

基于“源—汇”原理的森林空间格局变化研究

——以福建省为例

吴玲鑫¹, 林以恒², 李键¹, 胡喜生³

(1.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2.福建农林大学 资源与环境学院, 福建 福州 350002; 3.福建农林大学 交通与土木工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 借助“源—汇”景观原理,明晰区域性的森林覆盖时空变化特征所蕴含的内在机制,为森林资源保护提供决策依据。[方法] 利用福建省 2010 和 2020 年的土地利用/覆盖变化(LUCC)、数字高程模型(DEM)和道路交通数据集,将对森林丧失起到促进或阻止/延缓作用的景观分别视为“源”景观和“汇”景观,综合高程、坡度和距离 3 个景观空间要素计算得到综合景观空间负荷对比指数(LCI'),从省、市 2 种尺度对福建省森林丧失空间格局变化进行系统分析。[结果] 省域尺度下,2010 和 2020 年 LCI'分别为 0.117 和 0.152,“源”景观对森林丧失贡献较大,且景观空间要素的作用表现为:距离>坡度>高程;市域尺度下的 LCI'计算结果存在差异,南平、三明、龙岩,LCI'相对较小(<0),福州、莆田、厦门、泉州、漳州地区的 LCI'较大(>0);与 2010 年相比,2020 年福建省各市 LCI'均有小幅上升,其中福州市增长幅度最大(0.070),相对其他城市的森林丧失变化情况更为剧烈。[结论] 近 10 a 来,福建省各区域存在不同程度的森林丧失,LCI'能够将景观格局与过程相结合,在一定程度上有效地反映 2010—2020 年福建省森林空间格局变化情况。

关键词: “源—汇”景观原理; 森林覆盖变化; 福建省; 景观空间负荷对比指数

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2023)04-0238-10

中图分类号: P901

文献参数: 吴玲鑫, 林以恒, 李键, 等. 基于“源—汇”原理的森林空间格局变化研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 238-247. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230508.007; Wu Lingxin, Lin Yiheng, Li Jian, et al. Changes in forest spatial patterns based on source-sink principle [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 238-247.

Changes in Forest Spatial Patterns Based on Source-sink Principle

—A Case Study in Fujian Province

Wu Lingxin¹, Lin Yiheng², Li Jian¹, Hu Xisheng³

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2.College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

3.College of Transportation and Civil Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] The mechanism underlying the spatial and temporal variation characteristics of regional forest cover was studied by using the source-sink landscape principle in order to provide a basis for decision-making regarding forest resource conservation. [Methods] We collected datasets of land use/cover change (LUCC), digital elevation model (DEM), and road traffic in Fujian Province for 2010 and 2020, and identified landscapes (i.e., source landscapes and sink landscapes) that either promoted or prevented/delayed forest loss. The comprehensive location-weighted landscape contrast index (LCI') was calculated by integrating three landscape spatial elements (elevation, slope, and distance). The spatial pattern change of forest loss in Fujian Province was systematically determined at the provincial and city scales. [Results] At the provincial scale, LCI' was 0.117 and 0.152 in 2010 and 2020, respectively. The source landscape contributed more to forest loss, and the most influential of the spatial elements of the landscape was distance, followed by slope and elevation. There were differences in calculated LCI' at the city scale, with relatively small LCI' in

收稿日期: 2022-11-13

修回日期: 2023-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“森林覆盖空间位移的格局、过程与机制”(31971639); 福建省自然科学基金项目(2019J01406); 科技基础资源调查专项(2019FY202108); 福建农林大学林学高峰学科建设项目(72202200205)

第一作者: 吴玲鑫(1998—), 女(汉族), 福建省宁德市人, 硕士研究生, 研究方向为森林资源监测与评价。Email: 1210454008@fafu.edu.cn。

通讯作者: 胡喜生(1979—), 男(汉族), 福建省莆田市人, 博士, 教授, 主要从事道路生态学、自然资源的可持续利用与保护机制工作。Email: xshu@fafu.edu.cn。

Nanping, Sanming, and Longyan (<0) and large LCI' in Fuzhou, Putian, Xiamen, Quanzhou, and Zhangzhou (>0). The LCI' of all cities in Fujian Province in 2020 had increased slightly since 2010, with Fuzhou having the largest increase (0.070) and a more dramatic forest loss relative to other cities. [Conclusion] There have been different degrees of forest loss in various regions of Fujian Province during the last decade. The LCI' combined the landscape pattern with process, and effectively reflected changes in forest spatial patterns in Fujian Province from 2010 to 2020.

Keywords: source-sink landscape principle; changes in forest cover; Fujian Province; location-weighted landscape contrast index

森林是陆地上最大的生态系统,在维持全球生态平衡中发挥着不可替代的作用^[1]。在气候变化、人类生产生活以及地理因素变化等多种条件因素的综合作用下,森林覆盖的时空变化常常呈现出不同的特征及趋势^[2-6]。

长期以来国内外有大量学者开展了森林覆盖变化相关研究,主要包括:①利用遥感技术进行以森林数量变化为主的覆盖变化监测^[7-11],②在统计各种景观类型面积的基础上,选取一些景观指数^[12-13]进行森林景观格局分析,但这些指数的生态学意义却很少被关注^[14]。这些方法主要研究森林的数量以及空间格局的变化,却较少考虑其蕴含的内在机制。森林覆盖变化过程包含森林重建与森林丧失,我国通过多项森林保护政策促进森林覆盖率的净增长,但人工林和森林再生造成的这种增加可能掩盖天然林下降的趋势,使人们在一定程度上忽略森林丧失生态过程的事实^[15]。因此,需要一种能够同时反映景观格局与生态过程内涵的方法进行分析。

“源—汇”景观理论的引入,为更准确研究森林格局变化过程的特征及趋势提供了有益的科学支持^[16]。“源—汇”景观理论是景观生态学理论的重要组成部分,是由陈利顶等^[16]基于大气污染中“源—汇”理论体系提出,该理论的核心方法是景观空间负荷对比指数(LCI),是以某一生态过程作为研究对象,在考虑各景观对该生态过程影响的基础上,从距离、高程、坡度3个方面,提出的将景观空间格局分析与生态过程相结合的综合方法^[17],近年来多应用于非点源污染^[18-20]、碳循环^[21]、生态风险等^[22-23]领域。“源”“汇”景观的扩张与缩小影响着森林的空间分布与变化趋势,然而目前基于“源—汇”理论将森林格局变化与景观过程分析相结合的研究较少,Zhang Haozhe等^[24]以三峡库区丰都县为例,将“源—汇”景观理论与生态系统理论相结合,构建土地利用优化框架。禹莎^[25]针对“源—汇”景观提出城市绿道生态带景观格局可持续发展的优化方案。Tian Yanan等^[26]基于“源—汇”理论构建景观生态安全格局,提出了分步修复生态功能区的优先次序。当前研究主要探讨小尺

度的绿地或林地混合景观的生态格局,缺乏结合“源—汇”理论对大尺度森林景观格局变化的研究。

福建省拥有全国最高的森林覆盖率^[27]且森林变化活跃^[28],鉴于此,本文以福建省作为研究对象,借助景观“源—汇”原理,将促进和阻止/延缓森林丧失的景观分为“源”和“汇”景观,从与干扰源距离、高程、坡度3个方面,省和市2种尺度分别测算森林景观空间负荷对比指数,探讨2010—2020年福建森林时空动态变化规律,探索森林丧失和“源”“汇”景观之间关联性和空间依赖性,以期为进一步阐明森林覆盖空间变化的内在机理,以及制订可持续森林保护和恢复策略提供科学依据。

1 研究区概况与数据获取

1.1 研究区选取

福建省位于中国东南沿海(23°31'—28°18'N, 115°50'—120°43'E),90%的陆地面积为山地丘陵,气候为亚热带海洋性季风气候,雨量充沛,气候温和,极大地丰富了森林资源,森林覆盖率达66.8%,位列全国首位。福建的地理特点是“依山傍海”,省内共有9个市:福州市、宁德市、厦门市、莆田市、泉州市、漳州市、南平市、三明市、龙岩市,除南平市、三明市、龙岩市外,其余城市皆与海相接。

1.2 数据获取与预处理

2010和2020年两个时期空间分辨率为30m的土地利用/覆盖变化(LUCC)数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),总体精度为88.95%,利用ArcGIS 10.7软件对LUCC数据进行土地类型重分类等预处理,满足研究需求^[29]。福建省30m数字高程模型(DEM)数据下载于地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>),通过ArcGIS 10.7软件对DEM数据进行裁切后处理可得到福建省坡度数据和高程数据。福建省2010和2020年道路网矢量数据下载于开放街道地图(Open Street Map)(<https://www.openstreetmap.org/>),(由于可获取的最早年份数据为2014年,因此下载2014年道路数据代替2010年进行处理分

析),并从中筛选出 5 级主要的道路类型,将其与区域遥感影像进行对比并删除有误道路数据,使用 ArcGIS 10.7 工具进行拓扑检查,从而使道路数据满足研究精度要求,最后建立道路缓冲区。

2 研究方法

2.1 源汇景观识别与计算斑块类型面积

生态景观“源—汇”原理中“源”景观指促进过程发展的景观类型,“汇”景观是指阻止或延缓过程发展的景观类型^[30]。本文“源”“汇”景观的划分针对森林丧失这一过程,结合景观对森林丧失的实际作用,在转移矩阵计算结果的基础上进行判断,若森林转出为该景观的面积大于该景观转入为森林的面积,对森林的丧失起到促进作用,则划分为“源”景观,反之之为“汇”景观。转移矩阵^[31]的数学表达式:

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{m1} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: A_{ij} 为 2010 和 2020 年的土地利用状态; n 为土地利用类型个数。

斑块类型面积(CA)度量的是景观的组分,也是计算其他指标的基础^[32]。CA 的单位为 hm^2 ,数值范围: $CA > 0$,本文通过 Fragstats 4.2 计算 2010 和 2020 年的各类“源”“汇”景观的斑块面积指数 CA。

2.2 计算洛伦兹曲线面积

陈利顶等^[17]发现洛伦兹曲线与“源”“汇”景观的分布具有一定相似性。本文将其应用于森林覆盖变化景观格局的空间分布,通过洛伦兹曲线的堆积面积来表示研究范围内的“源”“汇”景观的空间分布情况,及其对区域内森林丧失的影响。先计算出不同景观单元随着横坐标(距离、高度和坡度)变化的面积累计占比,绘制洛伦兹曲线(图 1),进一步计算出洛伦兹曲线的面积,即曲线与 OC,BC 围成的面积。曲线上 m 点表示某一景观随着景观空间要素分布,在当景观空间要素值增加至 k ,该景观占其自身总面积比为 l 。若景观的分布曲线为 ODB,说明景观的分布靠近景观要素值较小的区域(高程低、坡度低、距离近),OFB 则相反。若景观在区域内均匀分布,则洛伦兹曲线为 OEB。

2.3 “源”“汇”景观权重

由于森林丧失是一个复杂的过程,为了相对准确客观反映“源”“汇”景观在森林丧失过程起到的作用效果,需要对“源”“汇”景观做标准化处理,根据在区域内影响作用不同情况进行对各个“源”“汇”景观进行赋权重,“源”景观和“汇”景观的权重计算公式:

$$\omega_i = \frac{|A_i - B_i|}{Z} \quad (2)$$

$$\omega_j = \frac{|A_j - B_j|}{Z} \quad (3)$$

式中: A_i, B_i 分别为“源”景观 2010 和 2020 年两个时期第 i 种景观的面积; A_j, B_j 则分别为“汇”景观两个时期第 j 种景观的面积; Z 为所有景观变化面积的总和; ω_i 为“源”景观 i 的权重; ω_j 为“汇”景观 j 的权重。

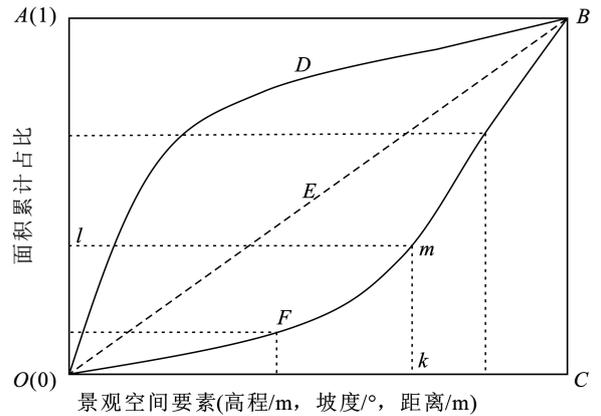


图 1 洛伦兹曲线示意图

Fig.1 Diagram of Lorenz curve

2.4 景观空间负荷对比指数

加入“源”“汇”景观的面积占比、景观的权重后,计算景观空间负荷对比指数,计算公式为:

$$LCI = \lg \frac{\sum_{i=1}^a S_{i\text{ODBC}} \omega_i p_{ci}}{\sum_{j=1}^b S_{j\text{OFBC}} \omega_j p_{cj}} \quad (4)$$

$$LCI' = \frac{LCI_{RD} \times LCI_{RE}}{LCI_{RS}} \quad (5)$$

式中: a, b 分别为“源”“汇”景观类型的总数; $S_{i\text{ODBC}}, S_{j\text{OFBC}}$ 分别为第 i 种“源”景观、第 j 种“汇”景观的洛伦兹曲线累计面积; ω_i, ω_j 分别为第 i 种“源”景观、第 j 种“汇”景观的权重; p_{ci}, p_{cj} 分别为第 i 种“源”景观、第 j 种“汇”景观在区域中所占面积百分比; LCI' 为综合景观空间负荷对比指数; LCI_{RD} 为景观空间距离负荷对比指数; LCI_{RE} 为景观空间高度负荷对比指数; LCI_{RS} 为景观空间坡度负荷对比指数。

式中取对数是将 LCI 的值控制在 0 左右,当 LCI 的值等于 0 时,区域内的“源”“汇”景观处于平衡分布的状态^[18],“源”“汇”景观对区域内森林丧失的促进与延缓处于一个稳定平衡的状态;当 LCI 大于 0 时,区域内“源”景观对森林丧失的贡献大于“汇”景观,区域的森林丧失情况相对严重;反之 LCI 小于 0 时,“汇”景观对区域内森林丧失的延缓或阻碍贡献更大,区域内森林丧失情况减少。相对距离与相对高度的 LCI 值越大,代表“源”景观在区域的累积面积比重更

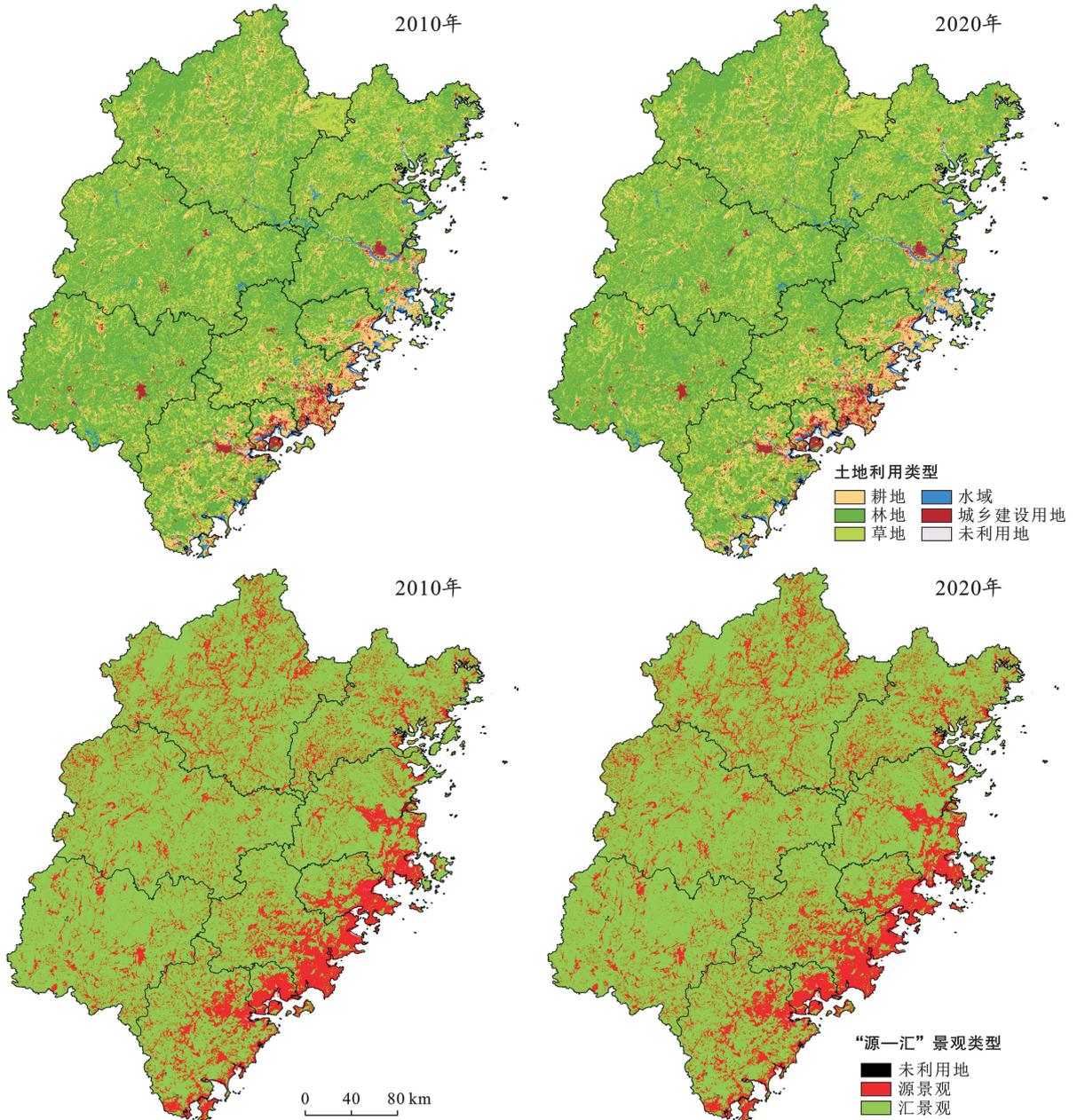
大,研究区域内促进森林丧失的地类面积更多;反之则“汇”景观累积面积比重更大。在坡度条件下,LCI 值代表含义与相对高度、距离刚好相反。

3 结果与分析

3.1 “源”“汇”斑块的识别

3.1.1 土地利用类型合并 2010 和 2020 年福建省

LUCC 数据包括 21 种土地利用类型,将其按照 LUCC 一级分类进行合并,可以分为耕地、林地、草地、水域、城乡建设用地、未利用地(图 2)。两个时期的城乡建设用地主要分布在福建省东部及南部沿海城市,草地主要分布在中部及北部城市,林地在全省范围内均有分布,且占大部分面积,东南部沿海城市林地相较于西北部城市稀少。



注:行政区划底图自然资源部审图号为 GS(2019)1822 号。下同。

图 2 重分类后的福建省土地利用类型和“源”“汇”景观类型的空间分布

Fig.2 Land use types in Fujian Province after reclassification and spatial distribution of source and sink landscape types

3.1.2 各景观类型转移分析 对 2010—2020 年土地利用类型的转移矩阵计算结果用弦图(图 3)表示,林地转出面积 33 730 hm²,主要转出的地类为城乡建设

用地和耕地,其中林地转变为城乡建设用地面积最多,为 24 320 hm² 占林地总转出面积 72%。其他地类转变为林地的面积为 11 970 hm²。

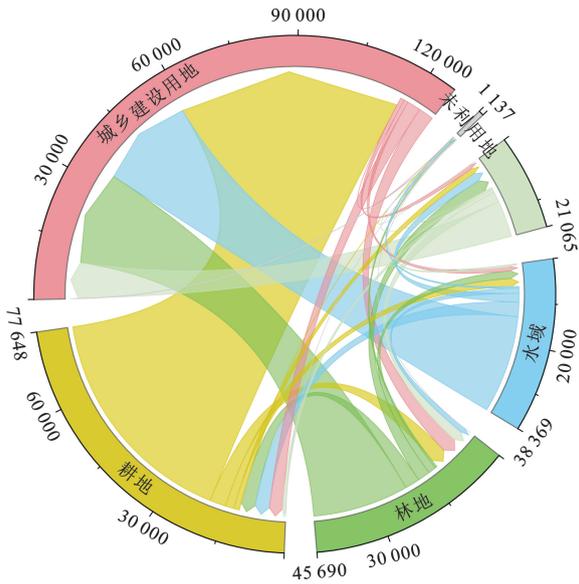


图 3 福建省 2010—2020 年土地类型转移矩阵 (hm^2)

Fig.3 Land type transfer from 2010 to 2020 in Fujian Province

3.1.3 “源”“汇”斑块分类统计 在转移矩阵计算结果的基础上对土地类型进行分类,对森林丧失起到促进作用的被分为“源”景观、对森林丧失起到阻止或延缓作用的被分为“汇”景观,其中耕地转入到林地面积略多于林地转出为耕地面积,但依然将耕地划分为“源”景观,是因为长期高强度的农业开发和山地丘陵的坡度较大,易导致区域森林生态功能退化等环境问题^[33],政府近年来颁布并实施“退耕还林”政策^[34],使得耕地类型转入林地,因此将耕地划分为“源”景观。未利用地比重极小($<0.1\%$),且其通过与其他地类的转化而影响森林覆盖变化,因此未利用地与森林丧失的相关性并不是直接逻辑上的因果关系,所以不将未利用地分为“源”或“汇”景观类型进行讨论。最后将耕地、水域、城乡建设用地分为“源”景观,林地、草地被分为“汇”景观(表 1)。2020 年相比于 2010 年,面积变化最大的景观类型是城镇建设用地,其次是耕地。将 2010 和 2020 年的各景观类型分别都合并为“源”“汇”两种景观类型(图 2),可以明显看出 2010 和 2020 年“源”景观的面积均小于“汇”景观,且两个时期“源”景观大部分分布在东部沿海坡度较小、高程较低的区域,以及小部分零星分布在全省各个区域。

3.2 各景观权重的确定

由于各类景观的面积比例不同、变化的情况也有所不同,为了让 LCI 指数计算结果更符合实际,因此需要给不同的景观类型赋以相应的权重,为避免过于主观地直接赋值,本文的权重确定是通过计算各种景观在面积变化中的贡献大小来确定。各景观变化面积占总变化面积的结果也就是该景观的权重,各个市

范围内的景观类型面积也有所不同,因此各个市的“源”“汇”景观权重也需要分别确定(图 4)。

表 1 福建省各源汇景观面积变化

Table 1 Changes of landscape areas in Fujian Province

景观类型	源汇类型划分	2010 年面积/ hm^2	2020 年面积/ hm^2
耕地	源	2 116 738.53	2 062 700.91
林地	汇	7 595 520.84	7 574 239.62
草地	汇	1 856 790.99	1 851 788.7
水域	源	247 181.22	219 002.67
城乡建设用地	源	436 272.57	552 581.55



图 4 省域、市域尺度下不同地类权重

Fig.4 Weights of different land categories at provincial and municipal scales

3.3 景观空间要素分级

景观空间负荷对比指数由距离、高程、坡度 3 种景观空间要素综合构建,将福建省高程数据和坡度数据利用自然间断点分级法,分别将研究区的高程及坡度分为 10 个等级,在数据值的差异相对较大的位置处设置边界,对相似值进行恰当的分组,以减少后续在计算洛伦兹曲线面积时产生的误差。在福建省东部沿海区域的坡度较为平缓, $0^\circ \sim 5.3^\circ$ 的坡度范围大多分布在海岸线区域,其余的坡度范围在全省范围内均有分布。同样在东部沿海区域的海拔也比较低,第一级别的高程范围基本分布在这个区域(图 5)。

相对距离以道路数据的“高速公路、铁路、一级道路、二级道路、三级道路、主干道”为干扰源中心(图 6),在周围 3 000 m 内,每 300 m 距离范围建立一个缓冲区,一共 10 个缓冲区级,以提取出在道路 3 000 m 范围内的“源”“汇”景观类型。2020 年道路相较于 2010 年整个省的道路变得密集,东部沿海城市如福州、厦门等经济发展较好的城市,基本被道路缓冲区覆盖。

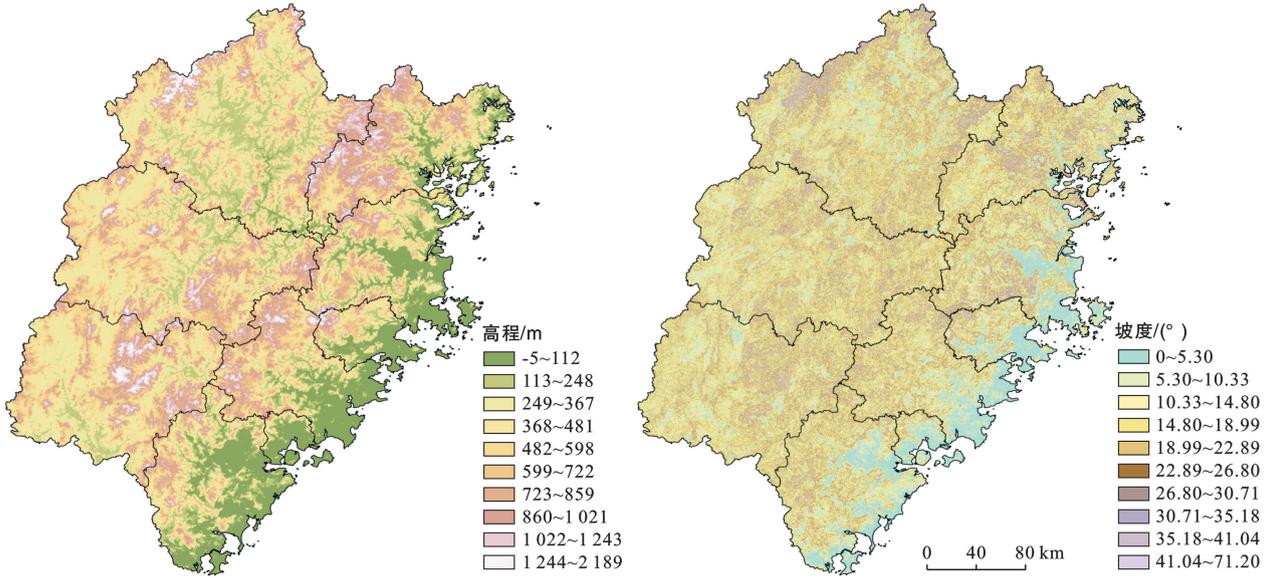


图 5 福建省省域尺度高程、坡度分级

Fig.5 Classification of elevation and slope on provincial scale in Fujian Province

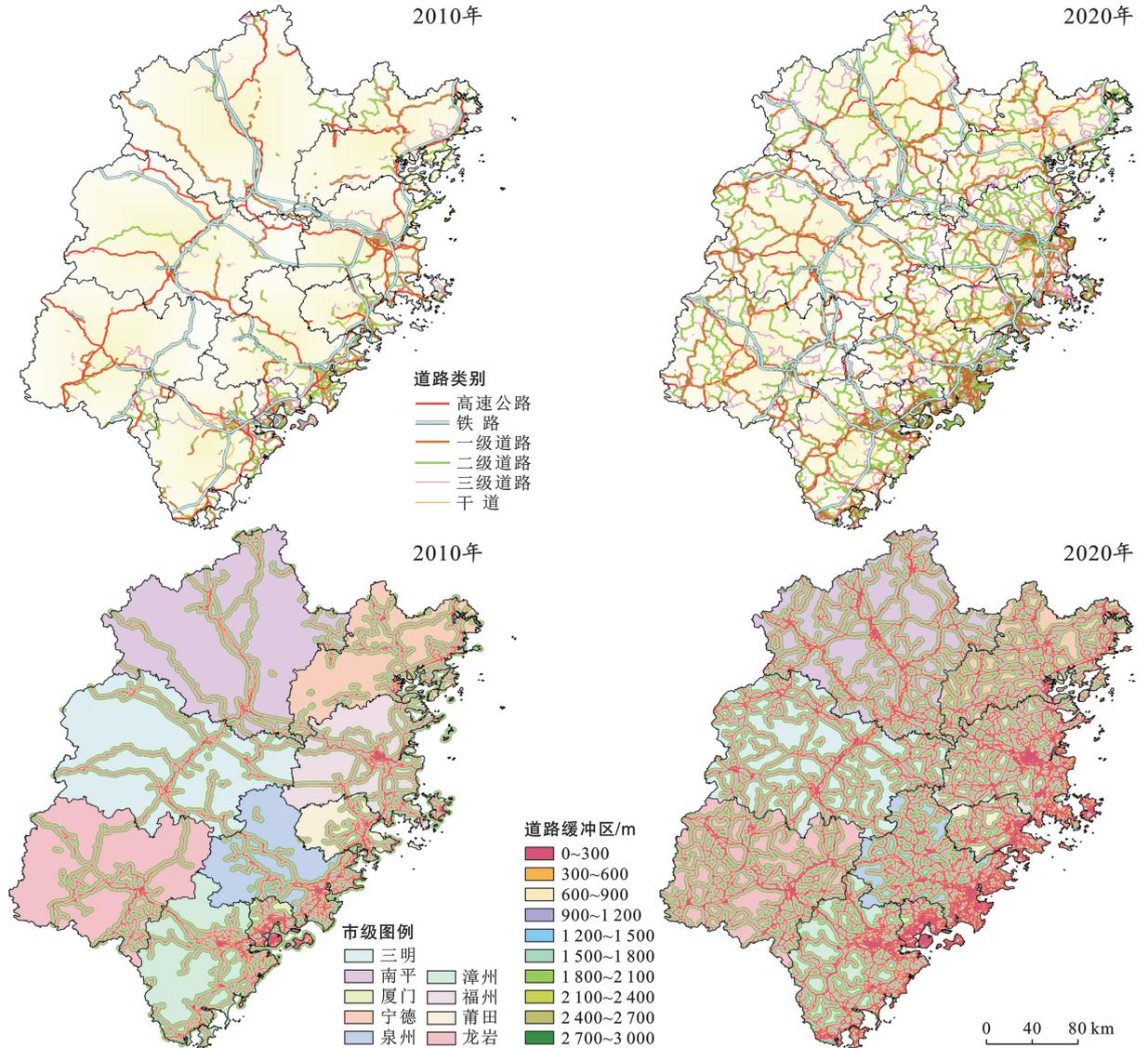


图 6 福建省道路类型与道路缓冲区分级

Fig.6 Road type and road buffer classification in Fujian Province

福建省内的沿海城市福州市、厦门市、莆田市、泉州市、漳州市,相较于内陆的龙岩市、三明市、南平市的坡度为平缓、高程也比较低,因此在进行市域尺度的 LCI 指数计算时,高程与坡度这两个景观空间要素需要进行重新分级,分级过程中,同样利用自然间断点方法对市域尺度的高程和坡度进行分级。道路缓冲区分级情况则是与省域尺度划分一致、建立 300 m 一级的 10 个道路缓冲区,无需重新划分等级。

3.4 计算洛伦兹曲线面积

计算出福建省域尺度和市域尺度 2010 和 2020 年高程、坡度和距离的各个“源”“汇”景观的洛伦兹曲线面积。计算出的高程、坡度、距离洛伦兹曲线面积越大时,说明该景观类型的高度差、坡度差、距离差更小,面积越小则相反。当“源”景观面积随距离和高程累积生成的洛伦兹曲线面积越大时,说明其对森林丧失贡献更大,而计算坡度洛伦兹曲线时,与距离和高程相反^[14]。在 2010—2020 年期间,省域尺度下(图 7)的高程和坡度各景观洛伦兹曲线面积变化较小,距离的洛伦兹曲线面积相较于高程和坡度小,各景观空间要素的“源”景观曲线面积大于“汇”景观。其中城乡建设用地的高程、坡度、距离洛伦兹曲线面积结果均较大,说明其主要分布在高程低、坡度缓的区域,且高度差、坡度差、距离差小。

在市域尺度下(图 8),各区域两个时期景观要素(高程、坡度、距离)的城乡建设用地洛伦兹曲线面积均大于 0.75,福州市两个时期各景观洛伦兹曲线面积均大于 0.55,其余各市洛伦兹曲线面积在不同景观要素下有所区别。

3.5 景观空间负荷对比指数计算

省域尺度下 2010 和 2020 年两个时期的 LCI' 指数都是大于 0(表 2),区域内“源”景观对森林丧失总体的促进作用大于“汇”景观对森林丧失的阻止或延缓作用,两个时期 LCI_{RD} 指数相较于 LCI_{RS}, LCI_{RE} 更大,说明“源”景观随着距离景观要素变化的条件下,相比于高程与坡度来说对森林丧失的影响更大。并且 2020 年

的 LCI' 指数相较于 2010 年,有增大的趋势,则表明福建省这 10 a 期间,森林丧失的情况是增加的。

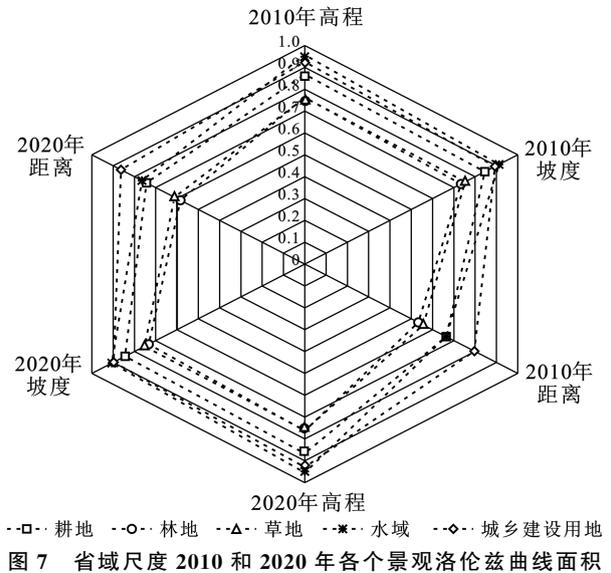


图 7 省域尺度 2010 和 2020 年各个景观洛伦兹曲线面积

Fig.7 Lorentz curve area of each landscape at provincial scale in 2010 and 2020

表 2 省域尺度 2010 和 2020 年 LCI 指数
Table 2 Provincial scale LCI in 2010 and 2020

年份	LCI _{RE}	LCI _{RS}	LCI _{RD}	LCI'
2010 年	0.069	0.073	0.122	0.117
2020 年	0.096	0.099	0.157	0.152

注:表中 LCI_{RE}, LCI_{RS}, LCI_{RD}, LCI' 分别为高程、坡度、距离、综合景观空间负荷对比指数。下同。

市域尺度下各个区域之间的各 LCI 指数相差较大(表 3),两个时期 LCI' 指数厦门市、莆田市、泉州市、漳州市、福州市和宁德市的均大于 0,说明区域内“源”景观对森林丧失的作用更大,而龙岩市、南平市、三明市的 LCI' 均小于 0,在这些区域 2010—2020 年期间森林丧失情况较少,“汇”景观对森林丧失的延缓或阻碍作用贡献更大,并且 2020 年 LCI' 相较于 2010 年都处于增大的趋势,说明各个市“源”景观的贡献都在增加。

表 3 市域尺度 2010 和 2020 年 LCI 指数
Table 3 LCI indices at municipal scale in 2010 and 2020

城市名	2010 年				2020 年			
	LCI _{RE}	LCI _{RS}	LCI _{RD}	LCI'	LCI _{RE}	LCI _{RS}	LCI _{RD}	LCI'
福州市	0.069	0.071	0.086	0.084	0.138	0.138	0.154	0.154
龙岩市	-0.339	-0.338	-0.281	-0.282	-0.331	-0.330	-0.257	-0.258
南平市	-0.429	-0.427	-0.402	-0.405	-0.413	-0.411	-0.362	-0.364
宁德市	0.044	0.038	0.078	0.092	0.075	0.067	0.100	0.112
莆田市	1.540	1.537	1.571	1.574	1.580	1.577	1.600	1.603
泉州市	0.805	0.765	0.821	0.864	0.818	0.783	0.828	0.865
三明市	-0.683	-0.692	-0.641	-0.632	-0.657	-0.668	-0.608	-0.598
厦门市	1.855	1.843	1.865	1.878	1.879	1.868	1.889	1.900
漳州市	0.470	0.460	0.503	0.513	0.497	0.487	0.541	0.552

从各市 LCI' 计算结果可以看出,东部沿海城市厦门市、莆田市、泉州市林丧失情况较为严重,区域内山地较多、干扰源较少的三明市、南平市、龙岩市森林丧失情况较少,由于该区域地处山区,海拔高、地形起伏大,开发成本较高,使得人类活动对于森林生态系统的开发和破坏的程度较小,所以该地区得以保持较稳定的森林覆盖度,而呈现出较低的景观空间负荷对

比指数,宁德市各 LCI 指数接近于 0,森林变化处于相对平衡状态。在 2010—2020 年期间,各 LCI' 指数分别均处于增长的状态(图 9),其中福州市 4 个指数的值增长最多,LCI' 指数增长 0.070,表明福州市相对其他城市的森林丧失变化情况最为剧烈,泉州市增长最少为 0.001,两个时期基本没有变化,则说明泉州市森林丧失的速度较为稳定。

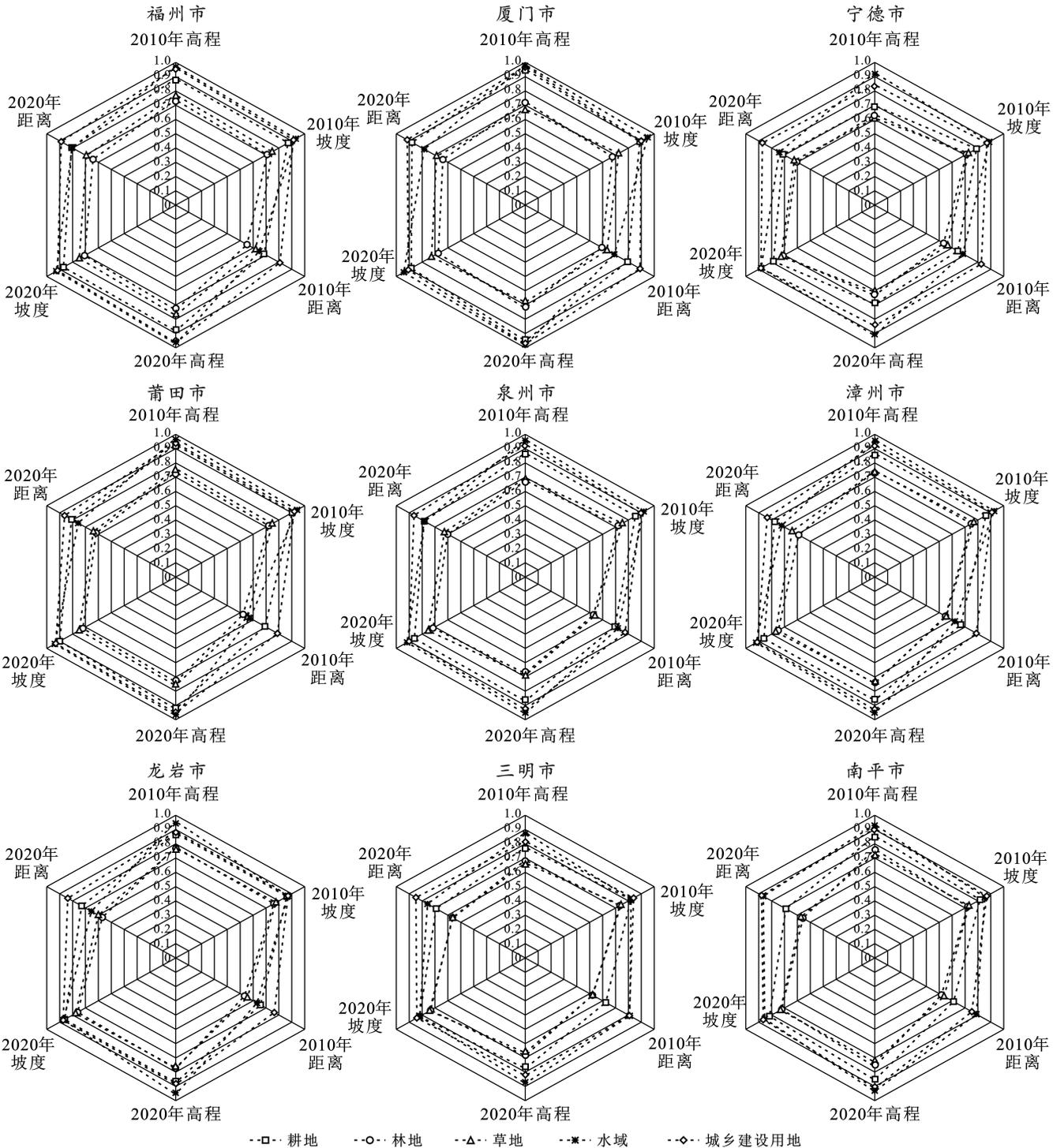


图 8 市域尺度 2010 和 2020 年各景观洛伦兹曲线面积

Fig.8 Lorenz curve area of each landscape in 2010 and 2020

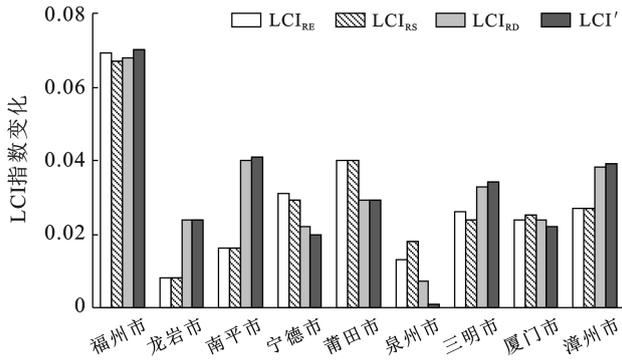


图9 福建省 2010—2020 年各市 LCI 指数增长变化

Fig.9 Change of landscape index growth in various cities from 2010 to 2020 in Fujian Province

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文以“源—汇”景观理论为基础理论,针对森林丧失这一生态过程具体应用,经过研究发现,在2010—2020年间,虽然福建省的森林覆盖率位于全国首位,但全省特别是在沿海地区,由于经济发展,道路建设加快,城镇建设用地扩张明显等,森林丧失问题仍然突出。侯秀英等^[35]分别从时间和空间维度对2001—2017年的森林丧失动态进行了系统分析,表明福建省森林丧失面积和丧失率均呈现上升的趋势;曹荣青等^[36]以福建省为研究对象,进行森林丧失量时空分布动态研究,发现森林丧失量时空分布情况与经济发展水平呈负相关。本文研究结果与以上相符。对比已有森林景观格局变化研究,多是以县域尺度或选择某森林公园作为研究对象,选择传统的景观指数进行分析,主要关注森林的斑块数量、聚集度、形状特征变化等^[37-38],本文不仅在空间尺度上扩大了研究幅度,以省域对象进行大尺度的森林格局变化研究,并采用陈利顶等^[17]提出的 LCI 评估方法,与传统景观指数相比,该方法能够将景观格局与生态过程进行较全面地评估,可更为准确反映森林丧失的程度及其与空间分布的关联性。已有“源—汇”景观理论相关研究大多集中在水土侵蚀、非点源污染、热岛效应等领域^[18-22]。本文将该理论引入大尺度森林空间格局变化过程的研究中,拓宽了“源—汇”景观理论的应用案例,深化了森林景观的研究内容,能够为开展森林景观生态过程的研究提供借鉴。同时,本文也存在一些不足之处,LCI 所考虑的权重仅仅是“源”“汇”景观本身,而缺少考虑地形和距离产生的影响,因为如果环境背景差异较大,同一景观要素不同级别之间对景观空间负荷对比指数计算结果影响较大,为此计算景观

空间负荷对比指数前不仅需要考虑“源”“汇”景观的权重,还要考虑坡度、高程和干扰源距离等因子对森林丧失的贡献大小进行校正。

4.2 结论

(1) 利用转移矩阵计算出林地主要转变为的地类是城乡建设用地和耕地,其中林地转为城乡建设用地的面积占总转出面积的 72%,表明城镇建设用地的扩张是森林空间变化的主要驱动力。

(2) 2010—2020 年,省域尺度下 LCI' 从 0.117 增长至 0.152,总体上“源”景观对森林丧失的贡献大于“汇”景观,且距离条件下“源”景观对森林丧失的影响最大。

(3) 市域尺度 LCI' 计算结果与省域尺度不同,且各城市之间也存在差异,表明研究空间尺度对 LCI 计算结果有着重要影响。各城市发展水平不同,海拔低、地形起伏小的东南沿海城市道路密度远大于开发成本较高的山区城市,其道路缓冲区距离范围内的“源”景观对森林丧失的影响也更大。

(4) 研究期间,各市 LCI' 指数分别有所增长,其中省会城市福州市的增长最大(0.070),说明福州市城镇建设用地扩张速度加快,相对其他城市的森林丧失变化情况最为剧烈。

鉴于此,依据各区域的“源”“汇”景观空间负荷对比指数特征,可将福建省森林空间变化格局分为森林丧失严重和接近平衡区域以及森林重建趋势较好区域,并为森林重建规划管理提供参考依据。在森林丧失严重城市更应该注意森林资源防护,以更加合理的土地布局减少森林丧失,同时进一步推进森林恢复。

[参 考 文 献]

- [1] 李世明,王志慧,韩学文,等.森林资源变化遥感监测技术研究进展[J].北京林业大学学报,2011,33(3):132-138.
- [2] 侯西勇,应兰兰,高猛,等.1998—2008 年中国东部沿海植被覆盖变化特征[J].地理科学,2010,30(5):735-741.
- [3] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [4] Delgerjargal U, Scott G, Peter V, et al. Correlates of forest-cover change in European Russia, 1989-2012 [J]. Land Use Policy, 2020,96:104648.
- [5] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].地理学报,2015,70(5):705-716.
- [6] 胡顺石,彭雨龙,秦建新,等.长株潭城市群植被指数动态变化及城市扩展对其影响分析[J].经济地理,2019,39(12):178-186.
- [7] 吴雪琼,覃先林,周汝良,等.森林覆盖变化遥感监测方法

- 研究进展[J].林业资源管理,2010(4):82-87.
- [8] 杨振兴,文哲,张贵,等.基于 Sentinel-2 A 数据的森林覆盖变化研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(8):53-62.
- [9] 田雷,傅文学,孙燕武,等.基于 TM 影像的西伯利亚北方森林覆盖度近 30 年空间变化研究[J].国土资源遥感,2021,33(1):214-220.
- [10] Guo Yantao, Long Tengfei, Jiao Weili, et al. Siamese detail difference and self-inverse network for forest cover change extraction based on Landsat 8 OLI satellite images [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(3):627-646.
- [11] 庞勇,蒙诗栋,史锴源,等.中国天然林保护工程区森林覆盖遥感监测[J].生态学报,2021,41(13):5080-5092.
- [12] 高海峰.粤西北部地区县域景观格局变化与发展研究[D].广东 广州:华南理工大学,2018.
- [13] 刘颂,李倩,郭菲菲.景观格局定量分析方法及其应用进展[J].东北农业大学学报,2009,40(12):114-119.
- [14] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶.关于景观格局演变研究的几个问题[J].地理科学,2003,23(3):264-270.
- [15] Biró M, Molnár Z, Öllerer K, et al. Behind the general pattern of forest loss and gain: a long-term assessment of semi-natural and secondary forest cover change at country level [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022,220:104334.
- [16] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义[J].生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [17] 陈利顶,傅伯杰,徐建英,等.基于“源—汇”生态过程的景观格局识别方法:景观空间负荷对比指数[J].生态学报,2003,23(11):2406-2413.
- [18] 王金亮,谢德体,倪九派,等.基于源汇景观单元的流域土壤侵蚀风险格局识别[J].生态学报,2017,37(24):8216-8226.
- [19] Zhang Xin, Liu Yuqi, Chen Yongxin. Development of a location-weighted landscape contrast index based on the minimum hydrological response unit [J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2018,36(4):1236-1243.
- [20] 张亚娟,李崇巍,胡蓓蓓,等.城镇化流域“源—汇”景观格局对河流氮磷空间分异的影响:以天津市桥水库流域为例[J].生态学报,2017,37(7):2437-2446.
- [21] Josep G C, Miko U F K, Werner A K, et al. Factoring out natural and indirect human effects on terrestrial carbon sources and sinks [J]. *Environmental Science and Policy*, 2007,10(4):370-384.
- [22] 张桐艳,贺敬滢,李光录,等.基于水土流失风险的流域景观格局识别方法研究[J].水土保持研究,2012,19(3):175-179,184.
- [23] 卢爱刚,张镭,索安宁.基于水土流失的景观格局分析方法[J].生态环境学报,2010,19(7):1599-1604.
- [24] Zhang Haozhe, Yang Qingyuan, Zhang Huiming, et al. Optimization of land use based on the source and sink landscape of ecosystem services: a case study of Fengdu County in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Land*, 2021,10(11):1-24.
- [25] 禹莎.基于景观格局优化的城市生态带功能布局研究[D].上海:复旦大学,2009.
- [26] Tian Yanan, Zhang Menghan, Xu Dangfei, et al. Landscape ecological security patterns in an ecological city, based on source-sink theory [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(7):1-11.
- [27] 陈增文,胡清华,陈忠兴,等.基于熵权法的福建县域生态文明建设水平及动态变化评价研究[J].环境生态学,2022,4(4):1-10,44.
- [28] 左雪漫,闫国东,陈瑾,等.福建省林地覆盖变化及其海拔梯度效应的分析[J].林业资源管理,2022(1):70-77.
- [29] 刘纪远.国家资源环境遥感宏观调查与动态监测研究[J].遥感学报,1997(3):225-230.
- [30] 高静,龚健,李靖业.“源—汇”景观格局的热岛效应研究:以武汉市为例[J].地理科学进展,2019,38(11):1770-1782.
- [31] 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.
- [32] 么欣欣,韩春兰,刘洪彬,等.基于 RS 与 GIS 的沈阳市土地利用及景观格局变化[J].水土保持研究,2014,21(2):158-161,166.
- [33] 王修文,于书霞,史志华,等.南方红壤区生态系统服务权衡与协同关系演变对退耕还林的响应[J].生态学报,2021,41(17):7002-7014.
- [34] 陈正林,葛敦.退耕还林工程建设研究综述[J].现代农业科技,2011(22):240-243,245.
- [35] 侯秀英,黄菲,赵青,等.福建省森林丧失的时空格局演化及其驱动力机制[J].山地学报,2020,38(6):829-840.
- [36] 曹荣青,胡喜生,吴承祯.福建省 2000—2012 年森林丧失量时空分布动态研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2019,50(2):197-201.
- [37] 赵芳芳,孙桂丽,吉小敏,等.天山大峡谷国家森林公园土地景观格局及生态风险分析[J].新疆农业科学,2022,59(3):735-743.
- [38] 叶丽敏,吴伟,邱荣祖,等.道路网络的森林景观效应及其对地形地貌的梯度变化规律:以福建省将乐县为例[J].林业资源管理,2016(5):138-143.