

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.021.

赵俊远, 高翔, 梁静波. 基于土地覆被变化的北京市生态环境质量时空分异特征及影响因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 350-362, 372.

Zhao Junyuan, Gao Xiang, Liang Jingbo. Spatiotemporal Change and Driving Factors of the Eco-Environment Quality in Beijing Based on RSEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 350-362, 372.

基于土地覆被变化的北京市生态环境质量 时空分异特征及影响因素

赵俊远^{1,2}, 高翔³, 梁静波⁴

(1.信阳学院 商学院, 河南 信阳 464000; 2.中国矿业大学 公共管理学院, 江苏 徐州 221116;

3.云南大学 民族学与社会学学院, 昆明 650091; 4.信阳师范大学 商学院, 河南 信阳 464000)

摘要: [目的]评价北京市生态环境状况对推进城市建设和经济发展,为实现生态环境保护和经济社会可持续发展具有重要的现实意义。[方法]耦合区域绿度、湿度、干度和热度特征的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),探究了 1990—2020 年北京市生态环境质量时空动态,并辅以 Sen 趋势分析、Manna-Kendall 突变点检验法和多元回归和结构方程模型,分析了不同环境因子对北京市生态环境质量的影响情况。[结果]1991—2020 年北京市生态环境质量总体以减小趋势为主。其中,林地区域生态环境质量表现为“先增加—减小—增加”趋势,灌木区域生态环境质量呈“增加—减小—增加—减小”趋势,草地、耕地、湿地和不透水面区域生态环境质量呈“减小—增加—减小”趋势,荒地区域生态环境质量一直呈“减小”趋势。不透水面区域生态环境质量主要受到干度的负影响和湿度的正影响较大,绿度和热度主要通过影响湿度和干度对其产生影响;草地、荒地和灌木区域生态环境质量主要受到热度负影响和绿度、湿度和干度正影响;耕地区域生态环境质量主要受到干度和热度的负影响;林地区域生态环境质量受到湿度、干度、热度和绿度的影响均较大;湿地区域生态环境质量受到热度、绿度和湿度的正影响大于干度的负影响。[结论]北京市在生态环境维持与治理方面政策的大方向是有效的,绝大部分区域生态环境质量都在提升,少部分地区略有降低,应有针对性地进行政策调整,改善生态环境质量,但后期仍需要进一步规范化北京市土地覆盖并进一步加强自然灾害的防护策略。

关键词: 北京市; 生态环境质量; 遥感生态指数; 土地利用

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0350-13

Spatiotemporal Change and Driving Factors of the Eco-Environment Quality in Beijing Based on RSEI

Zhao Junyuan^{1,2}, Gao Xiang³, Liang Jingbo⁴

(1.School of Business, Xinyang University, Xinyang, Henan 464000, China; 2.School of Public Management, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 3.School of Ethnology and Sociology, Yunnan University, Kunming 650091, China; 4.School of Business, Xinyang Normal University, Xinyang, Henan 464000, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to evaluate the ecological environment status of a region, which is of great practical significance for promoting urban construction and economic development, achieving ecological environment protection and sustainable economic and social development in Beijing. [Methods] The remote sensing ecological index (RSEI) coupled with the characteristics of regional greenness, humidity, dryness, and heat was used to explore the temporal and spatial dynamics of eco-environmental quality in Beijing from 1990 to 2020. Sen trend analysis, Manna-Kendall mutation point test,

收稿日期: 2023-06-07

修回日期: 2023-07-01

资助项目: 河南省哲学社会科学规划一般项目(2022BJJ092); 河南省高等学校重点科研项目(23A630030); 信阳学院校级重点科研项目(2023-XJWZD-001)

第一作者: 赵俊远(1979—), 男, 河南禹州人, 副教授, 在读博士生, 主要从事区域旅游规划与土地资源管理研究。E-mail: ZHAOJY2021520@163.com

通信作者: 梁静波(1973—), 男, 河南信阳人, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事区域经济与绿色发展研究。E-mail: ljingbo2023@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

Hurst method, multiple regression, and structural equation model were employed to explore the impact of different environmental factors on the ecological environment quality of Beijing. [Results] (1) From 1991 to 2020, the overall ecological environment quality in Beijing showed a decreasing trend. Among them, the ecological environment quality of forest areas showed a trend of ‘increasing decreasing increasing’, while the ecological environment quality of shrub areas showed a trend of ‘increasing decreasing increasing decreasing’. The ecological environment quality of grasslands, farmland, wetlands, and impermeable areas showed a trend of ‘decreasing increasing decreasing’, while the ecological environment quality of wasteland areas had always shown a trend of ‘decreasing’. (2) The ecological environment quality of impermeable areas was mainly affected by the negative impact of dryness and the positive impact of humidity. Greenness and heat mainly affected them by affecting humidity and dryness. The ecological environment quality of grassland, wasteland, and shrub areas was mainly negatively affected by heat and positively affected by greenness, humidity, and dryness. The ecological environment quality of cultivated land areas was mainly negatively affected by dryness and heat. The ecological environment quality of forest areas was greatly affected by humidity, dryness, heat, and greenness. The ecological environment quality of wetland areas was positively affected by heat, greenness, and humidity, rather than negatively affected by dryness. [Conclusion] The overall direction of policies in maintaining and managing the ecological environment in Beijing is effective. The ecological environment quality in the vast majority of regions is improving, while the ecological environment quality of a few areas has slightly decreased. The targeted policy adjustments should be made to improve the ecological environment quality. However, further standardization of land cover in Beijing and strengthening of natural disaster prevention strategies are still needed in the later stage.

Keywords: Beijing; eco-environment quality; remote sensing ecological index; land use

生态环境质量是人类活动与自然环境共同作用的结果,与人类生存和社会经济发展密切相关^[1-2]。自改革开放以来,我国通过扩大建成区和城市边界来促进工业化和城市化发展,这虽然促进了我国经济发展,但也出现了各种各样的生态环境问题(如土地盐碱化、热岛效应、积水、道路交通和空气污染等)^[3-6]。其次,据政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告显示世界将在21世纪继续变暖且到2100估计将至少增高4℃,热浪、干旱等极端天气气候的发生和频率将迅速增加,这一趋势势必会对我国生态环境脆弱的区域的自然和社会生态系统的可持续发展和稳定性产生重要影响(如土地退化等)^[7-9]。近年来随着生态文明建设的不断深入和强化,生态文明建设及提升生态环境质量已经成为我国工作重点^[4]。因此,定量描述和评价城市生态环境的时空动态及其变化的主要驱动因子对指导当前生态文明建设具有重要作用。北京市是我国的政治文化中心和国际化大都市,环境质量的好坏直接关系到这个城市的国际形象与居民生活^[10]。改革开放以来北京市经历了快速城市化进程,2010年年底全市城镇常住人口已经达到了2200万,城市建成区面积由解放初的109 km²增加到了2010年的1350 km²^[11-12]。不断增加的城市用地对各类生态用地带来了巨大的压力,从而使其生态环境质量发生了

显著变化。因此,理清北京市生态环境质量时空动态及其变化的驱动因素已成为评估该地区经济—生态协调发展的一个紧迫科学问题。

目前国内外关于生态环境质量监测的模型多为单一生态因子(如使用归一化植被指数(NDVI)或叶面积指数用于监测环境变化^[13-14];采用地表温度(LST)评估城市热岛效应^[9];应用归一化差异累积指数(NDBI)^[5]、基于指数的累积指数(IBI)和归一化差异不透水表面指数(NDISI)来描绘累积和不透水表面面积^[15-16];使用归一化差异水指数(NDWI)和修正的NDWI(MNDWI)提取水体^[17];NDVI和LST用于监测干旱或土壤湿度^[16];裸土指数(BI)和干裸土指数用于绘制裸土区域等^[17-18]),单一因子虽然可以在一定程度上反映生态环境质量情况,但由于生态系统的复杂性和多样性,仅采用一个或两个生态指标来评估生态系统的状况是不够的。因此,鉴于生态系统的复杂性,综合指标因能更全面地反映了该地区的生态状况而被提出^[6,19-25]。经济合作与发展组织(OECD)最初为环境决策提出的压力状态响应(PSR)可以通过加权方法将一组遥感和统计数据集成到一个指标中标被广泛应用于评估生态环境的健康,如森林生态系统、土壤生态系统、湿地生态系统、农业生态系统、水生态系统和城市生态系统等,但指标权重的获取可能会受到

实践中主观经验的影响^[19-20]。因此,徐涵秋^[21]通过主成分分析(PCA)方法通过整合绿度、湿度、干度和热度生成了一个完全基于遥感的生态指数(RSEI),该综合指数已经被很多研究证明可以有效地反映区域生态环境质量、分布格局和变化情况的,其可以代表气候和陆地生物物理变量。如程琳琳等^[22]基于 RSEI 对 2001—2018 年北京市门头沟区生态环境质量进行评价;杨江燕^[23]基于 RSEI 对 1995—2015 年雄安市生态环境质量进行监测;Yang 等^[24]基于 RSEI 评价了 2001—2019 年长江流域生态环境动态及其驱动因素;WU 等^[25]基于 RSEI 分析了 2001—2002 年萨赫勒地区的生态环境质量。以上研究均表明 RSEI 指数能够有效反应区域的生态环境质量情况。但目前基于 RSEI 的北京市生态环境质量监测和评估研究较少,且均多采用单遥感数据对某一次或某一时段的生态环境质量进行监测^[11-15],很少探讨将来生态环境质量可能的持续状态的研究。

基于以上原因,本文利用 Google Earth Engine (GEE)遥感大数据处理平台提供的 Landsat 产品反演得到 RSEI 指数,并基于 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall(MK)趋势分析探究北京市不同时间段、不同土

地覆盖区域生态环境质量的时空格局和演变趋势。考虑到自然和人为因素共同制约生态环境质量的变化,本文建议不同环境因子变化对北京市生态环境质量空间分布影响情况。研究结果可为北京市生态环境保护战略与经济发展战略的协调发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区

北京地处华北平原西北边缘太行山脉与燕山山脉的交接位置(115.7°—117.4°E, 39.4°—41.6°N),地势上呈现出西北高、东南低的地形特征,总面积 16.41 km²。北京大部分地区属于温暖大陆性气候/湿润大陆性气候,少数地区属于寒冷半干旱气候。年平均气温 12℃,年平均降水量达到 640 mm,年平均日照时间在 2 000~2 800 h^[3]。北京市作为中国的首都,也是世界上发展最快的城市之一和中国人口最稠密的城市之一,2021 年末 2022 年初常住人口 2 188.6 万^[11]。作为中国北部平原快速城市化的特大城市,北京在过去几十年中经历了城市面积的显著扩张。除市区和耕地外,北京的植被类型以暖温带落叶阔叶林为主,小面积为暖性针叶林和草原(图 1)。

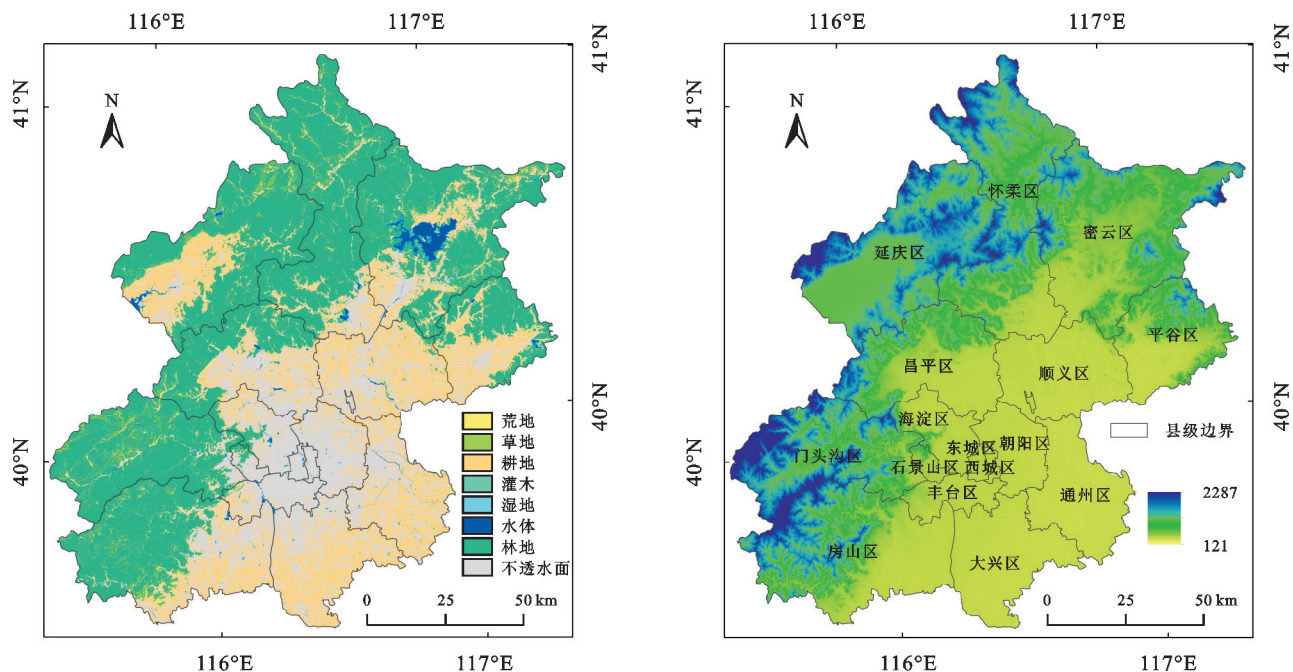


图 1 北京市土地利用类型图及 DEM 空间分布

Fig. 1 Land Use Type Map and DEM Spatial Distribution Map in Beijing

1.2 数据源及预处理

(1) Landsat 遥感数据:源于 Google Earth Engine(GEE)平台上提供的已经经过辐射定标、大气校正等预处理的 30 m 空间分辨率的陆地卫星 TM 和 OLI/TIRS 数据的地表反射率数据,反射率数据用于构建本文 RSEI 指数需要的归一化差异植被指数

(NDVI)、缨帽变换的湿度分量(WET)、归一化差异不透水表面指数(NDBSI)和地表温度(LST)。本文通过多次对比试验选择每年的 3—10 月份的遥感反射率作为 RSEI 计算的基础数据,因为该阶段能更好地体现 RSEI 指数的特性。NDVI, NDBSI, WET 和 LST 的计算公式见文章“1.3.1 遥感生态指数(RSEI)

计算方法”章节。

(2) 1990—2020 年的土地利用数据 (LUCC) 数据源于 CLCD (China Land Cover Dataset) 数据集, 该数据集是由武汉大学黄昕老师基于 Google Earth Engine 上所有可获得的 Landsat 数据, 通过构建时空特征, 结合随机森林分类器得到分类结果, 并提出一种包含时空滤波和逻辑推理的后处理方法进一步提高 CLCD 的时空一致性。最后, 基于 5 463 个目视解译样本, CLCD 的总体准确率达 80%。该数据集主要将中国土地利用类型划分为耕地、林地、灌木、草地、水体、冰/雪、荒地、不透水面和湿地 9 大类。北京市土地利用类型依据 CLCD 除没有冰/雪, 其他类型均有。本文选取了 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年四景土地利用数据分析北京市近 30 年土地类型情况, 在进行生态环境质量计算时剔除了水体区域。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数 遥感生态指数 (RSEI) 利用主成分分析耦合了表示地表植被覆盖和生长情况的绿色指数 (NDVI)、表示土壤的湿度状况的湿度 (WET) 指数、表示地表干旱程度的干燥度指数 (NDBSI) 和反应地表热度情况的热量指数 (LST) [21]。其中, NDVI 和 NDBSI 指标可以反映生态环境对人类活动引起的土地覆盖变化的生态响应, LST 和 WET 揭示了生态环境质量对代表气候变化的响应, 4 个生态指标综合起来能够直观地反映区域生态环境恶劣情况 [17]。4 个指标的计算如下:

(1) 绿度指标——NDVI。归一化差异植被指数 (NDVI) 是应用最广泛的植被指数之一, 许多生态学研究均证明了其有用性 [18-19]。因此, 本文选择 NDVI 作为绿度指数, 计算公式为 (1):

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \quad (1)$$

式中: ρ_{nir} 为遥感图像的近红外波段; ρ_{red} 为红光波段。

(2) 热度指标——LST。热度指标由地表温度 (LST) 表示。虽然 Landsat 8 TIRS 传感器中有两个热红外波段, 但由于波段 11 的辐射校准问题, 本文仅选择了波段 10 来反演 LST [20]。当然, 对于 TM, 我们仍然得到了基于波段 6 的 LST。首先, 将数字 (DN) 值转换为传感器孔径处的光谱辐射亮度 (L_λ), 表示为: LST 的计算公式见 (2):

$$L_\lambda = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale} \quad (2)$$

式中: $G_{rescale}$ 是特定于频带的重新缩放增益因子; Q_{cal} 是量化的校准像素值 (DN); $B_{rescale}$ 是不同于频带的重缩放偏置因子。传感器处光谱辐射亮度 (L_λ) 可使用公式 (3) 转换为传感器亮度温度下的有效辐射亮度:

$$T_\lambda = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right) \quad (3)$$

式中: T_λ 是传感器亮度温度下的有效值; K_1 (TM 波段 6 为 607.76 W/(m² · sr · μm), TIR 波段 10 为 774.89 W/(m² · sr · μm), K_2 (TM 波段 4 为 260.56 K, TIR 波段 10 为 1 321.08 K) 分别是校准常数 1, 2。最后, 使用 T_λ 获得 LST, 见公式 (4):

$$LST = T_\lambda / [1 + (\frac{\lambda T}{\rho}) \ln \epsilon] \quad (4)$$

式中: λ 是发射辐射的波长 (TM 波段 6 为 11.435 μm, TIR 波段 10 为 10.9 μm); ρ 为常数 (1.438×10^{-2} mK); ϵ 是表面发射率, 可通过使用 Sobrino 模型的 NDVI 估算 [21]。

(3) 湿度指标——WET。对地表湿度信息较为敏感的缨帽变换湿度分量 (TCW) 已被证明对植被、水和土壤湿度条件的识别较为精确 [22]。因此, 本文选择 TCW 作为湿度指数 (WET), 并且可以分别使用方程 (5) 和 (6) 来估计 Landsat TM 和 Landsat 8 的湿度指数 [23]:

$$WET_{tm} = 0.0315 \rho_1 + 0.2012 \rho_2 + 0.3102 \rho_3 + 0.1594 \rho_4 - 0.6806 \rho_5 - 0.6109 \rho_6 \quad (5)$$

$$WET_{oli} = 0.1511 \rho_1 + 0.1973 \rho_2 + 0.3283 \rho_3 + 0.3407 \rho_4 - 0.7117 \rho_5 - 0.4559 \rho_6 \quad (6)$$

式中: ρ_i ($i=1, 2, 3, \dots, 6$) 分别为 TM 和 OLI 传感器对应的蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外波段 1 和短波红外波段 2。

(4) 干度指标——NDBSI。由于建设用地和裸露土壤会对区域生态环境造成严重危害。因此, 本文选择了归一化差异不透水表面指数 (NDBSI) 结合基于指数的建成指数 (IBI) 和土壤指数 (BSI) 表征研究区干燥度 [21], 其计算公式见 (7—9):

$$NDBSI = (BSI + IBI) / 2 \quad (7)$$

$$BSI = [(S_1 + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{nir})] / [(S_1 + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{nir})] \quad (8)$$

$$IBI = \left\{ \frac{2 S_1}{S_1 + \rho_{nir}} - \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + S_1} \right] \right\} / \left\{ \frac{2 S_1}{S_1 + \rho_{nir}} - \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + S_1) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $S_1, \rho_{red}, \rho_{green}, \rho_{nir}, \rho_{blue}$ 分别表示 TM 和 OLI 对应的短波红外、红光、绿光、近红外和蓝光波段

(5) 遥感生态指数构建——RSEI。通过主成分变化 (PCA) 对以上 4 个指标进行集成, 并使用第一个主成分 (PC1) 构建 RSEI, 其最大优点是综合指标的权重不是人为确定的, 而是根据每个指标对 PC1 的贡献自动客观地确定 [21]。因此, 在计算中避免了由于权重设置而导致的可能的偏差, 该权重设置因

个人和方法而异,这大大提高了结果的客观性和可信度。在预处理后需要对 4 个指标进行归一化以实现单位统一,然后采用 PCA 方法将 NDVI, LST, WET, NDBSI 的信息集中到第一主成分上。

指标归一化公式见(11):

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (10)$$

式中: NI_i 为个指标归一化结果; I_i 为各指标在第 i 像元的值; I_{\min} 和 I_{\max} 分别为各指标最小值和最大值。

RSEI 计算公式见(12), (13):

$$RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (11)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0\min}) / (RSEI_{0\max} - RSEI_{0\min}) \quad (12)$$

式中: $PC1$ 为 4 个指标归一化后指标通过第一主成分分析的结果,为了方便分析,对其进行正负值转置。 $RSEI_0$ 为转置后结果,4 个指标分别参与徐涵秋等^[21]的研究成果,具体计算公式见文献^[21]; $RSEI_{0\max}$ 、 $RSEI_{0\min}$ 分别为 $RSEI_0$ 最大值和最小值。

本文基于文献^[24]将 $RSEI$ 划分为 $RSEI < 0.2$ (差), $0.2 \leq RSEI < 0.4$ (较差), $0.4 \leq RSEI < 0.6$ (中等), $0.6 \leq RSEI < 0.8$ (良好)和 $RSEI \geq 0.8$ (优)5 个等级。

1.3.2 Mann-Kendall 突变点检验 本文采用 Mann-Kendall 方法对 1990—2020 年北京市生态环境质量突变检验^[26-27]。首先用每年的 $RSEI$ 构造一个 X 序列列为 S_k ,在时间序列为随机的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[s_k - E(s_k)]}{\sqrt{\text{var}(s_k)}} \quad (13)$$

式中: $E(s_k)$ 和 $\text{var}(s_k)$ 分别是 S_k 的均值和方差。 UF_k 形成 UF 的特征曲线,再通过可信度检验来判断是否有明显的变化趋势。 $UF > 0$,表示序列呈上升趋势,反之,呈下降趋势。 $RSEI$ 突变点为 UF 与 UB 曲线相交点。

1.3.3 $RSEI$ 变化趋势分析 采用 Sen 趋势法探究 1990—2020 年北京市 $RSEI$ 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式见(14)^[26-27]:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \quad (14)$$

式中: β 为 $RSEI$ 变化趋势; Median 为中值函数;当 $\beta > 0$ 时, $RSEI$ 呈增加趋势; $\beta < 0$ 时, $RSEI$ 呈减小趋势。

1.3.4 重要性评价 本文采用多元线性回归分析法分析 4 个指标对北京市 $RSEI$ 的影响情况。多元线性回归分析法基于 $RSEI$, $NDVI$, LST , WET 和 $NDBSI$ 的时间序列数据,以 $RSEI$ 为因变量, $NDVI$, LST , WET 和 $NDBSI$ 为自变量,建立多元线性回归模型。 $NDVI$, LST , WET 和 $NDBSI$ 的斜率用来表示其对

$RSEI$ 的贡献情况,通过进行单样本双尾 t 检验来监测其显著性^[14]。

$$RSEI_{cc} = a \times T + b \times P + c \times W + d \times H + f \quad (15)$$

式中: T , P , W 和 H 分别代表 $NDVI$, LST , WET 和 $NDBSI$; a , b , c , d 分别表示不同因子对 $RSEI$ 的贡献; f 为常数项。

1.3.5 结构方程模型 结构方程模型是结合因子分析和回归分析的多元统计方法,可同时估算测量变量和潜变量(即不可观测变量)及潜变量之间的关系,该模型基于研究者的先验知识预先设定各因素之间的依赖关系,以此判断各因素之间关系强弱,可获得自变量对因变量影响的直接效果、间接效果和总效果,并能够拟合和判断整体模型,可更全面地了解研究系统^[14],已被广泛应用于各个研究领域。结构方程模型与普通回归模型相比最大的优点是它可以同时处理多个被解释变量,且解释变量和被解释变量之间容许存在测量误差,模型能够同时测量和估计因子结构和因子关系。因此,本文采用 AMOS23 软件构建结构方程模型(SEM)通过构建 $NDVI$, LST , $NDBSI$ 和 WET 对 $RSEI$ 的直接和间接影响。因结构方程模型的最大似然法可以同时考虑多个变量之间的关系,用来研究复杂的关系(如多层次结构,交互作用等),因此本文选择最大似然法构建 4 个指标和 $RSEI$ 之间的模型。

2 结果与分析

2.1 生态环境整体分析

本文通过 GEE 平台提供的主成分分析算法构建 1990—2020 年北京市 $RSEI$ 时间序列(表 1),发现近 30 年第一主成分平均贡献率达到 94% 以上,说明第一主成分集中了 $NDVI$, LST , WET 和 $NDBSI$ 指标的大部分特征信息,能够表示区域内生态环境情况。从各指标的载荷来看,1990—2020 年不同流域的各指标在第一主成分上均具有相同的正负分布,其中代表绿度的 $NDVI$ 和代表生态环境湿度的 WET 在第一主成分上的贡献率均为正值,符合绿度和湿度越高地表植被覆盖越高,土壤水分越充足,生态环境质量越好的理论事实。代表地表温度的 LST 和代表建筑用地和裸土地的硬化程度的 $NDBSI$ 均为负值,符合干度和热度越高,土壤沙化、岩石裸露等问题越严重的自然特征,这与现实相符。因此,本文后续研究将采用第一主成分的结果构建北京市的 $RSEI$ 模型。

2.2 各指标和 $RSEI$ 时序变化特征

从 1990—2020 年 $NDVI$, WET , LST , $NDBSI$ 和 $RSEI$ 时序变化情况及 $RSEI$ 突变情况分布图发现(图 2), $NDVI$, WET 和 LST 呈增加趋势,增加速率

分别为 0.002 4/a,0.006 9/a 和 0.001 5/a,干度指标(NDBSI)呈下降趋势,下降速率为 0.005 5/a。RSEI 从 0.697(1990 年)增加至 0.764(2020 年),整体每年以 0.002 9 的速率增加,说明北京市近 31 年生态环境质量整体呈变好趋势,但存在显著的时间差异。从 UF 曲线来看 1994 年之前北京市 RSEI 为减小趋势,1995—2001 年呈增加趋势,2002—2013 年又呈下降

趋势,2014 年之后持续增加,且 UF 和 UB 曲线相较于 2013 年,可知 2013 年为 RSEI 发生突变的年份。综合可知各指标对北京市 RSEI 的影响整体呈增加趋势,这与北京市 RSEI 变化趋势相一致。从各曲线来看,RSEI 的变化曲线走向没有与任何一个指标相一致,因此可以发现是各指标的综合影响共同促进了北京市的生态环境变化。

表 1 北京市 1990—2020 年各指标第一主成分载荷和贡献率

| Table 1 The first principal component load and contribution rate of various indicators in Beijing from 1990 to 2020 | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 年份 | WET | NDVI | LST | NDBSI | 贡献率/% | 年份 | WET | NDVI | LST | NDBSI | 贡献率/% |
| 1990 | 0.46 | 0.60 | −0.44 | −0.49 | 95.66 | 2006 | 0.62 | 0.46 | −0.42 | −0.49 | 96.26 |
| 1991 | 0.46 | 0.61 | −0.47 | −0.44 | 96.02 | 2007 | 0.55 | 0.50 | −0.51 | −0.43 | 94.67 |
| 1992 | 0.46 | 0.51 | −0.53 | −0.50 | 95.37 | 2008 | 0.56 | 0.60 | −0.15 | −0.55 | 96.49 |
| 1993 | 0.45 | 0.57 | −0.45 | −0.52 | 95.77 | 2009 | 0.60 | 0.55 | −0.46 | −0.36 | 96.07 |
| 1994 | 0.42 | 0.54 | −0.46 | −0.56 | 96.18 | 2010 | 0.50 | 0.52 | −0.51 | −0.46 | 94.66 |
| 1995 | 0.42 | 0.53 | −0.53 | −0.51 | 95.81 | 2011 | 0.61 | 0.48 | −0.43 | −0.46 | 95.90 |
| 1996 | 0.46 | 0.56 | −0.43 | −0.54 | 95.40 | 2012 | 0.46 | 0.60 | −0.42 | −0.50 | 95.45 |
| 1997 | 0.53 | 0.55 | −0.41 | −0.49 | 97.22 | 2013 | 0.53 | 0.59 | −0.47 | −0.39 | 96.18 |
| 1998 | 0.43 | 0.54 | −0.52 | −0.50 | 96.13 | 2014 | 0.54 | 0.61 | −0.42 | −0.40 | 96.49 |
| 1999 | 0.41 | 0.57 | −0.50 | −0.51 | 97.18 | 2015 | 0.45 | 0.67 | −0.44 | −0.39 | 95.67 |
| 2000 | 0.42 | 0.53 | −0.51 | −0.53 | 96.63 | 2016 | 0.54 | 0.59 | −0.50 | −0.33 | 96.05 |
| 2001 | 0.49 | 0.58 | −0.09 | −0.64 | 97.44 | 2017 | 0.56 | 0.62 | −0.39 | −0.39 | 95.60 |
| 2002 | 0.43 | 0.52 | −0.56 | −0.48 | 97.02 | 2018 | 0.51 | 0.59 | −0.43 | −0.45 | 96.92 |
| 2003 | 0.46 | 0.53 | −0.53 | −0.47 | 95.47 | 2019 | 0.54 | 0.62 | −0.40 | −0.40 | 96.02 |
| 2004 | 0.50 | 0.52 | −0.48 | −0.49 | 96.08 | 2020 | 0.48 | 0.59 | −0.55 | −0.35 | 97.48 |
| 2005 | 0.61 | 0.52 | −0.47 | −0.38 | 96.14 | 2021 | 0.56 | 0.64 | −0.37 | −0.38 | 95.11 |

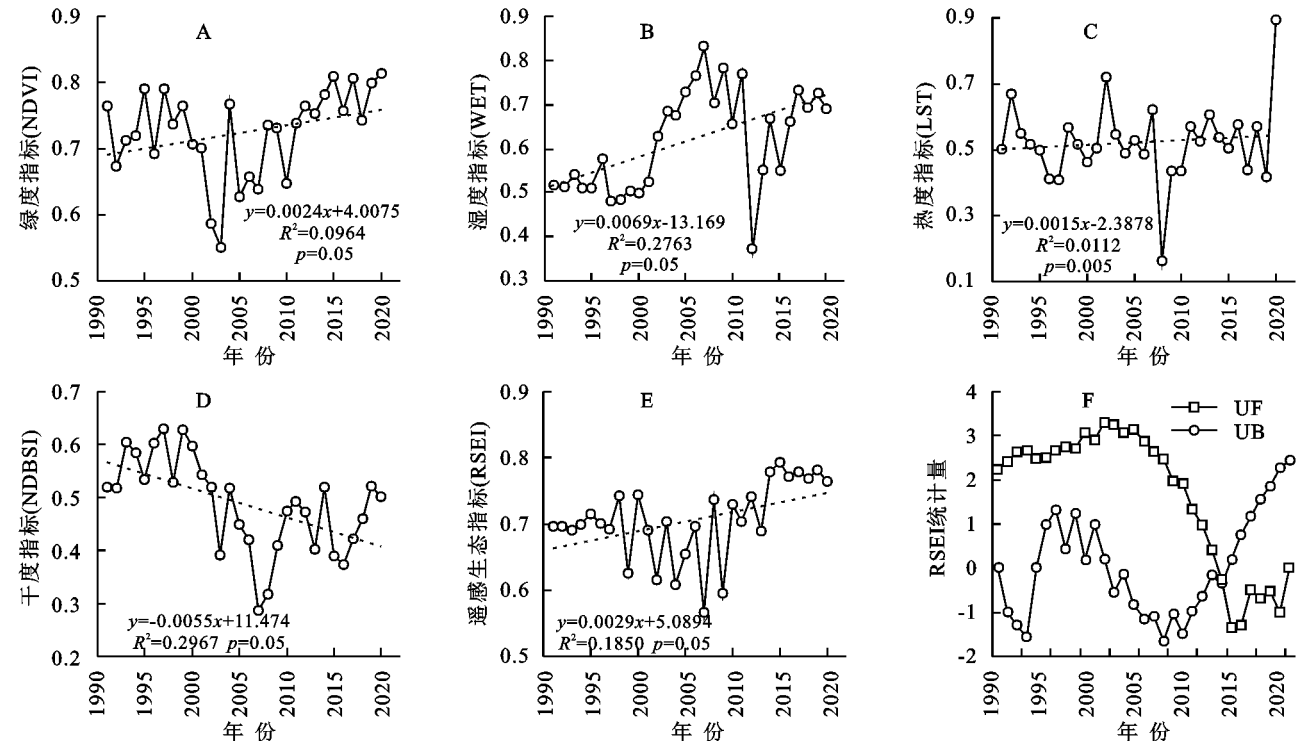


图 2 北京市 1990—2020 年 NDVI,LST,DBSI,WET,RSEI 变化曲线和 RSEI 变化突变点检验

Fig. 2 NDVI, LST, DBSI, WET, RSEI change curves and RSEI change mutation point test in Beijing from 1990 to 2020

2.3 北京市 RSEI 的空间分布特征

从北京市 RSEI 的空间分布来看(图 3),1990 年北京市大范围生态环境质量表现为良好等级,其中怀柔区大范围生态环境质量较其他地区好。1995 年生态环境质量较 1990 年南部部分地区有所改善,但是怀柔区生态环境质量有所变差,而密云区大部分区域生态环境质量有所改善。2000 年在密云区北部、平谷区东部和门头沟区域生态环境质量表现为优等等级,延庆区、房山区和怀柔区部分区域生态环境质量呈中等等级,较 1995 年有

所变差。2005 年较 2000 年西南生态环境有所改善,但北京市城市中心区域生态环境质量从 2000 年的良好变为了中等等级。2010 年较 2005 年来看,除北京市城市中心的不透水面区域生态环境呈变化趋势,其他区域均表现为变好趋势。2015 年、2020 年北京市生态环境质量较 2010 年发生了较大变化,大面积呈现为变好趋势(呈优等等级),且 2020 年较 2015 年生态环境质量更优。总体来看,从 1990—2020 年北京市生态环境质量大范围表现为改善趋势。

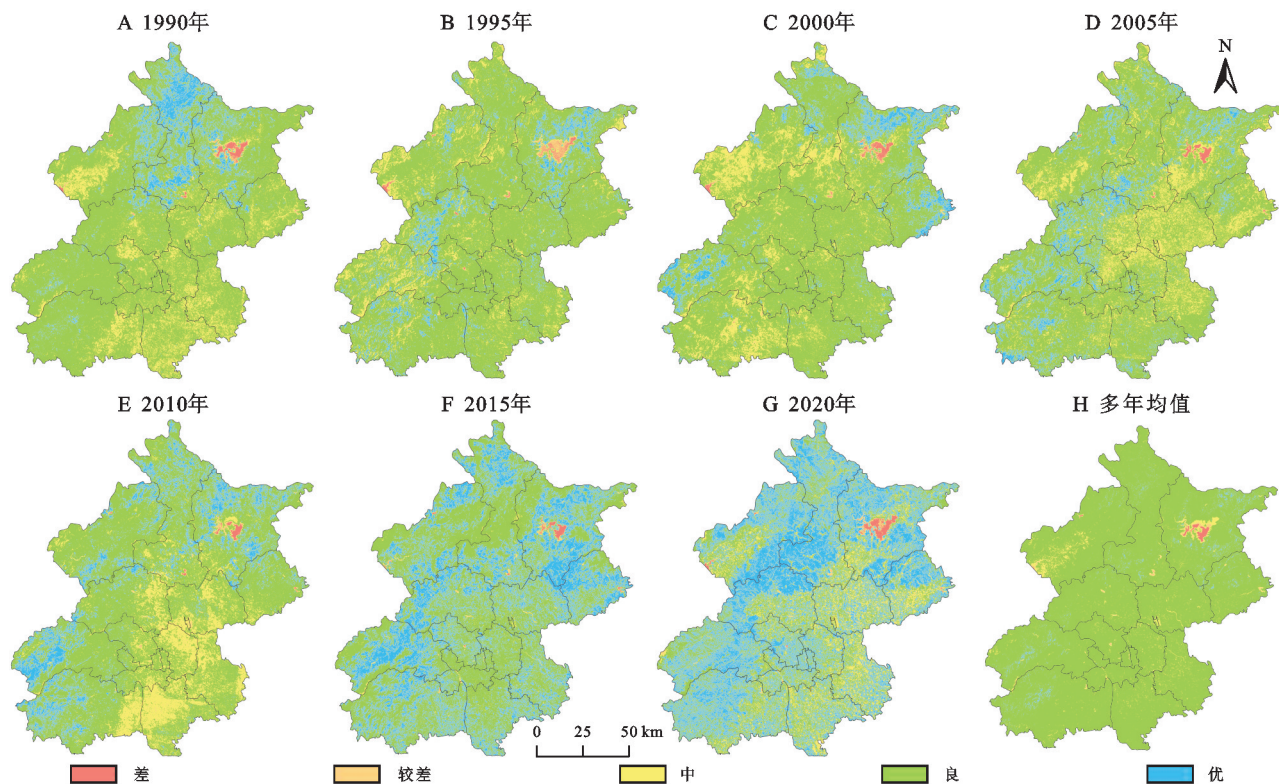


图 3 北京市 1990—2020 年 RSEI 空间分布

Fig. 3 Spatial Distribution of RSEI in Beijing from 1990 to 2020

2.4 北京市 RSEI 变化趋势

根据突变点检验结果,本文分别探究了 1990—1994 年、1995—2001 年、2002—2013 年、2014—2020 年北京市生态环境质量变化趋势空间分布特征和不同土地覆盖类型区域生态环境质量变化速率(图 4, 表 2),发现 1990—1994 年北京市 RSEI 空间分布上呈现出从西向东逐渐由增加变为减小的趋势,但整体以减小趋势为主。其中 42.662% 的区域为不显著减小,17.998% 的区域为显著减小,集中分布在北京市东部的通州区、顺义区、平谷区和密云区南部地区。31.151% 的区域呈不显著增加趋势,呈显著增加的区域占整个北京市的 8.188%,集中在西部的门头沟区和延庆区。但从不同土地覆盖区域的 RSEI 变化速率来看,除林地和灌木区域的 RSEI 呈增加趋势,其他土地类型区域 RSEI 均为减小趋势,且耕地减小速

率最大(为 0.022/a),其次为不透水面和草地(减小速率分别为 0.001 6/a 和 0.001 4/a)。1995—2001 年北京市 RSEI 变化不显著,整体呈现出从北向南由不显著增加转为不显著减小趋势,但整体以不显著减小趋势为主(占比 69.966%)。从不同土地利用类型区域来看,除湿地区域 RSEI 为增加趋势(增加速率为 0.032/a),其他土地类型区域均为减小趋势,其中不透水面减小速率最大(减小速率为 0.023/a),其次为荒地(0.022/a)、草地(0.019/a)和灌木(0.019/a)。2002—2013 年 RSEI 整体以增加趋势为主,其中 53.028% 的区域为不显著增加趋势,23.254% 的区域为显著增加趋势,10.711% 的区域为极显著增加趋势,呈显著增加趋势的区域集中在北京市西北部的延庆区东部、怀柔区北部和密云区西北部。13.077% 的区域呈现为减小趋势,集中在北京市东部和东南部地

区。从不同土地类型区域的 RSEI 变化速率来看,除湿地和荒地呈现为减小趋势,其他区域均为增加趋势,且林地区域生态环境质量增加速率最大(0.011/a)。2014—2020 年北京市 RSEI 整体以不显著变化趋势为主,其中 49.134% 的区域为不显著减小趋势,46.389% 的区域为不显著增加趋势,显著变化的区域仅占 4.477%。

从不同土地类型区域来看,除林地区域为增加趋势,其他区域均为减小趋势。从 1991—2020 年北京市 RSEI 整体以不显著变化趋势为主,其中 51.701% 的区域为不显著减小趋势,46.664% 的区域为不显著增加趋势,显著变化的区域仅占 1.635%。但仅有湿地区域 RSEI 为减小趋势,其他区域 RSEI 均为增加趋势,但其变化速率较其他时间段小。

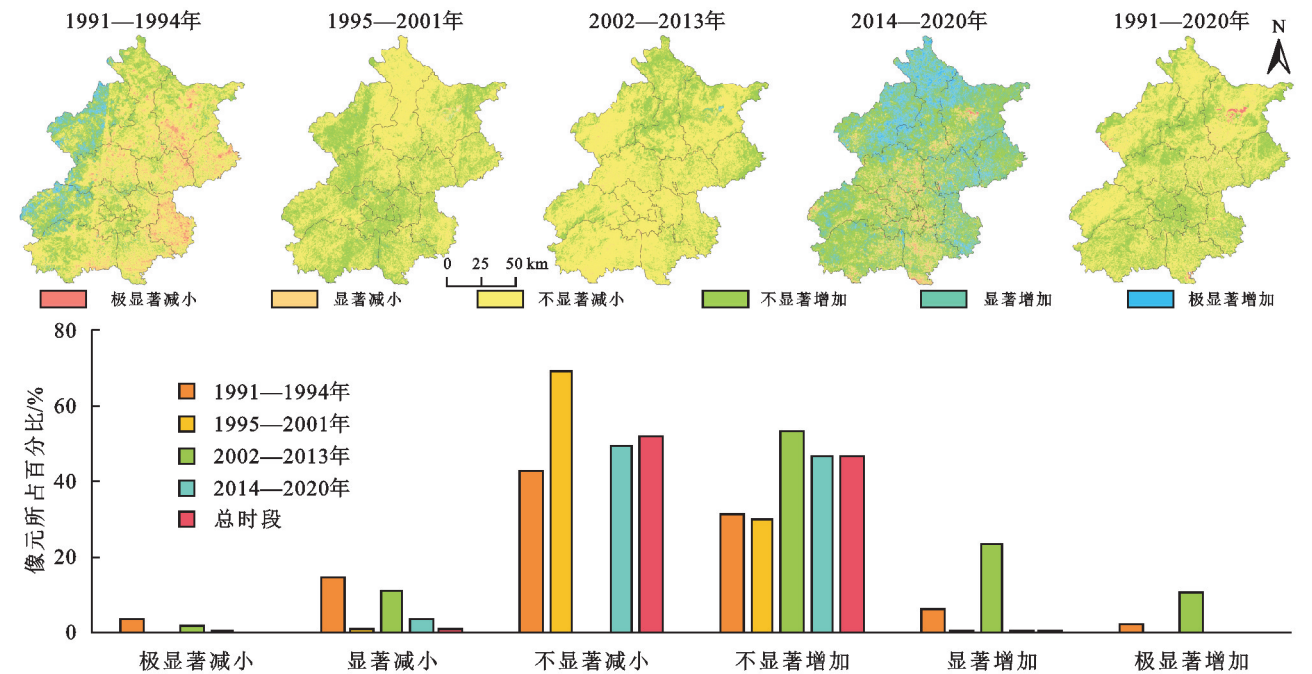


图 4 北京市不同时间段 RSEI 时空变化趋势和统计

Fig. 4 Spatial and temporal variation trend and statistical chart of RSEI in different time periods in Beijing

表 2 北京市不同时间段不同土地利用类型 RSEI 变化趋势统计

| Table 2 Statistical Table of RSEI Change Trends of Different Land Use Types at Different Time Periods in Beijing | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 类型 | 1990—2019 年 | 1991—1994 年 | 1994—2001 年 | 2002—2013 年 | 2014—2019 年 |
| 不透水面 | 0.004 | −0.016 | −0.023 | 0.004 | −0.008 |
| 草地 | 0.007 | −0.014 | −0.019 | 0.006 | −0.009 |
| 耕地 | 0.001 | −0.022 | −0.009 | 0.008 | −0.005 |
| 灌木 | 0.005 | 0.009 | −0.019 | 0.009 | −0.014 |
| 荒地 | 0.004 | −0.004 | −0.022 | −0.002 | −0.022 |
| 林地 | 0.006 | 0.002 | −0.003 | 0.011 | 0.001 |
| 湿地 | −0.054 | −0.007 | 0.032 | −0.002 | −0.059 |

2.5 北京市 RSEI 对影响因素变化的响应

2.5.1 北京市土地覆盖变化 从 1990 年、2000 年、2010 年、2020 年北京市土地利用分布发现(图 5): 1990—2000 年不透性水面面积增加最多(增加了 3.264%),其次为林地(增加了 2.439%),其他用地面积均呈减小趋势,且耕地和草地面积减少最多,分别减少了 4.132% 和 1.322%。结合 RSEI 变化趋势图来看(图 4),在此期间大部分区域的 RSEI 呈减小趋势,且不透水面区域 RSEI 减小速率最快。2000—2010 年不透水面、林地、灌木和草地均增加了 5.098%,0.280%,0.103% 和 0.166%,增加的面积主要来源于原来的耕

地(减少了 5.351%)和水体(减少了 0.269%),同样,在此期间北京市生态环境质量整体也表现出增加趋势。2010—2020 年耕地面积减少了 2.99%,草地面积减少了 1.23%,不透水面和林地面积分别增加了 2.74% 和 1.00%,灌木和水体面积分别增加了 0.05% 和 0.42%,在此期间除林地区域生态环境质量呈增加趋势,其他区域均表现为减小趋势。整体来看,北京市 1990—2020 年,耕地减少最多,总共减少了 12.47%,其次为草地(2.38%),灌木(减少了 0.05%),荒地面积减少较少(0.01%),不透水面面积增加最多(增加了 11.10%),其次为林地(增加了 3.72%)和水体(增

加了 0.09%), 且生态环境质量变化与土地利用变化存在显著的关系。

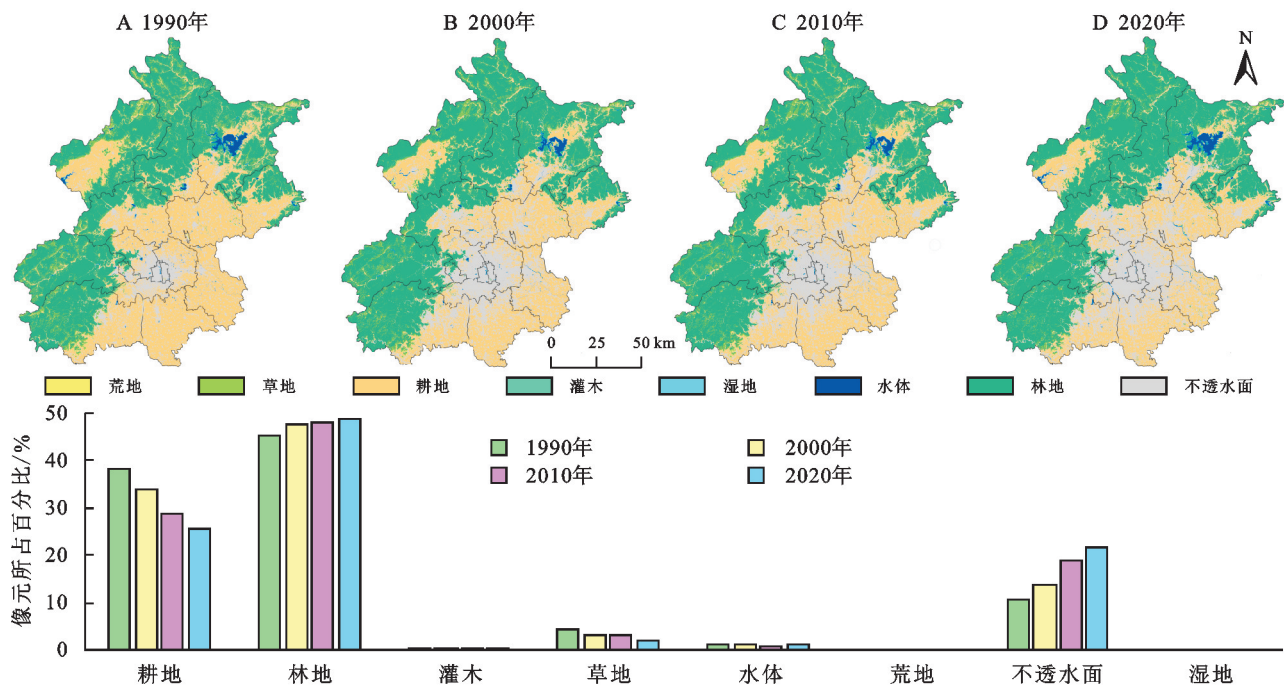


图 5 北京市土地利用变化图和所占百分比统计

Fig. 5 Land use change map and percentage statistics in Beijing

2.5.2 不同阶段 4 个生态指标对 RSEI 贡献度 基于多元回归法分析了 NDVI, LST, WET 和 NDBSI 变化对 RSEI 变化的贡献情况(图 6), 发现 63.947% 区域的 RSEI 变化由 NDVI 变化引起, 4.491% 的区域由 WET 变化引起, 4.926% 的区域由 NDBSI 变化引起, 26.529% 的区域由 LST 变化引起。

区域由 LST 变化引起。从空间分布来看, 北京市周边海拔较高的区域 RSEI 变化主要受到 LST 变化的驱动, 而北京市市区大部分区域 RSEI 变化受到 NDVI 的驱动, 而 NDBSI 和 WET 为主要驱动因子的区域主要集中在海淀区东北角和怀柔区中部地区。

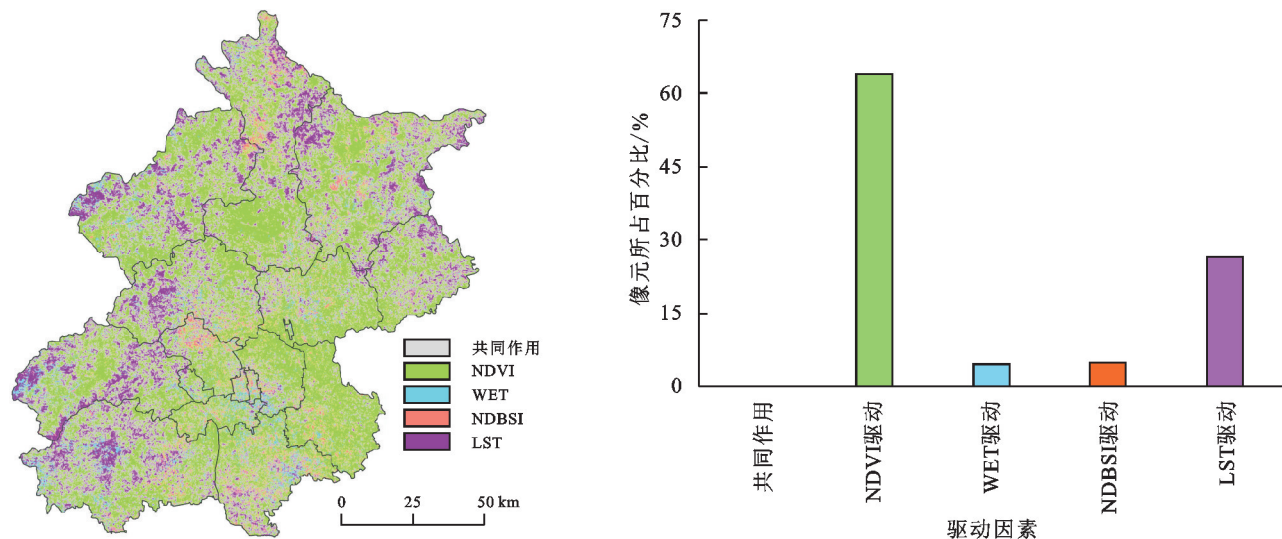


图 6 北京市 RSEI 变化的驱动因子分布

Fig. 6 Distribution of Driving Factors for RSEI Changes in Beijing

从 NDVI, LST, WET 和 NDBSI 与 RSEI 的回归系数分布图可知(图 7), NDVI 和 WET 与 RSEI 主要以正回归系数为主, LST 和 NDBSI 与 RSEI 主要以负回归系数为主。其中, 59.956% 的区域 NDVI 与 RSEI 的回归系数大于 0.6, 这表明 NDVI 对 RSEI 的整体贡献度较高。WET 与 RSEI 的回归系数集中在

0~0.2, 但在海拔较高的西部区域主要以负回归系数为主, 而在海拔较低的区域主要以正回归系数为主, 尤其在市区区域正回归系数较大。LST 与 RSEI 的回归系数在海拔较高的西部区域以正回归系数为主, 而在海拔较低的东部区域主要以负回归系数为主, 尤其在市区区域负回归系数较大。NDBSI 与 RSEI 的

回归系数空间分布于 LST 较为相近,在海拔较高的区域以负回归系数为主,在市区区域以负回归系数为

主。由此可见 WET,LST 和 NDBSI 与 RSEI 的关系存在显著的空间异质性。

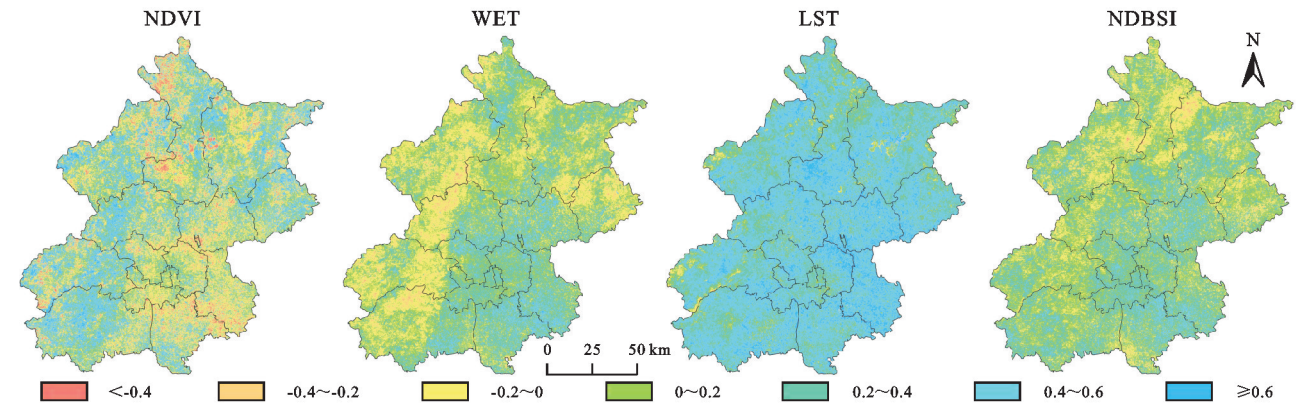


图 7 4 个指标与 RSEI 的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of four indicators and RSEI

为进一步探究不同土地类型区域 RSEI 变化的决定因素,通过构建 NDVI,WET,LST,NDBSI 与 RSEI 的结构方程模型得到彼此间的通径系数,发现不同土地类型区域 RSEI 与 4 个指标间存在复杂的交互作用(图 8)。其中,不透水面区域 NDBSI(通径系数为-0.14)和 WET(通径系数为 0.12)对 RSEI 的影响较大,而 LST(通径系数为-0.03)和 NDVI(通径系数为 0.09)对其影响较小。整个相互作用路径 LST 和 NDVI 与 NDBSI 和 WET 间存在显著的相关性,因此可以推断 NDVI 和 LST 主要为 RSEI 变化的间接因子,通过影响 NDBSI 和 WET 来影响 RSEI。草地区域对 RSEI 影响较大的因素为 LST(-0.42)、NDVI(0.42)和 WET(0.43),NDBSI 对 RSEI 的影响较小(-0.03),但 NDBSI 与 WET,NDVI 间的相关性较高,可以发现 NDBSI 通过影响 NDVI 和 WET 对 RSEI 产生影响。耕地区域 RSEI 受到 NDBSI(-0.57)和 LST(-0.65)的负影响大于 NDVI(0.23)和 WET(0.13)的正影响。荒地区域 RSEI 受到 LST(-0.87)的负影响大于 NDBSI(0.73)、NDVI(0.66)和 WET(0.38)的正影响。灌木覆盖区域 4 个指标对 RSEI 影响均较大,但 LST 对 RSEI 起到促进作用,且正影响显著大于负影响。林地区域 RSEI 受到 4 种指标的影响较其他区域均较大,且 LST 与 RSEI 的通径系数为正,表明 LST 对 RSEI 起到促进作用。湿地区域 RSEI 受到 LST(0.85)、NDVI(0.51)和 WET(0.76)的正影响大于 NDBSI(-0.20)的负影响。

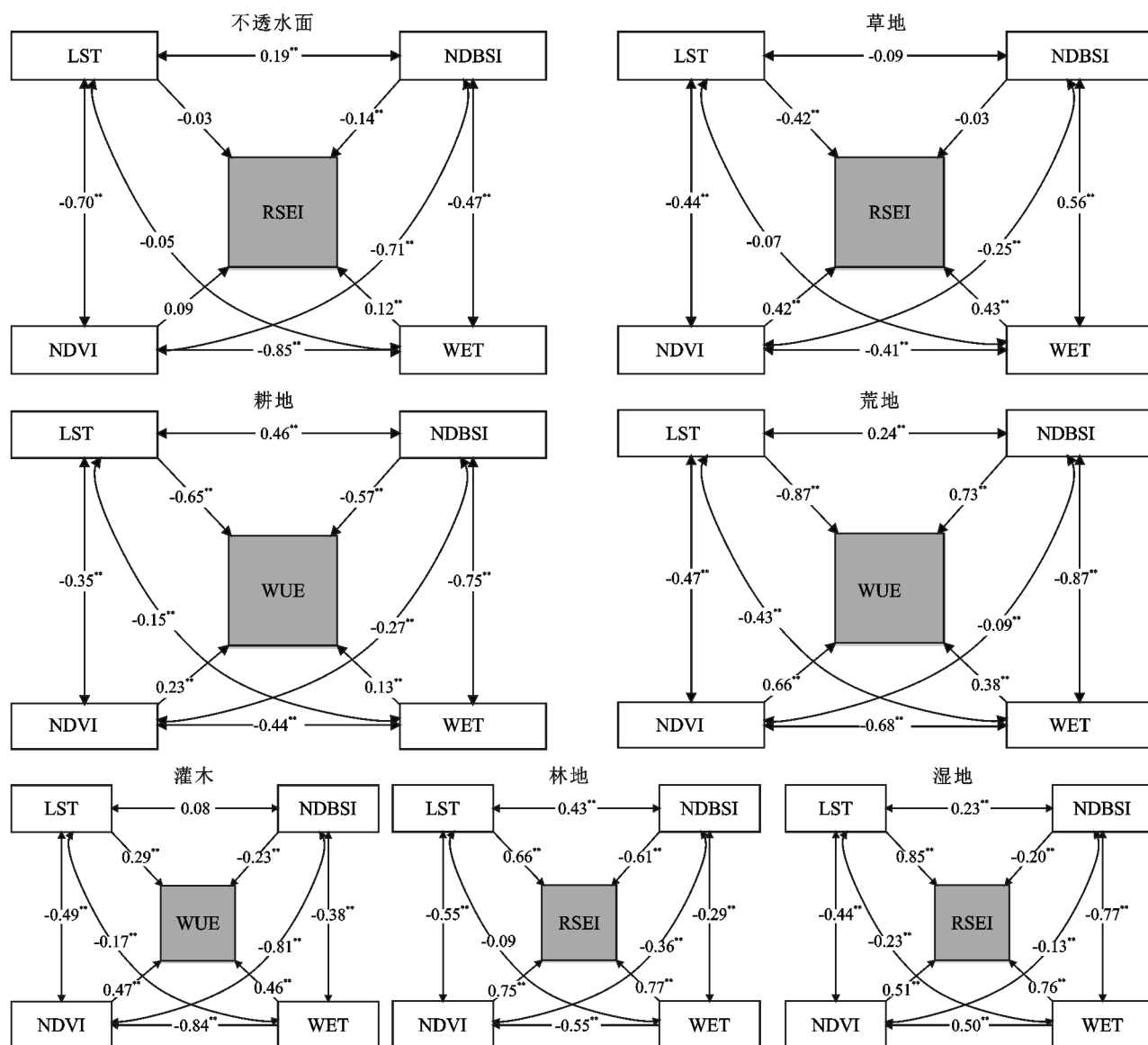
3 讨论

北京作为我国政治文化中心,环境质量的好坏直

接关系到这个城市的国际形象和人民生活水平^[7]。既有研究发现随着北京市城镇化快速发展,北京市土地资源需求量的迅速增加,日益激化了社会发展中资源匮乏与生态环境保护之间的矛盾。因此,亟需理清生态工程实施和城镇化快速发展背景下北京市生态环境质量时空演变及其主要影响因子。本文通过分析北京市 1990—2020 年的生态环境质量时空动态,发现 1990—2020 年北京市生态环境质量整体呈增加趋势。其中对北京市生态环境质量整体影响最大的环境因子为绿度指标,但在海拔较高的西北地区生态环境质量变化主要受到湿度指标的负影响较大,而在海拔较低的城区湿度指标增加能够提升区域生态环境质量,而热度和干度指标在西部区域可以促进生态环境质量在城区热度指标增加会显著降低生态环境质量。这主要是因为西部地区海拔相对较高,地表干旱程度相对较低,植被覆盖浓密,水汽浓郁,生态条件相对较好,而温度升高有利于固碳释氧和净化大气环境,因此热度和干度指标在该区域可以促进生态环境质量改善。但在北京市南部和东部区域,随着人工表面的扩张,具有生态功能的湿地、林地和草地的面积减少,并且随着水泥路、高楼大厦的崛起,区域发挥生态效益的能力下降,若是热度和干度指标增加,会导致蒸散发量增加,不利于植被生长并且也会增加土壤干燥化,只会进一步导致区域干旱程度加重,因此在东部和南部的城区区域生态环境质量受到热度和干度的负影响显著。以上研究结论可以解释高海拔区域 LST 对 RSEI 为促进作用,城市区域 LST 对 RSEI 为抑制作用。同样,裴子萱等^[5]发现生态用地面积在生态条件较好区域受城市增长负面影响较大,生态条件相对薄弱区域的生态建设在城市增长中加

强;冯舒等^[6]同样指出 2000—2015 年首都功能核心区和生态涵养发展区的生境退化度逐渐增加,最严重

的区域在城市功能拓展区以及平原—山区交界地带。上述研究结果也进一步验证了本文的主要结论。



注: ** 代表显著性 0.005。单向箭头表示由自变量指向因变量。双向箭头表示两因子之间的相关关系。线上的数值表示标准化路径系数,表示自变量对因变量影响的大小。数值正负表示相关关系的正负。

图 8 4 个指标与 RSEI 的结构方程模型

Fig. 8 Structural equation model of four indicators and RSEI

其次,本文研究发现北京市生态环境质量在不同时段趋势变化存在显著差异。其中在 1990—1994 年生态环境质量呈现出从西向东变化趋势逐渐由增加变为减小的趋势,除林地和灌木区域外,其他区域均为减小趋势;1995—2001 年生态环境质量整体呈现出从北向南由不显著增加转为不显著减小趋势,但在湿地区域生态环境质量为增加趋势;2002—2013 年呈显著增加趋势的区域集中在延庆区东部、怀柔区北部和密云区西北部,呈减小趋势的集中在北京市东部和东南部地区,且仅在荒地和湿地区域生态环境质量为减小趋势;2014—2020 年除林地区域外其他区域

生态环境质量为增加趋势。可以发现在 2002 年之前北京市生态环境质量总体以减小趋势为主,而在 2002 年之后总体表现为增加趋势。同样,程琳琳等^[22]基于 RSEI 指数也发现北京市门头沟区生态环境质量呈现减小后增加的趋势,并且城镇化对门头沟区生态环境产生了显著的负影响,但在生态工程区生态人类活动有利于生态环境质量改善;成方妍等^[28]也发现 2000—2012 年北京市植被覆盖度整体表现为增加趋势。这主要是因为特定生态环境变化和人类活动导致部分草地转为耕地、林地和其他土地,由于人口快速增长和三北防护林体系工程的实施,建设用

地的发展,导致许多草地遭到破坏,并且长期过度放牧加上气候变化和啮齿动物破坏的影响,北京市天然草地退化严重,将不可避免地导致该区域荒漠化加剧^[28-29]。这主要是因为土地利用不当,盲目破坏生态环境,进而导致大面积的植被区域被破坏,尤其在经济发展迅速的地区表现尤为显著。同样,本文也发现在1990—2000年林地覆盖面积增加,因此在林地区域的生态环境在此期间仍为增加趋势,但在南部和东部具有生态效益的草地、湿地、水体等均呈减小趋势,且大部分转变为不透水面类型,在此期间其他区域生态环境均呈减小趋势。自从退耕还林工程于1999年开始实施,2000—2019年在退耕还林政策的全面实施下,北京市生态环境得到了很大改善。同样,本文也发现在2000—2010年林地、灌木和草地均表现为增加趋势,且2000年之后北京市生态环境质量自生态修复工程和城市化绿色发展理念推进以来得到了极大的改善,这也进一步说明土地利用变化对生态环境质量的影响较大。

虽然本文综合评价了不同时间段北京市生态环境质量时空变化及不同环境因子变化对其主导作用,但因篇幅问题并未探究不同随着时间变化土地利用变化、社会经济、气候(平均气候和极端气候)、极端水文气象现状对北京市生态环境质量的影响以及多因素是如何共同作用于生态环境质量的,这些仍需要进一步深入探究。其次,因目前政府较为关注未来北京市在不同气候、人类活动和地形影响下北京市生态环境质量可能发生的现状,但本文并未涉及这一部分内容。后期将进一步探究对不同因素的控制下北京市RSEI可能的持续状态进行预测,为北京市生态环境保护 and 政策制定提供更加详细的参考资料。

4 结论

(1) 1991—2020年北京市生态环境质量总体以减小趋势为主。其中,林地区域生态环境质量表现为“先增加—减小—增加”趋势,灌木区域生态环境质量呈“增加—减小—增加—减小”趋势,草地、耕地、湿地和不透水面区域生态环境质量呈“减小—增加—减小”趋势,荒地区域生态环境质量一直呈“减小”趋势。

(2) 不透水面区域生态环境质量主要受到干度的负影响和湿度的正影响较大,绿度和热度主要通过影响湿度和干度对其产生影响;草地、荒地和灌木区域生态环境质量主要受到热度负影响和绿度、湿度和干度正影响;耕地区域生态环境质量主要受到干度和热度的

负影响;林地区域生态环境质量受到湿度、干度、热度和绿度的影响均较大;湿地区域生态环境质量受到热度、绿度和湿度的正影响大于干度的负影响。

这项研究表明,北京市在生态环境维持与治理方面政策的大方向是有效的,绝大部分区域生态环境质量都在提升,少部分地区略有降低,应针对性地进行政策调整,改善生态环境质量,但后期仍需要进一步规范北京市土地覆盖并进一步加强自然灾害的防护策略。

参考文献(References):

- [1] Ji J W, Tang Z Z, Zhang W W, et al. Spatiotemporal and multiscale analysis of the coupling coordination degree between economic development equality and eco-environmental quality in China from 2001 to 2020[J]. *Remote Sensing*, 2022,14(3):737.
- [2] Ji J, Wang S, Zhou Y, et al. Spatiotemporal change and coordinated development analysis of “population-society-economy-resource-ecology-environment” in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration from 2000 to 2015[J]. *Sustainability* 2021,13(7):4075.
- [3] 鲁绍伟,李少宁,刘逸菲,等.北京市退耕还林生态效益评估[J].*生态学报*,2021,41(15):6170-6181.
Lu S W, Li S N, Liu Y F, et al. Ecological benefit evaluation of the Grain for Green Project in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(15):6170-6181.
- [4] 杨婉清,杨鹏,孙晓,等.北京市景观格局演变及其对多种生态系统服务的影响[J].*生态学报*,2022,42(16):6487-6498.
Yang W Q, Yang P, Sun X, et al. Changes of landscape pattern and its impacts on multiple ecosystem services in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(16):6487-6498.
- [5] 裴子萱,李强,刘婷婷,等.基于GlobeLand30的城市生态用地时空变化特征:以北京市为例[J].*生态学报*,2022,42(24):10072-10087.
Pei Z X, Li Q, Liu T T, et al. Spatial and temporal change characteristics of ecological land in Beijing based on GlobeLand30[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(24):10072-10087.
- [6] 冯舒,孙然好,陈利顶.基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究[J].*生态学报*,2018,38(12):4167-4179.
Feng S, Sun R H, Chen L D. Spatio-temporal variability of habitat quality based on land use pattern change in Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018,38(12):4167-4179.
- [7] Piao S, Wang X, Park T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019,1(1):14-27.
- [8] Gerland P, Raftery A E, Sevckova H, et al. World population stabilization unlikely this century[J]. *Science*, 2019

- (346):234-237.
- [9] Xu H, Wang M, Shi T, et al. Prediction of ecological effects of potential population and impervious surface increases using a remote sensing based ecological index (RSEI)[J]. *Ecological Indicators*, 2018,93,730-740.
- [10] 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, Oyang 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.
- [11] 北京市统计局. 北京统计年鉴—2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- Beijing Municipal Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook-2019[M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2019.
- [12] 国家统计局, 生态环境部. 中国环境统计年鉴—2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
- National Bureau of Statistics, Ministry of Ecology and Environment. China environmental statistics yearbook-2018 Beijing[M]. China Statistical Publishing House, 2019.
- [13] 王思, 张路路, 林伟彪, 等. 基于 MODIS—归一化植被指数的广东省植被覆盖与土地利用变化研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(6): 2149-2163.
- Wang S, Zhang L L, Lin W B, et al. Study on vegetation coverage and land-use change of Guangdong Province based on MODIS-NDVI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(6):2149-2163.
- [14] Qin G X, Meng Z Y, Fu Y. Drought and water-use efficiency are dominant environmental factors affecting greenness in the Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2022,834:155479.
- [15] 王飞, 王宗敏, 杨海波, 等. 基于 SPEI 的黄河流域干旱时空格局研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(9): 1169-1183.
- Wang F, Wang Z M, Yang H B, et al. Study of the temporal and spatial patterns of drought in the Yellow River basin based on SPEI[J]. *Scientia Sinica(Terrae)*, 2018,48(9):1169-1183.
- [16] 江樟焰, 陈云浩, 李京. 基于 Landsat TM 数据的北京市热岛研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2016, 31(2): 120-123.
- Jiang Z Y, Chen Y H, Li J. Heat island effect of Beijing based on Landsat TM data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2006, 31(2): 120-123.
- [17] 谭深, 吴炳方, 张鑫. 基于 Google Earth Engine 与多源遥感数据的海南水稻分类研究[J]. *地球信息科学学报*, 2019, 21(6): 937-947.
- Tan S, Wu B F, Zhang X. Mapping paddy rice in the Hainan province using both Google Earth Engine and remote sensing images[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2019,21:937-947.
- [18] Peng J, Pan Y, Liu Y, et al. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape[J]. *Habitat International*, 2018,71:110-124.
- [19] 魏雨涵, 钱建平, 范伟伟. 基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J]. *中国水土保持科学*, 2021, 19(1): 122-131.
- Wei Y H, Qian J P, Fan W W. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Lijiang River Basin based on RSEI[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021,19(1):122-131.
- [20] 王志超, 何新华. 基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(4): 492-500.
- Wang Z C, He X H. Assessments of ecological quality in Jinjiang district of Chengdu city using the FVC and RSEI models[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2021,37(4):492-500.
- [21] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897.
- Xu H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. *China Environmental Science*, 2013,33(5):889-897.
- [22] 程琳琳, 王振威, 田素锋, 等. 基于改进的遥感生态指数的北京市门头沟区生态环境质量评价[J]. *生态学报*, 2021, 40(4): 1177-1185.
- Chen L L, Wang Z W, Tian S F, et al. Evaluation of eco-environmental quality in Mentougou District of Beijing based on improved remote sensing ecological index[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021,40(4):1177-1185.
- [23] 杨江燕, 吴田, 潘肖燕, 等. 基于遥感生态指数的雄安新区生态质量评估[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 277-284.
- Yang J Y, Wu T, Pan X Y, et al. Ecological quality assessment of Xiong an New Area based on remote sensing ecological index[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019,30(1):277-284.
- [24] Yang X, Meng F, Fu P, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the Eco-Environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019[J]. *Ecological Indicators*, 2021,131:108214.
- [25] Wu S, Gao X, Lei J, et al. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Arid Land*, 2022(1):14-33.

- graphical direction-based approach for capturing the local variation of urban expansion in the application of CA-Markov model[J]. *Cities*, 2019,93(10):120-135.
- [20] Rimal B, Keshkar H, Sharma R, et al. Simulating urban expansion in a rapidly changing landscape in eastern Tarai, Nepal[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019,191:1-14.
- [21] Ramli, Firuz M, Aburas, et al. Improving the capability of an integrated CA-Markov model to simulate spatio-temporal urban growth trends using an Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017,59:65-78.
- [22] Tang F, Fu M, Wang L, et al. Land-use change in Changli County, China: Predicting its spatio-temporal evolution in habitat quality[J]. *Ecological Indicators*, 2020,117:106719.
- [23] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].*地理学报*,2020,75(1):160-178.
- Zhang X R, Zhou J, Li M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020,75(1):160-178.
- [24] 杨述河,闫海利,郭丽英.北方农牧交错带土地利用变化及其生态环境效应:以陕北榆林市为例[J].*地理科学进展*,2004,23(6):49-55.
- Yang S H, Yan H L, Guo L Y. The land use change and its eco-environmental effects in transitional agro-pastoral region: A case study of Yulin City in Northern Shanxi province[J]. *Progress in Geography*, 2004,23(6):49-55.
- [25] Sang L, Zhang C, Yang J, et al. Simulation of land use spatial pattern of towns and villages based on CA-Markov model[J]. *Elsevier Science Publishers B V*, 2011,54(3):938-943.
- [26] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, et al. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides [J]. *Nature nanotechnology*, 2012,7(11):699-712.
- [27] Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2004,5(1):29-39.
- [28] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging [J]. *Catena*, 2014,113(2):56-69.
- [29] 吕霜霜.三峡库区土地利用变化及生态服务价值研究[D].重庆:西南大学,2019.
- Lv S S. Study on land use change and ecological service value in the Three gorges reservoir area [D]. Chongqing:Southwest University, 2019.
- [30] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*,2022,77(3):534-546.
- Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorialspace: An analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022,77(3):534-546.

(上接第 362 页)

- [26] 徐建华.计量地理学[M].2 版.北京:高等教育出版社,2014.
- Xu J H. Quantitative geography[M]. Second Edition. Beijing: Higher Education Press, 2014.
- [27] Kengdall M G. Rank correlation methods[M]. England: Hafner. Oxford, 1955:1-8.
- [28] 成方妍,刘世梁,张月秋,等.基于 MODIS 序列的北京市土地利用变化对净初级生产力的影响[J].*生态学报*,2017,37(18):5924-5934.
- Chen F Y, Liu S L, Zhang Y Q, et al. Effects of land-use change on net primary productivity in Beijing based on the MODIS series[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(18):5924-5934.
- [29] 董欣,刘鹏程.基于 GEE 的土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究:以京津冀地区为例[J].*华中师范大学学报:自然科学版*,2020,54(4):670-678.
- Dong X, Liu P C. Impacts study of GEE-based land use changes on Ecosystem Service Value (ESV): take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as an example [J]. *Journal of Central China Normal University: Natural Sciences*, 2020,54(4):670-678.