-7988.

PAN Y, YIN Y H, HOU W J, et al. Spatiotemporal Variation of Habitat Quality in the Source Region of the Yellow River Based on Land Use and Vegetation Cover Changes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 7978-7988.

[57] 杨阳, 窦艳星, 王云强, 等. 黄土丘陵沟壑区典型小流域生态系统服务权衡与协同关系研究[J]. 生态学报, 2022, 42 (20): 8152-8168.

YANG Y, DOU Y X, WANG Y Q, et al. Ecosystem Service Tradeoffs and Synergies in Typical Small Watersheds of the Hilly and Gully Region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(20): 8152-8168.

[58] 郭立硕, 宋晓宇, 郭亚南, 等. 京津冀地区水资源承载力多情景模拟: 基于人口与经济的考量[J]. 生态经济, 2025, 41 (6): 164-171.

GUO L S, SONG X Y, GUO Y N, et al. Multi-scenario Simulation of Water Resources Carrying Capacity in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Population and Economic Considerations[J]. Ecological Economy, 2025, 41(6): 164-171.

[59] 李鑫, 邹长新, 陈艳梅, 等. 2000—2019年京津冀地区水源涵养功能时空格局变化及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2022, 42 (5): 265-274.

LI X, ZOU C X, CHEN Y M, et al. Spatio-temporal Pattern Changes and Driving Factors of Water Conservation Function in Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2000 to 2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 265-274.

[60] ZHANG Y, GE J T, WANG S Y, et al. Optimizing Urban Green Space Configurations for Enhanced Heat Island Mitigation: A Geographically Weighted Machine Learning Approach[J]. Sustainable Cities and Society, 2025, 119: 106087.

[61] 曾海聪, 李晨亮, 张君瑶, 等. 城市绿地生物多样性影响因素研究概述[J]. 中国城市林业, 2023, 21 (5): 171-178.

ZENG H C, LI C L, ZHANG J Y, et al. Research on Influencing Factors to Biodiversity in Urban Green Spaces[J]. Journal of Chinese Urban Forestry, 2023, 21(5): 171-178.

[62] 王云才, 申佳可, 彭震伟, 等. 适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化[J]. 中国园林, 2018, 34 (10): 45-49.

WANG Y C, SHEN J K, PENG Z W, et al. The Optimization of Green Infrastructure Ecosystem Services Adapted to Urban Growth[J]. Chinese Landscape Architecture, 2018, 34(10): 45-49.

[63] MATHIEU A, MARTIN-GUAY M O, RIVEST D. Enhancement of Agroecosystem Multifunctionality by Agroforestry: A Global Quantitative Summary[J]. Global Change Biology, 2025, 31(5): e70234.

[64] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42 (23): 9405-9416.

ZHAO M Y, LIU Y X, ZHANG X Y. A Review of Research Advances on Carbon Sinks in Farmland Ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23): 9405-9416.

[65] 蔚奴平. 滨海盐碱湿地景观建设的基本原则: 以天津光合谷湿地公园为例[J]. 现代农业科技, 2020 (5): 147-149.

WEI N P. Basic Principles of Coastal Saline Alkali Wetland Landscape Construction: Taking Tianjin Guanghegu Wetland Park as an Example[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(5): 147-149.

图片来源(Sources of Figures):

图 1、2、4 底图来源于资源环境科学数据平台 (www.resdc.cn) 中国多年度省级行政区划边界数据, 边界无修改; 图 3、5 由作者绘制。

(编辑 / 刘颖)

作者简介:

马致远 / 男 / 博士 / 清华大学建筑学院在站博士后、助理研究员 / 生态修复研究中心成员 / 研究方向为生态学、生态系统服务

李锋 / 男 / 博士 / 清华大学建筑学院教授、博士生导师 / 生态修复研究中心主任 / 研究方向为生态修复、生态资产与生态产品
通信作者邮箱: feng_li@tsinghua.edu.cn

许丁 / 男 / 博士 / 清华大学建筑学院在站博士后、助理研究员 / 生态修复研究中心成员 / 研究方向为生态产品价值实现

陈可为 / 女 / 博士 / 清华大学建筑学院在站博士后、助理研究员 / 生态修复研究中心成员 / 研究方向为城市生态学、自然式种植设计

MA Z Y, LI F, XU D, CHEN K W. Threshold Effects of Fractional Vegetation Cover on Ecosystem Service Across Different Functional Zones in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Landscape Architecture, 2026, 33(5): 43-50. DOI: 10.3724/j.fjyl.LA20260048.

Threshold Effects of Fractional Vegetation Cover on Ecosystem Service Across Different Functional Zones in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China

MA Zhiyuan, LI Feng*, XU Ding, CHEN Kewei

Abstract:

[Objective] The interplay of natural and anthropogenic factors has led to significant spatial heterogeneity in vegetation distribution across the Beijing-Tianjin-Hebei region. Vegetation conditions are a critical determinant of regional ecosystem service (ES) and functioning. Nevertheless, the threshold effects of vegetation changes on ecosystem services across different functional zones remain unclear, and whether such thresholds vary spatially lacks quantitative identification. This study aims to systematically analyze the spatiotemporal dynamics of fractional vegetation cover (FVC) and key ES in various functional zones (the northwestern ecological conservation zone, central core functional zone, southern functional expansion zone, and eastern coastal development zone) from 2000 to 2020, and to quantify the threshold effects of FVC on ES.

[Methods] Based on data availability and assessment feasibility, this study focused on the importance of ecological security in the Beijing-Tianjin-Hebei region and its correlation with vegetation changes, and selected four key ecosystem services: habitat quality, water yield, soil conservation, and carbon sequestration. The specific methods were as follows. First, the habitat quality and water yield modules of the integrated valuation of ecosystem services and trade-offs (InVEST) model were utilized to assess habitat quality and water yield; the revised universal soil loss equation (RUSLE) model was used to assess soil conservation services, and the Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model was used to assess carbon sequestration services across different functional zones of the Beijing-Tianjin-Hebei region. Second, FVC in each functional zone was estimated based on NDVI data. Subsequently, the biophysical values of the four ecosystem services were normalized into dimensionless values, which were then summed to obtain the total ecosystem service (TES), representing the overall level of ES in the Beijing-Tianjin-Hebei region. Finally, a combination of the quantile segmentation method and elasticity coefficient was applied to identify the FVC thresholds that influence TES across different functional zones.

[Results] The spatiotemporal dynamics of ES in the Beijing-Tianjin-Hebei region was significant from 2000 to 2020. From the perspective of functional zones, habitat quality decreased by 2.98% in the northwestern ecological conservation zone, by 11.32% in the central core functional zone, and by 8.14% in the southern functional expansion zone. Notably, habitat quality in the eastern coastal development zone showed an increasing trend during this period, with an increase of 10.62%. Soil conservation increased most significantly in the eastern coastal development zone, rising by 91.84%. It also increased in the northwestern ecological conservation zone (61.01%), the central core functional zone (55.22%), and the southern functional expansion zone (28.63%). Regarding water yield, the eastern coastal development zone exhibited the largest increase (132.13%), followed by the northwestern ecological conservation zone (127.36%), the central core functional zone (119.40%), and the southern functional expansion zone (43.19%). In terms of carbon sequestration, the northwestern ecological conservation zone and the southern functional expansion zone showed the most substantial increases, with rises of 65.46% and 65.99%, respectively, while the central core functional zone and the eastern coastal development zone increased by 1.26% and

24.12%, respectively. FVC showed an overall increasing trend. By functional zone, the northwestern ecological conservation zone exhibited a relatively pronounced increase (14.60%), followed by the eastern coastal development zone (2.66%), the central core functional zone (1.49%), and the southern functional expansion zone (0.37%). Furthermore, this study elucidated the differentiated impacts and thresholds of FVC on ES across functional zones. The thresholds, in descending order, were: northwestern ecological conservation zone (0.946), central core functional zone (0.824), eastern coastal development zone (0.775), and southern functional expansion zone (0.772).

[Conclusion] This study shows that the effects of FVC on ES in different functional zones exhibit regional threshold characteristics. Accordingly, differentiated ecosystem management pathways were proposed based on the ecological conditions and FVC threshold characteristics of each functional zone. For the northwestern ecological conservation zone, which has an overall high FVC, management priorities should shift from quantity expansion to quality improvement. The central core functional zone should focus on the comprehensive enhancement of ecosystem quality rather than merely increasing vegetation area, promoting ES improvements within limited spaces through optimized urban green space landscape patterns. For the southern functional expansion zone dominated by agricultural ecosystems, efforts should enhance the multifunctionality of agricultural ecosystems, scientifically regulate FVC in agricultural systems, and promote water-saving irrigation and ecological agriculture to synergistically improve provisioning ES alongside biodiversity and hydrological regulation functions. The eastern coastal development zone requires the synchronised improvement of vegetation quality and stress resistance, avoiding monoculture vegetation planting, emphasizing saline-alkali tolerance, and constructing structurally stable and functionally diverse ecosystems. These findings provide scientific support for precision ecosystem management and the realization of ecological product value and sustainable development in the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Keywords: ecosystem assessment; ecosystem service; ecological products; threshold effects; Beijing-Tianjin-Hebei region

Authors:

MA Zhiyuan, Ph.D., is a postdoctoral researcher and assistant research fellow in the School of Architecture, Tsinghua University, and a member of the Ecological Restoration Research Center. His research focuses on ecology, and ecosystem services.

LI Feng, Ph.D., is a professor and doctoral supervisor in the School of Architecture, Tsinghua University, and director of the Ecological Restoration Research Center. His research focuses on ecological restoration, and ecological assets and product. Corresponding author Email: feng_li@tsinghua.edu.cn

XU Ding, Ph.D., is a postdoctoral researcher and assistant research fellow in the School of Architecture, Tsinghua University, and a member of the Ecological Restoration Research Center. His research focuses on realization of ecological product value.

CHEN Kewei, Ph.D., is a postdoctoral researcher and assistant research fellow in the School of Architecture, Tsinghua University, and a member of the Ecological Restoration Research Center. Her research focuses on urban ecology, and naturalistic planting design.