

基于地理探测器的闽三角城市群 植被覆盖时空变化及影响因素研究

吴思佳^{1,2}, 吴伟^{1,2}, 陈文惠¹, 张文燕¹, 林金煌¹, 程瑞彤¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;)

摘要: 基于研究区 1995、2000、2005、2010 和 2015 年的 Landsat TM/OLI 影像, 定量分析其植被覆盖空间格局及其变化规律, 并运用地理探测器探究植被覆盖影响因素的空间差异性。结果表明: 1995-2015 年闽三角城市群低、中低植被覆盖总体增加, 中、中高和高植被覆盖总体减少, 植被覆盖整体呈退化趋势; 闽三角地区植被覆盖水平与垂直空间变化明显, 其中在水平空间上, 严重退化区和中度退化区主要位于泉州东南区域和厦门地区; 在垂直空间上, 植被覆盖度分别在海拔 1 200~1 500 m、坡度 30°~40°达到最大值, 阴坡植被覆盖度高于阳坡, 而平地植被覆盖度最低; 植被覆盖变化主要受人类活动影响, 其中人口密度、建设用地和 GDP 的影响较大, 双因子之间的协同作用相对于单因子对植被覆盖变化的影响力更强。

关键词: 植被覆盖度; 时空变化; 地理探测器; 闽三角

中图分类号: Q948 文献标志码: A

Study on Temporal and Spatial Changes of Vegetation Coverage and Its Influencing Factors in the Urban Agglomeration of Min Delta Based on the Geographical Detector Method

WU Si-jia^{1,2}, WU Wei^{1,2}, CHEN Wen-hui¹,
ZHANG Wen-yan¹, LIN Jin-huang¹, CHENG Rui-tong¹

(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;

2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on Landsat TM/OLI images of 1995, 2000, 2005, 2010 and 2015, this study quantitatively analyzed the spatial pattern of vegetation coverage and its variation in the urban agglomeration of Min Delta, and used the geographical detector method to explore the factors. The results show that the low vegetation coverage and middle-low vegetation coverage increased, the middle vegetation and middle-high vegetation and high vegetation decreased, and the overall vegetation coverage showed a degraded trend in the urban agglomeration of Min Delta from 1995 to 2015. The vegetation coverage of horizontal and vertical space was significantly different in Min Delta. In the horizontal space, the severely degraded area and the moderately degraded area were mainly located in the southeast of Quanzhou and Xiamen regions. In the vertical space, the vegetation coverage reached a maximum at 1 200~1 500 m altitude and 30°~40° slope respectively, and it was higher in the shady slope than the sunny slope. However, the vegetation coverage was the lowest in the flat. The vegetation cover change was mainly affected by human activities, and the population density, construction land and GDP have a greater impact. The synergy between two factors has a

收稿日期: 2019-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0502901)

通信作者: 陈文惠 (1965-), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为遥感与地理信息系统应用. whchenfz@sohu.com

stronger influence on the change of vegetation cover than the single factor.

Key words: vegetation coverage; temporal and spatial variation; geographical detector; Min Delta

城市群是随着城市化进程的不断加剧,形成的一种空间相邻、协同发展的特殊区域,在推动城市化进程和社会发展等方面具有重要作用^[1].而素有“闽南金三角”之称的闽三角城市群位于我国亚热带地区,早期生态环境优良.但近年来,随着对“厦漳泉一体化”的重视程度不断增加,退植扩建和森林砍伐现象愈演愈烈,天然植被被人工绿地所代替,自然环境脆弱性增加^[2-3],人类活动的不断加剧影响了闽三角城市群区域内的生态环境平衡,破坏了植被的生长环境,因此对该地区的生态环境问题进行研究具有重要的意义^[4-5].

此外,植被是陆地生态系统的重要组成部分,很大程度上能直接反映区域生态环境的总体状况,体现自然以及人类活动对环境的交互作用^[6].而描述植被的重要参数——归一化植被指数(NDVI),已被广泛应用于探究植被覆盖变化^[7].邓晨辉等运用多元回归残差分析法和偏最小二乘回归法探究了秦岭植被覆盖时空变化与当地气候变化和人类活动的双重响应,发现人类活动在植被覆盖变化中发挥主导作用^[8];刘昱霞等在分析黄土高原植被覆盖时空变化的基础上,使用偏相关分析和残差分析法探讨了自然因素与人类活动对其的影响,发现人类活动对植被覆盖变化具有双重作用^[9].

尽管前人研究已聚焦自然因素和人类活动对植被覆盖变化的影响,但对于影响因素之间的协同作用研究仍旧较少,且大多数采用相关或回归等统计方法,此类方法主观性较强,仅仅从数量上描述了影响因子对植被覆盖变化的作用程度,并未定量分析影响因子对植被覆盖度空间分异的影响^[10].地理探测器(<http://www.geodetector.org>)是一种探测空间分异并揭示其潜在影响因子的一种方法,它通过探测地理现象的空间分层异质性来揭示其背后的驱动力^[11].例如柳冬青等通过地理探测器定量分析了甘肃白龙江流域土壤磷流失的空间分异与影响因素,探究了影响因子之间的交互作用,为磷治理提供了有效建议.而Du等发现该模型也适用于植被覆盖度空间分布研究^[12].该方法目前在人类健康方面应用较广泛,在自然、环境中的应用也逐渐普及,但运用于植被覆盖度影响因子研究仍较少^[11].

鉴于此,本研究基于1995-2015年5个时期的Landsat TM/OLI影像,定量分析闽三角城市群近20年植被覆盖度的空间格局及其变化规律,并运用地理探测器探究植被覆盖空间分异的主导影响因子及交互作用,为快速发展下的闽三角城市群的植被覆盖保护提供科学依据.

1 研究区概况

闽三角城市群总面积约 $2.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ (研究区不含金门县),包括厦门、泉州和漳州3个设区市,位于中国东南沿海——福建省东南部,东经 $116^\circ 53' 21'' \sim 119^\circ 01' 38''$,北纬 $23^\circ 33' 20'' \sim 25^\circ 56' 45''$ 处,素有“闽南金三角”之称^[13].该区域属典型的亚热带湿润季风气候,温度稳定在 $14.6 \sim 21.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,年均降水量 $1\ 000 \sim 1\ 200 \text{ mm}$,河网密布.研究区以山地丘陵为主,最高海拔 $1\ 823 \text{ m}$,最低海拔 -20 m ,地形起伏较大;森林覆盖以阔叶林、针叶林为主;土壤以红壤、砖红壤为主,抗侵蚀能力差.闽三角城市群地理位置见图1.

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本次研究选取1995、2000、2005、2010和2015年6~10月的Landsat TM/OLI影像(<http://www.gscloud.cn>),因为这时期植被生长较旺盛,能够更好地研究该区域的植被覆盖度,以增加植被时空变化研究的可比性.研究区完全被覆盖需要5景影像,轨道号分别为:119 042、119 043、120 042、120 043、120 044,为提高精度、减小地形和大气的误差,将原始影像分别进行辐射定标、大气校正、几何校正、镶嵌等预处理,将云量小的、信息量大的影像至于顶层,以形成质量较高的闽

三角城市群的完整影像^[14]。

2.2 研究方法

2.2.1 植被覆盖度估算

像元二分法模型假设每个像元的光谱信息均是由纯植被和纯土壤两种组分以面积比例加权而成的线性组合^[15-16], 即

$$VFC = \frac{(NDVI - NDVI_{soil})}{(NDVI_{veg} - NDVI_{soil})}$$

式中, VFC 为植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ 为裸土或无植被覆盖区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ 为纯植被像元的 NDVI 值。

本模型的应用的关键在于对 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 的取值上, 理论上 $NDVI_{soil}$ 应该是一个接近于 0 的值, 但是由于各种噪声的影响, 使得其取值通常在 $-0.1 \sim -0.2$ 之间, 而 $NDVI_{veg}$ 由于受到植被类型、植被生长周期的影响, 也无法取到理想值。因此本文参考前人的研究方法^[17], $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 通过 NDVI 频率累积表的 5% 的置信区间为纯土壤像元, 95% 的置信区间为纯植被像元。

植被覆盖度 VFC 介于 $[0, 1]$ 之间, 结合闽三角城市群植被覆盖的实际情况, 并根据《土壤侵蚀分类分级标准》将植被覆盖度分为 5 个等级^[18], 分别是: 低植被覆盖度: $<30\%$; 中低植被覆盖度: $30\% \sim 45\%$, 中植被覆盖度: $45\% \sim 60\%$, 中高植被覆盖度: $60\% \sim 75\%$, 高植被覆盖度: 75% 。

2.2.2 地理探测器

基于空间方差分析理论的地理探测器, 其理论的假设是: 如果某种影响因子对地理事物分布有重要影响, 那么该地理事物的空间分布和影响因子的空间分布应该具有空间一致性^[19]。地理探测器主要包括 4 个探测器, 其中因子探测器主要用于探测地理因子在多大程度上揭示了该地理事物的空间分异; 交互探测器用于探测不同因子在影响地理事物的空间分布方面是否发挥交互作用^[19]。目前对影响因素研究的主要方法有统计分析、系统分析和模型化方法^[20], 但这些传统方法对模型假设条件和数据要求较多, 而地理探测器模型假设制约条件较少, 可以有效降低传统数学统计模型处理此类问题的局限性。地理探测器最早被应用于疾病风险与地理环境要素的相关性研究, 近年来有学者将其用于探究人为因素和自然因素对植被覆盖变化的影响^[21]。地理探测器的具体公式为:

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

式中, q 是度量空间分异性的指标; $h=1, 2, \dots, L$ 为分类的数目; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的样本单元数; σ_h 和 σ 分别为层 h 和全区的方差。 q 的取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大, 说明空间分异性越明显。

结合前人研究^[21]以及数据的可获得性, 选取 1995 年和 2015 年研究区内降水量、气温、人口密度、GDP、耕地和建设用地因子, 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>); 并加入地形因子(坡度、坡向、海拔), 其提取自 30 m 的 DEM 数据(<http://www.gscloud.cn>)。本研究

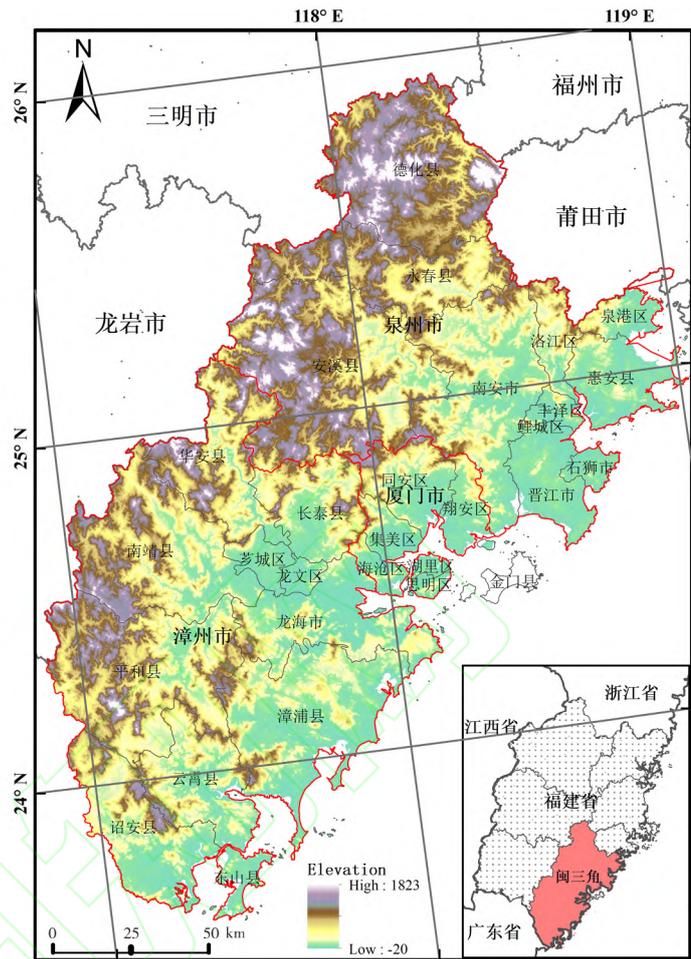


图 1 闽三角城市群地理位置

Fig. 1 Location of the urban agglomeration in the urban agglomeration of Min Delta

选取 $10\text{ km}\times 10\text{ km}$ 格网作为空间单元, 获取每个空间单元内 1995–2015 年影响因子的变化量, 并在 ArcGIS 中采用自然间断点法对各影响因子变化量进行等级分区, 分为 5 个等级, 分别探测各因子对闽三角城市群植被覆盖时空变化的影响.

3 结果与分析

3.1 植被覆盖时间变化特征

如图 2, 研究区植被覆盖总体状况良好, 随着时间的变化, 5 个不同等级的植被覆盖面积变化明显.

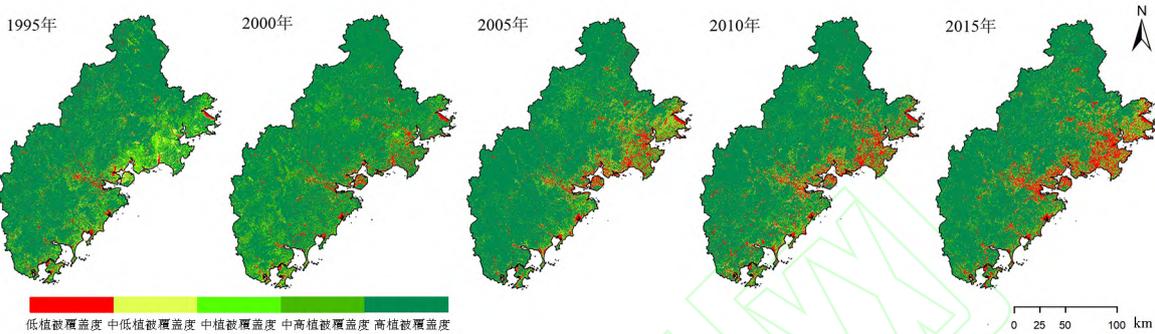
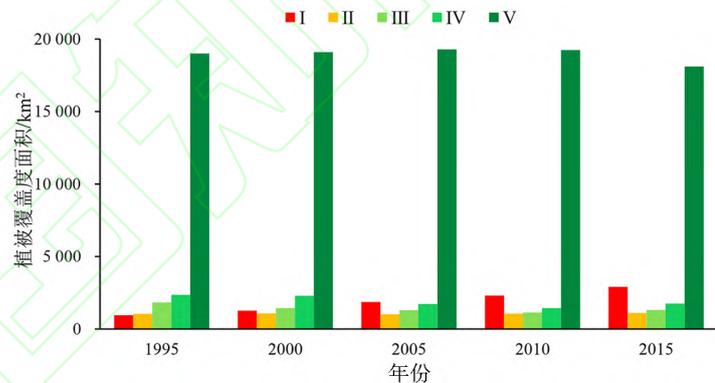


图 2 1995–2015 年闽三角城市群植被覆盖状况

Fig. 2 Changes of vegetation coverage in the urban agglomeration of Min Delta from 1995 to 2015

如图 3 示, 1995–2015 年, 低植被覆盖度的面积持续增加, 中低植被覆盖度的面积总体上呈现波动增加的趋势, 分别增加了 $1\,943.11\text{ km}^2$ 和 66.23 km^2 ; 而 1995–2010 年中植被覆盖度、中高植被覆盖度和高植被覆盖度的面积总体上呈现波动减少的趋势, 分别减少了 508.37 、 603.86 、 897.11 km^2 . 对比发现, 每一年高植被覆盖度所占总面积的比例均为最大, 均值达到了 75.23% . 但 2015 年发生了突变, 高植被覆盖度的面积比例降到了均值以下, 只占 71.88% ; 低植被覆盖度所占比例高于均值 3.82% , 表明 2015 年闽三角城市群的植被退化严重.



注: I 级到 V 级分别表示低植被覆盖度、中低植被覆盖度、中植被覆盖度、中高植被覆盖度和高植被覆盖度

图 3 1995–2015 年闽三角城市群不同等级植被覆盖度变化

Fig. 3 Different levels of vegetation coverage changes in the urban agglomeration of Min Delta from 1995 to 2015

3.2 植被覆盖空间变化特征

3.2.1 水平空间变化

根据前人研究植被覆盖度变化的分级标准^[22], 将 1995–2015 年闽三角城市群植被覆盖变化情况分为 7 个等级, 分别为: 严重退化区 ($< -30\%$)、中度退化区 ($-30\% \sim -10\%$)、轻微退化区 ($-10\% \sim -5\%$)、稳定区 ($-5\% \sim 5\%$)、轻微改善区 ($5\% \sim 10\%$)、中度改善区 ($10\% \sim 30\%$)、明显改善区 ($> 30\%$), 得到近 20 a 该区域分区县植被覆盖度变化 (图 4).

总体上, 该研究区的植被覆盖以稳定区为主, 占据总面积的 52.73% ; 其次是以改善区较多, 占据总面积的 26.56% . 改善区总面积比例在 35% 以上的有 7 县 (市、区), 按比例大小依次排列为: 东山县、诏安县、海沧区、龙文区、翔安区、漳浦县和同安区, 主要分布在闽三角的东南部地区. 研究区内植被覆盖呈退化状态的区域, 占据总面积的 20.71% . 退化区总面积比例在 35% 以上的有 11 个县 (市、区), 按比例大小依次排列为: 石狮市、晋江市、鲤城区、湖里区、翔安区、丰泽区、惠安

县、思明区、龙文区、集美区和海沧区, 主要分布在闽三角的东部地区. 其中石狮市、晋江市、鲤城区和湖里区的退化总面积比例在 55% 以上, 除了湖里区位于厦门市, 其他 3 个地区都位于泉州市, 表明该期间泉州市的植被生长环境恶化十分严重.

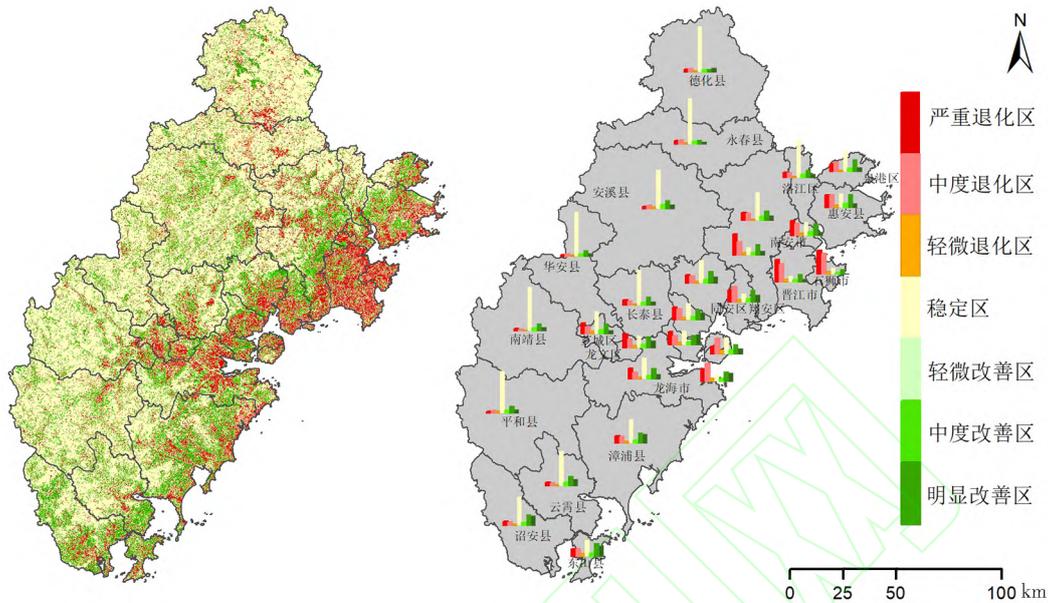


图4 1995-2015 闽三角城市群植被覆盖度变化及分区统计

Fig. 4 Change and zonal statistical result of vegetation coverage in the urban agglomeration of Min Delta from 1995 to 2015

3.2.2 垂直空间变化

闽三角地区主要以山地丘陵为主, 植被垂直空间差异显著^[23]. 为分析研究区植被覆盖在垂直空间上的分布特征, 分别探讨了海拔、坡度和坡向与植被覆盖度之间的相关关系.

研究区最低海拔为-20 m, 最高海拔为 1 823 m, 本次研究将其分为 6 个等级: ≤ 300 m、300~600 m、600~900 m、900~1 200 m、1 200~1 500 m 和 $\geq 1 500$ m, 分别统计近 20 a 海拔区间的平均植被覆盖度值分别为: 0.69、0.86、0.88、0.89、0.91 和 0.90. 同样地将研究区坡度划分为 6 个等级: $\leq 10^\circ$ 、 $10^\circ \sim 20^\circ$ 、 $20^\circ \sim 30^\circ$ 、 $30^\circ \sim 40^\circ$ 、 $40^\circ \sim 50^\circ$ 和 $\geq 50^\circ$, 相对应的植被覆盖度值分为: 0.67、0.85、0.90、0.92、0.90 和 0.67. 由图 5 可知, 随海拔和坡度的增加, 植被覆盖度呈现先增加后减少的趋势. 在 ≤ 300 m 的低海拔地区植被覆盖度最低, 这是由于低海拔地区人类活动频繁, 农业规划和城镇建设等的影响. 随海拔的升高先增加, 并在 1 200~1 500 m 区间上达到最大值, 而海拔的继续增加植被覆盖度开始降低. 这可能是由于海拔高的地区与海拔低的地区植被类型不同所致, 诸如林地变为灌丛草地^[24], 且海拔达到一定程度, 气温较低、降水量减少, 均影响了植被生长, 植被覆盖较低. 植被覆盖在坡度为 $30^\circ \sim 40^\circ$ 区间达到最大值, 而该区间主要是森林覆盖区域^[25], 加之人类活动较少, 因此植被覆盖率较高.

为进一步探究研究区内植被覆盖度与地形因子之间的关系, 探讨其随坡向的变化特征. 将研究区按照平地 (-1°)、阴坡 ($0^\circ \sim 45^\circ$ 、 $315^\circ \sim 360^\circ$)、半阳坡 ($45^\circ \sim 135^\circ$)、阳坡 ($135^\circ \sim 225^\circ$)、半阴坡 ($225^\circ \sim 315^\circ$) 分为 5 个坡向带, 分别统计每个坡向带的多年平均植被覆盖度值. 结果发现植被覆盖度随着坡向的变化而变化, 从小到大依次为平地 (0.31) < 半阳坡 (0.73) < 阳坡 (0.75) < 阴坡 (0.78) < 半阴坡 (0.80). 由此可知平地的植被覆盖度值最低, 而半阴坡的植被覆盖度相对最高. 这是由于平地的植被受到人类活动的影响最多, 而半阴坡的土壤水分充足、光热条件适宜, 湿润的地理条件更利于植被的生长. 由于阳坡太阳辐射量过高, 蒸发量过大致使土壤水分不足, 且阳坡多用于坡地农业垦殖, 因此阳坡相对于阴坡植被覆盖较差^[26].

3.3 影响因素的空间异质性分析

从植被覆盖度影响因子探测结果 (表 1) 发现, 各因子对植被覆盖度空间分异影响程度排序为:

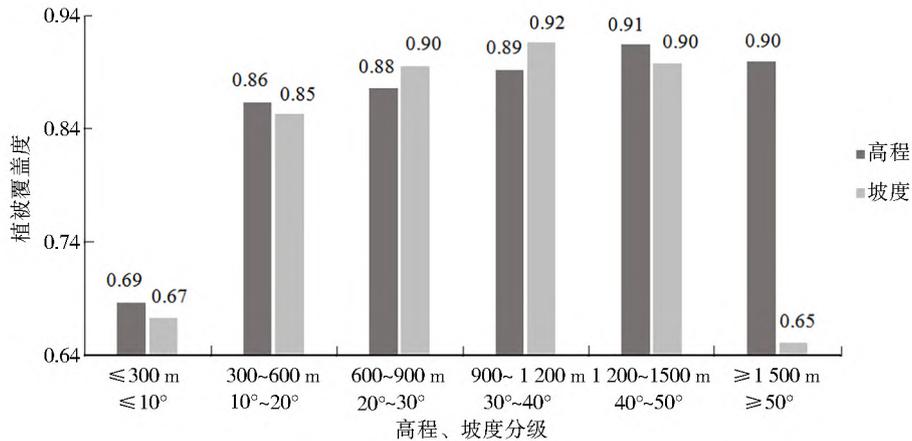


图5 闽三角城市群1995-2015年平均植被覆盖度在海拔和坡度上的变化

Fig. 5 Variation of annual average vegetation coverage value in elevation and slope in the urban agglomeration of Min Delta from 1995 to 2015

人口密度>建设用地面积>GDP>降水>气温>耕地面积>海拔>坡度>坡向。即人类活动对闽三角城市群植被覆盖变化具有至关重要的作用,突出表现为人口密度、建设用地面积和GDP,这3个要素的解释力明显高于其他影响因素。其次,气候因素对植被覆盖变化也具有较大的影响力,其中降水量的解释力略高于气温,说明降水量对植被覆盖变化的影响程度大于气温。此外,地形因子对植被覆盖度空间分异也存在一定影响,其中海拔和坡度对植被覆盖空间分异的影响高于坡向。

表1 1995-2015年植被覆盖变化的影响因子q值统计

Tab. 1 The q values of influencing factors of vegetation coverage changing in 1995-2015

	降水量	气温	人口密度	GDP	耕地面积	建设用地面积	海拔	坡度	坡向
q	0.192	0.190	0.289	0.214	0.147	0.247	0.110	0.107	0.009
p	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.012

交互作用探测结果(表2)表明除坡向以外的8种影响因子两两交互作用均会增加对植被覆盖变化的解释力。交互作用解释力靠前的均为人口密度与其他影响因子的协同作用,解释力均高于30%,其中人口密度与降水量的叠加作用最大,可解释35.3%的植被覆盖变化空间分布。此外,GDP与降水量的叠加也可大大加强单因子对植被覆盖变化的解释力,说明在人为因素与自然因素的共同作用对植被覆盖变化的影响力较强。

表2 不同影响因子交互作用探测

Tab. 2 The interactions between two covariates in different factors

	降水量	气温	人口密度	GDP	耕地面积	建设用地面积	海拔	坡度
气温	0.246							
人口密度	0.353	0.328						
GDP	0.316	0.255	0.320					
耕地面积	0.279	0.246	0.318	0.219				
建设用地面积	0.293	0.259	0.335	0.288	0.248			
海拔	0.284	0.308	0.331	0.241	0.231	0.251		
坡度	0.309	0.309	0.346	0.231	0.257	0.270	0.141	
坡向	0.240	0.244	0.310	0.183	0.175	0.214	0.165	0.170

4 讨论与结论

本研究基于1995、2000、2005、2010和2015年5个时期植被生长季(6-10月)Landsat系列数

据,运用像元二分模型估算闽三角城市群的植被覆盖度,分析了植被覆盖度的时间变化和空间分布格局;在此基础上利用地理探测器探究了闽三角城市群植被覆盖变化的主要影响因素及其交互作用,主要结论如下:

(1) 近20 a 闽三角城市群植被覆盖总体状况良好,高植被覆盖度均值达到了75.23%。这主要因为我国东南地区均温较高、雨量充沛、水热资源丰富,植被生长具有一定的先天优势^[27]。2015年植被覆盖退化较严重,可能是由于随着城市化的加快,对生态环境保护重视力度不够所致。

(2) 闽三角植被覆盖度整体呈“西高东低”的空间分布特征,空间分布差异明显。从水平空间上来看,主要以稳定区为主,严重退化区和中度退化区主要位于泉州东南区域和厦门地区。严重退化区占比达到30%以上的有3个地区,其中泉州市中的石狮市退化情况最为严重,占比达到38.57%,晋江市次之,占比为36.17%,鲤城区随后,占比为33.86%。表明这3个区域植被覆盖退化严重,有关部门可结合当地政策实施对植被加强保护。

(3) 从垂直空间上来看,地形特征是决定植被生境要素的主导因子,这与前任研究相一致^[28]。植被覆盖度随海拔的升高呈现出先增加后减少的趋势,在1200~1500 m 区间上达到最大值;随坡度等增加呈现先增加后减少的趋势,坡度为30°~40°处植被覆盖最佳;受水热条件的影响^[29],阴坡植被覆盖度高于阳坡,而平地植被覆盖度最低。

(4) 1995-2015年研究区内植被覆盖变化整体受人类活动影响较大,可能是因为快速发展的闽三角城市群地区,人口密度增加,居民所需生产生活用地增加,部分植被覆盖面积被用于建设用地,从而导致植被覆盖变化较大。而耕地面积相对于其他人类活动因子对植被覆盖影响较小,可能是因为闽三角以山地丘陵为主,地形起伏较大,多数植被覆盖的山地不适宜耕地种植。气候因素对植被覆盖影响也较大,主要是因为充足的水分和适宜的温度有利于植被的生长。在对植被覆盖垂直分布的研究中,发现地形因子与其空间分布具有一定关系,而根据因子探测结果得知海拔和坡度相对于坡向对植被影响更大,这与前人研究一致^[30],可能是因为海拔和坡度影响土壤水分与土壤肥力,且一定程度上影响了人类活动范围^[29],进而影响植被覆盖度。但地理过程的复杂性往往导致影响因子不是单独起作用,而是共同作用的,探讨其作用的耦合程度目前仍是急需解决的难题。本次研究采用交互探测器进行植被覆盖变化影响因子两两作用的探讨,以期发现影响因子间共同作用的规律。结果表明人口密度与其他影响因子的协同作用,解释力均高于30%,意味着人口密度因子的变化,使得降水量、坡度、建筑面积、海拔、气温、GDP和耕地面积因子对植被覆盖变化的影响力加大。因此,在制定植被管理政策时,应充分考虑人口密度的影响,有针对性的选取适合的治理方式。

闽三角城市群是目前我国东南地区的重要发展区域,虽生态状况一直保持良好的,但经济的迅速发展和人类活动的不断增加仍给生态环境带来了巨大压力。本研究得出闽三角城市群多年的植被覆盖空间格局及其变化规律,运用地理探测器对造成植被覆盖空间变化差异的影响因素进行分析,与传统的植被覆盖研究相比,更直观揭示出该区域植被的空间特征及影响其植被覆盖变化的因子作用情况。为该地区有关部门对其生态环境治理和植被保护提出了科学性指导建议。

参考文献:

- [1] 陆大道. 京津冀城市群功能定位及协同发展 [J]. 地理科学进展, 2015, 34 (3): 265-270.
- [2] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P, ZHAO D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the loess plateau area of China [J]. Ecological Modelling, 2006, 198 (1): 263-268.
- [3] HAN W, ZHAO S, FENG X, et al. Extraction of multilayer vegetation coverage using airborne LiDAR discrete points with intensity information in urban areas: a case study in Nanjing City, China [J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2014, 30 (1): 56-64.
- [4] WU D, HAO W, XIANG Z, et al. Evaluation of spatiotemporal variations of global fractional vegetation cover based on GIMMS NDVI data from 1982 to 2011 [J]. Remote Sensing, 2014, 6 (5): 4217-4239.
- [5] ZHEN L, YAN Z, ZHU Q, et al. Assessment of bank gully development and vegetation coverage on the Chinese Loess

- Plateau [J]. *Geomorphology*, 2015, 228 (2): 462-469.
- [6] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器模型的自然和人为因素对植被变化的影响 [D]. 太原: 山西大学, 2016.
- [7] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响 [J]. *地理学报*, 2018, 73 (3): 395-404.
- [8] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33 (3): 425-438.
- [9] 刘旻霞, 赵瑞东, 邵鹏, 等. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析 [J]. *干旱区地理*, 2018, 41 (1): 99-108.
- [10] 张金茜, 巩杰, 柳冬青. 地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析 [J]. *地理科学*, 2018, 38 (8): 1370-1378.
- [11] 王欢, 高江波, 侯文娟. 基于地理探测器的喀斯特不同地貌形态类型区土壤侵蚀定量归因 [J]. *地理学报*, 2018, 73 (9): 66-78.
- [12] DU Z Q, XU X M, ZHANG H. Geographical detector-based identification of the impact of major determinants on aeolian desertification risk [J]. *PLOS ONE*, 2016, 11 (3): e0151331.
- [13] 吴思佳, 林金煌, 陈文惠, 等. 2000 年以来 4 个时期闽三角城市群中的湿地格局及变化 [J]. *湿地科学*, 2018, 16 (6): 717-722.
- [14] 孙雷刚, 郑振华. 基于 RS 的近 30 年滹沱河流域植被覆盖度动态变化研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30 (6): 36-40.
- [15] YANG S W, DONG B, LIU L, et al. Research on vegetation coverage change in Sheng Jin Lake wetland of Anhui province [J]. *Wetlands*, 2015, 35 (4): 677-682.
- [16] MA N, HU Y F, ZHUANG D F, et al. Vegetation coverage distribution and its changes in plan blue banner based on remote sensing data and dimidiate pixel model [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012 (2): 251-256.
- [17] 王文辉, 马祥庆, 邹显花, 等. 2000-2010 年福建省植被覆盖度的时空演变特征 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24 (4): 234-239.
- [18] 吕丹红, 姜琦刚, 王德军, 等. Landsat 数据的植被覆盖估算和景观格局分析 [J]. *测绘科学* 2018 #3(11): 157-164.
- [19] WANG J F, LI X H, CHRISTAKOS G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24 (1): 107-127.
- [20] 李颖, 冯玉, 彭飞, 等. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变 [J]. *经济地理*, 2017, 37 (12): 180-189.
- [21] 裴志林, 杨勤科, 王春梅, 等. 黄河上游植被覆盖度空间分布特征及其影响因素 [J]. *干旱区研究*, 2019 (3): 546-555.
- [22] 张学玲, 张莹, 牛德奎, 等. 基于 TMNDVI 的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (7): 2414-2424.
- [23] 王文辉. 福建省植被覆盖度的动态变化及驱动因子分析 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [24] 陈桃, 包安明, 何大明. 基于 MODIS NDVI 的攀枝花市植被覆盖变化及其驱动力 [J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27 (8): 1847-1857.
- [25] 林金煌, 吴思佳, 陈文惠, 等. 闽三角地区森林景观及其生态服务价值遥感动态监测 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34 (6): 78-85.
- [26] 魏建瑛, 徐建英, 樊斐斐. 卧龙自然保护区植被覆盖度变化及其对地形因子的响应 [J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28 (2): 440-449.
- [27] 苏大学. 中国南方天然草场类型分类的探讨 [J]. *自然资源*, 1986 (2): 37-42.
- [28] 张诗羽, 张毅, 王昌全, 等. 岷江上游流域植被覆盖度及其与地形因子的相关性 [J]. *水土保持通报*, 2018, 38 (1): 69-75.
- [29] 陈洪磊, 欧阳炜, 吕凤玲, 等. 官渡河流域植被覆盖变化与地形因子相关性 [J]. *水土保持研究*, 2019, 26 (3): 135-140.
- [30] 刘尧文, 沙晋明. 基于 Landsat 影像的多时相植被覆盖度与地形因子关系研究: 以平潭岛为例 [J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 32 (4): 89-98.