气候变化和人类活动对南京主城区植被覆盖变化的影响*

刘 鸣 李志朋 李 艳

南京工业大学建筑学院 南京 211816

摘要：【目的】探讨近 20 年快速城市化进程中，气候变化与人类活动对南京主城区植被覆盖的影响及各自贡献率的大小，为城市植被科学规划和管理提供参考依据。【方法】以南京主城区为研究范围，构建气候因子和归一化植被指数（NDVI）之间的线性回归模型以量化近 20 年（2000—2020 年）气候变化对 NDVI 的影响，采用残差分析计算人类活动的影响，通过趋势分析计算各自贡献率，以及利用相关性分析确定主要影响因子。【结果】南京主城区植被覆盖变化受气候变化和人类活动的共同影响，但人类活动的平均贡献率（65.4%）高于气候变化（34.6%），其中，人类活动以正向效应为主，建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积是最主要的正向驱动因子，而城区人口和市区 GDP 是主要的负向驱动因子；气候变化以负向效应为主，温度比降水与植被的相关性更高，极端气候事件具有明显负向作用。【结论】气候变化和人类活动共同影响南京主城区植被覆盖，人类活动的作用与贡献高于气候变化。因此，气候变化对城市植被的负面影响不容忽视；城市更新和植被恢复等人类活动对城市绿地管理措施的制定应重视建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积等绿化指标的提升。

关键词：城市扩张；城市更新；城市绿地；NDVI

DOI：10.12169/zgcsly.2025.02.12.0001

Impacts of Climate Change and Human Activities on Vegetation Cover Changes in Core Area of Nanjing City

Liu Ming Li Zhipeng Li Yan

(College of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: 【Objective】 This study is to discuss the impact of climate change and human activities on vegetation cover in the core area of Nanjing City during the rapid urbanization process in the past 20 years, and determine their respective contribution rates, which would provide references for the science-based planning and management of urban vegetation. 【Method】 A linear regression model between climatic factors and normalized difference vegetation index (NDVI) is constructed to quantify the impact of climate change on NDVI in the past 20 years (2000-2020) in the core area of Nanjing. The impact of human activities is calculated by residual analysis. The respective contribution rates are calculated by the trend analysis, and the main influencing factors are determined by the correlation analysis. 【Result】 The vegetation cover change in the core area of Nanjing is jointly affected by climate change and human activities, but the average contribution rate of human activities (65.4%) is higher than that of climate change (34.6%). Human activities have positive effects, and the green coverage rate of built-up areas

收稿日期：2025-02-12

* 基金项目：高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室开放课题（20220111）；南京市绿化园林局专项资金（JSCXFW2022-06-1）

第一作者：刘鸣（1984- ），男，博士，副研究员，研究方向为园林植物生态与应用。E-mail：mingliu@njtech.edu.cn

通信作者：李艳（1987- ），女，博士，讲师，研究方向为景观规划和生态遥感。E-mail：202110006937@njtech.edu.cn

and per capita public green space area are the main positive driving factors, while urban population and urban GDP are the main negative driving factors. Climate change has a negative effect. Temperature is more correlated with vegetation than precipitation, and extreme climate events have a significant negative role.【Conclusion】 Climate change and human activities impact the vegetation cover in the core area of Nanjing, while human activities have a higher effect and contribution than climate change. Hence, the negative effect of climate change on urban vegetation cannot be ignored. The formulation of urban green space management measures for human activities such as urban renewal and vegetation restoration should focus on improving greening indicators such as green coverage rate in built-up areas and per capita public green space area.

Keywords: urban expansion; urban renewal; urban green space; NDVI

城市植被在缓解气候变化冲击中发挥着不可替代的调节功能，如降低城市热岛效应、调节和改善小气候、保护和维持城市生物多样性等[1]。然而，城市植被覆盖的变化受到气候和人类活动等多种因素的影响。近年来，探讨城市植被覆盖对气候变化和人类活动的响应研究越来越受到关注[2]。但是，气候变化和人类活动究竟在多大程度上以何种方式对城市植被产生了怎样的影响，其中的诸多问题仍然值得探讨。因此，在气候变化背景下，开展城市尺度的绿地植被变化驱动力研究对于城市更新以及绿地管理政策的制定具有指导意义。

气候变化对城市植被的影响很容易被明显的感知和观察。气候变暖和城市增温，以及城区降水模式的改变会直接影响城市植被的物候期波动，以致植物群落结构发生变化[2-3]。但是，在不同区域尺度上，植被对气候因子（气温和降水为主）的响应也存在较大差异[4]。例如，在北方暖温带地区，气温显著影响着植物物候的变化，而在干旱、半干旱地区，降水则是主要的影响因子[5]。

城市植被受人类活动的影响也不可忽视，主要以人为对绿地植被的改造和更新活动为主。在城镇化程度较低干扰的地区，自然植被受气候因素的调节更为显著。而在快速城市化进程中，城市植被覆盖变化则受气候变化和人类活动的共同影响。城市扩张对周边土地的侵蚀会直接导致城郊原有植被的破坏和减少，而气候变化主导的极端气候事件则有可能加剧人为活动干扰的负效应强度[6-7]。相反，城市绿地建设与生态修复等人类活动则会对城市植被覆盖产生正向的恢复作用[8-9]。

南京是中国东部地区重要的中心城市、全国重要的科研教育基地和综合交通枢纽，是长江三角洲特大城市，城市气候特征显著。南京城区植被绿化水平居全国前列，幕府山、狮子山、清凉山、鸡笼山等环峙城区，秦淮河、玄武湖、莫愁湖等星罗棋布，造就了独特的“山水城林”景观特征。近年来，气候变化与人类活动都对南京主城区的植被覆盖产生了重大影响[10]。为探讨气候变化和人为活动这两种驱动力各自的贡献率，以及主要的影响因子，本文以南京主城区为研究范围，分析其近20年（2000—2020年）植被覆盖的变化特征，以期为城市植被科学规划和管理提供参考依据。

1 研究区概况

南京中心城区辖鼓楼、建邺、栖霞、秦淮、玄武、雨花台等11个区，人口稠密，常住人口942.34万；属北亚热带湿润气候，四季分明，雨水充沛，春秋短、冬夏长，年温差较大。冬季常年以东北风为主，1月平均气温2.7 ℃；夏季以东南风为主，7月平均气温28.1 ℃。降水日数113.7 d，年均降水量1 090.4 mm。主要气候事件包括寒潮、强对流、高温、暴雨、旱涝、冰雹、台风等。本文选择南京主城区6个行政区（鼓楼、建邺、栖霞、秦淮、玄武、雨花台）为研究范围。

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

气候数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所（https://www.resdc.cn/）“中国气象要素年度空间插值数据集（1960—2021年）”。该数据集是基于全国2 400多个站点的气象要素站点日观测数据，在计算各气象要素年值的基础上，

由 Anuspl 插值软件生成的 1960—2021 年年际气象要素 1 km 栅格数据集。

归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）已被广泛应用于衡量城市植被覆盖和生长状况的动态监测。NDVI 数据来源于中国科学院生态科学数据中心（https://www.casdc.cn/）“2000—2020 年中国 30 m 年最大 NDVI 数据集”。该数据集利用 Google Earh Engine 云计算平台对 Landsat 系列遥感卫星影像进行处理，包括云影去除和条带错位修复（Landsat5 和 Landsat7 利用 B4 和 B3 波段计算，Landsat8 和 Landsat9 NDVI 利用 B5 和 B4 波段计算），合成 2000—2020 年最大 NDVI 值，以反映植被在每年中的最佳状况。按 NDVI 分类等级将植被覆盖分为低植被覆盖区（<0.3）、中植被覆盖区［0.3，0.6）和高植被覆盖区（≥0.6）3 类。

数据预处理包括对气候数据和 NDVI 数据采取格式转换、坐标转换、数据裁剪，以及统一重采样为 30 m 分辨率等，得到 2000—2020 年南京市主城区植被逐年 NDVI、年平均气温（℃）和年降水量（mm）数据[11-12]。

2.2　趋势分析

采用一元线性回归方法计算植被 NDVI 的年际变化趋势[6, 13-15]，斜率定义为 NDVI 的年际变化趋势率（*slope*），计算公式如下：

$$slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^{n}(iNDVI_i) - \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} NDVI_i}{n \times \sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2} \quad (1)$$

式（1）中：*slope* 为拟合的回归方程斜率；i 为某年；n 为总年数。若 *slope* 为正值，则指示为增长趋势，若为负值则为下降趋势。*slope* 绝对值越大，表明变化越快。

2.3　多元回归残差分析

采用多元回归残差分析方法量化气候变化和人类活动对主城区 NDVI 的影响[6,10,13-15]。残差分析是常见的量化且分离气候变化和人类活动对城市植被覆盖影响的方法[6,11]。该方法通过建立气候因子与植被响应之间的关系进行建模预测，从而将人类活动对植被的影响剥离开来，一定程度上可以解释和估算人类活动对植被的影响。建立气候因子（年均气温 T 和年降水量 P）和 NDVI 观测值（$NDVI_{obs}$）之间的线性回归模型，以 NDVI 预测值（$NDVI_{CC}$）来量化气候变化对 NDVI 的影响，而预测值与观测值之间的差值，即 NDVI 残差（$NDVI_{HA}$），用来指示人类活动对植被 NDVI 的影响。计算公式如下：

$$NDVI_{CC} = a \times T + b \times P + c \quad (2)$$

$$NDVI_{HA} = NDVI_{obs} - NDVI_{CC} \quad (3)$$

式（2）~（3）中：$NDVI_{CC}$、$NDVI_{HA}$ 和 $NDVI_{obs}$ 分别为 NDVI 预测值、NDVI 残差和 NDVI 观测值（无量纲）；a、b 和 c 为参数；T 和 P 分别为年均气温（℃）和降水量（mm）。

2.4　贡献率分析

按表 1 和表 2 计算气候变化与人类活动对植被 NDVI 的贡献率。

表 1　气候变化与人类活动对植被的影响分级

slope（$NDVI_{CC}$）/slope（$NDVI_{HA}$）	影响程度
<-2.0	明显抑制
-2.0<-1.0	中度抑制
-1.0<-0.2	轻微抑制
-0.2<0.2	基本不变
0.2<1	轻微促进
1.0<2.0	中度促进
>2.0	明显促进

表 2　植被变化驱动因素评价标准与贡献率计算方法

观测值趋势率 slope($NDVI_{obs}$)	驱动因素	驱动因素的划分标准		驱动因素的贡献率/%	
		拟合值趋势率 slope($NDVI_{cc}$)	残差趋势率 slope($NDVI_{cc}$)	气候变化	人类活动
>0	CC & HA	>0	>0	$\frac{slope(NDVI_{CC})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
	CC	>0	<0	100	0
	HA	<0	>0	0	100
<0	CC & HA	<0	<0	$\frac{slope(NDVI_{CC})}{slope(NDVI_{obs})}$	$\frac{slope(NDVI_{HA})}{slope(NDVI_{obs})}$
	CC	<0	>0	100	0
	HA	>0	<0	0	100

2.5 影响因子分析

通过计算气候因子和人类活动指标与 NDVI 的皮尔逊相关系数和多元线性回归（标准化系数）分析主要的影响因子。气候因子包括年际气温和降水量。人类活动指标从《南京统计年鉴（2001—2021）》中提取与主城区植被相关的 10 个指标，包括城区人口（万人）、市区国内生产总值（亿元）、绿化覆盖面积（hm^2）、建成区绿化覆盖面积（hm^2）、园林绿地面积（hm^2）、公园绿地面积（hm^2）、公园个数、公园面积（hm^2）、建成区绿地覆盖率（%）、人均公共绿地面积（m^2）。

3 结果与分析

3.1 气候变化

近 20 年南京年均气温逐渐上升，尤其是自 2017 年以来，年均气温均超过 17.0 ℃；年降水量总体上也呈现上升趋势，但具有较大波动，2019 年的年降水量为 721.8 mm，在近 20 年中居于最低水平（图 1A）。

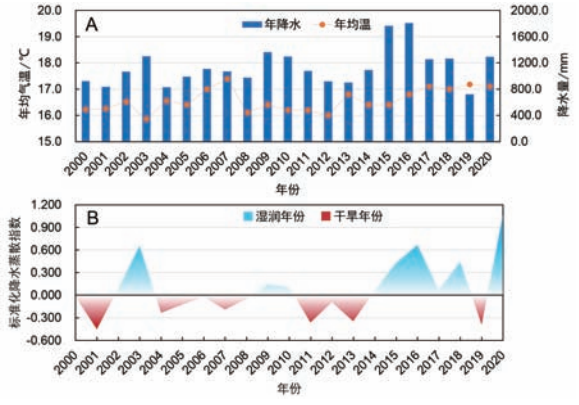


图 1 2000—2020 年南京温度和降水变化

标准化降水蒸散指数显示，近 20 年南京出现了相对干旱的年份，其中，2001 年为最干旱年，其次是 2019 年；连续干旱的年份分别为 2000—2001 年、2004—2008 年、2011—2013 年，以 2011—2013 年的干旱较为严重，持续时间较长，对植被覆盖可能会产生不利的影响（图 1B）。

3.2 NDVI 时间变化特征

近 20 年南京主城区的植被 NDVI 呈波浪状波动，总体为下降趋势（图 2）。大致上可分为 3 个时期：1）缓慢下降期（2000—2012 年），主城区植被 NDVI 总体呈缓慢下降的趋势；2）逐步上升期（2013—2018 年），NDVI 逐年增长；3）陡然下降期（2019—2020 年），2019 年主城区植被 NDVI 值均值陡然下降至 0.285，为近 20 年最低，2020 年略上升至 0.304。

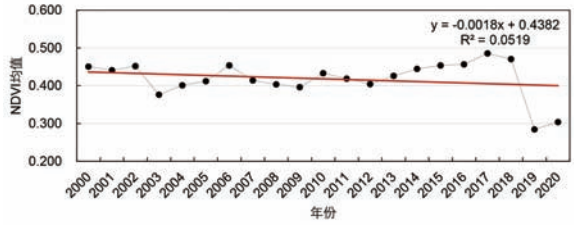


图 2 2000—2020 年南京主城区植被 NDVI 均值的年际变化

3.3 NDVI 空间变化特征

由图 3A 可知，在空间分布上，高植被覆盖区主要以城区绿地植被、城外山林植被和农田植被组成。其中，城区绿地植被主要包括城东钟山—玄武湖景区、城南雨花台风景区、城西清凉山—狮子山风景区和城北沿江幕燕风景区；城外山林植被主要为东部栖霞山—汤山风景区和南部将军山—牛首山风景区。农田植被主要有东部栖霞农田片区和北部八卦洲农田片区。

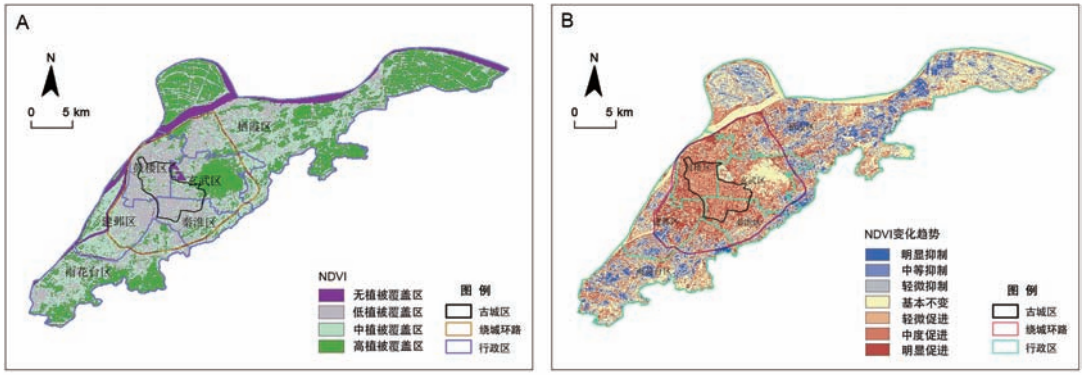


图 3 2000—2020 年南京主城区植被与变化趋势

由图 3B 可知，在变化趋势上，主城区内的植被变化呈增加的趋势，说明近年来南京主城区的绿地植被得到明显的改善和增强；而城郊区域的植被变化呈下降的趋势，说明城区扩张对城市边际植被的侵蚀状况日益加剧。城区内以紫金山为主体的大型绿地植被斑块变化趋势基本未有明显变化，说明长期以来对紫金山植被的保护和管理是富有成效的。

在气候变化影响的 NDVI 空间分布上，主城区南部高于北部（图 4A）。在变化趋势上，气候变化对主城区南部的植被以正向的促进作用为主，而对北部植被以负向的抑制作用为主（图 4B）。

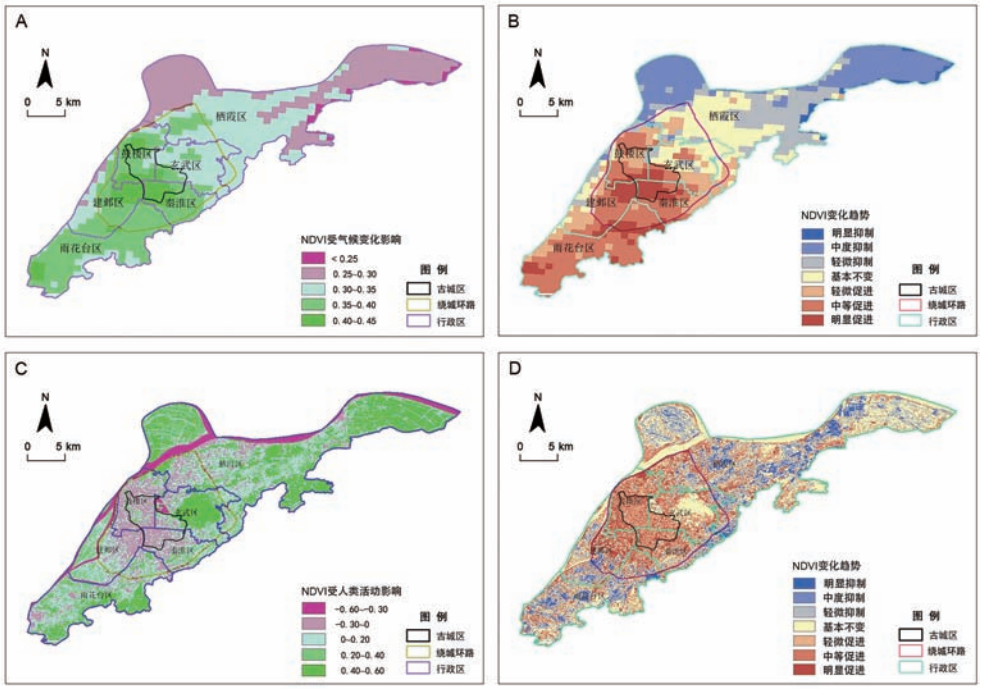


图 4　2000—2020 年南京主城区植被受人类活动与气候变化的影响

在人类活动影响下的 NDVI 空间分布上，建成区的植被总体处于低覆盖度水平，然而，老城区西部和东部、玄武湖诸岛，以及与钟山风景区连接的公园绿地的植被处于中、高覆盖度水平（图 4C）。在变化趋势上，主城区的植被在人类活动影响下具有正向增加的趋势，说明城区老公园绿地中的植被得到了很好的保护和维持（图 4D）。尽管如此，主城区周边的绿地则呈现明显的减弱和抑制趋势，说明城区的扩张对建邺区河西、雨花台区南部山林，以及栖霞区仙林大学城等周边原生植被具有负向影响。

3.4　贡献率

由图 5 可知，气候变化对南京主城区植被 NDVI 的平均贡献率为 34.6%，其中，正向贡献率为 5.6%，负向贡献率为 29.0%；而人类活动的平均贡献率为 65.4%，其中，正向贡献率为 39.4%，负向贡献率为 26.0%。按各行政区分析，气候变化正向贡献率最大的是玄武区（6.0%），其他行政区贡献率不超过 3.0%；气候变化负向贡献率最大的是栖霞区（43.3%），最小的是鼓楼区（20.8%）。人类活动正向贡献率差异较大，最高的是鼓楼区（74.2%），最低是栖霞区（23.5%）；人类活动负向贡献率最高的是雨花台区（34.6%），最低的是鼓楼区（4.2%）。

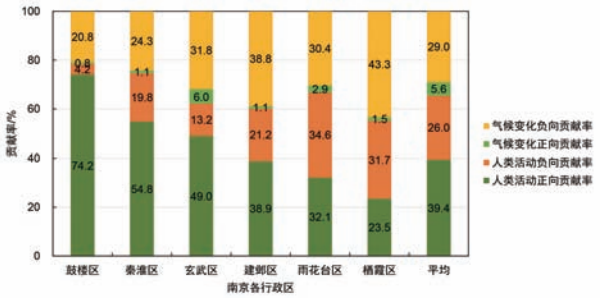


图 5　气候变化与人类活动对南京主城区各区植被变化的贡献率

3.5　主要影响因子

从气候因子对南京主城区植被的预测模型上分析，温度（$R = 0.351$，$P < 0.05$）和降水（$R =$

0.297，$P<0.05$）都与 NDVI 具有显著正相关关系，且温度与植被的相关性更加密切。

由图 6 可知，在人类活动指标中，建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积与各行政区 NDVI 呈显著性正相关关系，且相关系数较高，是最主要的正向驱动因子。相反，城区人口和市区 GDP 与各行政区 NDVI 呈显著性负相关关系，是最主要的负向驱动因子，说明城市扩张、人口增长和经济开发对植被覆盖的抑制作用。其中，秦淮区和雨花台区的城区人口对 NDVI 的负相关性最强，这可能与老城区人口密集、绿地空间受限有关；而栖霞区人口影响最小，这可能与区域面积较大且自然植被保留较多有关。

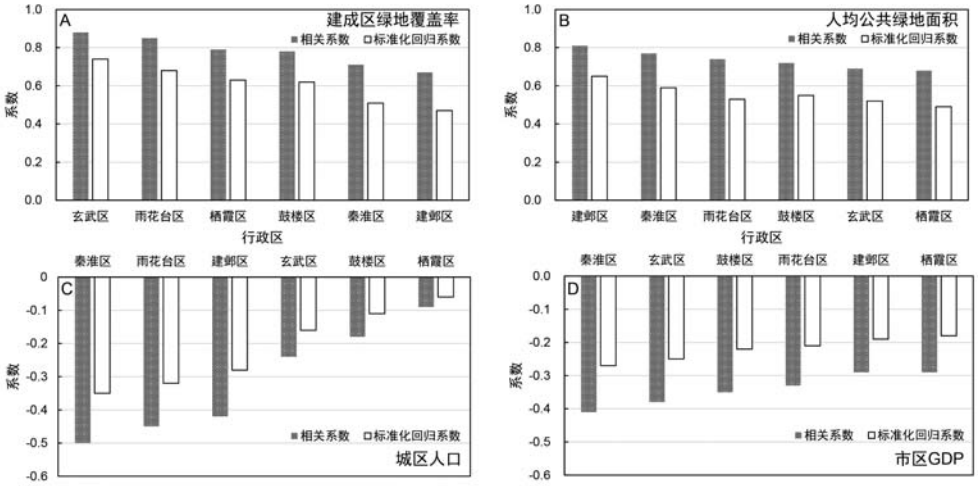


图 6 人类活动对南京主城区植被变化的主要影响因子

4 讨论

虽然城市植被变化受气候变化和人类活动的共同影响，但气候变化和人类活动对植被的正向和负向作用存在明显差异性[6-7]。关于植被对气候因子的响应，有研究认为，我国东部地区植被在生长季受降水状况的影响较大[5,13]。年降水量是驱动植被变化的主要因子[4,16]。但也有研究认为，气温对 NDVI 的影响高于降水[10,12]。本研究结果显示，南京主城区 NDVI 与气温为正相关关系，且通过了显著性检验，而降水与 NDVI 的相关性相对较弱。造成差异结果的原因，可能与研究区域的尺度大小相关，具体原因还需要做进一步研究来证实。

近些年，人类活动对植被恢复的促进作用愈发显著，且远高于气候变化的影响[4,6]。有研究报道，南京都市圈中人类活动对 NDVI 的正向促进作用进作用高于负向抑制作用[10]。这些结果与本文的研究结果相一致。本研究结果也显示，人类活动的正向贡献率（39.4%）高于负向贡献率（26.0%）。建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积可指示人类活动对城市植被覆盖的正向效应。相反，城区人口和市区 GDP 指示负向效应。

一方面，鼓楼区、玄武区和秦淮区等老城区的植被变化在 2010—2018 年呈逐年上升趋势，其主要贡献归功于城市绿地规划与建设，即人类活动的正向作用。在这段时期，紫金山、雨花台、幕府山—燕子矶、狮子山等风景区植被的保育恢复，加之老城区公共绿地的开辟与新健，以及明城墙护城河游憩绿带和外环线（沿江、秦淮河、快速路）绿带的更新扩展都对南京主城区的植被具有正向的促进和改善作用[8-9]。虽然南京经历了快速城市化的城区面积扩张，原有城市植被在这些以人类活动为主导的城市绿地更新过程中，重新得到了恢复和增强[17]。另一方面，主城区外围的城市扩张，例如，栖霞区新港区域和建邺区河西地区的开发建设，导致城区植被变化呈逐年下降的趋势[18-19]。本文结果也证实，城郊植被变化在城市扩张期，以受侵蚀和破坏为最显著的变化特征[5,20]。

值得关注的是，南京主城区内有面积较大的城市山林和水体植被斑块，诸如紫金山与玄武湖，

由于多年来的保育政策有效实施，其 NDVI 的变化趋势较为恒定，无论是对人类活动，还是气候变化的响应都比较弱，这间接证实了大型绿地植被斑块具有明显的缓冲与调节气候变化的功能[19]。

虽然多元回归残差分析方法可在一定程度上用于分析气候和人类活动对 NDVI 的影响研究，但其本身也存在一定的局限性。首先，城市植被覆盖变化受多种因素的共同影响，气候因素不仅有气温和降水，还有极端气候事件的干扰[6]。其次，NDVI 与多种气候要素具有复杂的非线性关系，但采用线性拟合的不同模型具有一定的不确定性和随机性，可能会导致气候和人类的贡献率估算产生或高或低的偏差[6]。再次，植被覆盖对气候响应产生的滞后效应考虑不足。以上问题都需做进一步的探讨[12]。

5　结论

综上所述，在近 20 年间，气候变化和人类活动共同影响南京主城区植被覆盖，人类活动的作用与贡献高于气候变化。建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积可指示人类活动对城市植被覆盖的正向效应；相反，城区人口和市区 GDP 指示负向效应。近年来，以干旱为主导的极端气候事件对南京主城区的植被变化具有明显负向作用，应引起园林绿化主管部门的高度重视，制定相应的应对气候变化对策；城市更新和植被恢复等人类活动对城市绿地管理措施的制定应重视建成区绿地覆盖率和人均公共绿地面积等绿化指标的提升。

参考文献

[1] LIU M, PIETZARKA U, MEYER M, et al. Annual shoot length of temperate broadleaf species responses to drought [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2022, 73: 127592.

[2] 冯娴慧，曾芝琳，张德顺. 基于 MODIS NDVI 数据的粤港澳大湾区植被覆盖时空演变[J]. 中国城市林业，2022，20(1)：1-6，28.

[3] 刘鸣，乌尔里希·皮特扎卡，安德烈亚斯·罗洛夫等. 不同生境中多树种生长对干旱胁迫的敏感性评价：以德国萨克森州为例[J]. 林业科学，2023，59(11)：12-22.

[4] 兰梦瑶，周德志，关颖慧. 延安市归一化植被指数时空变化及其驱动因素[J]. 浙江农林大学学报，2024，41(6)：1293-1302.

[5] LIU M, ZHANG D S, PIETZARKA U, et al. Assessing the adaptability of urban tree species to climate change impacts: a case study in Shanghai [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 62: 127186.

[6] 金凯，王飞，韩剑桥，等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报，2020，75(5)：961-974.

[7] 王涛，李贝贝，裴春营. 植被 NDVI 对城市扩展及气候变化的响应：以西安及其附近区域为例[J]. 干旱区地理，2017，40(2)：388-396.

[8] 邵大伟，吴殿鸣. 1979—2017 年城市公园绿地空间布局的分形演化特征：以南京为例[J]. 风景园林，2021，28(3)：113-120.

[9] 邵大伟，吴殿鸣. 城市功能空间对绿地格局作用效应的地理探测：以南京为例[J]. 中国园林，2021，37(9)：31-35.

[10] CHEN S L, ZHU Z H, YANG L, et al. Vegetation cover variations associated with climate change and human activities in Nanjing metropolitan area of China [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(13): 38535-38549.

[11] 俞文政，周雅文，魏柱灯，等. 青海高原温性草原对气候变化和人类活动响应动态机制研究[J]. 地理研究，2024，43(8)：1941-1957.

[12] 殷菲，白冰，黄鹏程，等. 气候和人类活动对黄河干流甘肃段 NDVI 变化的影响[J]. 干旱气象，2024，42(6)：934-943.

[13] 赵倩倩，张京朋，赵天保，等. 2000 年以来中国区域植被变化及其对气候变化的响应[J]. 高原气象，2021，40(2)：292-301.

[14] 刘阳，周忠发，闫利会. 2001—2018 年贵州省 NDVI 时空演变及其对气候变化和人类活动的响应[J]. 水土保持通报，2021，41(1)：327-336.

[15] HOU P, WANG Q, CAO G Z, et al. Sensitivity analyses of different vegetations responding to climate change in inland river basin of China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2012, 22(3): 387-406.

[16] 毛德华，王宗明，宋开山，等. 东北多年冻土区植被 NDVI 变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J]. 中国环境科学，2011，31(2)：283-292.

[17] 邵大伟，吴殿鸣. 基于景观指数的南京主城区绿色空间演变特征研究[J]. 中国园林，2016，32(2)：103-107.

[18] 乔伟峰，毛广雄，王亚华，等. 近 32 年来南京城市扩展与土地利用演变研究[J]. 地球信息科学学报，2016，18(2)：200-209.

[19] 丁海勇，史恒畅. 基于 Landsat 数据的城市热岛变化分析：以南京市为例[J]. 安全与环境学报，2018，18(5)：2033-2044.

[20] 佟光臣，林杰，陈杭，等. 1986—2013 年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析[J]. 水土保持研究，2017，24(2)：240-245.