

DOI: 10.5846/stxb202205081270

张淑怡, 尤怡靖, 朱泓恺, 赵铨钰, 谷璇, 高婵婵, 刘敏. 长三角地区植被覆盖演变城乡差异及其原因. 生态学报, 2023, 43(14): 5980-5993.

Zhang S Y, You Y J, Zhu H K, Zhao C Y, Gu X, Gao C C, Liu M. Urban and rural differences in vegetation cover evolution and its causes in the Yangtze River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5980-5993.

长三角地区植被覆盖演变城乡差异及其原因

张淑怡¹, 尤怡靖¹, 朱泓恺¹, 赵铨钰¹, 谷璇¹, 高婵婵¹, 刘敏^{1,2,*}

1 华东师范大学生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241

2 崇明生态研究院, 上海 200241

摘要: 城市生态环境和城市化之间的关系是城市可持续发展的关键。研究不同城市化水平下植被覆盖的长时间演变趋势, 对理解城市化过程对植被生长动态的影响, 城市更新以及推进城市绿化的科学管理具有重要意义。然而, 目前对城市内部沿城乡梯度植被生长趋势差异的认识还比较有限。以我国城市化发展最为强烈的长三角地区为研究对象, 基于 2000—2020 年长三角归一化植被指数数据, 采用趋势分析和地理探测器方法, 探究了长三角地区城市内部植被覆盖演变城乡差异, 并从土地利用/覆被变化和城市化发展的角度解析其成因。研究结果表明: (1) 2000—2020 年长三角地区植被总体呈绿化趋势, 植被明显绿化占最大比例 (52.06%), 轻微绿化与稳定不变地区占 31.68%, 零星分布的褐化区占 6.82%。(2) 城市老城区植被覆盖变化总体呈现返绿趋势 (0.016/10 a), 新城区褐化明显 (−0.019/10 a), 农郊区绿化突出 (0.023/10 a)。在上海、南京和杭州等人口城市化水平较高的城市中, 老城区土地利用变化强度最高, 其绿化趋势也最高, 体现了城市更新过程对绿地空间的促进作用; 而在人口城市化水平相对较低的宣城、蚌埠和阜阳等城市, 土地利用变化强度相对较低的农郊区也呈现明显的绿化趋势, 更多的是受到区域生态保护的影响。(3) 土地城市化是长三角地区老城区和新城区植被覆盖变化的主导因子, 而城市化因子对农郊区解释程度总体不显著。从长三角总体区域看, 城镇人口比重、不透水面积/总面积以及地区生产总值三者对植被覆盖演变存在显著影响, 其中城镇人口比重影响最大。

关键词: 植被覆盖; 城乡差异; 土地利用变化强度; 城市化; 长三角地区

Urban and rural differences in vegetation cover evolution and its causes in the Yangtze River Delta

ZHANG Shuyi¹, YOU Yijing¹, ZHU Hongkai¹, ZHAO Chengyu¹, GU Xuan¹, GAO Chanchan¹, LIU Min^{1,2,*}

1 Shanghai Key Laboratory of Urbanization Ecological Process and Ecological Restoration, School of Ecology and Environmental Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China

2 Chongming Ecological Research Institute, Shanghai 200241, China

Abstract: The relationship between urban ecological environment and urbanization is a key to sustainable urban development. Studying the long-term evolutionary trends of vegetation cover under different levels of urbanization is important for understanding the effects of urbanization processes on vegetation growth dynamics, urban regeneration, and advancing scientific management of urban greening. However, the understanding of the differences in vegetation growth trends along urban-rural gradients within cities was still relatively limited. Based on the MODIS-NDVI data of the Yangtze River Delta (YRD) from 2000 to 2020, this study investigated the urban-rural differences in vegetation cover evolution within the cities of the YRD using trend analysis and geographic probe methods, and analyzed the causes from the perspectives of land use/cover change and urbanization development. The results showed that (1) the vegetation in the Yangtze River Delta region showed a greening trend in general from 2000 to 2020, with the largest proportion (52.06%) of

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977399)

收稿日期: 2022-05-08; 网络出版日期: 2023-03-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: mliu@re.ecnu.edu.cn

vegetation being significantly green, 31.68% being slightly green and stable unchanged areas, and 6.82% being sporadically distributed in browning areas. (2) The change of vegetation cover in the old urban areas of the region showed a general trend of returning to green ($0.016/10\text{ a}$), browning in the new urban areas was obvious ($-0.019/10\text{ a}$), and greening in the agricultural suburban areas was prominent ($0.023/10\text{ a}$). In cities with a high level of population urbanization, such as Shanghai, Nanjing and Hangzhou, the old urban areas with the highest intensity of land use change also had the highest greening trend, reflecting the promotion of green space by the urban renewal process; while in cities with a relatively low level of population urbanization, such as Xuancheng, Bengbu and Fuyang, the agricultural suburban areas with a relatively low intensity of land use change also showed an obvious greening trend, more influenced by regional ecological protection. (3) Land urbanization was the dominant factor of vegetation cover change in old and new urban areas in the Yangtze River Delta, while the urbanization factor was generally insignificant in explaining the degree of suburban areas. From the overall region of the Yangtze River Delta, three factors, namely the proportion of urban population, impervious area/total area and gross regional product, had significant effects on the evolution of vegetation cover, among which the proportion of urban population has the greatest influence.

Key Words: vegetation cover; urban-rural difference; land use change intensity; urbanization; Yangtze River Delta region

全球卫星监测显示三分之一的陆地植被呈现增绿趋势,其中三分之二的绿化面积来自耕地和森林^[1]。城市植被作为城市生态环境的重要组成部分,也出现一系列“返绿”现象,具体表现为城市绿化面积增加和植被指数升高等趋势^[2]。全球 841 个城市建成区面积超过 100 km^2 的大城市中,绿化扩张区占 32%,超过 10%的城市扩张区显示出显著绿化趋势^[3],包括美国、中国和印度在内诸多国家的城市都实现了绿色复苏^[1]。城市化进程中不透水表面(如道路、建筑物等)替代部分植被,导致城区植被面积减少,另一方面城市环境也可能会促进植被生长。然而目前对城市化如何直接和间接影响植被的认识相对有限,缺乏较大空间尺度上的定量研究^[4]。

尽管植被覆盖的演变受到自然和人为因素的综合影响,但在人类活动频繁的地区人为因素对植被覆盖变化的影响比自然因素的影响更为显著^[2, 5]。城市面积扩张、土地利用变化、经济发展和人口快速增长都是植被覆盖演变的重要影响因素^[4]。研究表明,欧洲、北美和亚洲的森林覆盖率正在增加,越来越多的国家和地区正在从砍伐森林转向重新造林^[5]。植被覆盖率随着城市面积的增加而增加,随着人口密度的增加而轻度下降^[6],经济社会因子(如人口密度)比自然因子对城市植被的影响更大。城市森林在经济水平较高的沿海城市中发展迅速,并取得了较大进展^[7],而人类活动对植被覆盖改善的影响一直被低估,土地利用变化对生态土地尺度和空间格局的影响尚未得到系统的研究。

近年来,中国经历了前所未有的城市化过程,目前已成为全球城市面积最大的国家^[8]。自 1953 年以来,中国政府实施一系列的生态工程,采取了系统的规划和政策将绿化引入城市地区^[7]。2000—2020 年深圳虽然经历大规模的城市扩张,但仍在向绿色转型,其中 61.5%的土地在近期变化中呈现绿化趋势,且大部分分布在城市建成区^[9]。杭州现有城区植被覆盖显著恢复,这主要是由于小块绿地的持续增加^[10]。1999—2015 年长江中下游归一化植被指数(NDVI)明显上升,植被 NDVI 增加的面积约占全区 90%^[11]。2000—2016 年上海市增强型植被指数(EVI)和植被总初级生产力(GPP)受城市不透水面(ISA)影响,城市周边和农村地区的 EVI 和 GPP 分别下降了 38.0%和 28.0%^[6]。城市作为全球变化研究的“天然实验室”,为了解自然生态系统对于未来全球环境变化的潜在响应提供了实验平台。然而,现有大多研究都致力于城市化进程与植被关系,关于中国城市植被返绿现象的研究大多局限于单一城市,或是研究尺度仅限于城市水平,较少关注城市内部城乡植被的差异。对中国不同城市而言,植被覆盖的长时间演变是否具有规律性,以及城市中沿城乡梯度的植被生长趋势有何差异,尚不清楚。因此,研究城市及内部区域植被覆盖的长时间演变趋势,对于理解城市化过程对植被生长动态的影响并制定科学合理的植被管理措施具有重要意义。

作为中国最发达的经济带之一,长三角地区发展极不平衡,包括快速城市化的长三角示范区和相对缓慢城市化的周边地区,使得在长期城市化过程中,城乡区域人类活动和发展模式不同^[12-13]。本文以我国长三角地区为研究对象,基于 2000—2020 年的中分辨率成像光谱仪(MODIS)NDVI 和不透水面城市边界数据,旨在

揭示近二十年来长三角地区植被生长动态,进而分析在不同城市化水平下植被覆盖演变的潜在规律,并从土地利用/覆盖变化和城市化发展的角度解释其成因。研究结果可为长三角城市绿地空间的规划建设和管理提供参考,量化城乡植被覆盖差异对城市更新以及绿地空间的精细规划具有重要的意义。

1 研究区概况

长三角地区(27.15—35.16°N,114.89—122.95°E)位于中国大陆东部沿海,根据2019年《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》,长三角地区包含江苏省、浙江省、安徽省和上海市(图1),共计41个地级及以上城市,总面积35.2万km²,人口为2.27亿,创造了中国23.49%的国内生产总值(GDP)^[14]。长三角地区年均温14—17℃,年降水量900—1600mm,北部主要为平原,西部和南部多是山地和丘陵;植被方面,北部主要为耕地,西南部主要为林地,且多为次生林,属亚热带湿润季风气候。2021年浙江省、江苏省、安徽省和上海市的森林覆盖率分别为61.2%、23.2%、28.7%和16.9%。2021年全国城市化平均水平为64.7%,上海城市化率最高为89.3%,江苏、浙江、安徽分别为73.4%、72.2%、58.3%。

2 数据和方法

2.1 数据来源及处理

本研究以16 d合成的MOD13A2-NDVI数据作为植被覆盖演变研究的基础数据(表1),空间分辨率为250 m,时间范围为2000年2月—2020年12月。为了有效地去除云、大气和太阳高度角等产生的影响,采用最大值合成法获取2000—2020年逐月NDVI数据,利用均值法获取逐年平均的NDVI数据,以消除极端年份气候异常对植被生长状态的影响^[15—16]。

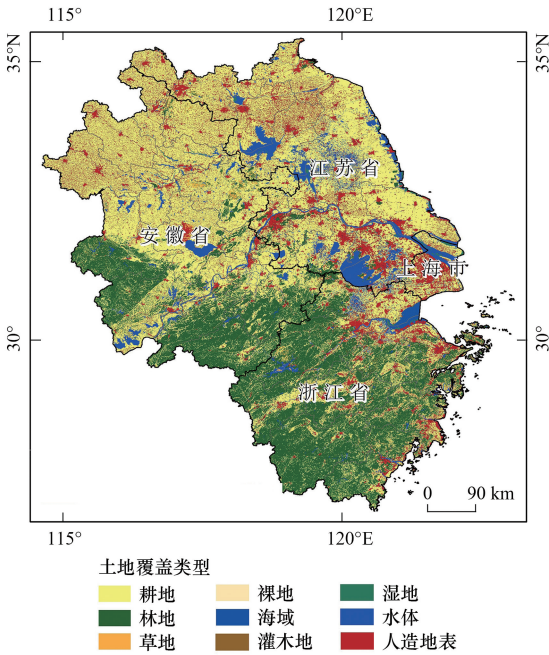


图1 长三角地区行政区划及土地利用现状(2020年)

Fig.1 Administrative divisions and land use in the Yangtze River Delta (2020)

表1 研究数据来源

Table 1 Research data source

数据类型 Data type	数据名称 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	年份 Year	数据格式 Data format	数据来源 Data source
遥感源数据 Remote sensing source data	归一化植被指数	250 m	2000—2020	栅格数据	美国国家航空航天局 NASA EOS/MODIS
基础地理数据 Fundamental geographic data	土地利用数据	30 m	2000、2010、2020	栅格数据	Globeland30 (www.globallandcover.com)
	行政区划数据	—	2019	矢量数据	国家基础地理信息中心
	不透水面数据	—	1990、2018	矢量数据	清华大学地球系统研究中心 (http://data.ess.tsinghua.edu.cn/)
社会经济数据 Socioeconomic data	建成区面积、建成区面积/市区面积、地区生产总值、地区生产总值增长率	—	2017	属性数据	《2018 中国城市统计年鉴》
	城镇人口比重	—	2020	属性数据	《江苏统计年鉴—2021》 《浙江统计年鉴—2021》 《安徽统计年鉴—2021》 《上海统计年鉴—2021》
	人口密度	1000 m	2018	栅格数据	World pop (https://www.worldpop.org/)

不透水面数据是本文的另一重要数据源,来源于清华大学地球系统研究中心全球城市边界(GUB)数据集^[8]。该数据集基于已开发的全球高分辨率(30 m)人造不透水面制图产品(GAIA)提取多时相全球城市边界,是评价城市生态环境和建成区构成的重要基础数据和评价单元。利用不透水面数据可计算不透水面比例,而包含城镇人口比重、建成区面积和地区生产总值的城市化因子取自2018年中国城市统计年鉴^[17]。人口密度数据来源于World Pop,空间分辨率为1 km^[18];土地利用数据选取我国研制的GlobeLand 30数据^[19],空间分辨率为30 m,本研究选取耕地、林地、草地、灌木地、人造地表5个一级类型。

2.2 研究方法

2.2.1 基于泰尔森(Theil-Sen Median)和曼-肯德尔(Mann-Kendall)分析的NDVI趋势检验

本研究采用泰尔森(Theil-Sen Median, Sen)趋势分析和曼-肯德尔(Mann-Kendall, M-K)检验方法开展长三角地区全域及像元尺度的植被覆盖演变趋势分析。由于NDVI的时间序列通常不满足正态性和同方差性的参数假设,所以采用Sen斜率估计方法^[20]。M-K属于非参数检验方法,与其他参数检验的方法相比,不需要样本遵从一定的分布,受异常值干扰小,更适合顺序变量^[21-22]。

Theil-Sen Median趋势分析计算时间序列数据的所有 $n(n-1)/2$ 成对组合之间的中位数。其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} + \frac{\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i}{j - i}, \quad 2000 \leq i < j < 2020 \quad (1)$$

式中, β 是植被变化趋势,NDVI_j是第j年的NDVI值,NDVI_i是第i年的NDVI值,如果 $\beta > 0$,则NDVI有增加趋势,表明在研究时段内植被在恢复或改善,植被覆盖呈现绿化趋势;如果 $\beta < 0$,则NDVI呈下降趋势,表明在研究时段内植被呈现褐化趋势。M-K检验计算公式如下:

设定NDVI_j = 2000, 2001, ..., 2020, 定义Z统计量为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{s(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{s(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n \text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) \quad (3)$$

$$s(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

$$\text{sgn}(\text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i) = \begin{cases} 1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i > 0 \\ 0, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i = 0 \\ -1, & \text{NDVI}_j - \text{NDVI}_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,NDVI_i和NDVI_j表示像元i年和j年的NDVI值,n为年份长度,sgn为符号函数。统计量Z的值在 $(-\infty, +\infty)$ 范围内。在给定显著水平 α 下,当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$,表示时间序列在 α 水平上存在显著的变化。一般取 $\alpha = 0.05$,本文判断在0.05置信水平上即 $|Z| > 1.96$,NDVI时间序列变化趋势的显著性。

2.2.2 城市建成区和乡村边界范围的界定

为了分析2000—2020年长三角地区植被覆盖城乡差异特征,本研究将每个城市划分为老城区、新城区和农郊区三个区域(图2)。将1990年中国城市边界视为各城市的老城区范围,1990—2018年新增的城市区域视作新城区范围,剩余区域为农郊区。通过此类城乡界定方式探究2000—2020年不同城市化水平地区(老城区-新城区-农郊区)的年均NDVI变化趋势。

2.2.3 土地利用变化强度

城市化进程伴随着耕地、林地等土地资源的占用,而土地利用变化可以反映同一时期人类活动与土地的

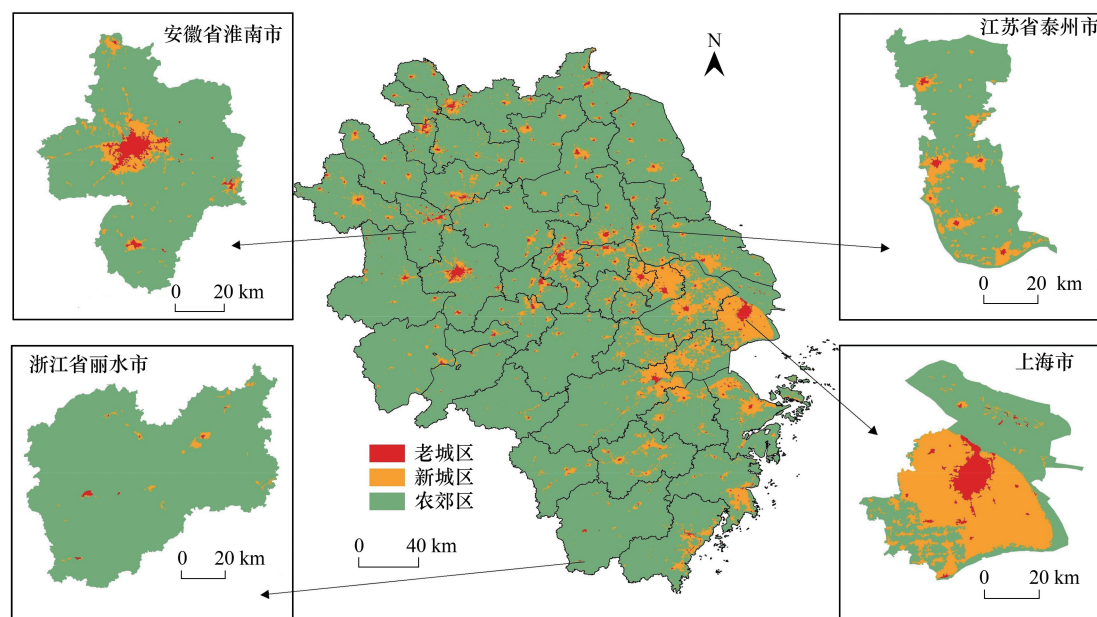


图2 长三角地区城乡范围界定

Fig.2 The scope of urban and rural areas in the Yangtze River Delta

相互作用。一般而言,土地利用变化强度指一定时期内土地利用变化区域与未变化区域之间的比例关系,通常侧重于运用土地利用转移矩阵进行评价^[23]。本文重点考虑建设用地与生态用地之间的转变,将土地利用变化强度(D 值)定义为建设用地与生态用地(植被)相互转化的面积占总面积比例。若建设用地转为生态用地(林地、耕地、草地、灌木地)则视土地发生绿化转变(D_{green}),反之为褐化转变(D_{brown})。

$$D_{\text{green}} = \frac{A_{e \rightarrow i}}{A_{e \rightarrow i} + A_{i \rightarrow e} + A_u} \quad (6)$$

$$D_{\text{brown}} = \frac{A_{i \rightarrow e}}{A_{e \rightarrow i} + A_{i \rightarrow e} + A_u} \quad (7)$$

$$D = D_{\text{green}} + D_{\text{brown}} = \frac{A_{e \rightarrow i} + A_{i \rightarrow e}}{A_{e \rightarrow i} + A_{i \rightarrow e} + A_u} \quad (8)$$

式中, $A_{e \rightarrow i}$ 为植被(林地、耕地、草地、灌木地)转为建设用地的面积; $A_{i \rightarrow e}$ 为建设用地转为植被(林地、耕地、草地、灌木地)的面积; A_u 为植被覆盖不变的面积。

2.2.4 城市化因素对植被覆盖因子探测

城市化是一个以城市范围面积扩张为特征的过程,伴随着土地利用的集约变化、经济发展和人口的快速增长等现象,全域尺度城市化因子可用于分析城市化对区域植被覆盖变化的影响。本文根据土地、经济以及人口三类城市化特征,选取7个与植被覆盖演变相关的城市化因子,运用地理探测器进行因子探测以解析不同城市化因子对区域植被覆盖演变影响的城乡差异(图3)。地理探测器模型用于检测空间分层异质性,揭示变量的主要驱动力,即测量因变量(Y),同时检验 Y 和 X (解释变量)之间的耦合^[24]。因子探测的作用是探测NDVI的空间分异性,以及探测各因子对NDVI空间分异的解释程度,用 q 值度量,表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{\text{SSW}}{\text{SST}} \quad (9)$$

$$\text{SSW} = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, \text{SST} = N \sigma^2 \quad (10)$$

式中, h 为 NDVI 变化率以及其城市化因子的分类或分区; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别为层 h 和全区的 Y 值的方差。SSW 和 SST 分别为层内方差之和及全区总方差, q 的值域为 $[0, 1]$, q 值越大表示城市化因子对 NDVI 变化趋势的解释程度越强, 反之则越弱。

探究城市植被覆盖演变和城市化的关系是指导可持续城市发展的关键^[7], 受城市化因子数据来源的限制, 并且考虑目前中国城市发展相关政策执行多以城市整体为单位, 故本研究重点探讨全域城市化相关因子对不同城市化发展梯度下植被生长的影响。以城市全域城市化因子作为解释变量(X), 开展城市化对不同城市化发展梯度(老城区、新城区、农郊区)和城市全域植被覆盖演变的影响及其差异研究(图 3)。7 个城市化因子($X_1, X_2 \cdots X_7$)为城市全域尺度(41 个城市), 其中 5 个因子(建设用地/市区面积、建成区面积、地区生产总值、地区生产总值增长率以及城镇人口比重)来源于城市统计年鉴。不透水面积/地级市总面积(X_3)和人口密度(X_7)原始栅格数据按城市的行政边界进行统计。因变量(Y)即 NDVI 变化趋势包括 3 个不同城市化发展梯度(老城区-新城区-农郊区)和 1 个城市全域尺度。因各类数据的数量级差距较大, 经归一化处理, 采用自然断点法分为 7 级, 输入地理探测器用于分析城市全域尺度城市化因子对不同城市化发展梯度(老城区、新城区、农郊区)和城市整体植被覆盖演变的影响及其差异。

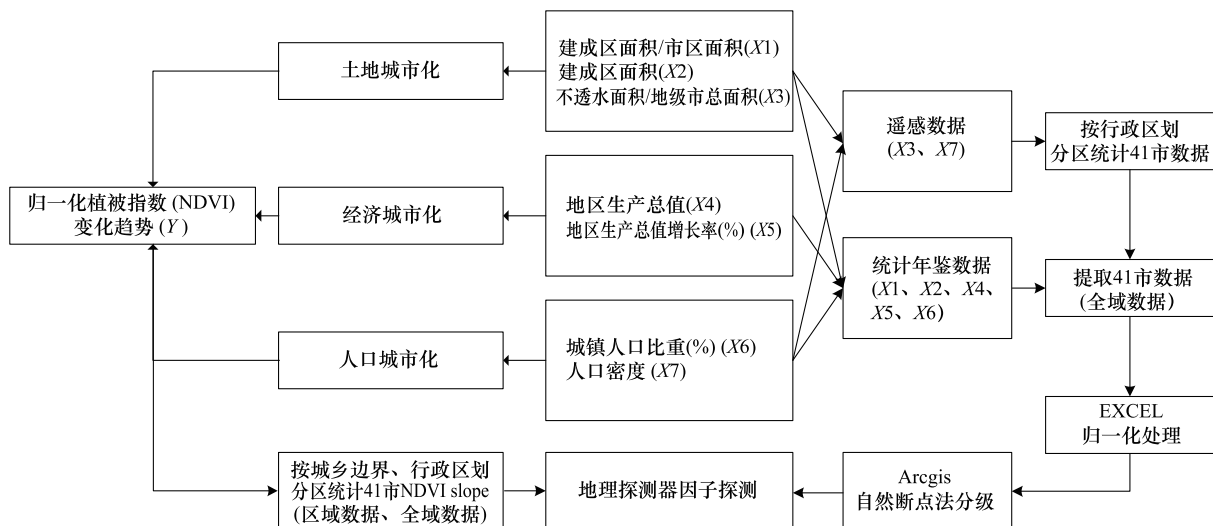


图 3 城市化因素对植被覆盖因子探测

Fig.3 Detection of urbanization factors on vegetation cover factors

3 结果与分析

3.1 长三角地区植被覆盖时空演变总体特征

2000—2020 年长三角地区 NDVI 在 0.49 和 0.54 之间变化, 经历了先快速后缓慢持续波动增长的过程(图 4), NDVI 年均增长率为 0.18%, 分别在 2001 和 2007 年出现最低值(0.49)和最高值(0.54)。长三角地区植被覆盖总体呈现“西高东低, 南高北低”的空间分布特征(图 4), NDVI 高值主要分布在浙江省丽水市(0.66)、安徽省黄山市(0.64)以及浙江省衢州市(0.60)等山地丘陵地带, 低值主要分布在高度城市化的城市中心, 如江苏省苏州市(0.29)、上海市(0.32)以及浙江省嘉兴市(0.35)的城市建成区。

M-K 趋势分析发现长三角地区 2000—2020 年 NDVI(表 2、图 4)植被明显绿化占最大比例(52.06%), 主要分布在长三角区域外侧; 轻微绿化与稳定不变地区占区域面积的三分之一(31.68%), 主要以太湖流域、巢湖流域为中心分布; 各个城市都存在一定的褐化区, 轻微褐化与严重褐化区域分别占比 8.19%、8.06%。褐化边界呈现“之”字型, 以上海市为中心向外辐射, 集中在沪宁、沪杭沿线, 主要分布在上海、苏州、南京等城市中心外围。

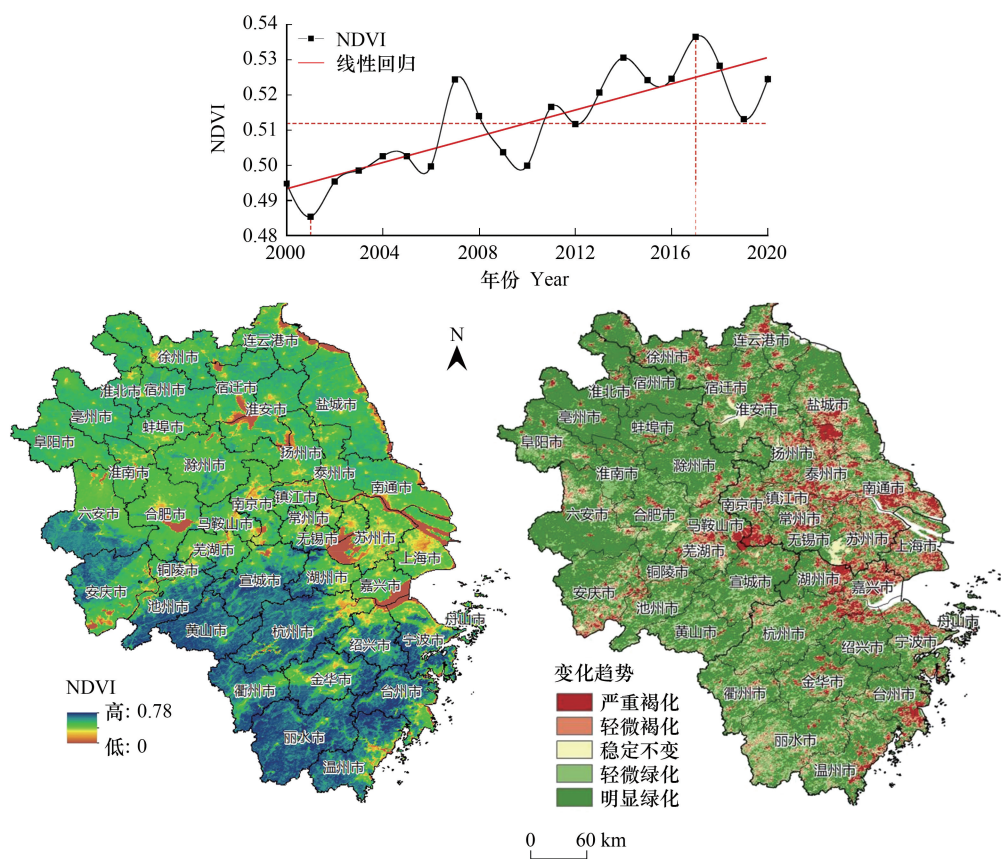


图 4 长三角地区归一化植被指数 (NDVI) 多年均值及变化趋势

Fig.4 Annual mean value and variation trend of NDVI in the Yangtze River Delta

表 2 2000—2020 年长三角地区 NDVI 变化趋势

Table 2 NDVI variation trend in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020

NDVI 趋势变化 NDVI trend change	变化率 slope	Z	面积占比 Area percentage
明显绿化 Significant greening	≥ 0.0005	≥ 1.96	52.06%
轻微绿化 Slight greening	≥ 0.0005	$-1.96-1.96$	22.35%
稳定不变 No change	$-0.0005-0.0005$	$-1.96-1.96$	9.33%
轻微褐化 Slight browning	< -0.0005	$-1.96-1.96$	8.19%
严重褐化 Serious browning	< -0.0005	< -1.96	8.06%

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index

3.2 土地利用变化与植被覆盖演变城乡分异的关联分析

长三角地区作为“耕地与建设用地转换地带”,城市化进程中建设用地占用优质耕地,城市扩张明显。从表 3 可知 2000—2010 年长三角地区土地利用褐化转变绝大部分 (95.48%) 以牺牲耕地为代价,其次是林地 (2.61%) 和草地 (1.89%),而新增的绿化主要 (97.03%) 来自建设用地转化为耕地。2010—2020 年,褐变最大占比仍然是耕地转化为建设用地 (93.90%),比前十年下降 1.58%,这一时期长三角地区土地绿化最大占比仍为建设用地转化为耕地 (93.56%),相比前十年下降 3.47%,主要是由于建设用地转化为草地 (3.72%) 和林地 (2.71%) 的比例增加。

将植被覆盖变化与土地利用变化区域进行对比分析,发现两者在空间上具有相似性(图 5)。长三角城市化进程的加快,城市中心附近的集聚效应进一步加强,褐化区域呈现散点状向四周扩张趋势。受土地利用变

化影响,植被褐化的区域主要集中在长三角地区的中北部江苏省、上海市等平原河网地区;土地利用与植被覆盖同时不变的区域主要集中在长三角地区南部的林地;土地利用与植被同时绿化的区域主要出现在安徽省的西北侧(图 5)。

表 3 长三角地区 2000—2020 土地利用总体变化情况

Table 3 Land use change in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020

土地利用变化 Land use change	绿化 Greening	2000—2010 年	2010—2020 年	褐化 Browning	2000—2010 年	2010—2020 年
变化类型及比例 Change type and proportion	建设用地\耕地	97.03%	93.56%	耕地\建设用地	95.48%	93.90%
	建设用地\林地	1.54%	2.71%	林地\建设用地	2.61%	3.61%
	建设用地\草地	1.41%	3.72%	草地\建设用地	1.89%	2.47%
	建设用地\灌木地	0.03%	0.02%	灌木地\建设用地	0.03%	0.02%

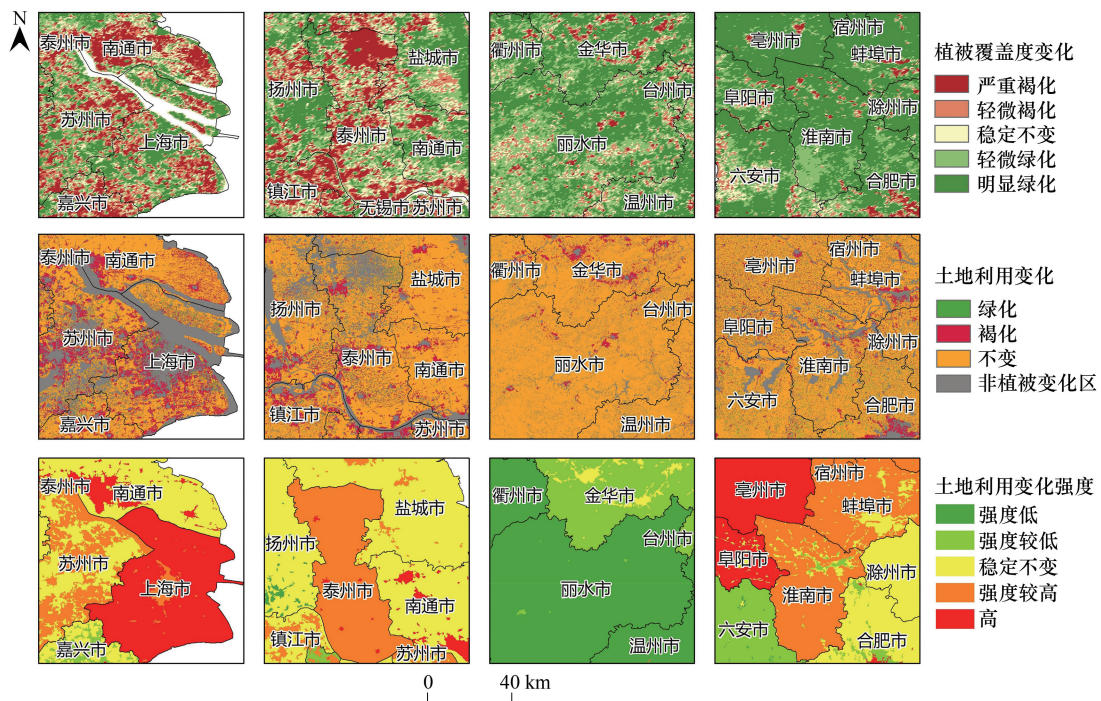


图 5 2000—2020 年长三角地区典型城市植被覆盖与土地利用空间布局

Fig.5 Typical urban vegetation cover and land use spatial layout in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020

从不同城市化发展梯度来看,城市 NDVI 变化趋势均呈现“U 型”(图 6),在人口城市化水平较高(70%—90%)的城市中,上海市、南京市和杭州市的植被覆盖变化趋势由高到低为:老城区>农郊区>新城区,而合肥市、芜湖市、温州市和舟山市呈现农郊区>老城区>新城区;人口城市化水平较低(40%—60%)的城市主要集中在安徽省,如宣城市、蚌埠市、阜阳市等,植被覆盖变化趋势由高到低依次为:农郊区>老城区>新城区。土地利用变化方面,长三角地区绝大多数城市(39 个)土地利用变化强度呈现老城区>新城区>农郊区(图 6),只有丽水市与衢州市呈现新城区>老城区>农郊区。一定程度上说明对于上海市、南京市、杭州市等人口城市化水平较高的城市,土地利用变化对植被绿化有促进作用;而对于宣城市、蚌埠市、阜阳市等人口城市化水平较低的城市,土地利用变化加速植被褐化。

3.3 长三角地区植被覆盖演变城乡分异对城市化因子的响应

2000—2020 年长三角地区城乡 NDVI 时间变化趋势总体表现为老城区和农郊区呈现波动上升趋势,新城

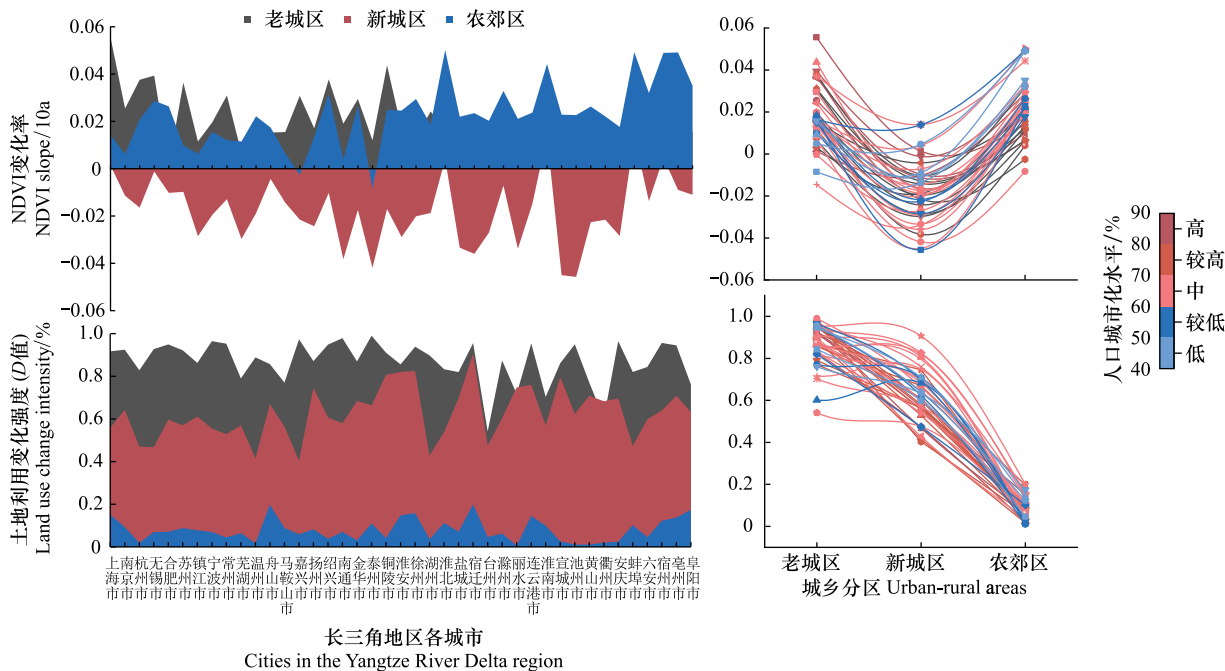


图 6 2000—2020 年长三角地区各城市植被覆盖与土地利用变化强度

Fig.6 Intensity of urban vegetation cover and land use change in the Yangtze River Delta from 2000 to 2020

左图横坐标为长三角地区 41 个城市按人口城市化水平由高至低排序

区呈现波动下降趋势(图 7)。从城市数量来看,绝大部分城市的老城区(38 个)和农郊区(39 个)呈绿化趋势,大多数城市新城区(36 个)呈现褐化趋势(图 7)。从数值而言,老城区植被覆盖变化趋势范围介于 $-0.015\text{--}0.056/10\text{ a}$,总体呈现返绿趋势($0.016/10\text{ a}$),而新城区褐化明显($-0.019/10\text{ a}$),农郊区绿化突出($0.023/10\text{ a}$)(表 4)。老城区、新城区和农郊区绿化趋势最大的城市分别为上海市、淮南市以及淮北市,其趋势值分别为 $0.056/10\text{ a}$ 、 $0.014/10\text{ a}$ 和 $0.050/10\text{ a}$;褐化最严重的区域分别在丽水市($-0.015/10\text{ a}$)、池州市($-0.046/10\text{ a}$)和泰州市($-0.008/10\text{ a}$),一定程度上说明城市化水平高的地市更加注重绿色空间的建设和保护。

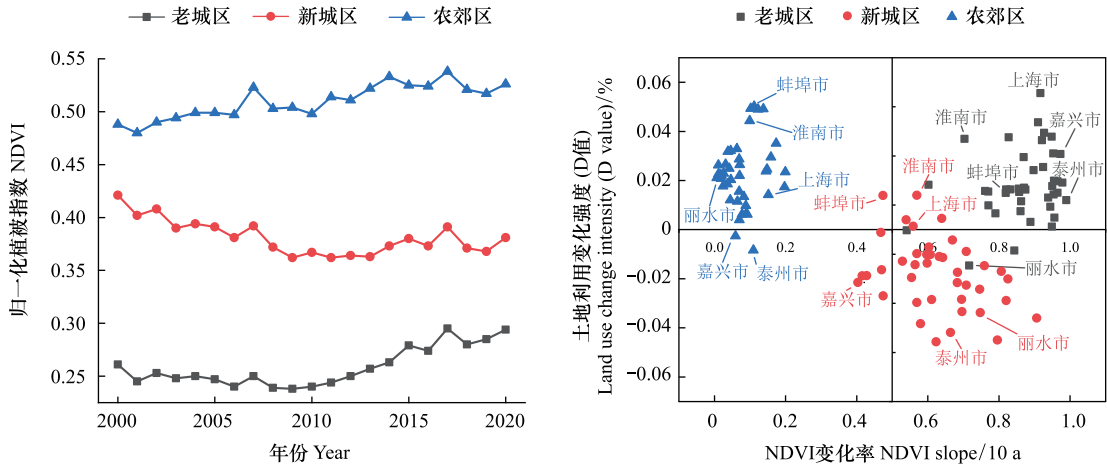


图 7 长三角地区城乡分区 NDVI 平均值年际变化

Fig.7 Interannual variation of mean NDVI of urban and rural areas in the Yangtze River Delta

表 4 长三角地区植被覆盖变化率 Top5 城市/10 a

Table 4 Top5 cities in change rate of vegetation cover in the Yangtze River Delta

城乡分区 Urban-rural areas	老城区 (0.016) Urban area (0.016)		新城区 (-0.019) Suburban area (-0.019)		农郊区 (0.023) Rural area (0.023)	
NDVI 变化率排序 NDVI slope sorted	绿化 NDVI 变化率 Greening NDVI slope	褐化 NDVI 变化率 Browning NDVI slope	绿化 NDVI 变化率 Greening NDVI slope	褐化 NDVI 变化率 Browning NDVI slope	绿化 NDVI 变化率 Greening NDVI slope	褐化 NDVI 变化率 Browning NDVI slope
1	上海市	0.056	丽水市	-0.015	淮南市	0.014
2	铜陵市	0.044	六安市	-0.009	蚌埠市	0.014
3	无锡市	0.039	台州市	0.000	宿州市	0.005
4	绍兴市	0.038	合肥市	0.001	淮北市	0.004
5	杭州市	0.038	温州市	0.003	上海市	0.001

通过比较老城区、新城区以及农郊区绿化、褐化的前五名城市(表 4),安徽省省会合肥的周边城市如淮南市、淮北市、蚌埠市、宿州市呈现聚集绿化趋势,淮南市的新城区趋势值最高(0.014/10 a),淮北市的农郊区趋势值最高(0.050/10 a)。总体来看,长江沿岸城市植被得到明显改善,安徽省北侧绿化趋势明显,而江苏省泰州市的新城区(-0.042/10 a)、农郊区(-0.008/10 a)均显示褐化。

为探究土地、人口和经济三类城市化因子对长三角地区植被覆盖城乡分异的影响,选取 7 个因子进行地理探测器分析,得到各因子对植被覆盖演变趋势的解释力(q 值)(图 8、表 5)。结果表明老城区与新城区解释力显著的因子均为不透水面积/总面积($P<0.05$),老城区 q 值为 0.42,新城区 q 值为 0.35,说明不透水面积/总面积是影响老城区、新城区 NDVI 演变趋势的主导因子,对老城区植被返绿的作用更为重要。城市化因子对农郊区 NDVI 演变趋势的解释力均表现不显著。从长三角总体区域看,城镇人口比重(0.47)、不透水面积/总面积(0.38)以及地区生产总值(0.36)三者都对植被覆盖演变趋势的解释力显著($P<0.05$),其中城镇人口比重 q 值最高(0.47),说明人口城市化对城市植被总体演变有较强的解释力。长三角地区植被覆盖的绿化趋势受正在进行的城市化影响,除地区生产总值增长率以外,其余城市化因子对老城区的植被覆盖演变均有正向影响。

表 5 2000—2020 年城乡 NDVI 变化率与城市化因子地理探测器结果

Table 5 Results of urban-rural NDVI slope and urbanization factor geographic detector from 2000 to 2020

因素 Factors	q			
	老城区 Urban	新城区 Suburban	农郊区 Rural	总体 Total
建成区面积/市区面积 Built-up area/urban area	0.20	0.31	0.22	0.29
建成区面积 Urban built-up area	0.35	0.16	0.15	0.20
不透水面积/总面积 Impermeable area/total area	0.42 *	0.35 *	0.28	0.38 *
地区生产总值 Gross regional production	0.46	0.20	0.29	0.36 *
地区生产总值增长率 Growth rate of gross regional product	0.26	0.30	0.28	0.26
城镇人口比重 Proportion of urban population	0.30	0.19	0.40	0.47 *
人口密度 Population density	0.47	0.28	0.21	0.28

* 表示 q 值在 0.05 层上显著(双尾)

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 长三角地区植被覆盖的时空演变

长三角地区 2000—2020 年 NDVI 略低于 2000—2015 年全国平均水平(0.52),也低于珠三角(0.69—0.75)、京津冀(0.53—0.63)与长江中游地区(0.76)^[21, 25—26], NDVI 变化率(0.18%/a)略低于全国增长速率(0.20%/a)^[7],远低于珠三角(0.51%/a)与京津冀地区(0.25%/a),高于长江流域(0.07%/a)^[25, 27—28]。多项研究证据表明上世纪 80 年代以来全球植被变绿现象一直持续至今,北半球的植被也呈现出越来越绿的趋势,

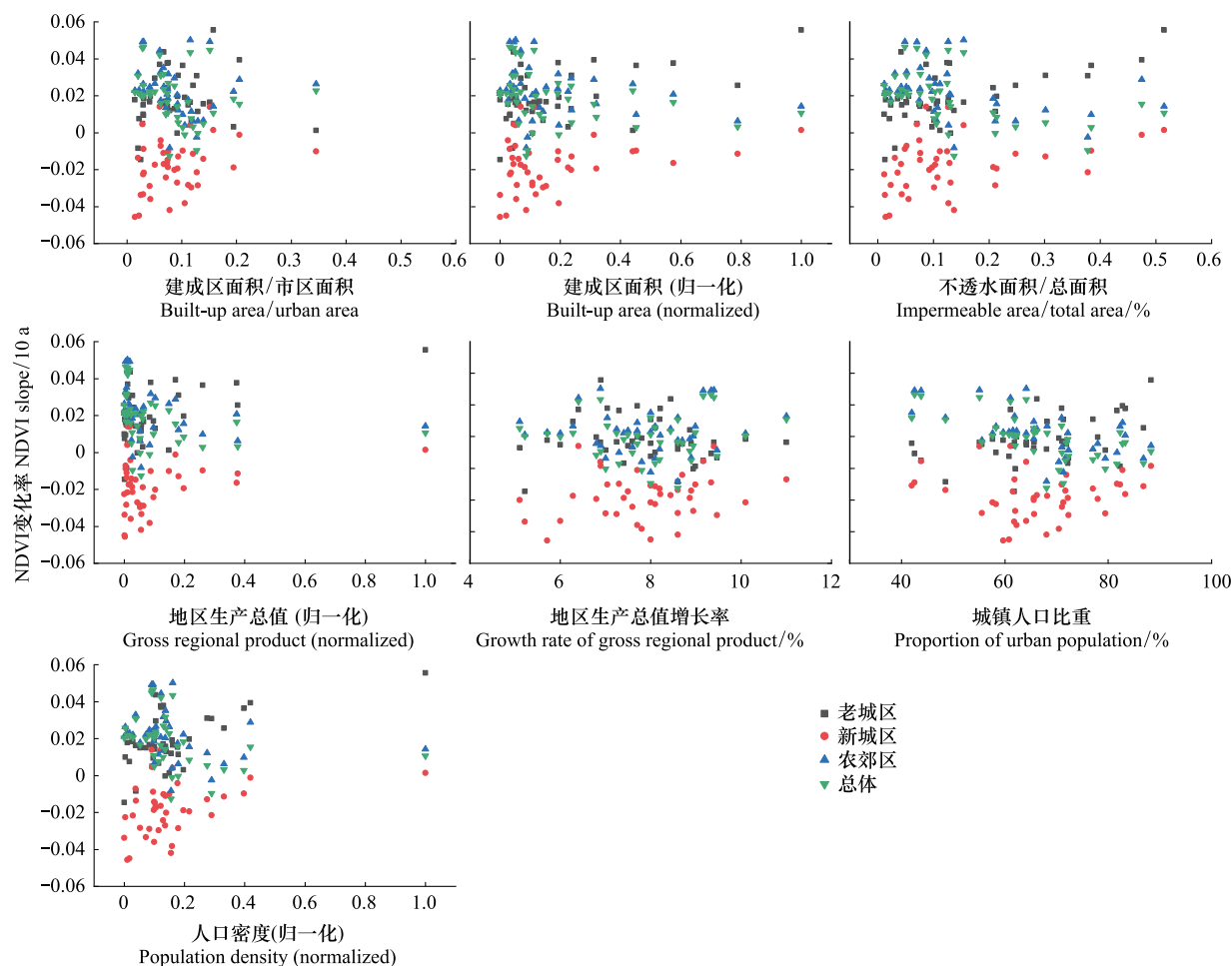


图8 2000—2020年城乡NDVI变化率与城市化因子关系

Fig.8 Relationship between NDVI slope and urbanization factors in urban and rural areas from 2000 to 2020

而中国地区的植被在过去几十年中也经历了多次绿化和褐化^[29],特别是中国中部和东部,植被覆盖状况改善,植被生态质量持续向好^[5]。在本研究中,长三角地区的70%以上区域呈现植被绿化及稳定不变的趋势,且明显绿化占52.06%,大面积绿化源于近年来重点防护林、生态廊道、湿地公园等生态恢复工程建设与生态保护力度加强^[30],也有研究表示最显著的绿化趋势出现在农业地区,这是由于植被覆盖演变受到农业生产活动的强烈影响^[1]。土地利用与植被同时绿化的区域以安徽省西北侧的淮北市、淮南市为主要代表,乡村振兴战略下“增减平衡”土地利用政策和农村人居环境整治政策的实施,农业植被增加和集中分布促进了植被的生长活动^[7]。

值得注意的是,长三角地区沪宁、沪杭沿线植被明显褐化,主要原因是林地被开垦为农田以及过度开发旅游业^[21]。Gan等发现杭州市城市建成区呈绿化趋势^[10],而城市边缘和郊区呈现褐化趋势,与本文研究结论相似,但杭州1990—2010年植被覆盖率总体呈下降趋势,这与本文2000—2020年杭州总体呈现绿化趋势的结论不尽一致,主要原因可能是研究时段上的差异。杭州在城市化快速建设时期(20世纪90年代)城市快速扩张,使得大量植被丧失,2000—2010年虽呈现植被恢复的现象,但不足以弥补20世纪90年代城市建设以来造成的植被丧失。2000—2010年长三角地区土地利用褐化转变绝大部分(95.48%)以牺牲耕地为代价;2010—2020年,褐变最大占比仍然是耕地转化为建设用地(93.90%)。高度城市化区域土地利用格局变化以农田和自然植被覆盖的斑块面积减少、破碎化为主,城镇建设用地平均斑块面积增大且呈聚合发展趋势^[11]。受土地利用变化影响,长三角的植被褐化区域表现出明显的空间集聚特征,主要集中在长三角地区的中北部

城市的周边水域附近,这是由于江苏省、上海市等平原河网地区的城市建设用地快速增加^[31]。

4.1.2 长三角地区植被覆盖城乡差异原因解析

2000—2020 年长三角地区 NDVI 城乡变化差异在时间上总体表现为老城区和农郊区呈现波动上升趋势,新城区呈现波动下降趋势,老城区的绿化趋势源于城市更新过程中对生态环境的建设和保护,绿地面积增多^[26]。本研究还得出结论:不透水面积/总面积是老城区 NDVI 演变趋势的主导因子($q=0.42, P<0.05$)。土地利用变化和经济生产等人为活动,尤其是大型生态保护项目在长三角地区植被绿化方面发挥了重要作用。例如,森林和农田的增加可以分别解释中国 42% 和 32% 的植被绿化现象^[1]。多年来森林保护项目(FPP)和退耕还林(GFG)项目促进林地和农田急剧增加,增加区域多分布在生态较为脆弱的区域和山地周围^[23]。

除本文探讨的土地、人口、经济三类城市化因子影响外,自然因素对长三角植被覆盖城乡差异的影响也不可忽视。在过去三十年(1989—2018 年),全球变暖背景下长三角地区的降水量呈现出略微下降的趋势^[32]。农郊区蒸发量和潜在蒸发量逐渐减少,而土壤水分呈增加趋势。在降水减少和变暖的背景下,复杂的地形和小气候同时影响植被生长,农郊区植被呈现绿化趋势^[33]。此外,早期的一项研究检测出温度升高地区占高纬度绿化地区的 31%,得出“日益快速的城市化进程所带来的城市热岛效应加速植被绿化”的结论^[34—35],即城市化因子对植被覆盖演变具备一定的正向影响。在过去的二十年里,许多新的城市绿色空间被建造,未来高植被郊区的扩张有助于提高城市的整体植被覆盖率,但可能会对周围的农村生态系统及其生物多样性或碳储量等产生负面影响^[36]。

长三角典型城市植被覆盖与土地利用变化对比分析结果表明,土地利用变化是长三角植被覆盖演变主要原因之一。城市扩张集中在新城区,原有生态用地被不透水层取代,并且工业生产、人口扩张和城市建设相应地阻碍了绿化进程,新城区的植被褐化明显。特大城市的城市用地扩张速度超过人口增长速度,而落后于 GDP 增长速度,植被覆盖增加的大部分城市的城区面积也在增加^[37]。本文地理探测器分析结果表明,城镇人口比重、不透水面积/总面积和地区生产总值三个因素对长三角地区植被覆盖演变的解释度显著($P<0.05$),其中城镇人口比重贡献最大($q=0.47$)。人口密度和 GDP 通常用于表示人类活动的强度,大量研究表明低人口密度有利于植被生长。现有城市区域的绿色集约化有助于适应不断增长的人口,增加植被覆盖率,促使城乡生态环境均衡发展^[38]。城市植被绿化或褐化不仅是对气候变化的响应,也是对人类活动干扰增加的响应^[39]。

4.2 结论

本研究以我国长三角地区为研究对象,通过开展近二十年来长三角地区植被生长动态的演变研究,探究了不同城市化水平下植被覆盖演变的潜在规律,并从土地利用/覆盖变化和城市化发展的角度解释其成因。主要结论如下:

(1) 2000—2020 年长三角地区植被总体呈绿化趋势,NDVI 平均增长速率为 0.18%。明显绿化占 52.06%,轻微绿化与稳定不变地区占区域面积的 31.68%,褐化区零星分布占 6.82%。长三角地区土地利用变化强度随时间的推移而增加,对老城区植被覆盖有双重作用。在上海、南京和杭州等人口城市化水平较高的城市中土地利用变化强度和植被覆盖变化趋势的最高值都出现在老城区,土地利用变化对植被绿化有促进作用;而在人口城市化水平相对较低的宣城、蚌埠和阜阳等城市,土地利用变化强度最高的老城区绿化程度较低,表明土地利用变化加速植被褐化。

(2) 从城市发展梯度看,长三角地区老城区总体呈现返绿趋势(0.016/10 a),新城区褐化明显(-0.019/10 a),农郊区绿化突出(0.023/10 a)。土地城市化是影响老城区、新城区植被覆盖变化趋势的主导城市化因子,而城市化因子对农郊区解释力总体表现不显著。从长三角总体区域看,城镇人口比重、不透水面积/总面积以及地区生产总值三者对植被覆盖演变存在显著影响,其中城镇人口比重影响最大。

参考文献(References):

- [1] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C,

- Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [2] Li C, Kuang Y Q, Huang N S, Zhang C. The long-term relationship between population growth and vegetation cover: an empirical analysis based on the panel data of 21 cities in Guangdong Province, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2013, 10(2): 660-677.
- [3] Sun L Q, Chen J, Li Q L, Huang D. Dramatic uneven urbanization of large cities throughout the world in recent decades. *Nature Communications*, 2020, 11: 5366.
- [4] 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.
- [5] Zhang X L, Huang X R. Human disturbance caused stronger influences on global vegetation change than climate change. *PeerJ*, 2019, 7: e7763.
- [6] Davies Z G, Fuller R A, Loran A, Irvine K N, Sims V, Gaston K J. A national scale inventory of resource provision for biodiversity within domestic gardens. *Biological Conservation*, 2009, 142(4): 761-771.
- [7] Zhao J J, Chen S B, Jiang B, Ren Y, Wang H, Vause J, Yu H D. Temporal trend of green space coverage in China and its relationship with urbanization over the last two decades. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 455-465.
- [8] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [9] Yu W J, Zhou W Q, Dawa Z X, Wang J, Qian Y G, Wang W M. Quantifying urban vegetation dynamics from a process perspective using temporally dense landsat imagery. *Remote Sensing*, 2021, 13(16): 3217.
- [10] Gan M Y, Deng J S, Zheng X Y, Hong Y, Wang K. Monitoring urban greenness dynamics using multiple endmember spectral mixture analysis. *PLoS One*, 2014, 9(11): e112202.
- [11] 胡昕利. 长江中游地区土地利用和植被 NDVI 动态及驱动因素研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [12] She Q N, Cao S S, Zhang S Q, Zhang J P, Zhu H K, Bao J H, Meng X, Liu M, Liu Y. The impacts of comprehensive urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta, China. *Ecological Indicators*, 2021, 132: 108337.
- [13] Peng X, She Q N, Long L B, Liu M, Xu Q, Zhang J X, Xiang W N. Long-term trend in ground-based air temperature and its responses to atmospheric circulation and anthropogenic activity in the Yangtze River Delta, China. *Atmospheric Research*, 2017, 195: 20-30.
- [14] 尹上岗, 杨山. 长三角地区城市人口-绿地面积异速增长特征及驱动机制. *地理研究*, 2021, 40(10): 2780-2795.
- [15] 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.
- [16] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李宜展, 赵安周. 1982—2012 年中国植被覆盖时空变化特征. *生态学报*, 2015, 35(16): 5331-5342.
- [17] 中华人民共和国国家统计局. 国际统计年鉴—2017. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [18] Gaughan A E, Stevens F R, Huang Z J, Nieves J J, Sorichetta A, Lai S J, Ye X Y, Linard C, Hornby G M, Hay S I, Yu H J, Tatem A J. Spatiotemporal patterns of population in mainland China, 1990 to 2010. *Scientific Data*, 2016, 3: 160005.
- [19] Jun C, Ban Y F, Li S N. Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434.
- [20] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of Earth Observation based global long term vegetation trends—comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 119: 131-147.
- [21] 易扬, 胡昕利, 史明昌, 康宏樟, 王彬, 张辰, 刘春江. 基于 MODIS NDVI 的长江中游区域植被动态及与气候因子的关系. *生态学报*, 2021, 41(19): 7796-7807.
- [22] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [23] Liu J Y, Zhang Z X, Xu X L, Kuang W H, Zhou W C, Zhang S W, Li R D, Yan C Z, Yu D S, Wu S X, Jiang N. Spatial patterns and driving forces of land use change in China during the early 21st century. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(4): 483-494.
- [24] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [25] 何全军. 基于 MODIS 数据的珠三角地区 NDVI 时空变化特征及对气象因素的响应. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1722-1730.
- [26] 赵安周, 刘宪锋, 裴韬, 王金杰, 张安兵, 宋辞. 京津冀地区不透水表面覆盖率的时空演变及其对植被的影响. *地理研究*, 2021, 40(6): 1582-1595.
- [27] 张亮, 丁明军, 张华敏, 文超. 1982—2015 年长江流域植被覆盖度时空变化分析. *自然资源学报*, 2018, 33(12): 2084-2097.

- [28] 张鹏骞, 胡理乐, 白加德. 京津冀地区近 20 年 NDVI 时空变化特征. 生态环境学报, 2021, 30(1): 29-36.
- [29] Piao S L, Yin G D, Tan J G, Cheng L, Huang M T, Li Y, Liu R G, Mao J F, Myneni R B, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Xiao Z Q, Zeng N, Zeng Z Z, Wang Y P. Detection and attribution of vegetation greening trend in China over the last 30 years. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1601-1609.
- [30] 刘垚燚, 曾鹏, 张然, 孙凤云, 车越. 基于 GEE 和 BRT 的 1984—2019 年长三角生态绿色一体化发展示范区植被覆盖度变化. 应用生态学报, 2021, 32(3): 1033-1044.
- [31] Lü Y, Fu B, Feng X, Zeng Y, Liu Y, Chang R, Sun G, Wu B. A policy-driven large scale ecological restoration: Quantifying ecosystem services changes in the loess plateau of China. *PloS one*, 2012, 7(2): e31782-e31782.
- [32] Tian F, Liu L Z, Yang J H, Wu J J. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities. *Ecological Indicators*, 2021, 125: 107479.
- [33] Haaland C, van den Bosch C K. Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: a review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(4): 760-771.
- [34] Myneni R B, Keeling C D, Tucker C J, Asrar G, Nemani R R. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 1997, 386(6626): 698-702.
- [35] Yuan M X, Wang L C, Lin A W, Liu Z J, Li Q J, Qu S. Vegetation green up under the influence of daily minimum temperature and urbanization in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105760.
- [36] Seto K C, Güneralp B, Hutyrá L R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(40): 16083-16088.
- [37] Richards D R, Belcher R N. Global changes in urban vegetation cover. *Remote Sensing*, 2019, 12(1): 23.
- [38] Vieira J, Matos P, Mexia T, Silva P, Lopes N, Freitas C, Correia O, Santos-Reis M, Branquinho C, Pinho P. Green spaces are not all the same for the provision of air purification and climate regulation services: the case of urban parks. *Environmental Research*, 2018, 160: 306-313.
- [39] Huo H, Sun C P. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on Geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China. *Ecological Indicators*, 2021, 130: 108005.