

DOI: 10.5846/stxb202104261100

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.

Wang S, Zhang L L, Lin W B, Huang Q S, Song Y X, Ye M. Study on vegetation coverage and land-use change of Guangdong Province based on MODIS-NDVI. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2149-2163.

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

王 思¹, 张路路¹, 林伟彪¹, 黄秋森¹, 宋亦心², 叶 脉^{1,*}

¹ 广东省环境科学研究院, 广州 510045

² 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030

摘要: 基于 MODIS-NDVI 遥感植被指数, 利用像元二分模型进行植被覆盖度提取, 结合趋势分析和显著性检验等方法, 对 2000—2020 年间广东省的植被覆盖时空变化特征进行分析, 并结合土地利用变化图谱, 探究土地利用类型对植被覆盖时空变化的驱动作用。结果表明: (1) 2000—2020 年, 广东省植被覆盖度整体以 0.23%/a 的变化率呈波动增长趋势, 但空间异质性显著, 呈现出以珠三角地区为中心向外辐射递增的趋势; (2) 广东省多年平均植被覆盖度介于 0.7—0.76, 以中高和高植被覆盖度为主, 低植被覆盖区约占研究区总面积的 4.37%。全省以植被改善为主 (78.18%), 显著和极显著退化区域占全区面积的 5.84%, 主要集中分布在珠三角、粤东沿海以及粤西沿海等地区; (3) 研究区以耕地与林地的图谱单元互换为主要土地利用变化特征, 而城乡、工矿、居民用地在耕地和林地的占用和补充过程中起了重要的作用, 反映出城乡建设过程中对耕地和林地的大量占用; 植被覆盖变化与土地利用变化存在响应联系, 且各土地利用类型对植被覆盖度的贡献各异; 向城乡、工矿、居民用地转化的图谱与植被显著和极显著退化区高度重合, 说明耕地和林地向城乡、工矿、居民用地转化是造成植被覆盖退化的主要原因, 其中以珠三角地区最为显著。

关键词: 归一化植被指数; 植被覆盖度; 时空变化; 土地利用变化图谱; 广东省

Study on vegetation coverage and land-use change of Guangdong Province based on MODIS-NDVI

WANG Si¹, ZHANG Lulu¹, LIN Weibiao¹, HUANG Qiusen¹, SONG Yixin², YE Mai^{1,*}

¹ Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China

² School of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

Abstract: In the National Strategy of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Guangdong Province assumed the function of the ecological protection barrier, and vegetation played an irreplaceable role in regional ecological security and sustainable development as an important regional ecological barrier. It was significant to study the change of fractional vegetation coverage (FVC) in Guangdong Province and its response to land-use change. Based on the MODIS-NDVI remote sensing index from 2000 to 2020, the study used dimidiate pixel model to extract FVC, trend analysis and significance test were used to analyze the temporal and spatial characteristics of FVC and to clarify driving forces of land-use change, which was expected to provide theoretical support and scientific basis for the construction of ecological security pattern and sustainable development decision-making in Guangdong Province. Results showed that (1) the FVC presented a volatility increasing trend with the change rate of 0.23% per year from 2000 to 2020. However, the spatial heterogeneity of FVC

基金项目: 广东省环保专项资金项目 (粤港澳大湾区生态环境科学中心建设 (2021—2022 年) (粤财资环[2021]13 号))

收稿日期: 2021-04-26; **网络出版日期:** 2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: vein1980@163.com

dynamic was significant, showing a center of the Pearl River Delta with an increasing trend of outward radiation. (2) The annual average vegetation coverage in Guangdong Province ranged from 0.7 to 0.76, which was dominated by the medium to high and high FVC types, while the areas of low FVC only accounted for about 4.37% of the study area, it was closely related to the regional differences in the topography, land-use types, urbanization process and economic development level of Guangdong Province. The FVC improved areas occupied 78.18% of the study area, significant and very significant degenerated areas accounted for 5.84% of the region which were concentrated in the Pearl River Delta, the east coast and the west coast of Guangdong Province. (3) The major characteristics of land-use change were swaps between the geo-spectrum unit of arable land and forest land, and urban-rural construction land played an important role in the occupation and replenishment of arable land and forest land, which reflected the massive occupation of arable land and forest land in the process of urban and rural construction. There was a response link between FVC change and land-use change, and the contribution of each land-use type to vegetation coverage varied. The map of transformation to urban-rural construction land highly overlapped with the degenerated areas of FVC, which meant the conversion of arable land and forest land to urban-rural construction land was the main reason for the degradation of FVC, most notably in the Pearl River Delta.

Key Words: NDVI; FVC; spatial and temporal change; geo-spectrum of land-use change; Guangdong Province

随着粤港澳大湾区国家战略的提出及“一核一带一区”区域发展新格局的构建,广东省的生态问题得到广泛关注。在粤港澳大湾区国家战略中,广东省承担着大湾区生态保护屏障功能,其森林覆盖率达 59.08%^[1],植被作为区域重要的生态屏障,对区域的生态安全和可持续发展起着不可替代的作用。植被覆盖度(Fractional Vegetation Coverage, FVC)作为重要的生态气候参数^[2],区域地表植被覆盖度的提取及变化分析,对揭示生态系统环境变化、植被恢复和重建布局具有重要意义^[3]。近年来,遥感数据因其区域性及时效性等优势日渐成为区域植被动态监测的重要数据^[4],由遥感数据反演的植被指数(VI)可以定量表达植被的生长状况,已被广泛用于植被动态的参数化表达^[5]。归一化差值植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI)是目前反映植被生长状况常用的两个植被指数^[6-7]。其中,NDVI 与植被分布密度呈显著线性相关,是研究植被覆盖度的重要参数^[8],也是应用最为普遍的植被定量监测指标^[9]。何全军等^[10]选取 RVI、NDVI 和 EVI 构建广东省植被指数序列并进行相关植被指数的应用分析,结果表明 RVI 和 NDVI 的相关性高且结果稳定,是广东省植被指数序列构建的最佳选择,而 EVI 具有数据异常现象。

目前,基于遥感信息估算植被覆盖度可归纳为经验模型法和植被指数转换法。像元二分法是利用 NDVI 对植被覆盖度进行提取的一种方法,很大程度上削弱了大气、土壤背景和植被类型的影响,普适性较好^[11-12],是当前应用最为广泛的植被指数法。前人基于此已取得了大量成果:穆少杰等^[13]探索了 2001—2010 年内蒙古地区植被覆盖度的空间格局和变化规律;李林叶等^[14]基于 MODIS-NDVI 数据,利用像元二分模型从区域和像元尺度分析了呼伦贝尔草原 2000—2016 年植被覆盖度时空变化和驱动机制;齐亚霄等^[15]利用天山北坡 2001—2015 年 MODIS-NDVI 数据,结合像元二分法进行植被覆盖度提取,并对其空间分布特征、随时间及地形的动态变化和面积加权重心进行分析。

近年来,广东省作为沿海开放省份,随着城镇化和工业化进程快速推进,土地利用类型发生较大变化,对广东省植被覆盖的空间格局也产生了深远的影响。地学信息图谱分析法通过图谱单元来记录时空复合信息^[16],常用于土地利用变化的研究^[17-18],然而,将土地利用变化图谱与植被覆盖变化相结合的研究鲜有报道。“一核一带一区”区域发展新格局要求全省区域协调发展,因此研究广东省植被覆盖变化及其与土地利用变化的相互驱动关系对于地区植被覆盖保持、土地利用结构优化、协调生态环境保护和经济发展具有重要意义。基于此,本文利用 GIS 技术,结合 NDVI 数据,采用像元二分模型对 2000—2020 年间广东省植被覆盖时空变化特征进行分析,并结合土地利用变化图谱特征,探究土地利用与植被覆盖之间的相互影响驱动关系,以为广东省生态安全格局构建及可持续发展决策提供理论支持和科学依据。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

广东省地处中国大陆的南端,位于 $109^{\circ}45'$ — $117^{\circ}20'E$ 和 $20^{\circ}09'$ — $25^{\circ}31'N$ 之间,现辖 21 个地市,地势北高南低,地貌以山地、丘陵占优势^[1,19](图 1)。广东属于东亚季风区,具有热带、亚热带季风和海洋等气候特点,常年植被覆盖较为丰富,地带性植被以北热带季雨林、南亚热带季风常绿阔叶林、中亚热带典型常绿阔叶林和沿海的红树林等为主^[20]。作为改革开放的排头兵、先行地、实验区,广东省承担着先行先试、敢为人先,率先建设生态文明、实现人与自然和谐共生现代化的历史使命^[21]。

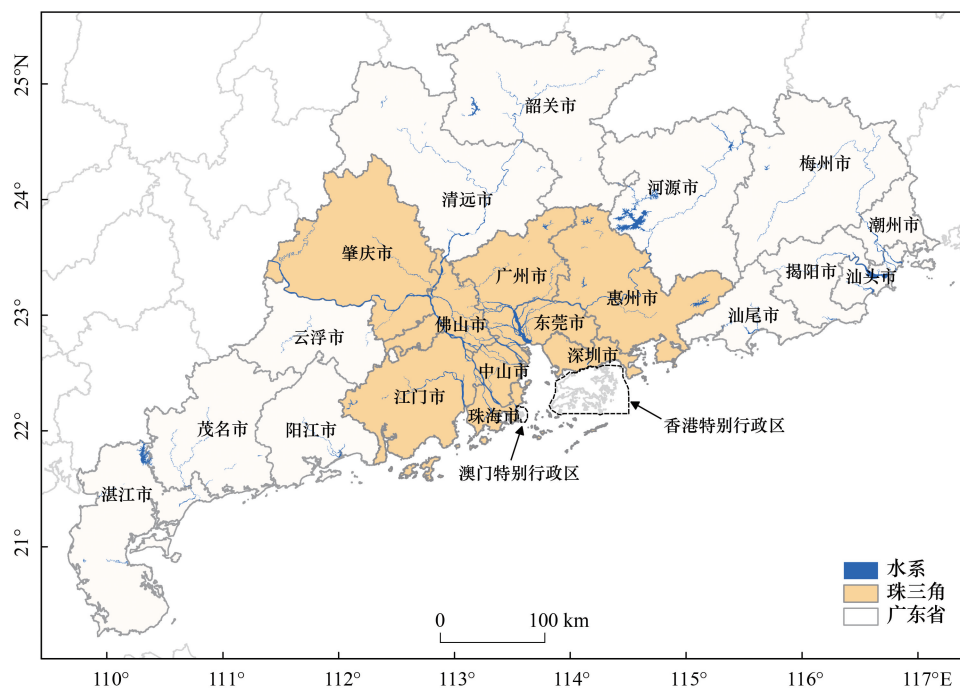


图 1 广东省行政区划

Fig.1 Administrative map of Guangdong Province

1.2 数据来源及处理

本文 NDVI 数据来源于美国国家航天局 NASA 提供的 MOD13Q1 级产品(<http://lpdaac.usgs.gov>),为更准确反映植被覆盖状况,选取植被生长季(4—10 月份)作为研究时段。时间范围为 2000(4 月—10 月)—2020(4 月—10 月),数据格式为 EOS-HDF,空间分辨率和时间分辨率分别为 250 m 和 16 d。NDVI 数据的预处理方法如下:首先使用 MRT(MODIS Reprojection Tools)工具进行格式、投影转换和波段提取,然后利用广东省行政边界进行研究区提取,最后采用最大值合成法^[10, 22—24]排除云和大气等干扰得到年 NDVI 影像。

此外,文中使用的广东省土地利用类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn>),空间分辨率 1 km,选取 2000 年和 2020 年两期土地利用数据。本文旨在揭示广东省植被覆盖规律和与土地利用之间的响应关系,植被覆盖与土地利用数据之间分辨率的差异不会对研究结果产生影响,因此未对两者的分辨率进行统一。

2 研究方法

2.1 植被覆盖度计算

植被覆盖度和 NDVI 之间存在极显著的线性相关关系,通过建立二者之间的转换关系,可直接提取植被

覆盖度信息。像元二分模型^[12-14]的原理:假设遥感传感器所观测到的每个像元的信息 S 可表达为由绿色植被部分所贡献的信息 S_v 与由裸土部分所贡献的信息两部分组成,将 S 分解为 S_v 和 S_s 两部分:

$$S = S_v + S_s \quad (1)$$

假设有植被覆盖面积比例即为植被覆盖度 C_i ,则裸土面积比例为 $1-C_i$ 。如果全由植被所覆盖的纯像元所得的遥感信息为 S_{veg} ,则 $S_v = C_i \times S_{veg}$,同理得 $S_s = (1-C_i) \times S_{soil}$,则:

$$S = C_i \times S_{veg} + (1 - C_i) \times S_{soil} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{S - S_{soil}}{S_{veg} - S_{soil}} \quad (3)$$

NDVI 是反映地表植被生长状态的重要指标因子,利用植被覆盖度和 NDVI 之间极显著的线性相关关系,在像元二分模型的基础上对植被覆盖度进行提取^[15]。基于上式(2)、(3)反演得到 21 年植被覆盖度的时间序列如下:

$$C_i = \frac{NDVI - NDVI_s}{NDVI_v - NDVI_s} \quad (4)$$

式中, $NDVI_v$ 为植被覆盖部分的 NDVI 值, $NDVI_s$ 为土壤部分的 NDVI 值, C_i 为植被覆盖度。 $NDVI_v$ 和 $NDVI_s$ 的取值是像元二分模型应用的关键,由于大气云层、地表湿度和光照等条件的影响, $NDVI_s$ 不再是一个接近于 0 的定值,其变化范围通常在 -0.1—0.2 之间^[13]。对于纯植被像元来说,植被类型及其构成、植被的空间分布和植被生长的季相变化都会造成 $NDVI_v$ 值的时空变异。结合实际情况,根据整幅影像上 NDVI 的灰度分布,选取累计频率为 0.5% 的 NDVI 值为 $NDVI_s$, 频率为 99.5% 的 NDVI 值为 $NDVI_v$, 最后得到 2000—2020 年的植被覆盖度分布图。

根据水利部 2008 年颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》中植被覆盖度分级标准和相关研究^[3,15],将植被覆盖度划分为 5 个等级: <30% (低覆盖度)、30%—45% (中低覆盖度)、45%—60% (中等覆盖度)、60%—75% (中高覆盖度)、>75% (高覆盖度)。

2.2 植被覆盖度年际变化趋势

2.2.1 趋势分析

趋势性分析是以单个像元的时间变化趋势来反映整体空间变化规律,基于像元的一元线性回归分析可模拟区域时空格局变化趋势。利用 ENVI 的 Layer Stacking 工具对 21 年植被覆盖度波段进行合成,然后利用趋势分析功能对 21 年植被覆盖度进行一元线性回归,生成的多波段影像包含斜率、截距和 R^2 。其计算公式为^[25]:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times C_i) - \left(\sum_{i=1}^n i \right) \left(\sum_{i=1}^n C_i \right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中, θ_{slope} 为单个像元植被覆盖度回归方程的斜率; C_i 为第 i 年的植被覆盖度; n 为检测时段的年数; 变量 i 从 1 到 n , 为研究时段年份的序号。回归方程的斜率 (θ_{slope}) 代表植被覆盖度各栅格单元的变化趋势,当 $\theta_{slope} > 0$ 时,表明该栅格单元所代表的植被覆盖度随时间变化而增大,反之当 $\theta_{slope} < 0$ 时,表明该栅格单元所代表的植被覆盖度随时间变化呈下降趋势。

2.2.2 显著性检验

采用 F 检验对变化趋势进行显著性检验, $P < 0.01$ 为极显著变化, $0.01 < P < 0.05$ 为显著变化, $P > 0.05$ 为不显著变化^[26, 27]。统计量计算公式如下:

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (6)$$

式中, $U = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 称为误差平方和, $Q = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 称为回归平方和, y_i 为第 i 年植被覆盖度的像元值, $\hat{y}_i$ 为其回归值, $\bar{y}$ 为研究时段植被覆盖度的平均值, n 为研究年数, 即 $n=21$ 。根据检验结果将变化趋势分为 6 个等级: 极显著退化 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$); 显著退化 ($\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < P < 0.05$); 不显著退化 ($\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$); 不显著改善 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$); 显著改善 ($\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < P < 0.05$); 极显著改善 ($\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$)。

2.3 土地利用变化图谱分析

2.3.1 建立土地利用变化图谱

目前主要是通过对不同时期的土地利用数据进行空间叠加, 以反映一定时期内的土地利用格局变化, 而图谱就是“空间与过程”研究的时空复合体。因此, 借鉴已有的图谱融合方法^[28-29], 对前后两期土地利用类型的图谱单元代码按照地图代数叠加运算而实现图谱融合, 从而记录图谱单元的演化过程。具体操作为:

$$C = 10 \times A + B \quad (7)$$

式中, C 为表征研究时段内土地利用方式演化特征的图谱单元栅格图; A 为前一时期即 2000 年广东省土地利用类型的图谱单元栅格属性值; B 为后一时期即 2020 年广东省土地利用类型的图谱单元栅格属性值。根据土地利用现状遥感监测数据, 本文基于耕地、林地、草地、水域、城乡、工矿、居民用地和未利用地 6 个一级土地利用类型对 2000 年、2010 年和 2020 年三期图谱单元进行融合, 由此得到广东省 2000—2020 年的土地利用变化图谱和 2000—2010—2020 年土地利用变化模式图谱特征。

2.3.2 土地利用变化图谱特征分析

为了更明显表现土地利用类型图谱单元的变化特征, 引入土地利用变化的变化比率和空间分离度指标。变化比率表示某种土地利用变化类型的图谱单元面积占研究区内所有土地利用变化类型图谱单元总面积的比率; 空间分离度描述图谱单元在空间分布上的分散程度, 分离度越大, 图谱单元在空间上分布越离散。计算公式如下^[30]:

$$C_{ij} = A_{ij} \times 100\% / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} \quad (i \neq j) \quad (8)$$

$$F_{ij} = \frac{1/2 \times \sqrt{N_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}}}{A_{ij} / \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}} \quad (9)$$

式中, C_{ij} 、 F_{ij} 分别表示变化比率和空间分离度; N_{ij} 、 A_{ij} 分别表示初期 (t) 第 i 种土地利用类型转变为末期 ($t+\Delta t$) 第 j 种土地利用类型的图谱单元数和面积; n 是土地利用类型的个数。

3 结果与分析

3.1 植被覆盖空间分异及年际变化

3.1.1 植被覆盖度的空间分布特征

利用广东省 2000—2020 年的植被覆盖度图, 计算得到多年平均植被覆盖度图 (图 2)。可以看出, 广东省 85% 以上的区域处于中高植被覆盖度及以上, 中等植被覆盖度、中低植被覆盖度和低植被覆盖度分别占研究区总面积的 6.27%、3.66% 和 4.37%。从空间分布来看, 广东省植被覆盖空间集聚性显著, 高植被覆盖区主要分布在粤北地区 (梅州、清远、河源、韶关、云浮 5 市), 因粤北地区以丘陵、山地为主, 是原生型亚热带常绿阔叶林、天然针叶林的集中分布区, 植被覆盖度远高于全省其他地区; 粤西地区 (湛江、茂名、阳江 3 市) 是全省热量资源最丰富的区域, 植被种类丰富, 植被覆盖度仅次于粤北地区; 粤东地区 (潮州、揭阳、汕头、汕尾 4 市) 是广东省人口密度较大的地区, 频繁的人类活动使得区域原生植被保存受到影响, 植被覆盖度低于粤北、粤西地区^[31]; 而低植被覆盖区则主要集中在珠三角地区, 这与广东省的地势特征、城市化进程以及经济发展水平的区域差异密切相关^[32]。

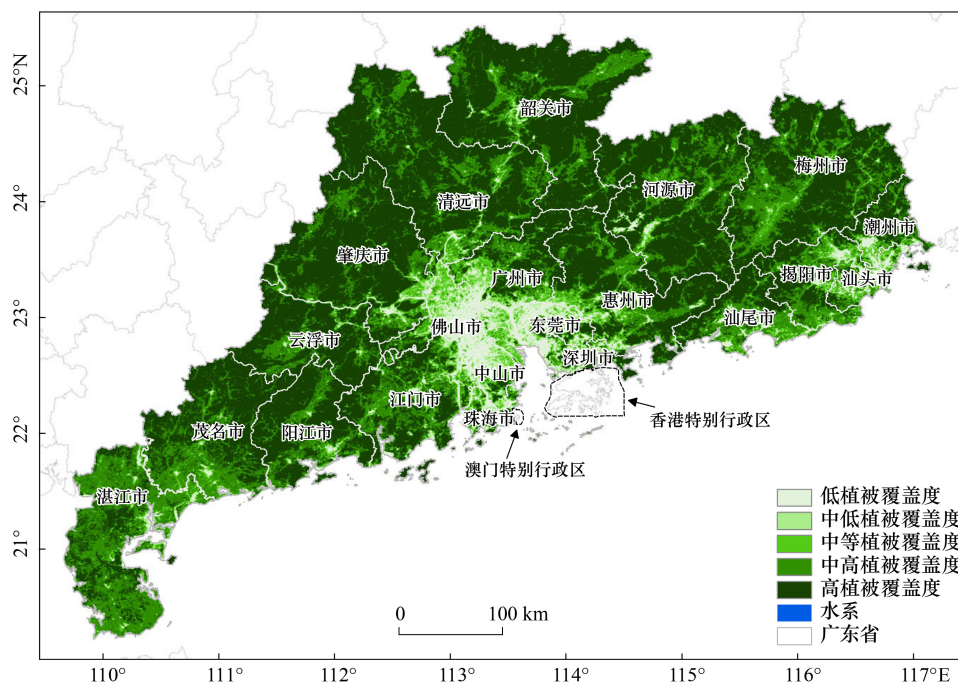


图2 广东省年平均植被覆盖度空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of average annual FVC values in Guangdong Province

3.1.2 植被覆盖度的年际变化特征

对研究区 2000—2020 年 4—10 月的平均植被覆盖度进行统计分析发现(图 3), 2000—2020 年广东省平均植被覆盖度在 0.7 和 0.76 之间变化, 整体以 0.23%/a 的变化率呈现波动增长趋势。对研究区不同等级的植被覆盖度进行统计分析(图 4), 结果发现: 2000—2020 年间, 研究区的高植被覆盖度面积大致呈增长态势, 中高植被覆盖度面积呈减少趋势, 中等、中低和低植被覆盖度面积呈波动状态。其中: (1) 高植被覆盖度所占比例在 46%—67%, 2000 年占比最低, 2020 年达最高; (2) 中高植被覆盖度所占比例在 18%—36%, 2000 年占比最高, 2020 年达最低; (3) 中等、中低和低植被覆盖度所占比例在 14%—18% 之间波动, 其中 2000 年为最高, 占 17.83%; 2016 年达最低, 为 13.93%。总体来看, 高植被覆盖度所占比例呈逐渐增加的趋势, 这与广东省 2000—2018 年 NDVI 的时空变化趋势一致^[1]。

由于年际变化是所有像元进行平均的结果, 为深入分析植被覆盖变化趋势的空间差异, 对 2000—2020 年植被覆盖度进行逐像元线性拟合。结果发现: 植被覆盖极显著退化的区域主要集中分布在珠三角、粤东沿海和粤西沿海等地, 增幅较大的区域则零散分布在各个地市。F 检验表明, 绝大部分像元植被覆盖度不存在显著的增减趋势(图 5), 呈极显著和显著改善的像元占比 36.92%, 呈极显著和显著退化的像元占比 5.84% (表 1)。

为了进一步比较各地市植被覆盖度的年际变化差异, 对广东省、珠三角、粤东、粤西和粤北地区植被覆盖显著变化情况进行统计(表 2)。结果表明: 广东省极显著或显著改善面积大于退化面积, 整体呈改善状态; 从

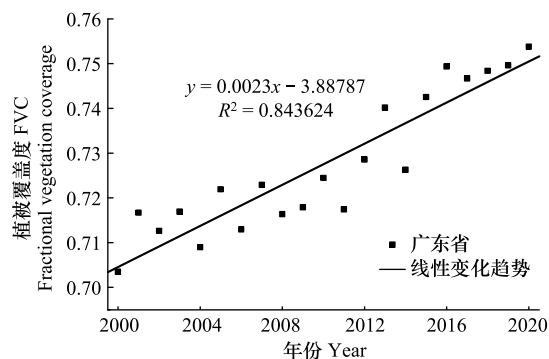


图3 2000—2020 年研究区平均植被覆盖度变化趋势

Fig.3 Temporal variation of annual mean FVC values of the study area during 2000 to 2020

各地区来看,极显著和显著改善区主要集中在粤北地区,极显著和显著退化区则主要集中在珠三角地区;从面积差来看,粤北地区极显著变化面积差最大,占广东省的 44.9%,显著变化面积差占比 52.8%。这表明广东省近 21 年的植被恢复和生态建设取得了一定成果,主要集中分布在粤北地区。

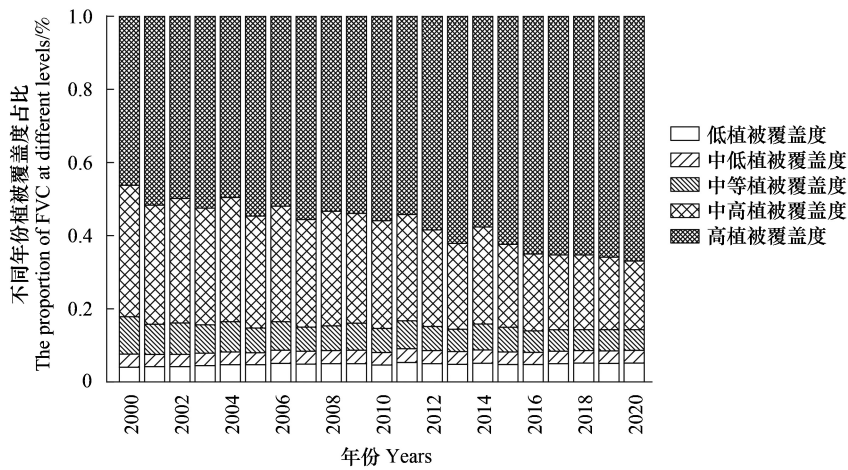


图 4 不同等级植被覆盖度年际变化图

Fig.4 The inter-annual variation of FVC at different levels

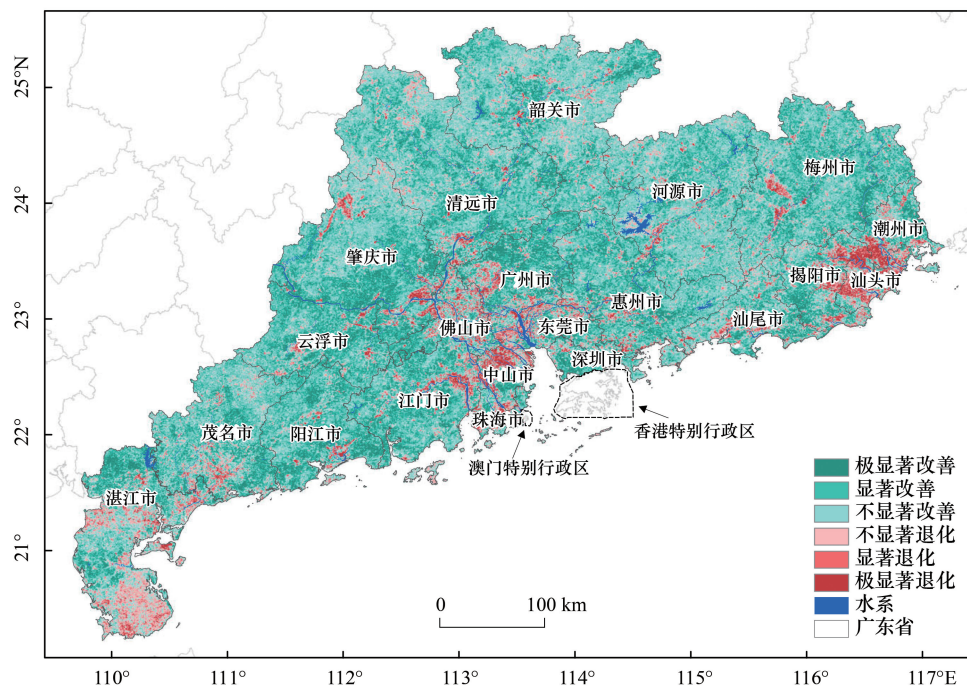


图 5 广东省植被动态变化

Fig.5 Dynamic change of vegetation in Guangdong Province

3.2 土地利用变化图谱特征

3.2.1 图谱单元的数量变化特征

2000—2020 年,广东省土地利用变化的总面积达 57341 km²,存在 30 类土地利用变化图谱(表 3、图 6)。从变化比率看,耕地和林地的相互转化(编码 12 和 21)占土地利用变化总量的 45.6%,是该时段广东省最主

要的土地利用变化类型。被占用与补充比率相差最大的为城乡、工矿、居民用地,被占用比率(7.83%)小于补充比率(16.49%),相差 8.7%,呈现以城乡、工矿、居民用地扩张为主要特征;其次为耕地:耕地累计被占用比率为(38.84%)大于补充比率(33.33%),相差 5.5%,这说明耕地转换过程被占用大于补充,耕地数量净减少;林地被占用规模也较明显:林地被占用比率(35.76%)大于补充比率(33.1%),相差 2.7%;草地、水域和未利用地被占用和补充比率差较小,整体变化不大。广东省整体呈现耕地和林地被占用,城乡、工矿、居民用地补充的土地利用变化特征。

表 1 植被覆盖度变化的显著性统计
Table 1 Significant statistic of fractional vegetation coverage (FVC)

序号 Serial code	变化程度 Degree of change	分级标准 Classification standard	比重 Percentage/%
1	极显著退化	$\theta_{\text{slope}} < 0, P < 0.01$	3.66
2	显著退化	$\theta_{\text{slope}} < 0, 0.01 < P < 0.05$	2.18
3	不显著退化	$\theta_{\text{slope}} < 0, P > 0.05$	15.98
4	不显著改善	$\theta_{\text{slope}} > 0, P > 0.05$	41.26
5	显著改善	$\theta_{\text{slope}} > 0, 0.01 < P < 0.05$	13.77
6	极显著改善	$\theta_{\text{slope}} > 0, P < 0.01$	23.15

表 2 2000—2020 年广东省各地区植被覆盖面积变化/km²
Table 2 Significant change of FVC area during 2000 to 2020 in various regions of Guangdong Province

行政区 Administrative regions	极显著变化 Very significant change			显著变化 Significant change		
	改善 Improve	退化 Degenerate	面积差 Area difference	改善 Improve	退化 Degenerate	面积差 Area difference
广东省	40830.7	6470.6	34360.1	24254.1	3855.6	20398.5
珠三角地区(9 市)	14002.6	2875.2	11127.5	7261.7	1462.7	5799.0
粤东地区(4 市)	2884.0	1583.5	1300.5	1545.7	665.9	879.7
粤西地区(3 市)	7392.2	895.1	6497.1	3807.5	864.3	2943.2
粤北地区(5 市)	16551.9	1116.8	15435.1	11639.3	862.7	10776.6

表 3 2000—2020 年各土地利用类型累计变化情况
Table 3 Cumulative change of land-use types during 2000 to 2020

编码 Code	土地利用类型 Type of land-use	变化比率 Change ratio/%			面积 Area/km ²		
		被占用 Occupied	补充 Replenish	比率差 Ratio difference	被占用 Occupied	补充 Replenish	面积差 Area difference
1	耕地	38.84	33.33	5.51	22270	19111	3159
2	林地	35.76	33.10	2.66	20506	18980	1526
3	草地	9.26	9.02	0.25	5312	5170	142
4	水域	8.11	7.92	0.20	4653	4541	112
5	城乡、工矿、居民用地	7.83	16.49	-8.65	4492	9454	-4962
6	未利用地	0.19	0.15	0.04	108	85	23

从图谱单元的变化比率和空间分离度来看(图 6),耕地与林地(编码 12、21)、耕地与城乡、工矿、居民用地(编码 15、51)和林地与草地(编码 23、32)互换的分离度最低且相近;未利用地与林地,草地,城乡、工矿、居民用地,水域之间的相互转化较少,变化比率均小于 0.1%,而空间分离度较大,说明相关变化图谱单元在区域上占比较小,分布较分散。

基于表 3 的分析,用补充比率减去被占用比率得到补充和占用比率差,对广东省 21 个地市耕地和林地,草地,水域,城乡、工矿、居民用地的比率差逐个进行分析(图 7),发现:(1)各地市耕地和林地面积补充和占用比率差均小于 0,城乡、工矿、居民用地比率差均大于 0,草地和水域的比率差在 0 上下浮动,说明广东省整

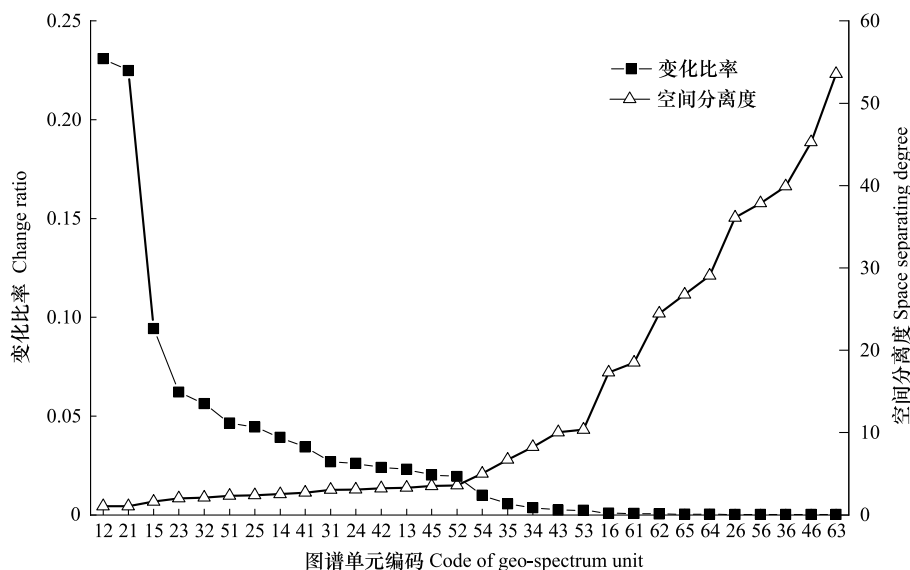


图 6 广东省土地利用变化图谱单元的变化比率和空间分离度

Fig.6 Change ratio and space separating degree of land-use change atlas unit in Guangdong Province

图谱单元编码中:1: 耕地 Arable land;2: 林地 Forest land;3: 草地 Grass land;4: 水域 Water body;5: 城乡、工矿、居民用地 Urban-rural construction land;6: 未利用土地 Unused land;12: 表示耕地→林地转移类型,以此类推

体耕地和林地整体面积减少,城乡、工矿、居民用地增加,草地和水域面积变化不大,与之前结论相符;(2)除去肇庆、珠海、佛山等地,耕地和林地与城乡、工矿、居民用地变化曲线基本以 x 轴为轴对称,说明被占用的耕地和林地面积用于补充城乡、工矿、居民用地;(3)相比其他地区,珠三角地区占用大量的耕地和林地用于发展城乡、工矿、居民用地,以广州、东莞最为显著。总的来说,广东省呈现占用耕地和林地转换成城乡、工矿、居民用地的显著特征,以珠三角地区最为显著。

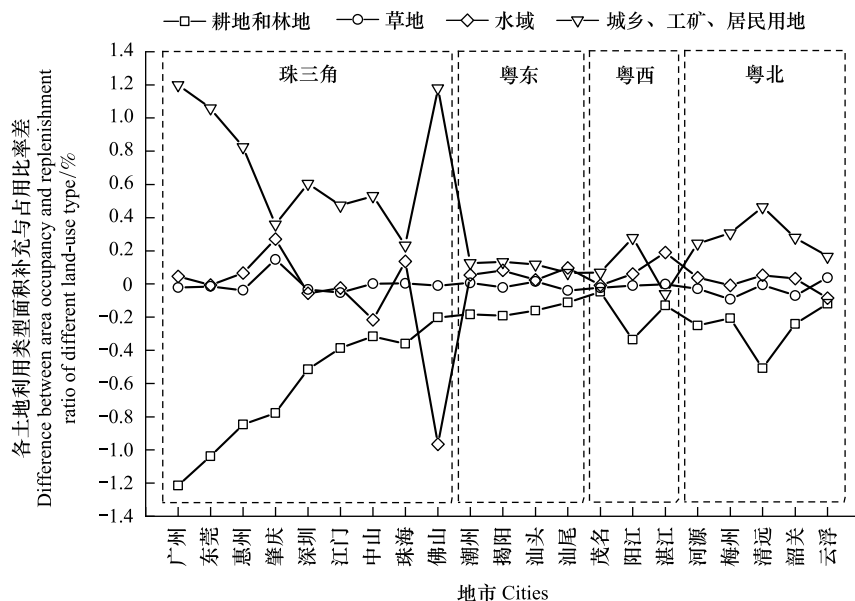


图 7 广东省各地市不同土地利用类型面积补充与占用比率差

Fig.7 Difference between area replenishment and occupancy ratio of different land-use type in Guangdong Province

3.2.2 耕地和林地变化模式的图谱特征

为了进一步研究耕地和林地利用变化模式,通过融合 2000、2010 和 2020 年 3 期土地利用数据,构建耕地和林地利用变化模式图谱。由表 4 可知,全省耕地利用变化模式以后期变化和前期变化为主,反复变化次之,持续变化所占比例较小;林地利用变化模式则有所不同,以后期变化为主要变化类型,反复变化次之,前期变化和持续变化所占比例较小。

表 4 耕地和林地利用变化模式图谱特征

Table 4 Geo-spectrum characteristics of arable land-use and forest land use change model

土地利用类型变化模式 Change model of land-use types	编码 Code	转移类型 Type of transfer	图谱变化单元数 Number of geo- spectrum unit	面积 Area/km ²	本阶段转移比率 Transferring ratio in the stage/%
耕地 Arable land	前期变化	122 耕地→林地→林地	8195	7269.8	75.1
		133 耕地→草地→草地	751	290.4	3.0
		144 耕地→水域→水域	991	520.7	5.4
		155 耕地→城乡、工矿、居民用地→城乡、工矿、居民用地	1871	1601.5	16.5
		166 耕地→未利用地→未利用地	14	3.0	0.0
		合计 11822	9685.4	100.0	
	后期变化	112 耕地→耕地→林地	9013	5112.0	52.0
		113 耕地→耕地→草地	1223	625.8	6.4
		114 耕地→耕地→水域	1629	1209.1	12.3
		115 耕地→耕地→城乡、工矿、居民用地	3380	2854.5	29.0
		116 耕地→耕地→未利用地	43	29.9	0.3
		合计 15288	9831.3	100.0	
	反复变化	121 耕地→林地→耕地	6846	4392.5	61.4
		131 耕地→草地→耕地	1338	507.8	7.1
		141 耕地→水域→耕地	1700	758.2	10.6
		151 耕地→城乡、工矿、居民用地→耕地	3202	1483.5	20.7
		161 耕地→未利用地→耕地	45	16.8	0.2
		合计	13131	7158.9	100.0
	持续变化	123 耕地→林地→草地	771	341.2	13.0
		124 耕地→林地→水域	563	221.6	8.4
		125 耕地→林地→城乡、工矿、居民用地	1561	613.7	23.4
		126 耕地→林地→未利用地	17	5.1	0.2
		132 耕地→草地→林地	882	272.3	10.4
		134 耕地→草地→水域	99	30.0	1.1
		135 耕地→草地→城乡、工矿、居民用地	237	79.6	3.0
		136 耕地→草地→未利用地	4	1.5	0.1
		142 耕地→水域→林地	560	172.9	6.6
		143 耕地→水域→草地	84	23.1	0.9
		145 耕地→水域→城乡、工矿、居民用地	665	231.2	8.8
		146 耕地→水域→未利用地	3	1.8	0.1
		152 耕地→城乡、工矿、居民用地→林地	1095	360.4	13.7
		153 耕地→城乡、工矿、居民用地→草地	129	40.4	1.5
		154 耕地→城乡、工矿、居民用地→水域	547	215.7	8.2
		156 耕地→城乡、工矿、居民用地→未利用地	6	2.3	0.1
		162 耕地→未利用地→林地	14	3.5	0.1
		163 耕地→未利用地→草地	4	0.9	0.0
		164 耕地→未利用地→水域	9	2.0	0.1
		165 耕地→未利用地→城乡、工矿、居民用地	17	5.0	0.2
		合计	7267	2624.2	100.0

续表

土地利用类型变化模式 Change model of land-use types	编码 Code	转移类型 Type of transfer	图谱变化单元数 Number of geo- spectrum unit	面积 Area/km ²	本阶段转移比率 Transferring ratio in the stage/%
林地 Forest land	前期变化	211 林地→耕地→耕地	7032	3534.8	70.8
		233 林地→草地→草地	1518	552.7	11.1
		244 林地→水域→水域	602	260.7	5.2
		255 林地→城乡、工矿、居民用地→城乡、工矿、居民用地	939	640.8	12.8
		266 林地→未利用地→未利用地	5	1.2	0.0
		合计	10096	4990.2	100.0
	后期变化	221 林地→林地→耕地	8592	8427.2	63.8
		223 林地→林地→草地	2792	2596.3	19.7
		224 林地→林地→水域	1185	925.9	7.0
		225 林地→林地→城乡、工矿、居民用地	1842	1248.6	9.5
		226 林地→林地→未利用地	10	5.3	0.0
		合计	14421	13203.3	100.0
	反复变化	212 林地→耕地→林地	9521	5620.6	67.3
		232 林地→草地→林地	3022	1448.7	17.4
		242 林地→水域→林地	1327	571.1	6.8
		252 林地→城乡、工矿、居民用地→林地	1573	700.3	8.4
		262 林地→未利用地→林地	22	6.7	0.1
		合计	15465	8347.3	100.0
	持续变化	213 林地→耕地→草地	920	313.6	14.2
		214 林地→耕地→水域	487	186.5	8.4
		215 林地→耕地→城乡、工矿、居民用地	1250	532.9	24.1
		216 林地→耕地→未利用地	6	1.9	0.1
		231 林地→草地→耕地	871	271.3	12.3
		234 林地→草地→水域	93	28.4	1.3
		235 林地→草地→城乡、工矿、居民用地	114	36.1	1.6
		236 林地→草地→未利用地	1	0.2	0.0
		241 林地→水域→耕地	629	197.5	8.9
		243 林地→水域→草地	126	38.2	1.7
		245 林地→水域→城乡、工矿、居民用地	217	71.5	3.2
		246 林地→水域→未利用地	2	0.8	0.0
		251 林地→城乡、工矿、居民用地→耕地	1266	413.4	18.7
		253 林地→城乡、工矿、居民用地→草地	134	42.0	1.9
		254 林地→城乡、工矿、居民用地→水域	191	68.1	3.1
		256 林地→城乡、工矿、居民用地→未利用地	2	0.6	0.0
		261 林地→未利用地→耕地	17	5.5	0.2
		263 林地→未利用地→草地	3	0.8	0.0
		264 林地→未利用地→水域	5	1.1	0.0
		265 林地→未利用地→城乡、工矿、居民用地	2	0.7	0.0
		合计	6336	2211.3	100.0

(1)前期变化型。前期变化型模式指土地仅在 2000—2010 年间出现转移的类型。在耕地的前期变化模式中,“耕地→林地→林地(编码 122)” (75.1%) 和“耕地→城乡、工矿、居民用地→城乡、工矿、居民用地(编码 155)” (16.5%) 占本阶段转移总面积的 91.6%,其中以“耕地→林地→林地(编码 122)”为主要转移类型,面积达 7269.8 km²;在林地的前期变化模式中,“林地→耕地→耕地(编码 211)” (70.8%) 为主要转移类型,面积约为 3534.8 km²,远小于“耕地→林地→林地(编码 122)”,其次为“林地→城乡、工矿、居民用地→城乡、工

矿、居民用地(编码 255)”(12.8%)。

(2)后期变化型。后期变化型模式指土地仅在 2010—2020 年间出现转移的类型。耕地的后期变化型模式中“耕地→耕地→林地(编码 112)”(52%)和“耕地→耕地→城乡、工矿、居民用地(编码 115)”(29%)占本阶段转移总面积的 81%,林地则以“林地→林地→耕地(编码 221)”(63.8%)和“林地→林地→草地(编码 223)”(19.7%)为主要转移类型。

(3)反复变化型和持续变化型。反复变化型是指土地仅在 2010 年发生转移,2000 和 2020 年土地利用类型保持一致;持续变化型指土地在 2000—2010 年间持续发生转移。耕地和林地的反复变化模式分别以“耕地→林地→耕地(编码 121)”(61.4%)和“林地→耕地→林地(编码 212)”(67.3%)为主要转移类型;持续变化型模式则分别以“耕地→林地→城乡、工矿、居民用地(编码 125)”(23.4%)和“林地→耕地→城乡、工矿、居民用地(编码 215)”(24.1%)为主要转移类型。

结合耕地和林地的四种土地利用类型变化模式,可见城乡、工矿、居民用地在耕地和林地的占用和补充过程中起了重要的作用,反映出城乡建设过程中对耕地和林地的占用。

3.3 植被动态与土地利用变化响应

结合 2000—2020 年广东省植被动态变化及土地利用变化特征来看(图 5、图 8),改善是最主要的植被动态变化形式,占比高达 78%。植被改善区以耕地和林地、林地和草地的相互转化为主,说明土地利用类型之间的相互转化会使得植被覆盖发生变化。土地利用变化图谱中变化最为显著的是“耕地→林地(编码 12)”图谱单元类型,分布相对分散;其次图谱变化比较明显的是“耕地→城乡、工矿、居民用地(编码 15)”、“林地→城乡、工矿、居民用地(编码 25)”、“耕地→水域(编码 14)”、“水域→耕地(编码 41)”和“水域→城乡、工矿、居民用地(编码 45)”,主要集中分布在珠三角、粤东沿海和粤西沿海等地,与植被覆盖显著和极显著退化区的分布相似(图 5),说明向城乡、工矿、居民用地转化是造成植被覆盖退化的主要原因。

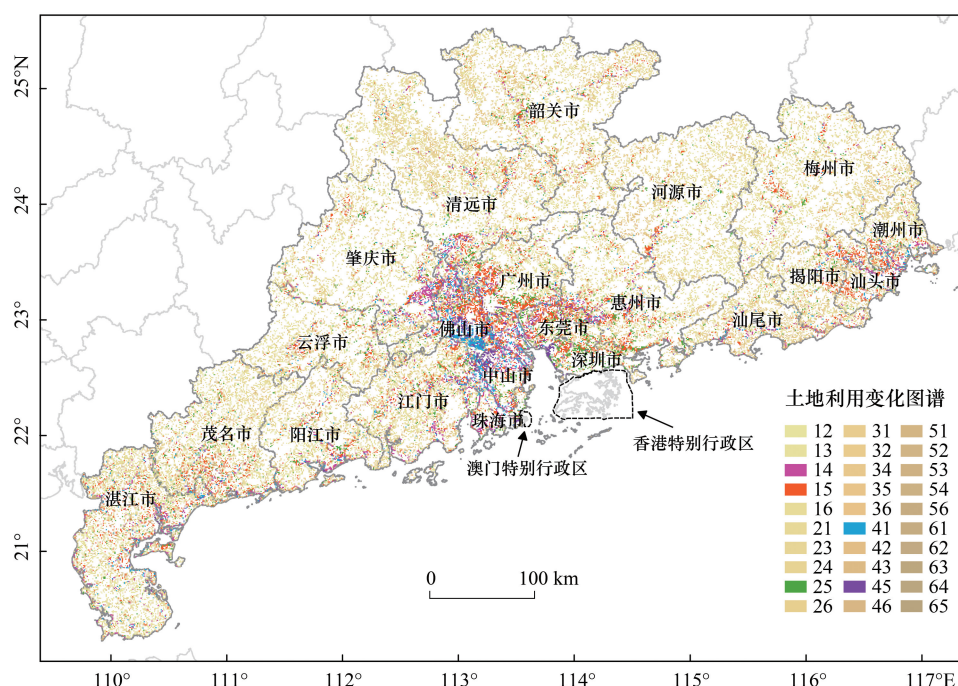


图 8 2000—2020 年广东省土地利用变化图谱

Fig.8 Land-use change atlas in Guangdong Province during 2000 to 2020

通过 2000 年、2010 年和 2020 年不同土地利用类型的植被覆盖度变化分析可知(图 9)不同土地利用类型面积占比发生明显变化,耕地面积先减后增,整体呈减少趋势,这与耕地的前期变化型模式保持一致,主要表

现为耕地转化为林地和城乡、工矿、居民用地;林地面积先增后减,总面积有所减少,这与耕地和林地前后期的互相转化有关;草地和水域面积变化不大;城乡、工矿、居民用地面积一直保持增长趋势,总面积明显增加。各土地利用类型的植被覆盖度存在明显差异,其中耕地、林地和草地以中高植被覆盖度及以上为主。2000—2020年间,耕地、林地和草地高植被覆盖占比持续增加,中高和中等植被覆盖占比持续减少,其中林地以高覆盖为主,高植被覆盖面积显著增加;水域和城乡用地都以低覆盖为主。结合植被覆盖度明显的上升趋势分析,各土地利用类型对植被覆盖度的贡献各异,以林地的贡献最大。

综合图5、图8和图9可以发现:(1)城市化进程导致耕地、林地等向城乡、工矿、居民用地转化,使得植被覆盖发生退化;(2)在生态城市指引下带来的林地面积的恢复令城市绿化度增加,进而改善植被覆盖。

4 讨论与结论

作为衡量地区生态的重要因子,由于不同研究采取的置信度水平存在差异可能造成结果的差异,但基本都是利用NDVI和植被覆盖度的正相关关系进行提取^[15]。过去已有大量研究运用不同数据源从不同时间和空间尺度对植被覆盖动态变化进行了研究^[1,33],得出我国和广东省总体植被覆盖逐渐绿化的趋势。

4.1 讨论

近年来,广东深入落实自然资源“两统一”职责,推动新时代广东生态保护修复取得良好成效^[21],植被覆盖整体呈现波动增长趋势。围绕广东省“三线一单”生态环境分区管控方案和“一核一带一区”区域发展新格局,结合本文研究结果,对珠三角核心区、沿海经济带和北部生态发展区实施差异性生态保护修复策略。

(1)珠三角核心区对标国际一流湾区,强化创新驱动和绿色引领,实施更严格的生态环境保护要求。珠三角地区植被覆盖较低,呈现“总体改善、部分退化”的显著变化趋势。植被退化区主要表现为大量的耕地和林地向城乡、工矿、居民用地转化,说明想要推进珠三角地区生态保护修复工作,必须重点加强城市空间与绿地系统、生态空间的统筹协调,以“逆城镇化”的发展趋势,推动产业高端化发展和促进生态环境质量协调化提升。生态修复重点区域主要集中在珠三角核心区,实施生态建设和生态修复,在保护生态空间的基础上合理开展生产建设活动^[36]。

(2)沿海经济带主要包含珠三角沿海7市和粤东、粤西地区。粤东、粤西地区植被覆盖较高,沿海少部分区域呈现植被退化趋势。沿海经济带东西两翼地区生态环境保护与经济发展介于珠三角核心区和北部生态发展区之间,发展不平衡不充分的问题较为突出,远未达到珠三角沿海地区发展水平。对于沿海经济带而言,坚持新型城镇化的建设道路,在推进环境治理项目、应用绿色科技的基础上,充分利用珠三角中心的辐射作用,发挥地区特色和资源禀赋,最大化减少产业同质化,打造生态环境与经济社会协调发展区,实现生态价值提升和产业高质量发展的匹配。

(3)北部生态发展区即粤北地区,其大部分区域为优先保护单元,以维护生态系统功能为主,禁止或限制大规模、高强度的工业和城镇建设。北部生态发展区,作为广东省的重点生态屏障,以中高和高植被覆盖为主,整体呈现为植被改善。随着生态环境分区管控方案的落实,北部生态发展区将保持植被改善的发展态势,打造广东生态安全屏障。然而,如何在高生态保护水平的前提下实现经济高质量发展,是北部生态发展区面临的重大课题。立足北部生态发展区的生态功能定位,坚持生态优先、绿色发展,推进产业生态化和生态产业

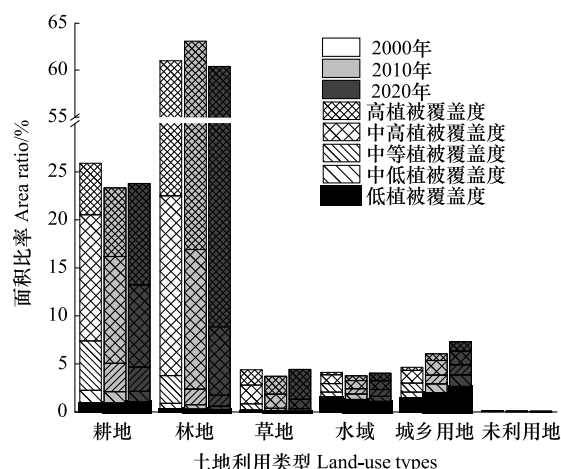


图9 2000和2020年广东省不同土地利用类型的植被覆盖度面积占比

Fig.9 Area ratio of FVC in different land-use types of Guangdong Province in 2000 and 2020

化的同时,健全生态补偿体制机制,实现乡村振兴。

习近平总书记的重要论述表明,新时代我们要协调好新型城镇化、逆城镇化和乡村振兴的关系^[37],以差异性生态保护修复策略和产业化、高端化和绿色化的发展思路,实现广东省生态环境和经济水平的协同发展。

4.2 结论

本文基于 2000—2020 年 MODIS-NDVI 数据分析了广东省近 21 年植被覆盖变化特征,并结合土地利用变化图谱,探究土地利用与植被覆盖度之间的相互影响驱动关系,得出以下结论:

(1)广东省多年平均植被覆盖度介于 0.7—0.76,85%以上的区域处于中高植被覆盖度及以上,植被空间集聚性特征显著,高植被覆盖区主要分布在粤北地区,低植被覆盖区则主要集中在珠三角区域,这与广东省的地势特征、土地利用类型、城市化进程以及经济发展水平的区域差异密切相关。广东省植被覆盖度整体以 0.23%/a 的变化率呈现波动增长趋势,高植被覆盖区面积逐年增加,全省植被呈正增长的区域面积占比达 78.18%;近 5.84% 的区域发生显著或极显著退化,主要集中于佛山、中山、广州、东莞等珠三角核心城市。随着广东省沿海地区低端产业向中部、北部转移以及经济不发达地区城市化、工业化进程的加速,导致广东省中等植被覆盖度区域向中部的肇庆、清远、惠州、云浮扩散,较高、高植被覆盖区域逐渐向北部和东部方向转移,其中高植被覆盖区域退缩到经济较为落后但森林资源丰富的粤北部,如韶关、河源、梅州一带^[33]。

(2)广东省的土地利用类型变化主要呈现以下 3 个特征:①耕地和林地的相互转化是 2000—2020 年广东省主要的土地利用变化类型;②珠三角、粤东和粤西沿海地区的土地利用变化类型以占用耕地和林地向城乡、工矿、居民用地转化为主;③城乡、工矿、居民用地在耕地和林地的占用和补充过程中起了重要的作用,反映出城乡建设过程中对耕地和林地的大量占用。

(3)国内外相关研究表明,人为活动主导下的土地利用变化与自然环境因子的时空分异构成了区域植被覆盖变化的重要驱动力来源^[34]。土地利用变化对于植被覆盖变化的影响主要源于土地转移过程中短时限的人为干扰和转移完成后较长时限的用地功能变化,往往表现为群落物种组成、生物生产能力、生态系统类型等方面的综合变化^[35],并在较大尺度上表现出明显的时空差异特征。研究结果也表明,研究区植被覆盖度的变化与土地利用变化存在响应联系,土地利用变化是研究区植被覆盖动态变化的重要影响因素之一。各土地利用类型对植被覆盖度的贡献各异,以林地的贡献最大;向城乡、工矿、居民用地转化的图谱与植被显著和极显著退化区高度重合,说明耕地和林地向城乡、工矿、居民用地转化是造成植被覆盖退化的主要原因。

参考文献 (References):

- [1] 邓玉娇,王捷纯,徐杰,杜尧东,陈靖扬,陈蝶聪. 广东省 NDVI 时空变化特征及其对气候因子的响应. 生态环境学报, 2021, 30(1): 37-43.
- [2] 张云霞,李晓兵,陈云浩. 草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述. 地球科学进展, 2003, 18(1): 85-93.
- [3] 吴昌广,周志翔,肖文发,王鹏程,汪涛,黄子杰. 基于 MODIS NDVI 的三峡库区植被覆盖度动态监测. 林业科学, 2012, 48(1): 22-28.
- [4] Fensholt R, Langanke T, Rasmussen K, Reenberg A, Prince S D, Tucker C, Scholes R J, Le Q B, Bondeau A, Eastman R, Epstein H, Gaughan A E, Hellden U, Mbow C, Olsson L, Paruelo J, Schweitzer C, Seaquist J, Wessels K. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981—2007: an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. Remote Sensing of Environment, 2012, 121(1/2): 144-158.
- [5] 闫俊杰,张静,雷雨,沙吾丽·达吾提拜,吕光辉. 2000—2016 年新疆伊犁河谷草地 NDVI 变化趋势分析. 草地学报, 2018, 26(4): 859-868.
- [6] Dutta D, Das P K, Paul S, Sharma J R, Dadhwal V K. Assessment of ecological disturbance in the mangrove forest of Sundarbans caused by cyclones using MODIS time-series data (2001 - 2011). Natural Hazards, 2015, 79(2): 775-790.
- [7] 陈燕丽,罗永明,莫伟华,莫建飞,黄永璘,丁美花. MODIS NDVI 与 MODIS EVI 对气候因子响应差异. 自然资源学报, 2014, 29(10): 1802-1812.
- [8] 杨艳丽,孙艳玲,王中良,康杰. 京津风沙源治理区植被变化的可持续性分析. 天津师范大学学报:自然科学版, 2016, 36(2): 47-53.
- [9] 何奕萱,易桂花,张廷斌,李景吉,别小娟,闫利,郑飞鸽. 红河流域“通道-阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力. 生态学报, 2018, 38(6): 2056-2064.
- [10] 何全军,曹静,张月维. 基于 MODIS 的广东省植被指数序列构建与应用. 气象, 2008, 34(3): 37-41.

- [11] 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 周海丽. 北京海淀区植被覆盖的遥感动态研究. 植物生态学报, 2001, 25(5): 588-593.
- [12] 彭飞, 范闻捷, 徐希孺, 刘星. 2000—2014 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化分析. 北京大学学报: 自然科学版, 2017, 53(3): 563-572.
- [13] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 刚成诚, 周伟, 居为民. 2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [14] 李林叶, 田美荣, 梁会, 陈艳梅, 冯朝阳, 渠开跃, 钱金平. 2000—2016 年呼伦贝尔草原植被覆盖度时空变化及其影响因素分析. 生态与农村环境学报, 2018, 34(7): 584-591.
- [15] 齐亚霄, 张飞, 陈瑞, 王一山. 2001—2015 年天山北坡植被覆盖动态变化研究. 生态学报, 2020, 40(11): 3677-3687.
- [16] 申丽娜, 孙艳玲, 杨艳丽, 景悦. 基于 NDVI 的三北防护林工程区植被覆盖度变化图谱特征. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 70-77, 106-106.
- [17] 张国坤, 邓伟, 张洪岩, 宋开山, 李恒达. 新开河流域土地利用格局变化图谱分析. 地理学报, 2010, 65(9): 1111-1120.
- [18] 常雄凯, 刘森, 李春林, 吕久俊, 陈探. 辽宁沿海土地利用变化的图谱特征. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3459-3465.
- [19] 姜春, 吴志峰, 程炯, 钱乐祥. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析. 自然资源学报, 2016, 31(06): 961-972.
- [20] 张争胜, 陈朝隆, 廖伟群. 广东地理. 北京: 北京师范大学出版社, 2016.
- [21] 裴凤松, 黎夏, 刘小平, 夏庚瑞. 城市扩张驱动下植被净第一性生产力动态模拟研究——以广东省为例. 地球信息科学, 2015, 17(4): 469-477.
- [22] 屈家树. 陆海统筹 生态优先——聚焦广东生态保护修复. 中国自然资源报, 2021-03-24(003).
- [23] 李美丽, 尹礼昌, 张园, 苏旭坤, 刘国华, 王晓峰, 奥勇, 伍星. 基于 MODIS-EVI 的西南地区植被覆盖时空变化及驱动因素研究. 生态学报, 2021, 41(3): 1138-1147.
- [24] 阮胜权, 王新广, 田风勋. 基于 MODIS-NDVI 的天津市静海区植被景观格局分析. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(11): 106-108.
- [25] 熊俊楠, 彭超, 程维明, 李伟, 刘志奇, 范春捆, 孙怀张. 基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析. 地球信息科学, 2018, 20(12): 1830-1840.
- [26] 吴炳伦, 孙华, 石军南, 张雨田, 石灵杰. 2000—2018 年深圳市植被覆盖动态变化与预测. 应用生态学报, 2020, 31(11): 3777-3785.
- [27] 李卓, 孙然好, 张继超, 张翀. 京津冀城市群地区植被覆盖动态变化时空分析. 生态学报, 2017, 37(22): 7418-7426.
- [28] 胡克林, 李保国, 林启美, 李贵桐, 陈德立. 农田土壤养分的空间变异性特征. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38.
- [29] 鲍文东, 侯志华, 吴泉源. 基于地学信息图谱的土地利用动态变化研究——以山东省龙口市为例. 地域研究与开发, 2007, 26(3): 80-84.
- [30] 吕晓, 史洋洋, 黄贤金, 孙晓芳, 苗志伟. 江苏省土地利用变化的图谱特征. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1077-1084.
- [31] 王金亮, 邵景安, 李阳兵. 近 20 a 三峡库区农林地利用变化图谱特征分析. 自然资源学报, 2015, 30(2): 235-247.
- [32] 刘海超. 基于 RS 和 GIS 的广东省植被覆盖度动态变化研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2015.
- [33] Shobairi S O, 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, 169-169.
- [34] 刘军会, 高吉喜. 气候和土地利用变化对中国北方农牧交错带植被覆盖变化的影响. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2016-2022.
- [35] 梁尧钦, 曾辉, 李菁. 深圳市大鹏半岛土地利用变化对植被覆盖动态的影响. 应用生态学报, 2012, 23(1): 199-205.
- [36] 陈新闯, 李锋, 李小倩, 胡印红, 韩婧, 胡盼盼. 珠三角城市群生态空间分区方法与管控对策. 生态学报, 2021, (13): 1-9.
- [37] 李启华. 广东统筹实施区域协调发展战略和乡村振兴战略的策略建议. 广东经济, 2019, (8): 36-41.