

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.05.006

CSTR:32310.14.stbxb.2025.05.006

窦婷婷, 赵晨森, 牛健植, 等. 北京市山区森林生态系统健康评估及驱动因素分析[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5)

DOU Tingting, ZHAO Chensen, NIU Jianzhi, et al. Health assessment and driving factors analysis of forest ecosystems in mountainous areas of Beijing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5)

北京市山区森林生态系统健康评估及驱动因素分析

窦婷婷^{1,2}, 赵晨森^{1,2}, 牛健植^{1,2}, 伦小秀³, 蔺星娜⁴, 杨涛^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持国家林业和草原局重点实验室, 北京 100083; 2. 林业生态工程教育部工程研究中心, 北京 100083; 3. 北京林业大学环境科学与工程学院, 北京 100083; 4. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 杭州 310000)

摘要: [目的] 揭示北京山区森林生态系统 2005—2020 年健康状况时空演变特征, 分析区域差异及影响因子解释力。[方法] 构建以“地理环境-植被结构-生态压力-植被功能”为准则层的森林生态系统健康评价体系, 应用熵权-TOPSIS 法, 计算指标权重并评价北京山区森林生态系统健康, 分析 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年森林生态系统健康变化特征。在此基础上, 利用空间自相关分析和 K-means 聚类分析探究生态系统健康的空间聚集和区域差异。最后, 利用地理探测器中的单因子探测和交互探测模块, 量化各指标因子对森林生态系统健康空间分布的解释力。[结果] 1) 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康水平呈上升趋势, 现阶段北京山区森林生态系统以中等健康和较好健康为主, 二者面积占比分别为 41% 和 48%, 空间上呈远城区高、近城区低的空间分异格局。2) 北京山区森林生态系统健康状况持续向好, 2015—2020 年变化尤为明显, 优等健康地区占比从 2.43% 升至 18.65%。研究区莫兰指数在 2005—2020 年呈先降后升的趋势, 表现出显著的全局空间自相关和局部空间自相关集聚特征, 显著性空间类型以正相关为主, HH 型和 LL 型分别为 41.8% 和 30.8%, 占显著性类型总数的 79.6%。3) 以乡镇为单位展示北京山区森林生态系统健康的空间差异性, 结果表明, 怀柔、密云和延庆地区的生态健康水平较高, 而丰台、海淀和石景山区的森林健康状况相对较差。4) 土壤保持、LAI、NDVI、乔木盖度、人口密度为北京山区森林生态系统健康的主导因子, 各因子之间的交互作用表现为非线性增强和双因子增强; 北京山区森林生态系统健康 2005 年由 GDP 和保持土壤主导, 2010—2015 年由 LAI 和保持土壤主导, 2020 年由保持土壤与空气净化主导。[结论] 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康状况不断好转, 生态服务功能在森林生态系统健康中的影响力逐渐显现。在今后森林经营和管护中, 需要充分考虑森林生态系统服务功能的提升及维护。

关键词: 森林; 健康评估; 熵权-TOPSIS; 地理探测器; 北京山区

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

Health Assessment and Driving Factors Analysis of Forest Ecosystems in Mountainous Areas of Beijing

DOU Tingting^{1,2}, ZHAO Chensen^{1,2}, NIU Jianzhi^{1,2}, LUN Xiaoxiu³, LIN Xingna⁴, YANG Tao^{1,2}

(1. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 4. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 310000, China)

Abstract: [Objective] To investigate the spatiotemporal evolution characteristics of forest ecosystem health in the mountainous areas of Beijing during 2005—2020, with particular emphasis on analyzing regional variations and the explanatory power of the influencing factors. [Methods] A forest ecosystem health evaluation system was

收稿日期: 2025-01-02

修回日期: 2025-03-02

录用日期: 2025-03-17

资助项目: 内蒙古自治区科技重大专项(2024JBGS0021-2-2); 承德国家可持续发展议程创新示范区建设科技专项(202302F008)

第一作者: 窦婷婷(1997—), 女, 博士研究生, 主要从事森林生态保护与修复研究。E-mail: 1302667100@qq.com

通信作者: 牛健植(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事森林水文与土壤侵蚀研究。E-mail: nexk@bjfu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

established based on four criteria layers, including geographic environment, vegetation structure, ecological pressure, and vegetation function. The entropy-weight TOPSIS method was applied to calculate indicator weights and evaluate the health of forest ecosystems in the mountainous areas of Beijing. Temporal variations in ecosystem health characteristics were analyzed for the years 2005, 2010, 2015, and 2020. On this basis, spatial autocorrelation analysis and *K*-means clustering analysis were employed to investigate the spatial clustering patterns and regional variations in ecosystem health. Furthermore, the single-factor and interactive detection modules of the geographical detector model were utilized to quantitatively assess the explanatory power of various indicator factors influencing the spatial distribution of forest ecosystem health. [Results] 1) From 2005 to 2020, the health condition of forest ecosystems in the mountainous areas of Beijing exhibited a consistent upward trend. At this stage, these forest ecosystems were predominantly moderately healthy (41%) or relatively healthy (48%), forming a spatial differentiation pattern characterized by higher health levels in farther urban areas and lower health levels near the urban zones. 2) The forest ecosystem health in the mountainous areas of Beijing showed continuous improvement, with particularly notable progress between 2015 and 2020, as the proportion of areas classified as “excellent health” increased from 2.43% to 18.65%. The Moran’s index in the study area exhibited a declining-then-rising trend from 2005 to 2020, indicating significant global and local spatial autocorrelation with clustering patterns. Among the significant spatial types, positive correlations dominated, with HH (41.8%) and LL (30.8%) clusters collectively accounting for 79.6% of all significant spatial types. 3) The spatial heterogeneity of forest ecosystem health in the mountainous areas of Beijing was analyzed at the township level. The results demonstrated that regions such as Huairou, Miyun, and Yanqing exhibited relatively higher ecological health levels, while forest ecosystems in Fengtai, Haidian, and Shijingshan districts showed comparatively poorer health conditions. 4) Soil conservation, Leaf Area Index (LAI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), tree cover, and population density were identified as the dominant factors influencing forest ecosystem health in the mountainous areas of Beijing. The interactive effects among the factors showed nonlinear enhancement and two-factor enhancement patterns. The primary driving factors of forest ecosystem health in the mountainous areas of Beijing showed distinct variations: GDP and soil conservation were the dominant factors in 2005, followed by LAI and soil conservation during 2010–2015, while air purification and soil conservation were dominant in 2020. [Conclusion] Based on the analysis, the health condition of forest ecosystem in the mountainous areas of Beijing shows consistent improvement during the 2005–2020 period, with the role of ecological services becoming increasingly prominent in shaping overall forest ecosystem health. These findings suggest that future forest management and conservation strategies should prioritize the enhancement and maintenance of forest ecosystem service functions.

Keywords: forest; health assessment; entropy-weighted TOPSIS; geographical detector model; mountainous areas of Beijing

Received: 2025-01-02

Revised: 2025-03-02

Accepted: 2025-03-17

森林生态系统结构复杂,发挥着保育水土、涵养水源等多种生态功能,并具有提供木材和林副产品等创造经济价值的能力^[1]。森林生态系统健康是指森林具备良好的恢复力,能够通过自身调节抵御外界负面的干扰,从而维持其完整性、稳定性和可持续性,提供人类社会所需要的生态服务功能^[2]。健康的森林可以保证自身的延续和不断发展,最大限度地

发挥生态效益,同时兼顾社会和经济效益,是促进区域可持续发展的重要因素。森林健康评价一直是林学研究的热点之一,也是国内外森林资源管理的重要手段^[3]。

森林生态系统健康评价在评价指标的筛选和评价方法上都得到发展。评价指标的选取需遵循科学、可行、易获取等基本原则,再根据研究森林的类

型、评价方的需求等进行取舍。目前,学者们通常选用的指标有森林生态系统中林分的结构和组成^[4]、生态系统的生产力^[5]、土壤肥力、景观破碎度等结构性指标和森林抵抗病虫害^[6]的能力等稳定性指标,有少数学者^[7]考虑到森林生态系统的功能性指标。随着遥感技术的快速发展,可用于大尺度森林评价的遥感数据的空间分辨率显著提升,生态指标的种类也愈加丰富。例如,森林树种^[8]、森林冠层高度^[9]、森林结构指数^[10]、地表土壤水分^[11]及森林火灾监测^[12]等指标已逐步应用于森林健康评估。遥感技术不仅能够在大范围内快速获取森林生态系统的时空动态信息,还能通过长期监测揭示森林健康状况的时间变化趋势。

从评价方法的指标赋权角度,通常将评价分为主观赋权和客观赋权2种。其中主观赋权(如层次分析法、德尔菲法)依赖先验知识,存在一定随机性与不确定性;客观赋权更能避免人为因素的干扰,具有更高的科学性和稳定性。但客观赋权也有局限,如主成分分析法和因子分析法在非线性数据环境下可能降低评价精度^[13],灰色关联分析法则适用于小尺度、少量样本数据研究,无法判断评价对象的等级^[14]。目前森林健康评价呈现出多种方法相结合的趋势。多属性决策问题的理想解法,即TOPSIS法,对样本数量及数据分布没有严格限制,可以精确反映各评价对象之间的差距,结合精度较高,客观性更强的熵权法,能够更科学准确地解释所获得的结果^[15],该方法能够降低权重误差,减少信息的损失,既有利于多指标之间的对比,也有利于不同年份之间的纵向比较^[16]。在指标数据的标准化处理时,许多研究并没有考虑到指标的作用区间。某些指标因子对森林生态系统健康有一个显著作用区间,即称该因子为区间型因子^[17]。例如,赵猛等^[18]在北京平谷地区的研究指出,随着坡度增加,土壤侵蚀强度也随之增加,在坡度超过25°时,土壤侵蚀量显著加剧,则坡度大于25°之后,其作用几乎和25°时相当。因此,衡量生态系统健康的相对优劣,需要在显著作用区间内对指标的相对作用值进行考量^[19]。研究区不同,因素指标的作用区间也发生变化,需考虑研究区的实际情况定义指标的作用区间。因为森林生态系统健康需要考虑区域立地条件,只有适合此区域立地条件的森林才可能是健康的森林,在大尺度森林生态系统健康评价需要重点考虑地理因素的影响。综上可知,森林生态系统健康评估急需较大尺度区域性整体健康快速、简洁的评估方法,实现研究区域森林生态系统健康

快速精准评估。

北京市是快速城市化的典型城市,城市建设用地的扩展侵占周边的耕地和生态用地,导致局部地区生态系统服务功能严重退化^[20]。近些年,北京市相继开展2轮百万亩造林工程,以及森林廊道建设、废弃矿山生态修复、低效林改造等森林景观保护与修复工作^[21],在林业建设方面进步显著。然而,北京市目前仍面临绿色空间格局分布不均衡、林地质量提升效果不明显及林业管理水平有待提高等问题^[22]。开展北京山区森林生态系统健康评估及驱动因素研究,有助于促进区域社会经济绿色发展。现有评价方法大多侧重自然属性和社会经济因素,而对生态系统的服务功能考虑较少,导致评价结果在反映生态系统整体健康状况方面仍存在局限性。本研究将生态系统服务功能指标纳入框架,结合“地理环境、植被结构、生态压力和植被功能”4个方面,构建16个指标的森林生态系统健康评价体系,以更全面地评估森林生态系统健康状况。在方法上,首先结合区域地理特征确定各指标的作用区间,然后采用熵权-TOPSIS法计算指标权重,并对2005—2020年北京山区森林生态系统健康状况的时空分布及变化趋势进行分析。利用地理探测器定量评估各指标对森林健康的影响力,并通过交互探测识别双因子之间的交互作用。本研究旨在明确北京山区森林生态系统的健康水平及其主要影响因素,并识别其相互作用机制,为生态环境保护 and 可持续发展政策提供科学依据,同时也为森林健康评价方法的优化提供参考。

1 研究区概况

北京山区位于北京市的北部和西部(39°12′~40°05′N,115°25′~117°30′E),分属燕山山脉和太行山脉,面积约为10 072.5 km²,涉及门头沟、房山、延庆、怀柔、密云等11个区县。北京山区地势由东南向西北逐渐升高,地质地貌多为低山丘陵,最高海拔2 258 m,土壤质地多为砂壤土,垂直地带性明显。年平均气温10~12℃,年平均降水量470~660 mm,降雨时间主要集中在7月,属暖温带大陆季风气候。该区林分类型丰富,主要树种为油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等针叶树和白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、栎树(*Quercus* L.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* L.)、杨树(*Populus* L.)的阔叶林,森林资源以人工幼龄林为主。林种主要为水土保持和水源涵养防护林(图1)。

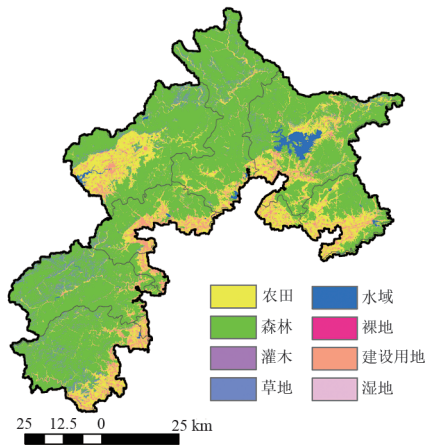


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

2 研究方法

2.1 数据来源与处理

本研究所涉及的原始数据包括 DEM、植被、社会经济、空气质量、土地利用、土壤、气象干旱、气候等 8 类。具体数据来源为：1) DEM 数据来源于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>) 中的 NASA SRTM1 V3.0 高程数据, 空间分辨率为 30 m, 借助 arcgis 软件计算海拔、坡度、坡向等地形指标。2) 植被遥感数据, 包括植被归一化指数 (NDVI)、叶面积指数 (LAI)、净初级生产力 (NPP), 来源于 Google earth engine (GEE) (<https://earthengine.google.com>) 中的 MOD13A1、MOD15A2H、MOD17A3HGF 数据集, 空间分辨率为 500 m。3) 人口密度、GDP 数据等社会经济资料来源于资源环境科学数据平台 (<https://www.resdc.cn/>), 空间分辨率为 1 km。4) PM₁₀ 浓度数据来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 用以表征森林净化大气功能。5) 土地利用数据, 来源于欧洲空间局 (<https://viewer.esa-worldcover.org/>) 的 ESRI Annual Land Cover 数据集, 空间分辨率为 10 m, 用以计算乔木盖度、景观多样性等指标。6) 土壤属性数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://soil.geodata.cn/>) 中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集, 空间分辨率为 250 m; 土壤根系深度数据来源于 YAN 等^[23]已公开发表的中国基岩数据集 (<http://globalchange.bnu.edu.cn/>), 空间分辨率为 100 m。7) 气象干旱数据标准化降水蒸散指数 (SPEI), 来源于科学数据银行 (<https://www.scidb.cn/>), 空间分辨率为 1 km, 干燥度 (AI) 来源于国家青藏高原科学数据中心 (<https://data.tpdc.ac.cn/>)。8) 逐月降水量和蒸散发等气象数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://soil.geodata.cn/>), 空间分辨率为 1 km。

soil.geodata.cn/), 空间分辨率为 1 km。

结合前文的气象数据、土壤数据、土地利用数据、高程数据等, 利用 SPAW 软件、InVEST 软件和 Arcgis 软件计算水源涵养量和土壤保持量。InVEST 模型具备较强的空间化、动态化和可视化特点, 能够更全面、精确地评估生态系统服务功能, 从而提升数据的精细度, 使研究结果更加科学和可靠^[24]。

以上原始数据均统一坐标系为 Krasovsky_1940_Albers, 空间分辨率为 250 m, 再进行后续的计算分析。

2.2 熵权 TOPSIS 法

本研究通过熵权-TOPSIS 法对北京山区森林生态系统健康进行评价, 以获得全面而客观的评价结果。

本研究对正负向型指标采用最大最小值标准化, 区间型因子以指标对森林生态系统健康影响的上限 (95%) 和下限 (5%) 为作用区间界限, 设定极值后进行标准化处理^[19], 构建标准化的决策矩阵, 其公式为:

$$Y_{ij}^+ = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$Y_{ij}^- = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

$$A = (Y_{ij})_{m \times n} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为原始数据; $\min(x_{ij})$ 和 $\max(x_{ij})$ 分别为评价指标最小、最大值, 即指标的上限和下限, 置信区间范围外为 0 或 1; Y_{ij}^+ 和 Y_{ij}^- 为正和负向标准化值; A 为标准化决策矩阵; m 、 n 为矩阵横纵坐标最大值。

利用熵值法计算出各指标的信息熵 E_i 及权重 W_i , 结合标准化的决策矩阵 A 得到加权规范化评价矩阵 V , 其公式为:

$$p_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (4)$$

$$E_i = \frac{-1}{\ln n} \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (5)$$

$$w_i = \frac{1 - E_i}{m - \sum_{i=1}^m E_i} \quad (6)$$

$$V = A \times w_i = (v_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

式中: p_{ij} 为归一化处理后的值; E_i 为各指标信息熵; w_i 为各指标权重; v_{ij} 为标准化加权后的值; V 为加权规范化评价矩阵。

2.3 空间自相关

空间自相关分析可用于探究地理数据的空间依赖性和集聚模式^[25]。本研究使用莫兰指数 (Moran's I) 反映北京山区森林生态系统健康的总体集聚趋势。值域为 $-1 \sim 1$, >0 时存在空间正相关, <0 时存在空间负相关, $=0$ 时不存在空间自相关, 绝对值越高, 空间

自相关性越强。局部莫兰指数(Local Moran's I)反映一个空间属性值与其相邻空间属性值之间的空间相关性,包括高-高(HH)、低-低(LL)、高-低(HL)和低-高(LH)4种类型。

2.4 聚类分析

采用K-means聚类方法,基于生态系统环境、植被、压力、功能和健康状况,分析生态系统健康的区域差异。该方法包括的步骤为:1)将所有样本划分为 k 个初始聚类;2)计算每个聚类的平均值,以此为重心;3)计算每个样本到各聚类重心的欧氏距离后,将其分配到距离最近的聚类;4)重复该步骤,直至所有样本无法继续计算为止。

2.5 地理探测器

本研究使用SONG等^[26]改进的参数最优地理探测器,解决离散化处理存在明显的人为主观作用及离散效果不佳等问题。首先利用Arcgis 10.6创建渔网工具创建250 km×250 km渔网点,剔除空值后,共生成164 772个采样点,将各因子数据输入,初设5种离散化方法(等间距、自然间断、分位数、几何间隔、标准差),4~7类间断数量,依据Q值最大准则选出

最优的离散化方法和间断数量再进行因子探测与交互探测,可使探测结果更为可靠。

3 结果与分析

3.1 北京山区森林生态系统健康空间格局分析

3.1.1 北京山区森林生态系统健康评价体系构建
森林的地理环境是其保持健康的基础,植被结构反映森林长期维持健康的内在要求,地理环境直接影响植被结构,进而影响植被功能。同时,生态压力破坏植被结构,降低生态服务功能,加剧森林退化。因此,评价森林健康需要综合考虑地理环境、植被结构、生态压力和服务功能的作用反馈机制。将地理环境、植被结构、生态压力和植被功能4个准则层因子作为一阶因子,建立森林生态系统健康评价体系(图2)。在此基础上,结合研究区的自然条件、林分特征和社会经济条件,将土壤厚度、坡度、坡向、海拔、乔木盖度、叶面积指数(LAI)、净初级生产力(NPP)、归一化植被指数(NDVI)、干燥指数(AI)、标准化降水蒸散指数(SPEI)、人口密度、国民生产总值(GDP)、水源涵养、水土保持、生物多样性和空气净化等16个指标因子作为指标层,构建北京山区森林生态系统健康评价指标体系。

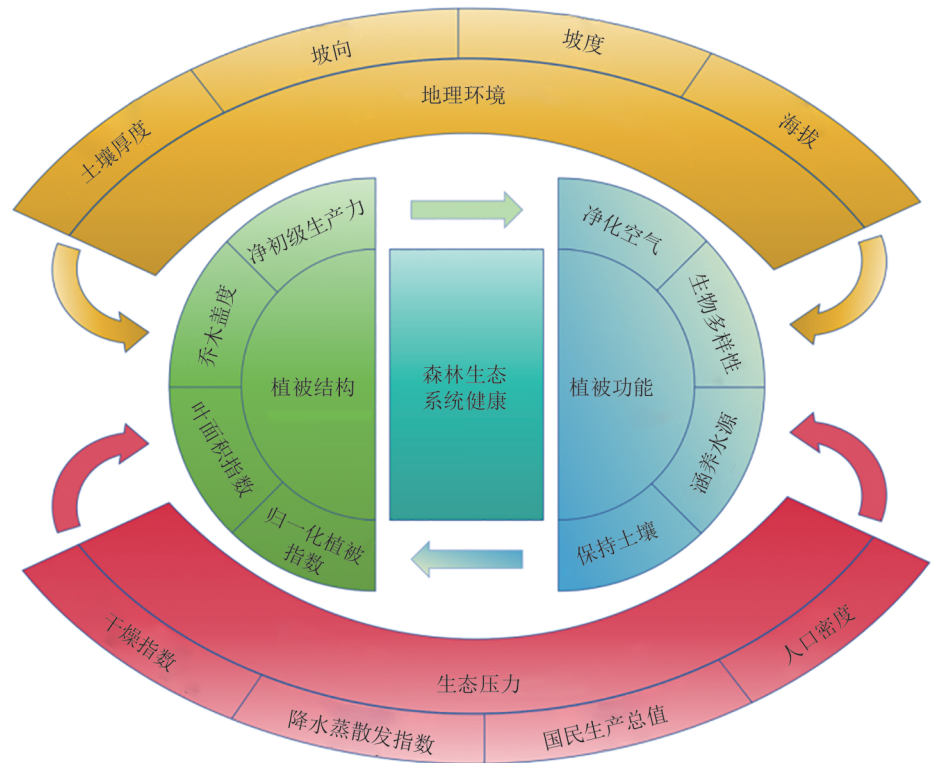


图2 森林生态系统健康准则层因子作用机制

Fig. 2 Mechanism of criterion-level factors in forest ecosystem health

采用熵权法计算得到各评价指标的权重,具体阈值范围及权重见表1。从结果来看,指标权重在准则层之间与同一准则层内部均存在差异。从维度间比较来看,植被功能指标的平均权重相对其他因子

较高,表明森林生态系统健康更好地体现在生态服务功能上,生态压力因子对森林生态系统健康的权重最小。从维度内部比较来看,地理环境因子中各项指标权重大致相当,植被功能因子中权重最高的

指标是叶面积指数,植被功能因子中土壤保持指标所占权重最高,生态压力因子中 AI 和 SPEI 指标所占权重较高,人口密度与 GDP 这类社会经济因素所占比重相对较小。可见,提高森林生态系统健康,应合理开发森林生态资源,优化森林资源保护和管理模式,提升森林生态服务功能。

表 1 北京山区森林生态系统健康评价指标体系

Table 1 Forest ecosystem health assessment indicator system for mountainous areas of Beijing					
目标层	准则层	指标层	值域	权重	权重
森林生态系统 健康评价指标体系	地理环境	土壤厚度/cm	60~140	0.07	0.27
		坡度/(°)	0~20	0.06	
		坡向	1~9	0.07	
		海拔/m	24~1500	0.07	
	植被结构	乔木盖度/%	0~100	0.06	0.25
		净初级生产力/(g·m ⁻² ·a ⁻¹)	200~500	0.03	
		归一化植被指数	0.6~0.9	0.05	
		叶面积指数	1.6~7.0	0.11	
	生态压力	人口密度/(人·km ⁻²)	0~120	0.03	0.16
		干燥指数	1.9~2.7	0.05	
		生产总值/元	25~3 000	0.03	
		降水蒸散指数	-0.1~0.4	0.05	
	植被功能	水源涵养/mm	0~30	0.08	0.32
		土壤保持/(t·hm ⁻²)	0~200	0.15	
		生物多样性	0~1.5	0.05	
		净化大气/(μg·m ⁻³)	77~120	0.04	

3.1.2 北京山区森林生态系统健康空间格局分布
研究时段内北京山区森林生态系统健康以中等与较好为主,占总面积的 70% 以上。植被结构因子分值 2005—2020 年整体呈增加的趋势,特别是 2015—2020 年,变化较为明显。植被功能因子与植被结构因子之间存在相似的时空分布格局。2005—2020 年分值逐渐增加,植被覆盖率高的地区分值较高,而建设用地、耕地聚集区分值较低,但植被功能因子空间分布更为细碎,与地形坡度的差异有很大关系。生态压力因子空间分布变化显著,2005 年压力较小的地区主要在北部(怀柔、延庆东部、密云北部),2010 则转至西部山区(延庆西部、昌平以及门头沟地区),2020 年压力较小的范围扩大,包括延庆、怀柔、密云、门头沟大部分地区。在时间变化方面,2005—2020 年,研究区的生态压力因子分值整体出现波动趋势。

由图 3 可知,森林生态系统健康水平由南向北方向上升。高水平(健康状况较好和健康状况优)主要分布在怀柔、密云、延庆东部。低水平(差和较差)地区主要分布在延庆西部、房山东部、门头沟中北部。从时间变化的角度来看(图 4),2005—2020 年 4 期北京山区森林生态系统差等、较差、中等健康面积分别下降 100%、69%、45%,较好和优等健康面积分别上升 19%、446%。与 2005—2010 年和 2010—2015 年相比,2015—

2020 年生态系统健康变化更显著,优等健康地区占比从 2.43% 升至 18.65%。

3.2 北京山区森林生态系统健康变化率及空间相关关系研究

3.2.1 北京山区森林生态系统健康变化率分析
从时间变化的角度来看(图 4),与 2005—2010 年和 2010—2015 年相比,2015—2020 年生态系统健康变化更显著。从空间变化的角度来看,2005—2010 年,北京西部山区(延庆西部、门头沟西部、房山西部)森林生态系统健康分值增加 1% 以上,另一部分地区(延庆东部、门头沟东部、房山东部、怀柔、密云在内的浅山区)健康分值降低,2010—2015 年呈相反的空间变化趋势,浅山区健康分值上升,而西部山区健康分值下降。而 2015—2020 年,研究区 64% 的区域健康分值增加了 5% 以上,只有 16% 的地区出现了变化率降低 1% 以上的情况。

3.2.2 北京山区森林生态系统健康空间相关关系研究
2005—2020 年,北京山区森林生态系统 Moran's I 指数值分别为 0.45、0.48、0.48 和 0.54,在 1% 水平上显著。结果表明,生态系统健康指数在北京山区森林生态系统具有显著的正空间自相关关系。生态系统健康指数相似的地区具有显著的空间集聚效应,集聚程度在 2005—2020 年呈先降后升的趋势。

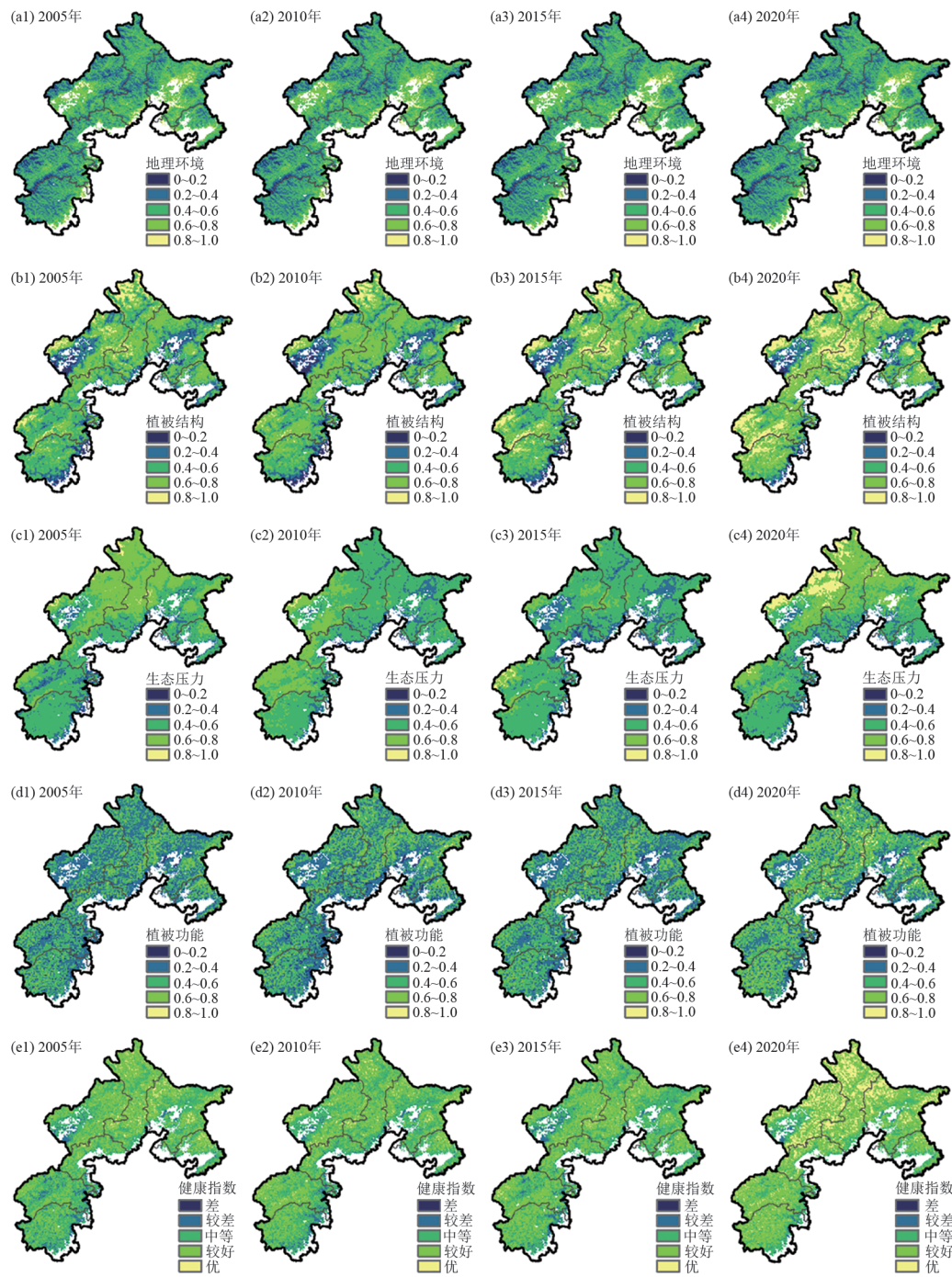


图 3 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of forest ecosystem health in mountainous areas of Beijing from 2005 to 2020

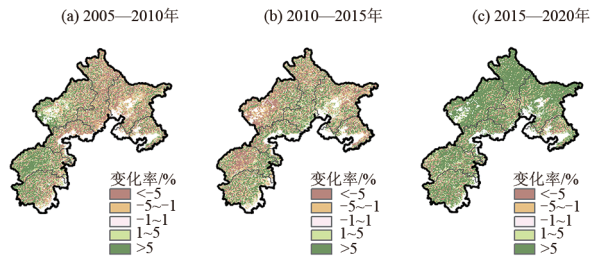


图 4 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康变化率

Fig. 4 Change rate of forest ecosystem health in mountainous areas of Beijing from 2005 to 2020

通过局部空间自相关分析得到 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康集聚类型, 结果表明, 北京山区森林生态系统健康的显著性空间类型以正相关为主。由图 5 可知, 各集聚类型占比在时间尺度变化不大, 2020 年共有 91.3% 的区域呈现显著性集聚, 其中 HH 型和 LL 型分别为 41.8% 和 30.8%, 占显著性类型总数的 79.6%, HL 型和 LH 型占比较少。但各集聚类型在空间分布上展现出动态的转移, 高-高型主要分布在北京北部山区, 门头沟西部与房山区西

部在 2005 年之后出现低-低聚集向高-高聚集型转化的现象。低-低型主要集中在延庆西部、顺义、密云中部、门头沟东部与房山东部。低-高集聚区与高-低集聚区在研究区内呈零星分布。

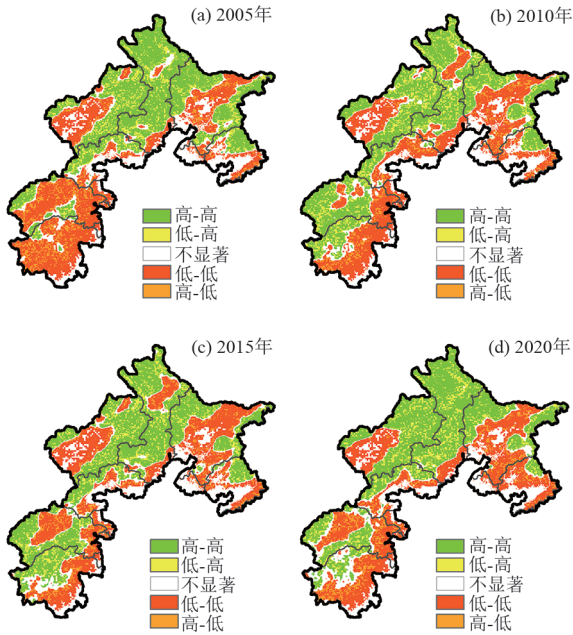


图 5 2005—2020 年北京山区森林生态系统健康空间聚集情况
Fig. 5 Spatial aggregation of forest ecosystem health in mountainous areas of Beijing from 2005 to 2020

3.3 北京山区森林生态系统健康等级

根据 K-means 聚类分析结果,本研究将研究区各镇森林生态系统健康分为由优到差共 5 个等级。结合图 6 和表 2 可以看出,健康状况为差的镇分布在延庆、房山、门头沟、怀柔、丰台的人口聚集区,所占面积积极小,这些地区拥有较好的地理环境因子,但由于植被覆盖度低,植被结构因子、植被功能因子分值都较低,除了房山和门头沟的压力为中等,其他区域压力均较高。健康状况为优的镇主要分布在怀柔、延庆、密云和昌平也有少量分布,除延庆香营乡植被结构因子为中等,其他区域均有较良好的植被、生态服务功能和较低的生态压力。

3.4 北京山区森林生态系统健康动态驱动力分析

3.4.1 生态系统健康单因素驱动分析 使用因子探测器对 16 个指标因子进行解释力探测,得到 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年各因子对森林生态系统健康的解释力动态变化。各指标因子 $p<0.01$,对北京山区森林生态系统健康的解释力均为显著,在 4 期时间内呈现出不同的变化趋势。

从图 7 可以看出,植被功能因子中的保持土壤对北京山区的森林健康具有最强的解释力,常年高于其他因子,占生态系统健康差异的 24.5%。LAI、

NDVI、乔木盖度等植被结构因子同样起关键作用。解释力前 4 的因子在 2005—2020 年的位次基本没有发生改变。而 2010 年 SPEI 因子的解释力位次由正 7 位降至倒数第 2 位,而后升至 11 位,交替变化最为明显,干燥指数也有先降后升的变化趋势。GDP、海拔变化也较为明显,GDP 大致呈下降趋势,海拔呈上升趋势,Q 值由 0.17 升高至 0.24。其中,坡向和景观多样性解释力最弱。

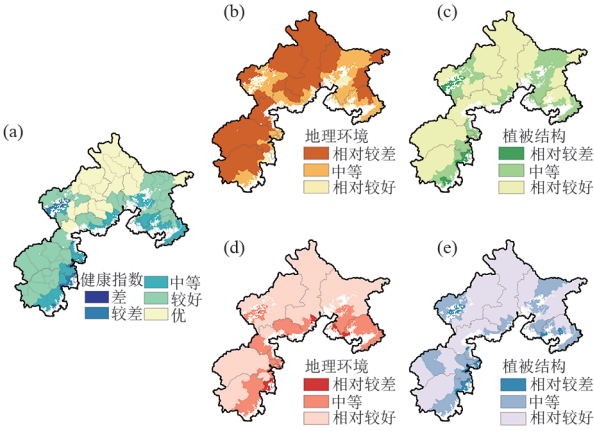
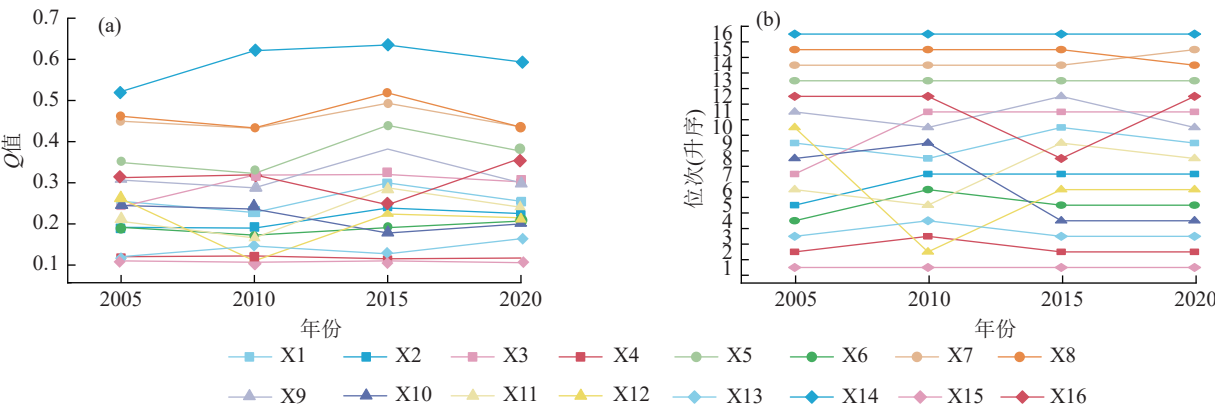


图 6 北京山区森林生态系统健康等级
Fig. 6 Grade of forest ecosystem health in mountainous areas of Beijing

表 2 北京山区各区森林生态系统健康等级乡镇数量分布
Table 2 Distribution of forest ecosystem health grades by township across districts in mountainous areas of Beijing

区县名称	差	较差	中等	较好	优	总计/个
昌平区	0	1	4	3	1	9
房山区	2	4	5	7	0	18
丰台区	2	1	0	0	0	3
海淀区	0	4	3	0	0	7
怀柔区	1	1	2	2	7	13
门头沟区	1	3	3	6	0	13
密云区	0	2	3	9	3	17
平谷区	0	0	8	3	0	11
石景山区	0	1	1	0	0	2
顺义区	0	1	3	0	0	4
延庆区	3	3	1	4	7	18
总计	9	21	33	34	18	115

3.4.2 生态系统健康驱动因子交互作用分析 使用地理探测器中的交互探测模块得到 2005 年、2010 年、2015 年、2020 年双因子交互作用对北京山区森林生态系统健康的解释力。结果表明,双因子交互作用对生态系统健康具有双增强或非线性增强效应,表明北京山区森林生态系统健康是多因素共同作用的结果,两因子交互作用的影响均大于单因子的影响(图 8)。



注: X1为土壤厚度; X2为坡度; X3为海拔; X4为坡向; X5为乔木盖度; X6为NPP; X7为NDVI; X8为LAI; X9为人口密度; X10为GDP; X11为干燥指数; X12为SPEI; X13为水源涵养; X14为保持土壤; X15为景观多样性; X16为空气净化。下同。

图 7 各因子对森林生态系统健康的解释力 Q 值及位次变化

Fig. 7 Changes in Q values and ranks of explanatory power of each factor on forest ecosystem health

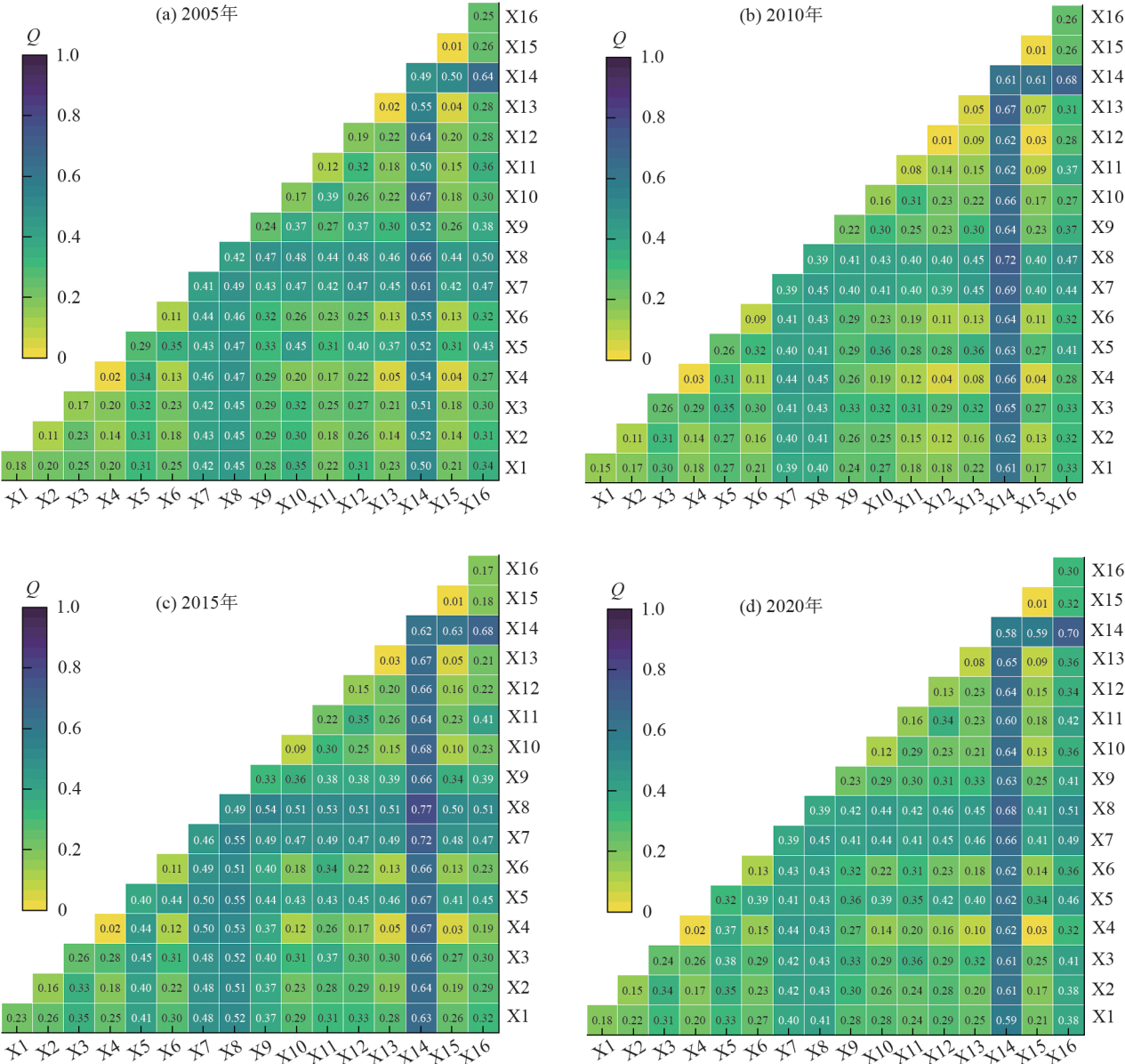


图 8 驱动因子交互作用动态解释

Fig. 8 Dynamic explanatory of driving factor interactions

同时交互探测结果表明,2005—2020年保持土壤 $\cap$ LAI(70.5%)、保持土壤 $\cap$ 空气净化(67.85%)、保持土壤 $\cap$ NDVI(67.18%)的解释力位于前3位。其中,2005由GDP和保持土壤主导,2010—2015年由LAI和保持土壤主导,2020年由空气净化与保持土壤主导。土壤保持量是影响森林健康空间分布的主导交互因子。从时间尺度来看,大多数双因子交互作用解释力都是波动变化的,坡向 $\cap$ 生物多样性、GDP $\cap$ 海拔、GDP $\cap$ 干燥指数在2015—2020年每一阶段的解释力都出现轻微下降。而坡度 $\cap$ 水源涵养、坡度 $\cap$ 海拔、干燥指数 $\cap$ 空气净化交互作用解释力呈持续增加趋势,在2020年出现最大值,说明这些因子的交互作用正在增加。一些单因子解释力较小的因子(如水源涵养、NPP、SPEI等),与土壤保持量、坡度等单因子解释力较高的因子交互作用表现出显著交互效应。

4 讨论

研究通过熵权-TOPSIS法对北京山区森林生态系统的健康进行评价。结果显示,中等和较好的森林状态较为普遍,而优质和差状态的森林相对较少,且各健康等级的占比及其空间分布模式与先前的研究结果吻合^[27]。从空间维度来看,临近城镇的区域生态健康程度较低,与宁立新等^[28]在京津冀地区的研究结果相符,表明北京南部和城市区域生境质量和生态服务功能呈现较差的状态。尽管代表城镇化的人口压力指标所占权重较小,但人口密度的提升可能引发资源开发、生境破坏等活动,城镇化进程不仅通过生态压力因子直接影响森林生态系统,也通过破坏地理环境和植被结构,进而降低生态系统的整体功能和健康状况。

从时间维度来看,北京山区的森林生态系统健康状况呈现持续改善的趋势,尤其在2015—2020年,健康状况的变化率显著增大。此变化可能与近年来北京生态恢复政策的实施和环境治理措施的加强密切相关,也与植被恢复的滞后效应有关。20世纪以来,北京山区大规模的植树造林工程,虽然多在2000年以后启动,但树木生长需要时间,新种植的森林在2015—2020年进入成熟阶段,生态功能也开始显著增强。

本研究中,利用地理探测器探测各因子对森林生态系统健康的单因子及双因子交互解释力。结果显示,土壤保持因子在指标层中具有显著影响。石建华等^[29]在陕北地区对退耕还林生态系统健康进行评价时发现,保育土壤因子具有最重要的影响;朱柱^[30]在研究青海黄土高寒区的森林健康评价体系时将生态系统服务功能纳入指标体系,也得出水土保持功能在其中占据重要地位的结论。由此可见,土

壤保持功能在森林生态系统健康评价中具有重要作用。此结论不仅与本研究的结论相吻合,也与前人对不同地区生态系统健康的研究结果相一致。在双因子交互效应中,土壤保持因子与其他因子的交互效应显著,每项组合的交互效益均较高,表现出明显的协同作用。类似的结论在赖承义等^[31]的研究中亦有所体现。其针对福建地区针叶纯林坡面水土保持功能的研究表明,植被结构因子与水土保持相关因子之间存在显著的非线性增强效应。该结果可能与北京山区大部分林地水土保持林的特征有关,这一类型的林地在功能上强调土壤保持能力,能够更好地发挥生态效益,从而在生态系统功能评估中表现出更高的重要性,进一步强化植被功能与结构交互作用对生态系统健康的影响。

本研究发现,NDVI与坡度的交互效应大于其各自的单因子影响力。表明植被结构因子对生态系统健康的作用是多层次和动态的,尤其是在与坡度等环境因子相互作用时,其效果更加显著。当坡度较大时,植被的生长受限,但通过增加植被覆盖率,可以有效减缓水土流失,增强土壤保持功能。因此,评估生态系统健康时,必须综合考虑各因子之间的交互作用,才能更全面、准确地揭示生态系统的健康状况和功能变化。

总体来看,遥感技术的进步显著提升森林健康评价的精度和效率,尤其是在应对大尺度和复杂生态系统的评估时,其优势尤为突出。随着遥感技术及其数据处理能力的进一步提升,更多精细化的生态指标将得到开发与应用,为森林健康的动态评估提供更为全面和精确的支持,并为全球森林资源的可持续管理与保护提供更科学的依据。本研究为北京山区森林生态系统健康评价提供科学量化方法,不仅丰富森林生态系统健康评估的理论体系,也为区域生态保护和可持续管理提供决策支持。未来研究中,若能进一步引入如林下盖度、病虫害等生态指标,将进一步丰富评估体系,对提升森林健康评价的准确性和促进生态系统管理具有重要意义。

生态系统对人类社会支撑作用的重要性在过去的研究中往往被忽视。近年来,随着人类对生态系统依赖关系的深入认识,越来越多的学者开始重视生态系统服务功能对人类福祉的贡献,并将其纳入生态系统健康评价体系。这种转变反映从传统的单一生态评估向综合性、多维度评估的过渡,更加凸显生态系统服务在促进社会可持续发展中的关键作用。本研究中纳入4种生态服务功能进行评估,但生态系统服务功能具有多样性和复杂性。未来的研

究可以进一步扩展评估范围,加入其他关键的生态服务功能指标,如林产品和旅游休憩等,将有助于更全面地理解生态系统的服务价值,为生态系统管理和保护提供更完善的科学依据。

5 结论

1)北京山区森林健康评价体系准则层中植被功能因子权重较高,占32.2%,指标层中土壤保持因子最高,占14.6%。2005—2020年,北京山区森林生态系统的健康水平逐步提升,中等与较好的地区占总面积的70%以上,且在15~20 a内出现明显的增长倾向,许多地区的生态健康状况提升至优等水平。

2)2005—2010年和2010—2015年健康变化率较低,且在空间上的分布相反,2015—2020年,研究区健康变化实现全区域的提升。生态系统健康相似的地区具有显著的空间集聚效应,2005—2020年,空间集聚程度呈先降后升趋势。

3)靠近城市或居民区的浅山区生态健康水平相对较低,而远离城市的区域则表现出较高的健康水平。以乡镇为单元显示北京山区森林生态系统健康的区域差异,怀柔、密云和延庆地区健康程度较高,丰台、海淀以及石景山森林健康程度较差。

4)土壤保持、LAI、NDVI、乔木盖度、人口密度为北京山区森林生态系统健康的主导因子,除人口密度外均与其呈正相关驱动特征,不同因子之间的叠加效应增强对森林特性的解释能力,特别是在考虑到土壤保持和LAI时。另外,2个因子单独的解释力较为有限,也可能出现双因子的交互作用解释能力显著增强,表现为超过任一单因子的效果,如坡向和NDVI。

参考文献:

- [1] 马泽钰,李鹏,肖列,等.青海省生态修复关键区识别及修复分区划分[J].水土保持学报,2024,38(3):252-265.
MA Y Z, LI P, XIAO L, et al. Identification of key areas for ecological restoration and division of restoration zones in Qinghai Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 252-265.
- [2] WU J S, CHENG D J, XU Y Y, et al. Spatial-temporal change of ecosystem health across China: Urbanization impact perspective [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 326: e129393.
- [3] 郑学良,陈丽华,李洪洋,等.基于水源涵养功能的辽东防护林体系健康评价[J].中国水土保持科学,2020,18(2):102-110.
ZHENG X L, CHEN L H, LI H Y, et al. Health assessment of Liaodong shelterbelt system based on water conservation [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(2): 102-110.
- [4] RI A N, AN H J. Health assessment of natural larch forest in Arxan guided by forestry remote sensing integrated with canopy feature analysis [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 11: e1171660.
- [5] ZHAO J, LI J, LIU Q H, et al. Assessment of forest ecosystem variations in the Lancang-Mekong Region by remote sensing from 2010 to 2020 [J]. Sensors, 2023, 23(22): e9038.
- [6] ILLARIONOVA S, TREGUBOVA P, SHUKHRA-TOV I, et al. Remote sensing data fusion approach for estimating forest degradation: A case study of boreal forests damaged by *Polygraphus proximus* [J]. Frontiers in Environmental Science, 2024, 12: e1412870.
- [7] 霍子文,王佳.基于PSR模型的北京市西北生态涵养区生态健康评价研究[J].中国土地科学,2020,34(9):105-112.
HUO Z W, WANG J. Assessment on ecological health in northwest conservation area of Beijing City based on PSR model [J]. China Land Science, 2020, 34(9): 105-112.
- [8] LIN H R, LIU X Y, HAN Z M, et al. Identification of tree species in forest communities at different altitudes based on multi-source aerial remote sensing data [J]. Applied Sciences, 2023, 13(8): e4911.
- [9] MANSOURI J, JAFARI M, TAHERI D A. Continuous mapping of forest canopy height using ICESat-2 data and a weighted kernel integration of multi-temporal multi-source remote sensing data aided by Google Earth Engine [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(37): 49757-49779.
- [10] SA R L, FAN W Y. Forest structure mapping of boreal coniferous forests using multi-source remote sensing data [J]. Remote Sensing, 2024, 16(11): e1844.
- [11] WIN K, SATO T, TSUYUKI S. Application of multi-source remote sensing data and machine learning for surface soil moisture mapping in temperate forests of central Japan [J]. Information, 2024, 15(8): e485.
- [12] BILGEHAN M H. Investigation of burned areas with multiplatform remote sensing data on the Rhodes 2023 forest fires [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2024, 15(10): e102949.
- [13] 王秋燕,陈鹏飞,李学东,等.森林健康评价方法综述[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(2):177-183.
WANG Q Y, CHEN P F, LI X D, et al. Review of forest health assessment methods [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(2): 177-183.
- [14] 郭书娟,许亚东,黄进勇.基于熵权TOPSIS模型的农业绿色发展水平评价:以河南省为例[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2024,50(2):221-230.
GUO S J, XU Y D, HUANG J Y. Evaluation of agricultural green development level based on entropyweighted TOPSIS model: A case study of Henan Province [J].

- Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2024, 50(2): 221-230.
- [15] 鲁言波, 陈湛峰, 李彤. 基于改进 TOPSIS 模型的广东省主要湖库水质特征分析[J]. 生态环境学报, 2023, 32(12): 2194-2206.
- LU Y B, CHEN Z F, LI T. An analysis of water quality characteristics of major lakes and reservoirs in Guangdong Province based on improved TOPSIS model[J]. Ecology and Environment Sciences, 2023, 32(12): 2194-2206.
- [16] 杨兆青, 陆兆华, 刘丹, 等. 煤炭资源型城市生态安全评价: 以锡林浩特市为例[J]. 生态学报, 2021, 41(1): 280-289.
- YANG Z Q, LU Z H, LIU D, et al. Ecological security evaluation on the coal resource-based city: A case of Xilinhot City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 280-289.
- [17] 曹美芹, 陈芸芝, 汪小钦, 等. 荒漠森林生态系统健康评价与分析: 以塔里木河下游为例[J]. 遥感信息, 2021, 36(2): 72-80.
- CAO M Q, CHEN Y Z, WANG X Q, et al. Evaluation and analysis of desert forest ecosystem health: Taking lower reaches of Tarim River for an example[J]. Remote Sensing Information, 2021, 36(2): 72-80.
- [18] 赵猛, 姚吉利, 王建, 等. 北京市山区小流域治理前后土壤侵蚀强度及空间格局分析[J]. 生态科学, 2020, 39(5): 115-123.
- ZHAO M, YAO J L, WANG J, et al. Analysis of soil erosion intensity and spatial patterns before and after small watershed management in mountainous areas of Beijing[J]. Ecological Science, 2020, 39(5): 115-123.
- [19] 曹春香, 陈伟, 黄晓勇, 等. 环境健康遥感诊断指标体系[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- CAO C X, CHEN W, TIAN R, et al. Index system for diagnosis of environmental health by remote sensing[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [20] 王文静, 逯非, 欧阳志云. 国土空间生态修复与保护空间识别: 以北京市为例[J]. 生态学报, 2022, 42(6): 2074-2085.
- WANG W J, LU F, OUYANG Z Y. Spatial identification of territory space ecological conservation and restoration: A case study of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2074-2085.
- [21] 刘海轩, 李锋, 马远, 等. 基于景观多样性的北京市域森林质量综合评价[J]. 中国园林, 2022, 38(10): 14-19.
- LIU H X, LI F, MA Y, et al. Comprehensive evaluation of forest quality in Beijing based on landscape diversity[J]. Chinese Landscape Architecture, 2022, 38(10): 14-19.
- [22] 王瀚淦, 余新晓, 贾国栋, 等. 北京大都市生态林业发展评述[J]. 世界林业研究, 2021, 34(6): 6-13.
- WANG Y S, YU X X, JIA G D, et al. Review on ecological forestry development in Beijing metropolis[J]. World Forestry Research, 2021, 34(6): 6-13.
- [23] YAN F P, SHANGGUAN W, ZHANG J, et al. Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): e2.
- [24] 张徐, 李云霞, 吕春娟, 等. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能应用研究进展[J]. 生态科学, 2022, 41(1): 237-242.
- ZHANG X, LI Y X, LV C J, et al. Research progress on application of ecosystem service functions based on InVEST model[J]. Ecological Science, 2022, 41(1): 237-242.
- [25] 赵晓燕, 谈树成, 张素, 等. 基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 151-163.
- ZHAO X Y, TAN S C, ZHANG S, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of ecological environment quality in Tuojiang River basin based on RSEI improved modeling[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 151-163.
- [26] SONG Y, WANG J, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience and Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [27] 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.
- [28] 宁立新, 梁晓瑶, 程昌秀. 京津冀地区生态系统健康评估及时空变化[J]. 生态科学, 2021, 40(6): 1-12.
- NING L X, LIANG X Y, CHENG C X. Spatiotemporal variations of ecosystem health of Jing-Jin-Ji region based on the PSR model[J]. Ecological Science, 2021, 40(6): 1-12.
- [29] 石建华, 喻理飞, 孙保平. 陕北地区退耕还林生态健康评价分析研究: 以吴起县为例[J]. 水土保持学报, 2015, 29(6): 332-336.
- SHI J H, YU L F, SUN B P. Research on ecological health assessment system of grain-for-green project in the northern Shaanxi: A case study of Wuqi County[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(6): 332-336.
- [30] 朱柱. 青海黄土高寒区生态公益林健康评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- ZHU Z. Study on health evaluation of ecological public welfare forest on Loess Plateaus of Qinghai[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [31] 赖承义, 左舒翟, 任引. 不同生态修复措施和环境因素对亚热带红壤区针叶纯林坡面水土保持功能的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4913-4922.
- LAI C Y, ZUO S Z, REN Y. Impacts of different ecological restoration measures and environmental factors on water and soil conservation of the slope in the pure coniferous forest of the subtropical red soil area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4913-4922.