

DOI: 10.20103/j.stxb.202309282105

周颖禧, 关艳炜, 曹 峥, 吴志峰, 俞方圆. 广东省城市化对植被生长的直接和间接影响. 生态学报, 2024, 44(16): 7063-7073.

Zhou Y X, Guan Y W, Cao Z, Wu Z F, Yu F Y. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth in Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(16): 7063-7073.

广东省城市化对植被生长的直接和间接影响

周颖禧, 关艳炜, 曹 峥, 吴志峰, 俞方圆*

广州大学地理科学与遥感学院, 广州 510000

摘要: 全球城市化进程的不可逆及快速发展严重影响了城市植被的生长, 城市植被生长状况代表了区域生态环境的稳定性, 区分城市化对植被的直接影响和间接影响并进行定量的区域分析对深入理解城市化对植被生长的影响机制和推动区域绿色可持续发展有着重要意义。以广东省为研究对象, 基于 MODIS13A1 产品中增强型植被指数和不透水路面数据, 运用 slope 趋势分析和相关性分析等方法, 量化研究 2000—2018 年广东省这一区域尺度下城市化对植被生长的直接和间接影响。研究结果表明: (1) 2000—2018 年广东省植被生长状态较为稳定且随着时间的变化有所增强。(2) 广东省植被指数与城市化强度存在显著负相关关系; 在城市化过程中, 除了负面的直接影响, 还存在消极和积极的间接影响。(3) 间接影响的占比随着城市化强度的增加, 呈现出下降-上升-下降的趋势。积极的间接影响的占比最大值出现时, 城市化强度约达 0.9。可为广东省城市生态系统的可持续发展提供重要的数据积累和科学依据。

关键词: 植被生长; 直接和间接影响; 城市化; 增强型植被指数; slope 趋势分析

Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth in Guangdong Province

ZHOU Yingxi, GUAN Yanwei, CAO Zheng, WU Zhifeng, YU Fangyuan*

School of Geographic Science and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510000, China

Abstract: Urbanization drives global changes in land cover, biogeochemical cycles, climate, and ecosystems, with changes in urban environments considered as "detectors" of future global changes. Urban vegetation serves as a reliable indicator of the urban ecological environment. However, the irreversible and rapid development of global urbanization has significantly impacted urban vegetation growth. The growth status of urban vegetation reflects the stability of regional ecological environments. Distinguishing between the direct and indirect impacts of urbanization on vegetation and conducting quantitative regional analysis are crucial for a deeper understanding of the mechanisms by which urbanization affects vegetation growth and for promoting regional green sustainable development. To better understand the relationship between regional urbanization and vegetation growth, this study focuses on Guangdong Province. Using data from the MODIS13A1 product, including Enhanced Vegetation Index (EVI) and impervious surface data, and employing methods such as slope trend analysis and correlation analysis, the study quantifies the direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth in Guangdong Province from 2000 to 2018. The research findings are as follows: (1) Overall, vegetation growth in Guangdong Province remained relatively stable and showed enhancement over time from 2000 to 2018. Regions with decreased EVI were mainly concentrated in areas with urban impervious surfaces, indicating a negative impact of urbanization-induced pavement hardening on vegetation growth. (2) There was a significant negative correlation between

基金项目: 国家自然科学基金(41901060)

收稿日期: 2023-09-28; 网络出版日期: 2024-06-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yfy@gzhu.edu.cn

vegetation index and urbanization intensity in Guangdong Province, with a well-fitted cubic regression curve. Besides negative direct impacts, both negative and positive indirect impacts exist during urbanization. Notably, the positive indirect impacts of urbanization on vegetation growth are strengthened as urban development compensates for negative direct impacts. (3) The proportion of indirect impacts showed a trend of decrease-rise-decrease with the increase of urbanization intensity, with turning points at $\beta \approx 0.2$ and $\beta \approx 0.9$. When urbanization intensity reached approximately 0.7, indirect impacts shifted from negative to positive, and the proportion of positive indirect impacts reached its maximum when urbanization intensity was about 0.9. This study contributes to a deep understanding of the growth of urban vegetation in Guangdong Province and the impact of urban environments on vegetation growth. It provides important data accumulation and scientific basis for the sustainable development of urban ecosystems in Guangdong Province. The aim is to maximize the positive indirect impacts of urbanization on vegetation growth, promote long-term vegetation growth, alleviate environmental pressure caused by increasing impervious surfaces during urbanization, achieve coordinated land use and vegetation coverage in urban areas, and ultimately realize the green sustainable development of regional cities.

Key Words: vegetation growth; direct and indirect impact; urbanization; EVI; slope trend analysis

在城市化快速发展的过程中,大面积的自然覆盖转为人工覆盖,不透水表面不断增加,加速了城市自然景观破碎化,引发了一系列城市病,包括城市热岛变暖、二氧化氮浓度增加、城市空气污染、生物多样性下降和生态系统退化等,严重影响了城市居住环境质量以及城市可持续发展^[1-4]。城市化推动着世界范围的土地覆盖变化、生物地球化学循环、气候和生态系统的变化,而城市环境的变化,被认为是未来全球变化的“探测器”。植被作为陆地生态系统的主要组成部分,是陆地生态系统存在的基础条件^[5],城市植被能够很好地反映城市生态环境的状况,快速城市化已经对植被生长产生了显著而复杂的影响,而不同环境中的植被响应具有差异性。因此,理解城市植被的生长情况以及城市环境对植被生长的影响可以为快速城市化过程中植被生态保护提供有力的支撑,为积极应对日益加剧的全球变化和推动城市的可持续发展提供科学的参考依据^[6]。

城市环境的快速变化对植被的影响是复杂的,包括积极或消极的影响^[1]。一方面,城市化过程中的生活、工业建设会导致植被破坏、植被覆盖度下降^[7];另一方面,城市化过程中的更高的大气氮沉降、灌溉等又会对植被产生积极影响^[8-9]。前人的研究从时间和空间的角度出发,利用遥感数据对不同区域的植被生长变化及其影响因素展开了研究^[10-13],以了解区域植被的生长情况及对各环境因子的响应。早期的研究表明由于城市快速扩张初期带来的路面硬化等情况使植被在城市中面临着更大的环境压力,导致植被的生长速度严重减缓甚至退化,得出城市化会对植被生长产生负面影响^[7,10];之后部分研究从比较植被在城市与自然环境中生长速度差异^[14-15]、对比分析城区面积与植被数据^[16-18]等角度进行数据比较分析,证明了城市化除了抑制植被生长还可能会促进植被生长,存在正面影响,例如:都义娟^[17]选取了 2000—2015 年长时间序列中全国所有城市及 32 个中心城市为研究区域,对比城市扩张前后发现,虽整体植被指数呈下降趋势,但个别城市呈上升趋势。随着城市化对植被生长影响的研究逐步深入,有研究对城市化对植被时空动态的影响趋势^[19-20]展开分析,发现城市化对植被生长的影响是更为复杂的。城市环境中的建筑、道路等建设因素会导致城市不透水路面积增加,会直接影响植被的覆盖度并限制植被生长。同时,城市发展变化改变了植物栖息地的物理结构,出现阻碍种子传播、空气污染加重等现象间接影响植被生长^[21],这些间接影响因素使得城市中的植被生长面临更多的挑战。Huang B 等^[19]通过分析对比 1990—2015 年中国 48 个沿海城市植被的生长趋势与理论趋势之间的差异,得出大多数沿海地区城市化对植被产生了积极影响,这些积极的间接影响归因于植被的管理与恢复以及植被生长环境恶化与城市气候的平衡。为了应对城市植被生长的压力,区分并量化城市化对植被生长直接和间接影响具有迫切性和必要性,根据量化结果便于展开进一步精细化的城市规划与管理,营造更适宜植被生长的城市环境。量化城市化对植被生长的间接影响具有一定的挑战性,随着高精度卫星遥感被广泛应用于植被数据监测,2016 年赵淑清等^[22]建立了一个基于植被指数量化城市化对植被生长

的直接影响与间接影响的概念框架,这一框架为相关研究提供了参考,在不同的量化研究中均得出了不同城市化程度给植被生长带来不同程度的正面或负面影响的相关结论^[1-2,8,23],也证实了该框架具有适用性。但在现有研究中,大多选取一个或多个城市研究城市化对植被生长的直接影响,而量化区域性尺度城市化对植被生长的直接影响和间接影响的研究仍然较少。

广东省作为“一带一路”的建设枢纽,呈现出发展速度快、城市间发展不平衡等特点^[24],随着“一轴、多中心、集群式”城镇空间建设的逐步推进,广东省的生态问题成为广受关注的焦点^[25-26]。广东省具有明显的城市化以及植被生长变化的时空格局,但不同区域城市化对于植被生长的影响程度的差异性以及两者之间的关系还有待探究,因此,本研究以广东省作为区域性研究对象,主要研究以下问题:(1)分析广东省植被生长的时空变化;(2)量化评估城市化对广东省植被的直接和间接影响,旨在准确把握广东省植被覆盖的时空演变情况,深入理解区域内不同程度城市化与植被生长之间的关系,为广东省城市化与植被生长之间的协调发展提供数据支撑,推动广东省的生态文明建设。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

广东省(20°09'N—25°31'N、109°45'E—117°20'E)面积约为 17.9 万 km²。整体地势北高南低,北部地形以山地和高丘陵为主,南部为平原和台地(图 1)。位于东亚季风区,雨热同期,全省年平均气温 21.8℃,降水主要集中在 4—9 月,年平均降水量为 1789.3mm。植被类型以常绿阔叶林为主,还包括了北热带季雨林和热带红树林等^[27]。自改革开放以来,广东省城市群发展迅速,截止 2021 年广东省城镇化率已达到 74.63%,远高于全国平均水平,由于区域自然条件和经济社会资源方面的差异,珠三角地区与东翼、西翼、山区间存在城市发展不平衡的问题^[28]。

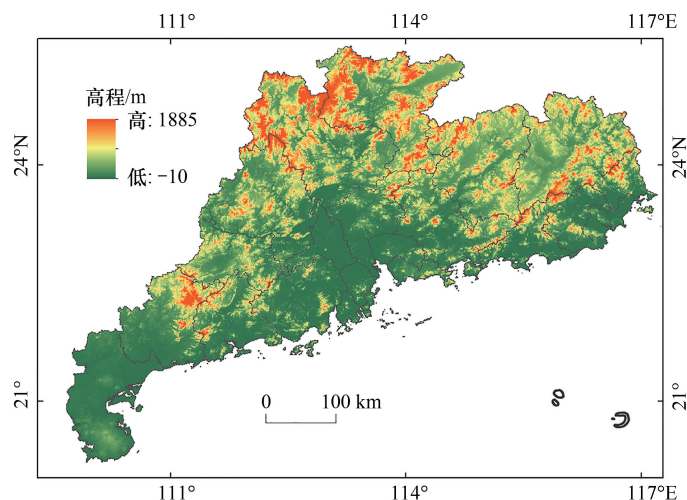


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源及预处理

1.2.1 增强型植被指数数据

增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)已被广泛用于代表植被的生长状况,数据来源为美国航空航天局 NASA 数据共享平台(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov>)的 MODIS13A1 数据,空间分辨率为 500m,时间分辨率为 16d。数据选取时间范围为 2000—2018 年植被生长季(4 月—10 月)。在数据订单预处理中,对植被数据进行拼接以及投影等设置,最终输出为 EVI 栅格数据。采用最大值合成法(Maximum Value

Composite, MVC)得到 EVI 月数据集,通过植被指数月数据(去除无效值),计算得出年均 EVI 数据集,其中 EVI 表达式(1)如下:

$$EVI = 2.5 \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + 6\rho_{RED} - 7.5\rho_{BLUE} + 1} \quad (1)$$

式中, ρ 是经过大气校正或部分大气校正的表面反射率,NIR 为近红外、RED 为红光、BLUE 为蓝光。

1.2.2 不透水面数据

本研究采取单位网格中不透水像元占比来量化城市化强度,基于全球人造不透水面的全球城市边界制图通过卫星影像记录绘制的 1985—2018 年 30m 不透水面数据(<http://data.ess.tsinghua.edu.cn/gaia.html>),对数据进行拼接、掩膜提取,获取广东省城市不透水路面数据^[29],建立公里格网,使每个像元被赋予 UID,对 2000—2018 年不透水路面数据(Global Artificial Impervious Area, GAIA)进行区域统计。

2 研究方法

2.1 趋势分析法

一元线性回归方程斜率用于代表每个栅格像元的时间变化趋势。栅格斜率变化计算如式(2)。

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n (i \times \overline{EVI}_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n \overline{EVI}_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中,slope 表示广东省植被生长季 EVI 的变化斜率; i 为年序; n 为年跨度; $\overline{EVI}_i$ 为第 i 年植被生长季 EVI 的平均值。Slope>0 表示区域内植被覆盖面积扩大,EVI 多年变化趋势增加;Slope<0 则反之;Slope=0 表示 EVI 在时间序列中保持不变。

2.2 相关分析法

相关分析法用于研究各个变量之间的相互关系,可以评估不同变量之间的响应程度。本研究采用 Person 相关系数进行计算。若 R 通过了 $P=0.05$ 的显著性检验,则是发生显著性变化。一般按照 R 的绝对值大小进行划分,0—0.2 为极弱相关、0.2—0.4 为弱相关、0.4—0.6 为中等程度相关、0.6—0.8 为强相关、0.8—1 为极强相关。

2.3 量化城市化对 EVI 影响

根据赵淑清等^[22]定义的概念框架,将城市化对植被生长的影响量化为直接影响和间接影响。其中,直接影响体现为不透水路面替代自然地表的过程;间接影响是指城市化过程中城市环境变化给植被生长带来的影响。本研究将研究区域进行公里网格化,进行研究计算。实际观测到的 EVI 值,可以用下式(3)表示:

$$V_{\text{obs}} = (1 + \omega) (1 - \beta) V_v + \beta V_{nv} \quad (3)$$

式中, V_{obs} 为实际观测像素的 VI 值; ω 为城市化对 VI 的整体影响; β 为该像元的城市化强度(定义为城市不透水路面占该像元的比例); V_v 为背景植被指数(未受城市化影响, $\beta=0$, $VI=V_v$), V_v 由当年城市化强度为 0 的所有 EVI 像元均值确定; V_{nv} 为不透水路面填充像素的 EVI(完全城市化, $\beta=1$, $VI=V_{nv}$),受到数据统计的影响,本文的 V_{nv} 选取当年数据 β 近似 1 的 EVI 最小值进行统计。

$$V_{zi} = (1 - \beta) V_v + \beta V_{nv} \quad (4)$$

式(4)为零影响线表达式,仅受城市化强度变化因素的影响。其中 V_{zi} 为理论 VI,由背景植被指数 V_v 和不透水路面指数 V_{nv} 定义。

城市化对于 VI 的整体影响包括了直接影响(ω_d)和间接影响(ω_i),其中,直接影响始终是负面的,可表示为式(5):

$$\omega_d = \frac{V_{zi} - V_v}{V_v} \times 100\% \quad (5)$$

间接影响(ω_i)可以通过实际观测像素的 VI 值(V_{obs})和零影响线的理论 VI 值(V_{zi})来进行衡量,如式(6):

$$\omega_i = \frac{V_{obs} - V_{zi}}{V_{zi}} \times 100\% \quad (6)$$

为了更好表示 VI 与 β 之间的关系,本研究采用三次多项式模型来拟合 VI - β 曲线: $y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$, 其中 y 表示 V_{obs} , x 表示 β 。该模型能够更加贴合地捕获 VI - β 之间的关系。通过该研究框架展开研究,可以将直接影响和间接影响进行量化,为城市化对植被生长的影响机制提供数据支撑。

3 结果与分析

3.1 广东省植被 EVI 时空变化

整体来看,广东省植被 EVI 值相对较高,植被覆盖情况较为良好。从 2000、2005、2010、2015 和 2018 年植被 EVI 均值分布(图 2)可以看出研究区域中植被 EVI 年均值分布存在明显空间差异性,广东省粤北、粤西等丘陵地区 EVI 均值相对较高,大部分在 0.6 及以上;珠江三角洲地区及部分沿海地区植被 EVI 均值出现负值,植被覆盖情况相对较差。

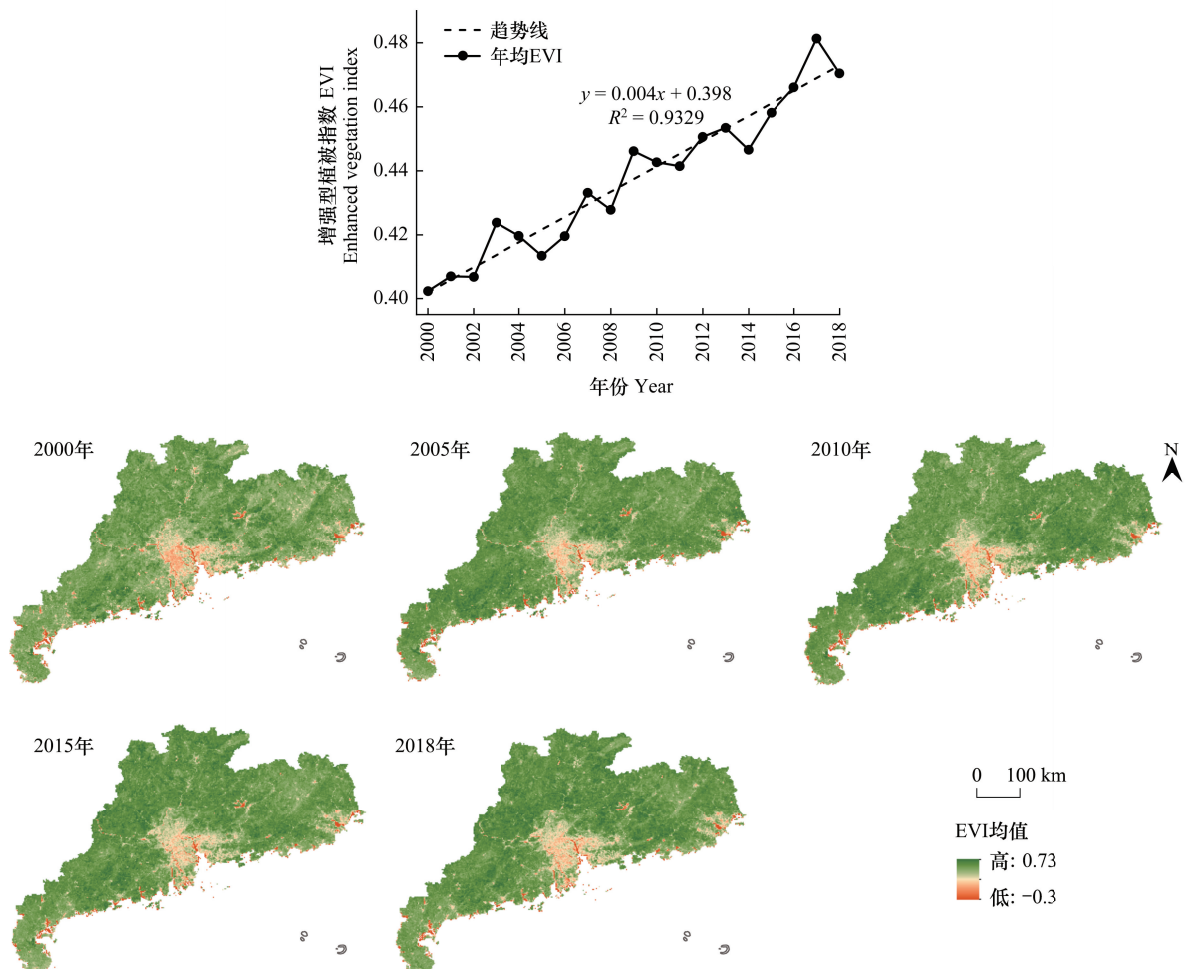


图 2 2000—2018 年广东省植被生长季 EVI 时空变化

Fig.2 Temporal and spatial changes of EVI during the vegetation growth season in Guangdong Province from 2000 to 2018

2000—2018 年广东省植被生长季年均 EVI 变化范围为 0.40—0.48(图 2),多年平均值为 0.44;根据变化趋势折线图中数据显示,2000—2018 年广东省植被指数呈现波动上升的趋势,植被覆盖情况由低向高转变,

表明广东省植被生态结构持续性改善。广东省 EVI 年均值由 2000 年的 0.40 增加至 2017 年的 0.48,2018 年轻微回落至 0.47,年均增长速率达到了 0.40%,且与时间的相关性高达 0.93,表明对着时间的推移,广东省植被状况以及覆盖范围有一定程度的改善。

广东省植被 EVI 的空间变化趋势的 slope 斜率范围为-0.028 至 0.021,将变化趋势划分为了五个级别(表 1)。结合图 3 和表 1 可以看出,广东省植被生长大部分区域呈现出轻微改善趋势,面积为 152701.68km²,占比 85.62%,主要分布在丘陵地区;植被明显改善的区域面积为 1966.66km²,占广东省总面积的 6.13%,位于广东省国土空间保护格局中的“两屏”区域内,即北部环形生态屏障和珠三角外围屏障。而珠三角城市群、粤东城市群、汕潮揭城市群、湛茂都市区以及部分沿海区域等则出现了轻微、严重退化的趋势,面积共 9578.62km²,占比 5.37%,该部分地区为低海拔的城市建成区,属于广东省“一心两极双支点”区域。EVI 轻微退化、稳定不变、轻微改善地区占主导地位,占广东省总面积的 98.71%。

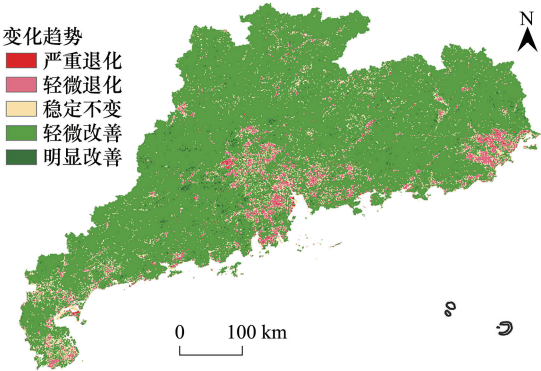


图 3 2000—2018 年广东省植被生长季 EVI 变化趋势分布
Fig.3 EVI variation trend distribution during the vegetation growth season in Guangdong Province from 2000 to 2018

表 1 2000—2018 年广东省植被变化趋势分析

Table 1 Analysis of vegetation change trends in Guangdong Province from 2000 to 2018

划分区间 Dividing intervals	趋势级别 Trend level	面积/km ² Area	占比/% Proportion	划分区间 Dividing intervals	趋势级别 Trend level	面积/km ² Area	占比/% Proportion
<-0.01	严重退化	325.36	0.18	0.001—0.01	轻微改善	152701.68	85.62
-0.01—-0.001	轻微退化	9253.26	5.19	>0.01	明显改善	1966.66	1.10
-0.001—0.001	稳定不变	14110.79	7.91				

3.2 广东省城市化强度空间差异

2000—2018 年,广东省不透水路面面积呈现持续增长趋势(图 4),从 2000 年的 5368.71km²增加至 2018 年的 12160.83km²,增幅超过 100%。

2000—2018 年广东省城市化强度(β)在数值上、空间分布面积上都呈现出持续增加的趋势(图 5),城市化强度平均值由 2000 年的 0.03 增加至 2018 年的 0.07。城市化程度较高的区域主要为珠三角城市群、汕潮揭城市群等,并且以此为中心逐年向周围地区辐射发展。

3.3 广东省城市化对植被生长的影响

3.3.1 广东省城市化对植被生长影响的年际变化

2000—2018 年广东省城市化强度(β)与年均植被指数(EVI)之间存在显著负相关性(0.01 级别双尾),城市化强度随着时间的变化逐渐增加,表明随着城市的不断发展对于植被生长的影响是逐渐加大的(图 6)。

2000—2006 年,城市化强度与年均 EVI 之间呈现出较弱的负相关性($|R| = 0.2—0.4$,弱相关);2007—2018 年,城市化强度与年均 EVI 之间呈现出中等程度的负相关性($|R| = 0.4—0.6$,中等程度相关)。

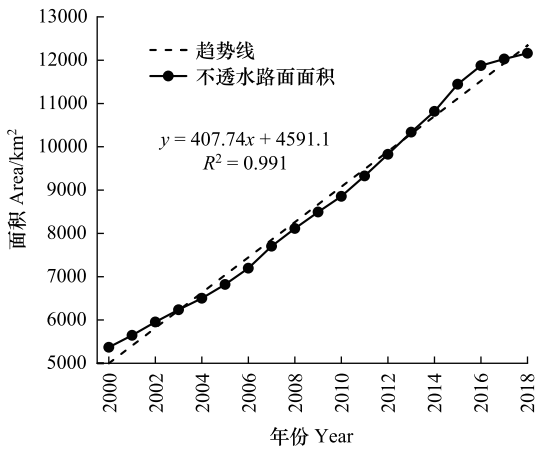


图 4 2000—2018 年广东省不透水路面面积变化
Fig.4 Changes in impervious road surface area in Guangdong Province from 2000 to 2018

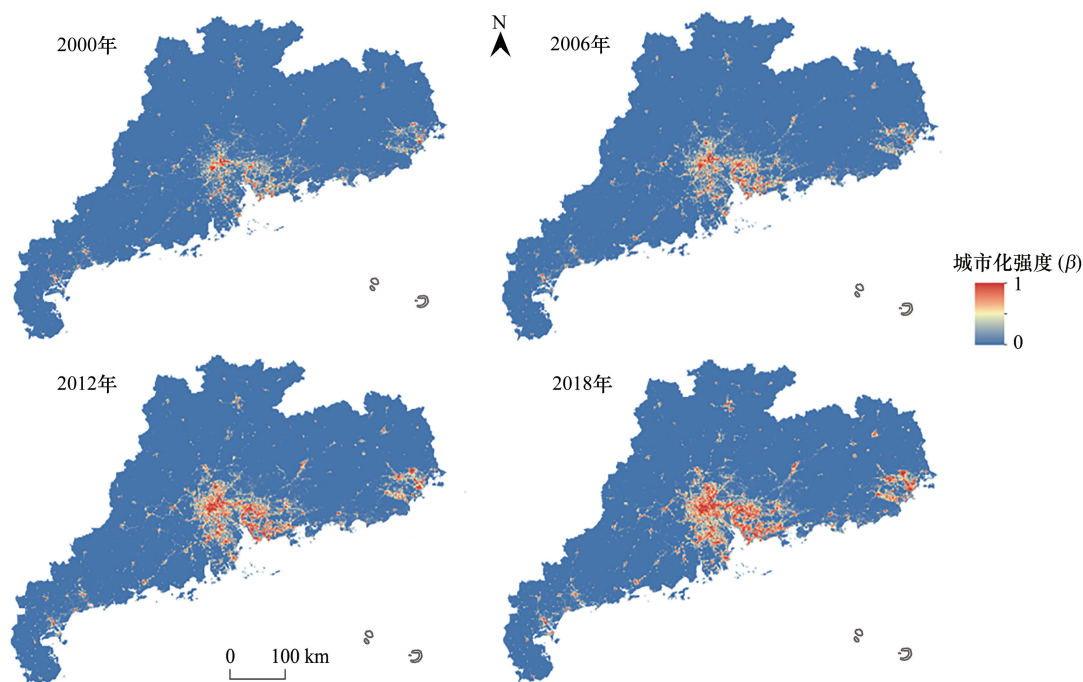


图5 广东省城市化强度空间分布

Fig.5 Spatial distribution of urbanization intensity in Guangdong Province

3.3.2 广东省城市化强度对植被生长的直接和间接影响

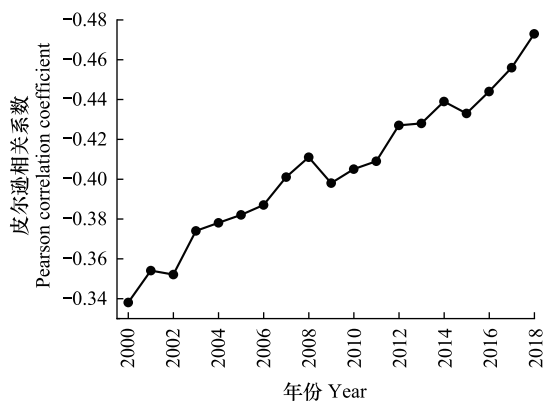
总体上, EVI 随着城市化强度的增大呈非线性的减小(图 7)。在城市化强度(β)增加的过程中, EVI 的观测值存在低于零影响线和高于零影响线的部分, 这说明城市化除了对植被生长有负面直接影响外, 对于植被的生长还具有消极和积极的间接影响。而 2000—2018 年城市化强度对应的间接影响(ω_i)(图 7), 随着城市化强度的增加, 呈现出下降—上升—下降的趋势, 变化的转折点分别出现在 $\beta \approx 0.2$ 和 $\beta \approx 0.9$ 处, 间接影响随着城市化强度的增加逐步由负向转为正向($\beta \approx 0.7$), 但在城市化强度超过一定的范围($\beta > 0.9$)后, 积极的间接影响出现了快速的下降趋势(图 8)。

2000—2018 年期间广东省城市化强度(β)与年均 EVI 的 R^2 均在 0.98 以上。随着时间的增加, y 轴的截距 a_0 由 2000 年的 0.38 增加至 2018 年的 0.46(图 9)。

4 讨论

4.1 城市化对植被的直接影响

根据研究结果, 城市化强度(β)高值的分布区域与植被指数(EVI)减少的分布区域基本吻合; 广东省城市化与植被生长之间存在显著负相关, 且程度随着时间的变化逐渐加强。本研究进一步通过量化广东省城市化对植被生长的影响得出, 城市化强度(β)和 EVI 观测值的关系能较好地拟合三次多项式模型(图 7), 与相关

图6 2000—2018 年广东省城市化强度(β)与年均 EVI 相关性Fig.6 The correlation between urbanization intensity in Guangdong Province from 2000 to 2018 (β) and annual average EVI

相关系数均在 0.01 级别(双尾), 相关性显著

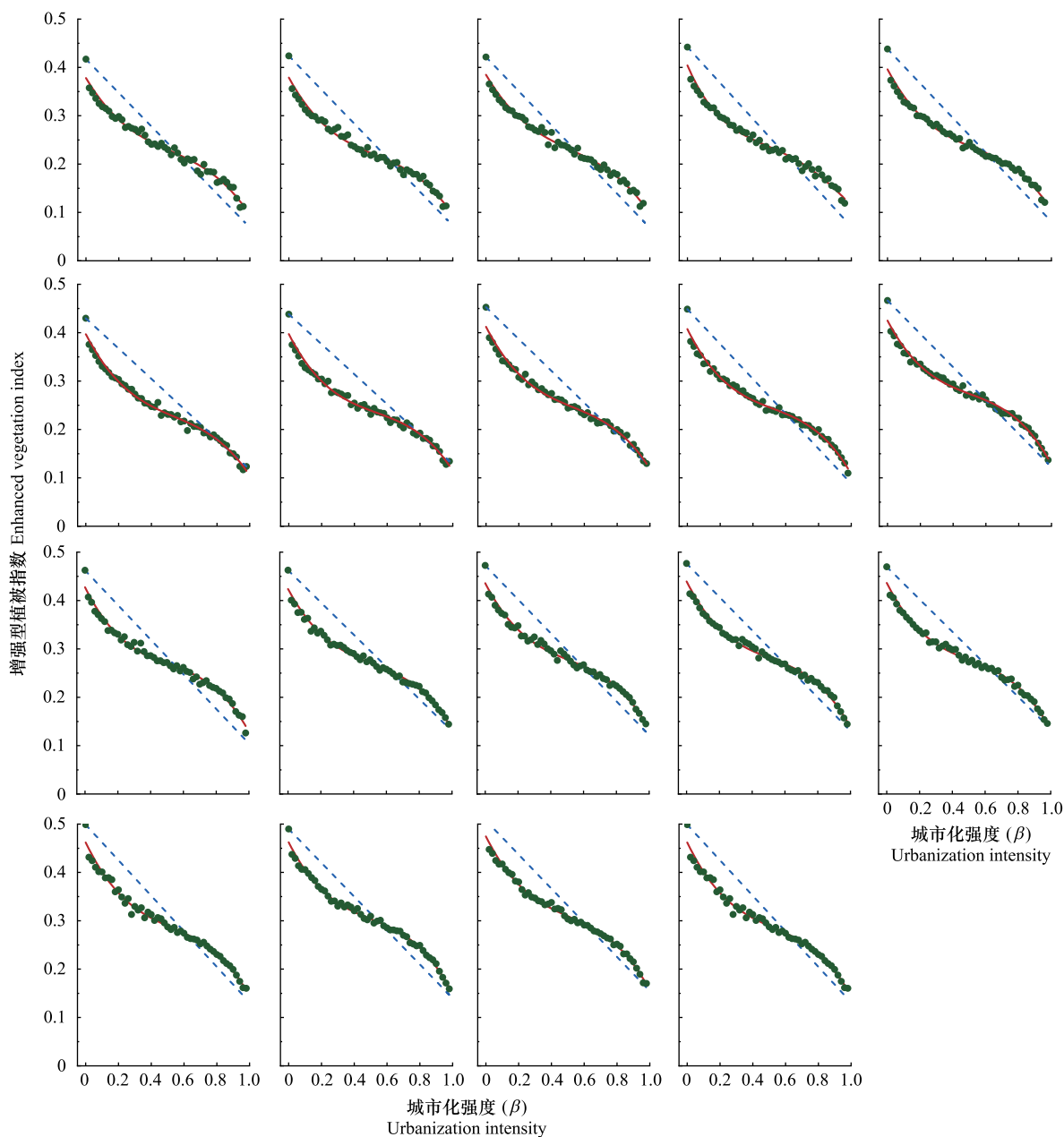


图7 2000—2018年广东省 EVI 观测值与城市化强度(β)的关系

Fig.7 The relationship between EVI observations and urbanization intensity in Guangdong Province (β) from 2000 to 2018

研究中^[1-2,8,22]城市化强度与植被指数观测值的关系基本一致,但本研究的拟合曲线结果对比相关研究存在差异性。产生差异的原因可能包括:其一,研究区域发展水平的差异,在赵淑清^[22]选取的中国32个主要城市得出的拟合曲线结果中,发展水平相似的深圳、长沙等城市拟合曲线结果较为相似,但与兰州、乌鲁木齐等城市拟合曲线对比存在较大差异;其二,研究数据及时间段选取的影响,蒋舒程^[1]选取2000—2017年的EVI数据对长沙市展开研究,而赵淑清^[22]选取了长沙市三个时间段的EVI数据展开研究,因而结果存在差异性;其三,研究区温度带热量差异,不同温度带的拟合曲线结果存在差异性^[2]。整体上,广东省EVI随着城市化强度的增大而减小,这与Jiaqiang Du等^[30]研究中对于中国东部地区城市化对植被的影响结论基本一致。主要原因在于城市快速发展建设过程中,对于林地、草地的占用以及交通路网建设、商业住房建设等城市发展规划造成地面硬化,不透水面面积持续增长^[31];城市土地利用复杂化导致城市绿地植被覆盖面积缩小且逐渐破碎

化^[32],易造成生态系统的断裂和破碎化,导致植物物种迁移能力受限,限制了植被的生长和连通性,使城市区域中绿地与不透水面积呈现出此消彼长的趋势,这些负面影响最终导致了 EVI 值下降。

4.2 城市化对植被的间接影响

EVI 观测值的非线性下降可能是由于间接影响的存在,这与 Zhang L 等^[2]、Jia W 等^[23]研究中对于间接影响的发现基本一致。随着城市化的不断发展,城市资源分配结构和城市区域环境等产生明显变化^[33],城市中植被的覆盖面积、碳吸收能力、叶片功能性状等^[34—35]会受到更大的影响。在对广东省研究量化后的间接影响进行统计,对比其他研究发现,广东省城市化对植被生长除了积极的间接影响存在,还存在消极的间接影响,关于间接影响的统计呈现下降—上升—下降的趋势(图 8),这与不同区域城市发展过程的异质性密切相关,由于广东省城市发展初期尤其是快速建设扩张时期忽略了对生态环境的保护,生态环境恶化、空气质量下降等一系列污染问题^[36]造成了消极的间接影响的产生,消极的间接影响叠加负面的直接影响,使植被生长恶化的情况加剧(低于零影响线);当城市化强度(β)逐步增强,城市由快速发展逐渐转变为高质量发展^[37],城市公园、生态廊道建设^[38]等生态补偿措施有助于城市生态环境的修复和保护,可持续发展规划、城市热岛效应减缓、氮沉降升高^[9]等因素带来的城市环境变化导致了积极的间接影响的产生,城市生态环境改善补偿了由于不透水面扩张导致植被覆盖面积下降带来的植被生产力损失,从而促进植被生长(高于零影响线)。在城市化强度大约达到 0.9 时(图 8),积极的间接影响在城市化对植被生长的影响中占比最大,当城市化程度超过一定限度后,积极的间接影响又快速降低,这可能与植被对城市中大气二氧化碳浓度的空间分布、地表温度等因素的响应有关^[1—2]。图 9 中 y 轴的截距 a_0 很大程度上代表了城市最大 EVI 值,主要受研究区气候以及城市化程度影响,而 a_0 的逐渐上升与区域内生态环境改善植被状况好转有密切相关性,这得益于政府重视可持续绿色发展观的贯彻与实施^[39],例如:规划实施国土空间生态修复^[40]、扩大城区的绿化面积、施行屋顶绿化、垂直绿化等措施^[41—42]。为了减轻城市植被的生长压力,在未来城市发展建设规划中应进行精细规划和区

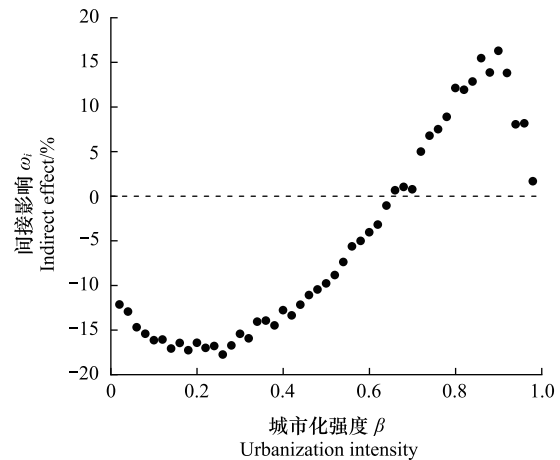


图 8 2000—2018 年广东省间接影响 (ω_i) 均值与城市化强度关系

Fig.8 The relationship between mean indirect impacts in Guangdong Province (ω_i) and urbanization intensity from 2000 to 2018

域。在城市化强度大约达到 0.9 时(图 8),积极的间接影响在城市化对植被生长的影响中占比最大,当城市化程度超过一定限度后,积极的间接影响又快速降低,这可能与植被对城市中大气二氧化碳浓度的空间分布、地表温度等因素的响应有关^[1—2]。图 9 中 y 轴的截距 a_0 很大程度上代表了城市最大 EVI 值,主要受研究区气候以及城市化程度影响,而 a_0 的逐渐上升与区域内生态环境改善植被状况好转有密切相关性,这得益于政府重视可持续绿色发展观的贯彻与实施^[39],例如:规划实施国土空间生态修复^[40]、扩大城区的绿化面积、施行屋顶绿化、垂直绿化等措施^[41—42]。为了减轻城市植被的生长压力,在未来城市发展建设规划中应进行精细规划和区

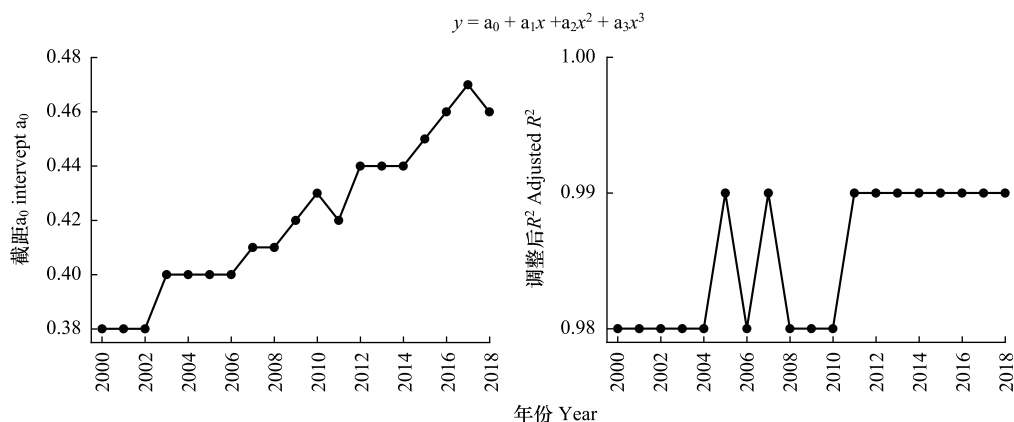


图 9 2000—2018 年广东省 EVI 观测值与城市化强度(β)三次多项式回归拟合

Fig.9 Cubic polynomial regression fitting of EVI observations and urbanization intensity in Guangdong Province from 2000 to 2018

域保护,如:根据局部区域内城市化强度选取合适的植被类型、根据城市布局进行调整革新植被的种植方式、划定城市生态保护区等^[43-44],将城市化对植被生长的积极间接影响最大化,以此长期促进植被生长,缓解城市化过程中不透水路面增加带来的环境压力,使城市土地利用与植被覆盖之间相协调,从而实现城市的绿色可持续发展。

5 结论

本文以广东省作为区域性尺度研究对象,利用 MODIS13A1 卫星的 EVI 数据以及 GAIA 不透水路面数据,从植被时空生长变化趋势、城市强度与植被相关性分析、量化影响三方面探讨了城市化对植被生长的直接影响和间接影响。研究主要结论如下:

(1) 2000—2018 年广东省 EVI 整体呈上升的趋势,说明研究区植被生长整体情况有所改善。EVI 下降的区域主要集中在城市不透水路面区域,表明城市化导致的路面硬化对于植被生长有负面的影响。

(2) 2000—2018 年广东省年均 EVI 与城市化强度(β)之间显著相关,EVI 随着城市化强度(β)的增大而减小,城市化对广东省植被生长不仅有负面的直接影响,还存在消极和积极的间接影响,其中城市化对植被生长的积极间接影响随着城市的发展对于负面直接影响的反向补偿是有所增强的。

(3) 2000—2018 年间接影响的占比随着城市化强度(β)的增加,呈现出下降—上升—下降的趋势(变化的转折点分别出现在 $\beta \approx 0.2$ 和 $\beta \approx 0.9$ 处)当城市化强度(β)达到约 0.7 时,间接影响由消极转为积极;但在城市化强度超过一定的范围($\beta > 0.9$)后,积极的间接影响出现了快速的下降趋势,说明在城市化强度达到 0.9 左右,积极的间接影响在城市化对植被生长的影响中占比最大。

参考文献 (References):

- [1] 蒋舒程. 2000—2017 年长沙市城市化对植被生长趋势的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [2] Zhang L, Yang L, Zohner C M, Crowther T W, Li M C, Shen F X, Guo M, Qin J, Yao L, Zhou C H. Direct and indirect impacts of urbanization on vegetation growth across the world's cities. *Science Advances*, 2022, 8(27): eabo0095.
- [3] 韦薇, 张银龙, 赵兵, 王浩. 快速城市化进程中城市扩张对景观格局分异特征的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(1): 7-12.
- [4] 秦艳丽, 时鹏, 何文虹, 霍春平, 李鹏, 李占斌, 杨殊桐, 冯朝红. 西安市城市化对景观格局及生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2020, 40(22): 8239-8250.
- [5] Li D L, Wu S Y, Liang Z, Li S C. The impacts of urbanization and climate change on urban vegetation dynamics in China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126764.
- [6] 黄作辉, 梁栋栋, 桂翔, 占得龙, 苗思达. 基于 NDVI 的安徽省城市化对植被变化影响的研究. *安徽师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 45(4): 345-355.
- [7] 熊巧利, 何云玲, 李同艳, 余岚. 西南地区生长季植被覆盖时空变化特征及其对气候与地形因子的响应. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 259-266.
- [8] 闫高鑫, 裴凤松, 仲锐. 淮海经济区城市化对植被活动的影响. *江苏师范大学学报: 自然科学版*, 2022, 40(2): 1-5, 77.
- [9] 莫凌梓, 彭彬, 王嘉珊, 黄伟斌, 陈小花, 徐国良. 氮沉降对城市绿地植物及土壤养分的影响初探——以果岭草 (*Cynodon dactylon*) 为例. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 459-468.
- [10] 梁爽, 彭书时, 林鑫, 丛楠. 1982—2010 年全国草地生长时空变化. *北京大学学报: 自然科学版*, 2013, 49(2): 311-320.
- [11] 刘恒, 汤弟伟, 孙毅, 宋鄂平, 常胜, 刘小芳. 武陵山区植被生长季 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应. *水土保持研究*, 2021, 28(5): 245-253.
- [12] 杨达, 易桂花, 张廷斌, 李景吉, 秦岩宾, 文博, 刘志宇. 青藏高原植被生长季 NDVI 时空变化与影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32(4): 1361-1372.
- [13] 樊艺, 赵牡丹, 王建. 秦巴山区增强植被指数长时间序列变化及其自然影响因素分析. *生态与农村环境学报*, 2022, 38(6): 733-743.
- [14] Gregg J W, Jones C G, Dawson T E. Urbanization effects on tree growth in the vicinity of New York City. *Nature*, 2003, 424: 183-187.
- [15] Briber B M, Hutrya L R, Reinmann A B, Raciti S M, Dearborn V K, Holden C E, Dunn A L. Tree productivity enhanced with conversion from forest to urban land covers. *PLoS One*, 2015, 10(8): e0136237.
- [16] 董晨炜, 曹宇, 谭永忠. 基于夜间灯光数据的环杭州湾城市扩张及植被变化. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 231-238.

- [17] 都义娟. 我国城市空间扩展与植被生长变化研究[D]. 开封: 河南大学, 2018.
- [18] 高海强. 城乡梯度下植被生长状况分异实测与遥感研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.
- [19] Huang B Y, Li Z J, Dong C C, Zhu Z C, Zeng H. The effects of urbanization on vegetation conditions in coastal zone of China. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2021, 45(4): 564-579.
- [20] Miao L J, He Y, Kattel G R, Shang Y, Wang Q F, Zhang X. Double effect of urbanization on vegetation growth in China's 35 cities during 2000—2020. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3312.
- [21] 崔胜辉, 于裕贤, 宋晓东, 李方一. 大气污染对城市植被的生态胁迫效应综述. *生态科学*, 2009, 28(6): 562-567.
- [22] Zhao S Q, Liu S G, Zhou D C. Prevalent vegetation growth enhancement in urban environment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(22): 6313-6318.
- [23] Jia W X, Zhao S Q, Liu S G. Vegetation growth enhancement in urban environments of the Conterminous United States. *Global Change Biology*, 2018, 24(9): 4084-4094.
- [24] 宾津佑, 唐小兵, 白福臣. 广东省经济发展的区域差异及其时空格局演变. *湖南师范大学自然科学学报*, 2021, 44(4): 62-70.
- [25] 陈瑶瑶, 廖彤, 汪宇, 沈劲, 翟宇虹, 叶斯琪, 陈多宏, 陈靖扬. 2016—2020 年广东省臭氧污染特征. *生态环境学报*, 2022, 31(12): 2374-2381.
- [26] 陈金月, 陈水森, 付尧, 尹小玲, 王重洋, 李丹, 彭咏石. 广东省水质现状及驱动因素. *生态学报*, 2022, 42(19): 7921-7931.
- [27] Seyed Omidreza Shobairi, 荣媛, 李明阳, 杨笑笑, 孙昕. 广东省植被覆盖度时空变化及驱动因素分析. *西南林业大学学报*, 2017, 37(1): 144-148, 169.
- [28] 吴玮怡, 钟凯文, 许剑辉. 广东省县域经济差异时空演化及影响因素研究. *测绘科学*, 2021, 46(6): 156-163.
- [29] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X, Yu L, Clinton N, Zhu Z L. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [30] Du J Q, Fu Q, Fang S F, Wu J H, He P, Quan Z J. Effects of rapid urbanization on vegetation cover in the metropolises of China over the last four decades. *Ecological indicators*, 2019, 107(Dec.): 105458.1-105458.11.
- [31] 高金龙, 陈江龙, 苏曦. 中国城市扩张态势与驱动机理研究学派综述. *地理科学进展*, 2013, 32(5): 743-754.
- [32] 吴宇哲, 谷晨焯. 城市不透水表面的梯度格局、演变驱动与景观优化. *水土保持学报*, 2023, 37(1): 168-175.
- [33] 李久枫, 余华飞, 付迎春, 赵耀龙. 广东省“人口-经济-土地-社会-生态”城市化协调度时空变化及其聚类模式. *地理科学进展*, 2018, 37(2): 287-298.
- [34] 王思, 张路路, 林伟彪, 黄秋森, 宋亦心, 叶脉. 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. *生态学报*, 2022, 42(6): 2149-2163.
- [35] 肖以华, 付志高, 许涵, 史欣, 唐海明, 陈步峰. 城市化对珠江三角洲不同功能群植物叶片功能性状的影响. *生态环境学报*, 2022, 31(9): 1783-1793.
- [36] 梁育填, 张家熙, 周侃, 周克杨. 主体功能区视角下的环境污染时空格局及驱动因素——基于广东省 121 个县域的实证分析. *环境科学学报*, 2021, 41(10): 3916-3926.
- [37] 崔丹, 卜晓燕, 徐祯, 李国平, 吴殿廷. 中国资源型城市高质量发展综合评估及影响机理. *地理学报*, 2021, 76(10): 2489-2503.
- [38] 韦家怡, 李铖, 吴志峰, 张莉, 吉冬青, 程炯. 粤港澳大湾区生态安全格局及重要生态廊道识别. *生态环境学报*, 2022, 31(4): 652-662.
- [39] 田光辉, 李江苏, 苗长虹, 杜萍萍. 基于非期望产出的中国城市绿色发展效率及影响因素分析. *经济地理*, 2022, 42(6): 83-91.
- [40] 叶玉瑶, 张虹鸥, 任庆昌, 宫清华, 吕丹娜, 刘郑倩, 李升发. 省级国土空间生态修复规划编制的思路与方法——以广东省为例. *热带地理*, 2021, 41(4): 657-667.
- [41] Jing D. Assessment of hydrological performance of green roofs in highly urbanized areas: a case study of Xiamen Island. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(6): 2237-2250.
- [42] 陈丽飞, 许志丹, 宋雪莲, 刘立波. 垂直绿化在城市中的应用. *吉林农业大学学报*, 2006, 28(10): 58-61.
- [43] 袁少雄, 宫清华, 陈军, 王均, 黄光庆, 刘峰. 广东省自然保护区生态网络评价及其生态修复建议. *热带地理*, 2021, 41(2): 431-440.
- [44] 刘晓曼, 王超, 肖如林, 付卓, 吕娜, 袁静芳, 侯鹏. 中国重要生态保护区人类干扰时空变化特征分析. *地理科学*, 2022, 42(6): 1082-1090.