

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.06.032.

杜峯屹, 陈松林, 蒲佳豪. 2000—2020年闽东南地区土地利用变化及生境质量时空演变[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 345-356.

Du Fengyi, Chen Songlin, Pu Jiahao. Land Use Change and Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 345-356.

2000—2020年闽东南地区土地利用变化及 生境质量时空演变

杜峯屹^{1,2}, 陈松林^{1,2}, 蒲佳豪^{1,2}

(1. 福建师范大学地理科学学院/碳中和未来技术学院, 福州 350117; 2. 福建省亚热带资源与环境重点实验室, 福州 350117)

摘要: [目的] 探究土地利用变化背景下生境质量的格局分布特征和时空演变规律, 为促进区域生态安全及土地资源可持续利用提供决策参考。 [方法] 基于2000年、2010年、2020年3期土地利用数据, 利用InVEST模型及空间自相关和热点分析方法, 评估闽东南地区生境质量状况, 分析了其时空演变特征。 [结果] 闽东南地区具有不低于67%的高植被覆盖度, 但建设用地大量侵占以耕地、林地及草地为主的非建设用地, 面积增幅达112.74%, 加剧了区域景观破碎化程度, 使景观空间形态趋向复杂。生境退化指数极值和均值分别上升23.44%, 43.94%, 退化强度持续提高, 退化高值区域由东南沿海向内陆蔓延, 退化水平表现出圈层式演化的空间形态。生境质量水平整体较好, 中等以上等级区域占比保持在63%左右, 但城市建成区的较低等级区域及城镇交界处的高等级区域易向下级转移且难以恢复, 区域生境质量逐期降低, 平均降幅达5.17%。生境质量分布带有明显空间聚集特征, 集中于东南部、以市辖区为中心的生态质量冷点区逐步向周边乡镇扩散, 分布于西北部、倚靠山地丘陵的生境质量热点区缓慢延展, 生态质量冷点及热点区域乡镇分别增加11, 6个, 生境质量东西部差异趋于扩大。经济发展、产业调整、人口增长所带来的以建设用地爆发式扩张为主要表现的土地利用格局变动, 是导致闽东南地区生境破碎、退化和质量下滑的首要原因。 [结论] 闽东南地区近20 a土地利用变化显著, 对区域生境质量产生不利影响, 未来应注重把控城镇空间扩张规模与速度, 做好生态治理与恢复工作。

关键词: 生境质量; 土地利用变化; 时空演变; 闽东南地区

中图分类号: F301.24; X24

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)06-0345-12

Land Use Change and Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

Du Fengyi^{1,2}, Chen Songlin^{1,2}, Pu Jiahao^{1,2}

(1. School of Geographical Sciences/School of Carbon Neutrality Future Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory of Subtropical Resources and Environment, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the distribution characteristics and spatiotemporal evolution of habitat quality patterns under land use change, and to provide decision-making reference for promoting regional ecological security and sustainable use of land resources. [Methods] Based on the land use data in 2000, 2010, and 2020, the InVEST model, spatial autocorrelation and hotspot analysis methods were used to evaluate habitat quality in southeastern Fujian, and to analyze its spatial-temporal evolution characteristics. [Results] Southeastern Fujian had a high vegetation cover of no less than 67%, but the construction land had encroached heavily on the non-construction land, mainly arable land, forest land and grassland,

收稿日期: 2022-09-13

修回日期: 2022-10-10

资助项目: 国家自然科学基金(41771136); 福建省科技计划项目(2019R0124)

第一作者: 杜峯屹(1998—), 男, 重庆渝中人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用与区域发展。E-mail: d_perfectionist@163.com

通信作者: 陈松林(1964—), 男, 福建南安人, 博士, 教授, 主要从事土壤与土地资源研究。E-mail: slchen6@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

with an increase of 112.74%, which had intensified the degree of regional landscape fragmentation and made the landscape spatial pattern tend to be complex. The extreme and average values of habitat degradation index in southeastern Fujian increased by 23.44% and 43.94%, respectively, the intensity of degradation continued to increase, the high value area of degradation spread from southeast coast to inland, and the degradation level showed the spatial pattern of circling evolution. The overall level of habitat quality was good, and the proportion of areas above medium grade was about 63%. However, the lower grade areas in the built-up areas of cities and the higher grade areas at the junctions of cities and towns were easy to shift to the lower grade and difficult to recover, the regional habitat quality decreased gradually, with an average decrease of 5.17%. The habitat quality distribution presented the obvious spatial aggregation characteristics. The cold spots of habitat quality, which concentrated in the southeast and centered on municipal districts, gradually spread to surrounding townships. The hot spots of habitat quality, which distributed in the northwest and depend on mountains and hills, slowly extended. Townships in the cold and hot spot areas of habitat quality increased by 11 and 6, respectively, so that the regional habitat quality differences between the east and west tended to expand. Changes in land use patterns, mainly manifested by explosive expansion of construction land, brought about by economic development, industrial restructuring and population growth, were the primary causes of habitat fragmentation, degradation and quality decline in southeastern Fujian. [Conclusion] In the past 20 years, the significant land use changes in Southeastern Fujian had a negative impact on the regional habitat quality. The region should focus on controlling the scale and speed of urban spatial expansion, and do a good job in ecological governance and restoration in the future.

Keywords: habitat quality; land use change; spatiotemporal evolution; southeastern Fujian

进入 21 世纪以来,中国经济迅速腾飞,伴随人类社会活动及土地利用强度的增强,生境破碎、消逝和生境质量退化等威胁生态系统服务水平的环境问题日益突显^[1],尤其是在地理区位优势、经济基础扎实的沿海地区,高速城镇化下不透水表面持续扩张,不断侵占生态空间^[2],对区域生境质量造成不利影响。生境又称栖息地,是指生物生活、繁育的空间和其中全部生态因子的总和^[3]。生境质量代表着一定时空范围内,地域环境能为生物个体、种群或群落的持久永续生存及繁衍提供适宜条件的能力^[4],被视为反映生物多样性,衡量生态稳定性,以及保障人类福祉的重要指标^[5]。土地作为自然环境和社会环境的物质基础与承载空间^[6],其利用变化是人与自然交互过程中最直接的表现之一,也是引起生境质量发生改变的主要原因^[7]。作为我国东南沿海至关重要的生态屏障以及福建省经济最活跃、人口最集中的区域,闽东南地区在过去几十年间的发展进程中始终面临着生态保育与经济建设的协调问题,以建设用地剧烈扩张为主要表现的高强度土地利用变化给自然环境带来了巨大压力,生物多样性受到严重干扰。因此,从土地利用变化角度出发,研究闽东南地区生境质量的格局分布特征和时空演变规律,对促进其生态安全及土地资源可持续利用具有重要意义。

学术界对生境质量开展的相关研究较为丰富,关注内容集中于两个方面:一是对特定物种生境条件的评估,二是对区域生境质量的评估。前者一般基于动植物实地调查与试验数据,通过构建指标体系评价特定物种的生境条件^[8-9],但受限于时间成本与人力消耗,该方法多用于小范围、单一时段的物种栖息地研究,较难满足大尺度、长时间序列的综合评估需求。后者是目前主流的研究方向,通常基于定量评估模型进行多尺度、多时段的生境质量测算。相较传统调查试验方法,模型方法具备可视性强、投入成本低、时空限制小的显著优势,如 InVEST 模型^[10]、SolVES 模型^[11]、MxEnt 模型等^[12]。其中 InVEST 模型作为当下体系较成熟的生态系统服务功能综合评估模型,因空间分析与可视化表达能力强、评估精度高、参数获取便捷,得到广泛应用^[13]。例如,彭建等^[14]结合生态系统服务价值、生境质量指数与 InVEST 模型,对黄山市生境质量时空演变特征展开分析;张学儒等^[15]在模拟历史时期土地利用状况的基础上,利用 InVEST 模型重建了泛长三角地区生境质量的空间格局;周婷^[16]、王军^[17]和黄木易^[18]等基于 InVEST 模型分别对神农架林区生境质量与人类活动的关系进行测度,对闽江流域在多种发展情景下的生境质量空间格局进行预测,以及结合地形位指数对大别山区

生境质量时空演变进行分析。

由上述研究工作可知,我国学者基于 InVEST 模型从行政区、城市群、自然区、流域、山区等多种空间尺度出发,定量评估不同时间动态上的区域生境质量,取得丰厚成果,但针对土地利用格局变动强烈,经济发展亟待转型的沿海地区开展的生境质量评估较为缺乏,且多集中于环渤海区域^[5,7,19],涉及城镇化最剧烈的东南沿海地区的生境质量研究鲜少。为此,以生态意义重大、经济潜力充足的闽东南地区为例,在分析 2000—2020 年土地利用变化特征的基础上选用 InVEST 模型研究其生境质量时空演变,以期在一定程度上为东南沿海经济区的土地利用结构优化,生境质量保护及生态安全格局构建提供决策依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

闽东南地位于 23°32′—26°39′N,116°53′—120°31′E,东隔台湾海峡,与台湾岛相望,地理位置特殊(图 1)。包括福州、莆田、泉州、厦门、漳州 5 个设区市,土地面积约 4.1 万 km²,约占福建省土地总面积的 33.45%,常住人口约 3 000 万人,占全省人口的 73.44%。区内地势总体上西北高东南低,地貌复杂多样,西北以山地为主,东南分布滨海平原、海涂滩地,中部穿插丘陵、台地,形成了“依山面海”的独特地形。海岸线曲折漫长,多海湾、半岛和岛屿,港口资源丰富。属亚热带海洋性季风气候,冬季温暖,夏季炎热,年均气温 18~28℃,降水丰富,雨热同期。闽东南地区是海峡西岸经济区的缩影,也是闽南金三角的有效扩展,虽因历史因素发展起步较晚,但凭借其独特的区位、资源及侨乡优势,已成为福建省对外开放和经济发展的重心所在,2020 年区域内生产总值达 33 752 亿元,约占全省生产总值的 76.88%。

1.2 数据来源

2000 年、2010 年、2020 年 3 期闽东南地区土地利用数据,均提取于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)所提供的土地利用遥感监测数据,其空间分辨率为 30 m×30 m,土地利用分类体系见表 1。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。人口和社会经济数据来自区域内各市县统计年鉴。

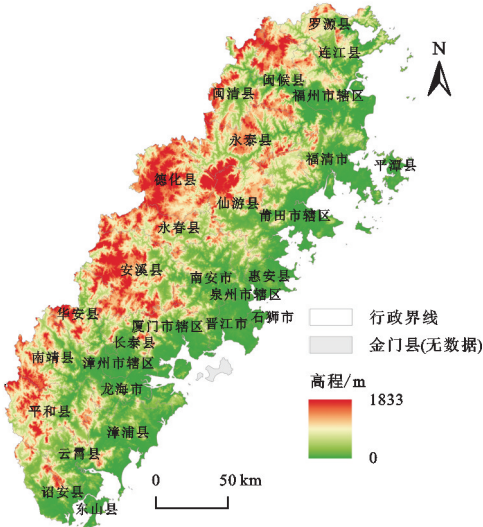
1.3 研究方法

1.3.1 土地利用变化分析 通过土地利用转移矩阵对闽东南地区 2000 年、2010 年、2020 年的土地利用数量变化进行计算,分析各土地利用类型的流失方向及来源组成。利用单一土地利用动态度定量描述一

定时期内某种土地利用类型数量的变化幅度、速率与趋势,其计算公式如下:

$$K=\frac{U_b-U_a}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$$
 (1)

式中:K 为研究期内某一土地利用类型的动态度;U_a、U_b分别为研究初期与研究末期该地类的数量;T 为研究时长。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2022)4312 号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图 1 闽东南地区位置
Fig. 1 Location of Southeastern Fujian
表 1 土地利用分类体系
Table 1 Land use classification system

一级地类	二级地类	一级地类	二级地类
林地	有林地	耕地	水田
	灌木林		旱地
	疏林地		河渠
	其他林地	水域	湖泊
草地	高覆盖度草地		水库坑塘
	中覆盖度草地		滩涂
	低覆盖度草地		滩地
建设用地	城镇用地	未利用地	沼泽地
	农村居民点		裸土地
	其他建设用地		裸岩石质地

在此基础上,使用景观格局指数深入探究区域内土地利用的景观格局特征和变化规律,选取的指标见表 2,各指标计算方法及生态学意义可参见文献[20]。

1.3.2 基于 InVEST 模型的生境质量计算 InVEST 模型作为综合性的生态系统服务功能评估模型,可为自然资源的管理和决策予以辅助^[21],其“Habitat Quality”模块以土地利用数据为基底,结合胁迫因子对生境的最大影响距离与相对权重、各地类的生境适宜度及其受胁迫因子干扰的敏感程度,对区域生境质量展开评估,其计算公式如下:

$$Q_{xj}=H_j\left(1-\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z+k^z}\right)$$

式中： Q_{xj} 为土地利用类型 j 中栅格 x 的生境质量指数； H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度得分； z 为归一化常量，通常取值 2.5； k 为半饱和常数，一般首先默认设为 0.5，再以生境退化度指数运行结果的 1/2 最大值作为最终取值； D_{xj} 为生境在胁迫因子干扰下呈现出的退化程度，即生境退化度指数，其计算公式如下：

$$D_{xj}=\sum_{r=1}^R\sum_{y=1}^{Y_r}(\omega_r/\sum_{r=1}^R\omega_r)r_yi_{rxy}\beta_xS_{jr}$$

式中： R 为胁迫因子数量； Y_r 为胁迫因子 r 的栅格总量； ω_r 为胁迫因子 r 对各生境类型的干扰权重； r_y 为栅格 y 上的胁迫因子数量； β_x 为栅格 x 的可达性水平； S_{jr} 为土地利用 j 对胁迫因子 r 敏感度的高低； i_{rxy} 为胁迫因子的影响距离，根据线性衰退(公式 4)及指数衰退(公式 5)进行计算，其计算公式如下：

$$i_{rxy}=1-(d_{xy}/d_{rmax})$$

$$i_{rxy}=\exp[-(2.99/d_{rmax})d_{xy}]$$

式中： d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 间的线性距离； d_{rmax} 为胁迫因子 r 的最大影响距离。

表 2 景观指数及其描述

Table 2 Landscape indices and their description

景观指数	尺度	描述
类型比例(PLAND)	类型水平	各斑块类型面积占景观总面积的比例,表征景观的优势度和多样性
最大斑块指数(LPI)	类型水平	最大斑块面积占景观总面积的比例,表征景观的优势度,反映人类活动的方向和强弱
斑块数量(NP)	类型水平/景观水平	表征斑块的数目,其值的大小与景观破碎度呈正相关,斑块数越多,破碎程度越高
斑块密度(PD)	类型水平/景观水平	斑块数量与景观总面积的比值,其值的大小与景观破碎度呈正相关,密度越大,破碎程度越高
形状指数(LSI)	类型水平/景观水平	表征斑块形状的复杂程度,反映景观空间格局的复杂性
聚合度指数(AI)	类型水平/景观水平	表征斑块的聚集程度,其值越大,景观的聚集程度越高
多样性指数(SHDI)	景观水平	表征景观的丰富和复杂程度,其值越大,景观类型越丰富,异质性越强,破碎度越高
均匀度指数(SHEI)	景观水平	表征景观分布的均匀程度,其值越大,景观类型分布越均匀,多样性越强,优势度越低
蔓延度指数(CONTAG)	景观水平	表征不同斑块类型的团聚程度或延伸趋势,其值越大,景观离散程度越低

将人为干扰严重的耕地、作为人工表面的建设用地以及以裸地为主、生态基础较差的未利用地设定为生境的胁迫因子,同时考虑到不同类型建设用地对生境质量的影响差异较为显著,因此进一步将建设用地划分为城镇用地、农村居民点和其他建设用地。在参考 InVEST 模型使用手册推荐参数与相关研究^[17,22-23]的基础上,结合专家意见及当地实际情况,对所需参数进行赋值(表 3—4)。

表 3 胁迫因子及其最大影响距离和权重

Table 3 Treats and their maximum distance of influence and weight

胁迫因子	最大影响距离/km	权重	衰减类型
耕地	1	0.5	线性衰退
城镇用地	10	1	指数衰退
农村居民点	5	0.6	指数衰退
其他建设用地	8	0.9	指数衰退
未利用地	1	0.4	线性衰退

表 4 各土地利用类型生境适宜度及其对胁迫因子的敏感度

Table 4 Habitat suitability of land use types and their sensitivity to threats

土地利用 类型	生境适宜度	胁迫因子				
		耕地	城镇用地	农村居民点	其他建设用地	未利用地
耕地	0.4	0	0.8	0.7	0.8	0.5
有林地	1	0.7	0.9	0.8	0.9	0.5
灌木林	0.9	0.7	0.9	0.8	0.9	0.5
疏林地	0.8	0.6	0.8	0.7	0.8	0.4
其他林地	0.7	0.6	0.8	0.7	0.8	0.4
高覆盖度草地	0.8	0.7	0.8	0.8	0.8	0.5
中覆盖度草地	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.4
低覆盖度草地	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.4
水域	0.8	0.4	0.7	0.6	0.7	0.4
城镇用地	0	0	0	0	0	0
农村居民点	0	0	0	0	0	0
其他建设用地	0	0	0	0	0	0
未利用地	0.1	0.3	0.6	0.5	0.6	0

1.3.3 空间自相关与热点分析 空间自相关分析是衡量地理事物的某一属性在空间分布上相互关联程度的空间探索方式,包含全局、局部空间自相关两种形式。通过全局空间自相关 Moran's *I* 和局部空间自相关 LISA 聚类图,对区域内不同年份生境质量在空间上的聚集或离散程度进行识别,计算公式参见文献[24]。

热点分析常用于判断地理事物在空间分布上是否具有统计意义上的显著性低值或高值,属于局部自相关分析方法的一种,以此识别研究区生境质量高值或低值在空间上发生聚类的位置,具体计算公式可参考文献[25]。

2 结果与分析

2.1 闽东南地区土地利用变化分析

2.1.1 土地利用类型变化及转移 研究区的中部及西部主要分布林地、草地,东北部及中南部分布有水域,耕地和建设用地集中分布于东部沿海地区(图 2)。林地、耕地及草地是闽东南地区主要的土地利用类型,占土地总面积的 88% 以上(表 5),构成了区域

的景观基态。研究期内,耕地、林地及草地面积呈持续下降状态,分别减少 1 327.04,510.62,191.91 km²,是数量流失最显著的几种土地利用类型。水域面积呈现先上升后下降的状态,2000—2010 年增加 113.24 km²,2010—2020 年小幅减少 38.45 km²,整体增幅 9.89%。建设用地面积呈持续上升态势,2000—2010 年和 2010—2020 年期间分别增加 1 424.94,527.45 km²,整体增幅达 112.74%。未利用地面积相对稳定,所占比重基本未变。

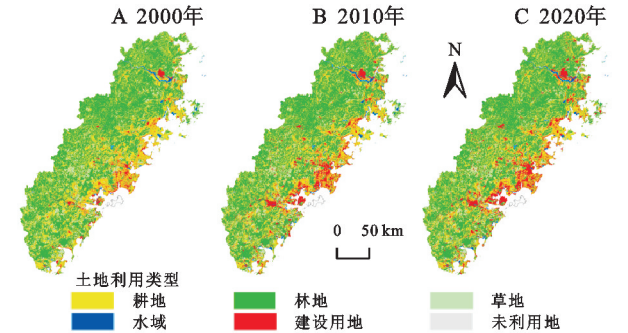


图 2 2000—2020 年闽东南地区土地利用类型分布及其变化
Fig.2 Land use distribution and changes of Southeastern Fujian from 2000 to 2020

表 5 2000—2020 年闽东南地区各地类面积变化
Table 5 Area change of land use types in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

年份	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
2000	9743.90	24.31	21618.96	53.95	6196.59	15.46	756.01	1.89	1731.84	4.32	27.79	0.07
2010	8780.77	21.91	21202.90	52.91	6036.16	15.06	869.25	2.17	3156.78	7.88	28.09	0.07
2020	8416.86	21.00	21108.34	52.68	6004.68	14.98	830.80	2.07	3684.23	9.20	29.04	0.07

研究期内,闽东南地区土地利用类型转移情况(表 6)主要表现为非建设用地向建设用地的显著转化,以及耕地、林地、草地内部的相互转化。在建设用地的转入中,耕地、林地、草地是其主要来源,分别占建设用地转入数量的 61.89%,23.61%,10.01%,水域、未利用地转入建设用地的占比虽小,但其数量分别占各自转出总面积的 66.58%,30.26%,说明建设用地依然是二者的主要转化方向。除建设用地外,耕地主要转为林地(239.56 km²)和草地(70.48 km²),林地主要转为草地(318.46 km²)和耕地(222.27 km²),草地主要转为林地(298.73 km²)和耕地(74.05 km²),可以发现三者内部的相互转化在数量上基本保持等量状态。水域新增部分的主要来源是建设用地和耕地,未利用地新增部分的主要来源是草地和水域。从土地利用动态来看(表 7),闽东南地区 2000—2010 年的土地利用变化速率整体上快于 2010—2020 年。建设用地在两个时段内的单一土地利用动态都远高于其他土地利用类型,年均变化率为 5.36%,说明建设用地是研究期内变动最剧烈的土地利用类型。耕地和水域年均变化率分别为

0.65%,0.47%,是除建设用地外发生转移最活跃的土地利用类型。林地和草地虽转移数量较多,但因其基数较大,所以年均变化率低,分别为 0.11%,0.15%,是研究期内最稳定的土地利用类型。

2.1.2 土地利用景观格局变化 在类型水平上(图 3),各地类的斑块数量(NP)和斑块密度(PD)整体上呈上升趋势,景观破碎程度提高,其中草地破碎度最高,水域破碎度最低,耕地破碎化持续加剧,林地、建设用地和未利用地的破碎度先升后降,有所缓解。林地的类型比例(PLAND)和最大斑块指数(LPI)远高于其他地类,说明林地是区域内的优势景观,林地、耕地和草地的类型比例(PLAND)和最大斑块指数(LPI)呈下降趋势,而建设用地明显上升,说明建设用地不断扩张,侵占其他地类,其景观优势度提高。各地类的形状指数(LSI)总体呈上升趋势,表明人类活动对景观的干扰加剧,导致景观空间形态趋于复杂,其中耕地、草地和林地的形状指数(LSI)位居前列,受到人为干扰的程度最强。林地的聚合度指数(AI)最大,其景观连接性最优,除建设用地的聚合度

指数(AI)逐年上升外,其他地类大多呈下降趋势或先增后减状态(水域),表明建设用地斑块集聚程度提高,呈连片式发展,其他地类受其侵占影响,斑块遭到分割,集聚度下降。

表 6 2000—2020 年闽东南地区土地利用转移矩阵
Table 6 Land use transfer matrix of Southeastern Fujian from 2000 to 2020 km²

年份	土地利用 类型	2010 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	8697.44	61.42	13.01	65.20	909.21	0.14
	林地	56.78	20999.46	150.77	23.57	390.76	0.68
	草地	17.39	137.69	5867.56	7.47	166.10	1.67
	水域	3.35	2.10	1.89	708.17	41.68	0.36
	建设用地	8.02	5.12	2.96	66.97	1650.18	0.05
	未利用地	0.06	0.33	1.43	0.22	0.54	25.21
年份	土地利用 类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2010 年	耕地	8007.39	217.80	69.57	24.62	461.01	0.38
	林地	211.42	20612.69	219.89	15.62	142.21	1.07
	草地	70.19	212.39	5688.94	5.65	58.66	0.33
	水域	29.03	14.27	6.15	755.71	62.35	1.74
	建设用地	98.38	50.50	19.80	28.84	2958.94	0.32
	未利用地	0.45	0.69	0.33	0.36	1.06	25.20
年份	土地利用 类型	2020 年					
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	耕地	8039.73	239.56	70.48	81.56	1312.18	0.39
	林地	222.27	20538.01	318.46	38.11	500.55	1.56
	草地	74.05	298.73	5598.18	11.53	212.28	1.82
	水域	26.48	12.30	6.51	615.12	93.80	1.80
	建设用地	54.03	19.18	8.68	85.50	1564.20	0.25
	未利用地	0.44	0.79	1.59	0.36	1.38	23.23

表 7 2000—2020 年闽东南地区单一土地利用动态度
Table 7 Single land use dynamic degree in Southeastern Fujian from 2000 to 2020 %

时期	单一土地利用动态度					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000—2010	−0.90	−0.17	−0.24	1.36	7.47	0.10
2010—2020	−0.38	−0.04	−0.05	−0.41	1.51	0.30
2000—2020	−0.65	−0.11	−0.15	0.47	5.36	0.21

在景观水平上(表 8),景观斑块数量(NP)和斑块密度(PD)呈现先大幅增加后略微减少的特点,表明 2000—2010 年期间闽东南地区景观破碎化程度显著加剧,而 2010—2020 年期间其破碎化进程降速,破碎度逐渐趋于稳定。形状指数(LSI)不断增大,聚合度指数(AI)及蔓延度指数(CONTAG)不断减小,进一步说明区域内景观的空间形态趋向复杂,景观的集聚性下降而离散性增强,总体上破碎程度提高。多样性指数(SHDI)和均匀度指数(SHED)持续上升,表明区域内土地利用类型丰富,景观异质性增强且各景观类型的分布趋向均匀。

2.2 闽东南地区生境质量时空演变分析

2.2.1 生境退化度的时空演变特征 InVEST 模型运算得到的生境退化度指数在栅格中以 0~1 连续变化的值呈现,其值越大代表相应栅格的退化度越高。对闽东南地区的生境退化度进行空间统计(表 9),并通过自然断点法将其生境退化水平作等级划分,共分为 4 个等级:轻度退化、中度退化、高度退化、严重退化(图 4)。

从时序特征来看,生境退化度指数的最大值在研究前期、后期及整个研究期内分别提高 19.68%,3.14%,23.44%,其平均值相应提高 34.85%,6.74%,43.94%,表明研究区生境退化的强度在提高的同时,

其退化高值区域也在逐渐蔓延,但在研究后期其退化速度已大幅变慢;生境退化度指数的标准差从 0.014 4 上升到 0.017 6,说明栅格单元间的生境退化水平差异在扩大。

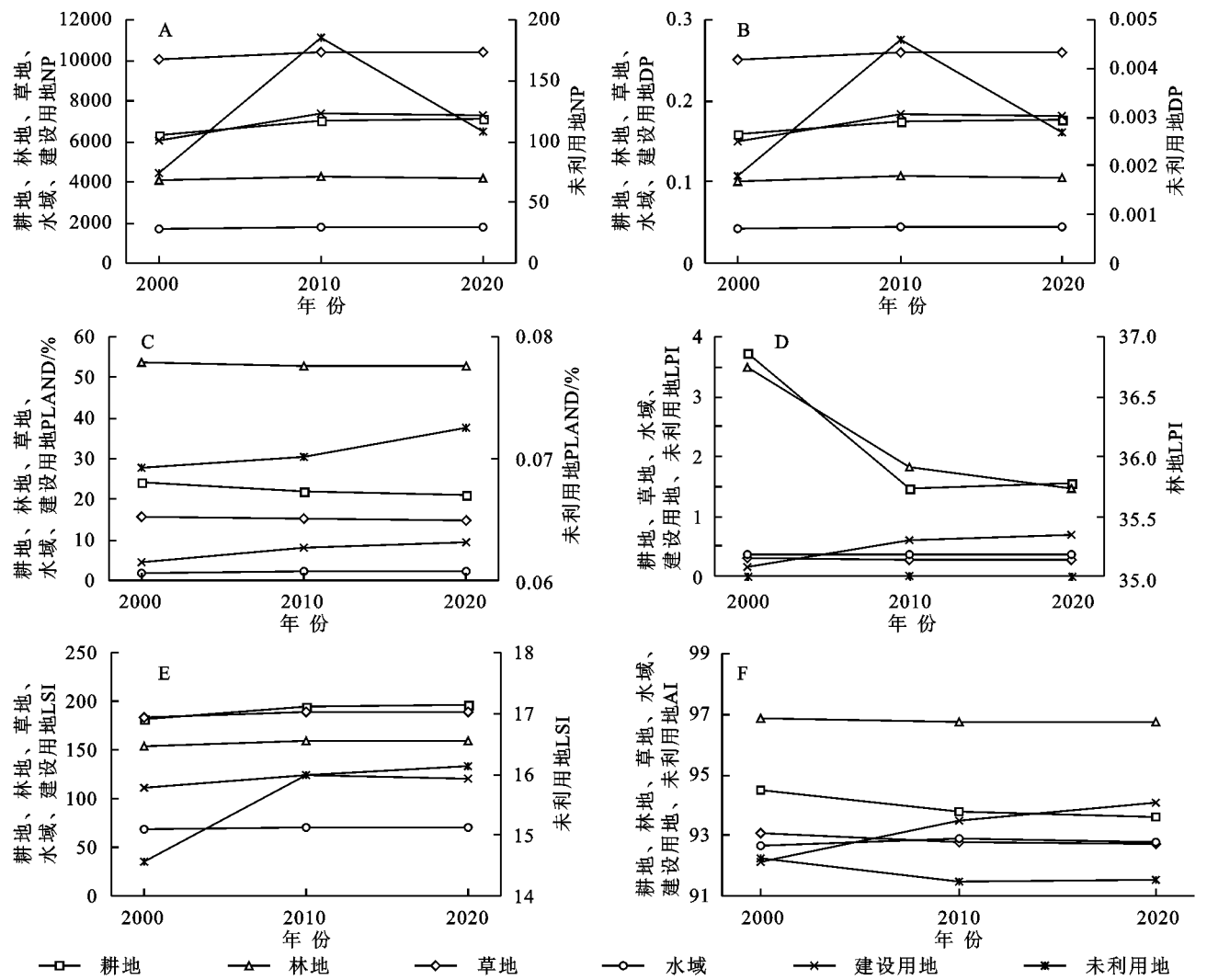


图 3 类型水平景观指数变化

Fig. 3 Landscape index changes on class metric

表 8 景观水平景观指数变化

Table 8 Landscape index changes on landscape metric							
年份	NP	PD	LSI	AI	CONTAG	SHDI	SHEI
2000	28273	0.7053	156.8941	95.4263	60.8328	1.1813	0.6593
2010	30970	0.7726	165.7652	95.1609	58.7149	1.2432	0.6938
2020	30907	0.7712	166.2250	95.1486	58.3648	1.2549	0.7004

从空间特征来看,生境退化在西北部山地和中部丘陵地区程度较轻,以轻度退化、中度退化为主,且变化幅度不大;而发生在东南部沿海平原地区的生境退化程度较重,且退化高值区域持续向内陆延伸,逐渐发展为以高度退化、严重退化为主。观察图 4 可以发现,闽东南地区生境退化水平显现出极其明显的空间圈层结构,即以“轻度退化”为轴心,按照“严重退化—高度退化—中度退化—轻度退化”的递次由内向外辐射扩散的空间形态,主要分布于以福州市辖区为核心

的福州中心城区,以及以泉州市辖区、厦门市辖区、漳州市辖区为中心轴的海岸带地区。此种圈层现象的产生机理是以建设用地为主的生境胁迫因子,因其内部人类活动密集或自然本底较差,所以生境质量低下,能够进一步退化的空间极小,于是呈现出轻度退化的状态;而胁迫因子周围的生境将受到强烈影响,距离威胁源越近受到的干扰越严重,因此生境退化水平由近及远按序呈现出由“严重退化”到“轻度退化”的递进层次。

表 9 闽东南地区生境质量及生境退化空间统计

Table 9 Spatial statistics of habitat quality and degradation in Southeastern Fujian

年份	生境质量统计参数				生境退化统计参数			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
2000	0	1	0.6881	0.2748	0	0.1250	0.0132	0.0144
2010	0	1	0.6620	0.2970	0	0.1496	0.0178	0.0169
2020	0	1	0.6525	0.3048	0	0.1543	0.0190	0.0176

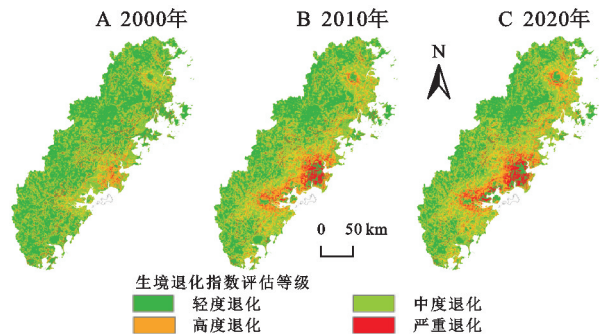


图 4 2000—2020 年闽东南地区生境退化度空间分布
Fig. 4 The spatial distribution of habitat degradation in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

2.2.2 生境质量的时空演变特征 生境质量指数取值区间为 0~1,非生境景观得分为 0,数值越靠近 1 代表生境质量越优越。为更加直观地呈现生境质量时空演变特征,根据相关研究^[7,22]及研究区实际情况,将生境质量指数划分为 0~0.2,0.2~0.4,0.4~0.6,0.6~0.8,0.8~1 共计 5 个区间,分别对应低、较低、中等、较高、高 5 个生境质量等级(图 5),并统计各生境质量等级面积及所占百分比(表 10)。

在时间尺度上,高和较高等级生境质量面积总占比维持在 63%左右,低和较低等级生境质量面积总

占比始终保持在 32%以下(表 10),说明区域生境质量水平良好,但生境质量均值由 2000 年的 0.688 1 依次下降到 2010 年的 0.662 0,2020 年的 0.652 5(表 9),表明生境质量的整体状况持续衰退。具体来看,2000—2010 年低等级生境质量面积占比提高了 4.89%,所占面积翻倍,而较低等级生境质量面积占比缩减了 3.6%;高等级生境质量面积占比缩减了 2.15%,而较高等级生境质量面积占比提高了 0.89%;中等等级生境质量面积先减后增,总体占比保持稳定。由此可知,各生境质量等级在宏观趋势上是向下转移的。

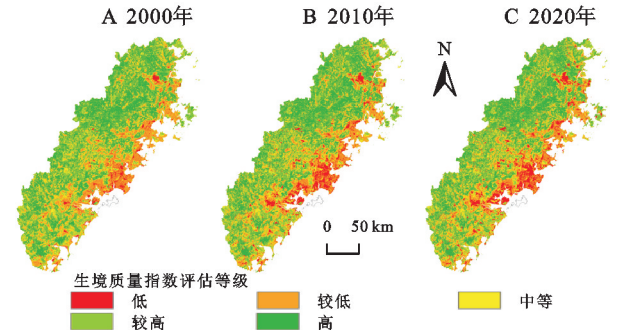


图 5 2000—2020 年闽东南地区生境质量空间分布
Fig. 5 The spatial distribution of habitat quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

表 10 2000—2020 年闽东南地区生境质量各等级面积统计

Table 10 Area statistics of each habitat quality grade in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

评估等级	分值区间	2000		2010		2020	
		面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
低	0~0.2	1767.81	4.41	3190.87	7.96	3728.03	9.30
较低	0.2~0.4	10197.96	25.44	9111.62	22.73	8754.85	21.84
中等	0.4~0.6	2421.21	6.04	2369.10	5.91	2409.19	6.01
较高	0.6~0.8	10947.57	27.31	11364.47	28.35	11304.34	28.20
高	0.8~1	14751.76	36.80	14050.25	35.05	13889.90	34.65

在空间格局上,闽东南地区生境质量总体呈现出“西北高东南低”的分布特征,高和较高等级区域成片出现在内陆地区的山地、丘陵地带,以福州市南部、泉州市北部、漳州市西北部地区为主,低和较低等级区域集中出现在沿海地区的城市建成区,以福州市辖区、莆田市西部、泉州市东南部、厦门市辖区、漳州市东北部为主。从生境质量等级的具体转移来看,2000—2010 年有 9.93%的栅格生境质量等级产生变

动,其中绝大部分栅格生境质量等级下降,占等级变动栅格的 72.38%,以“较低转低”(23.90%)和“高转较高”(21.72%)为主,集中分布在东南沿海城市建成区及各县交界地带;27.62%的栅格等级上升,其中以“中等转较高”(9.41%)和“较高转高”(7.79%)为主,主要分布于研究区中部的永春县、安溪縣和福州市西北部的闽清县、闽侯县。2010—2020 年发生生境质量等级变动的栅格数量下降,占 6.37%,其中生境

质量等级下降的栅格比例略有降低但依旧居多,为 65.40%,仍以“较低转低”(18.68%)和“高转较高”(15.50%)为主,主要分布于福州市辖区及厦门、漳州市辖区交界处,等级变动幅度较大的“高转较低”“较高转较低”占比提高,分别由前期的 0.64%,0.82%上升到 3.04%,5.28%,在平潭综合试验区中分布明显;34.60%的栅格等级上升,其中以“较高转高”(10.19%)和“较低转较高”(5.20%)为主,散布于西部山区。2000—2020 年共有 14.26%的栅格生境质量等级发生转移,其中 72.49%的栅格生境质量等级下降,以“较低转低”(24.03%)和“高转较高”(19.86%)为主,主要分布在东南沿海地区及城镇交界处;27.51%的栅格等级上升,其中以“较高转高”(7.93%)和“中等转较高”(6.64%)为主,于福州市西部的永泰县、闽清县、闽侯县及东部的长乐区分布明显。

2.3 基于乡镇(街道)的闽东南地区生境质量时空格局分析

2.3.1 生境质量空间自相关分析 为更清晰准确地识别闽东南地区生境质量分布的空间关联性,以我国行政区划的最小单位乡镇(街道)为基础单元,计算区域内各乡镇(街道)的生境质量均值,并依托 ArcGIS 对研究区生境质量进行空间自相关分析。

全局空间自相关参数(表 11)显示,2000—2020 年区域生境质量全局 Moran's *I* 均大于 0.8,*Z* 得分远高于 2.58 且 *p* 值小于 0.01,表明闽东南地区生境质量在空间上聚集特征显著。全局 Moran's *I* 由 2000 年的 0.845 286 提高到 2020 年的 0.860 509,说明研究期内生境质量的空间聚集性进一步加强;而在 2010—2020 年期间全局 Moran's *I* 略有下降,说明研究后期生境质量的空间聚集有分散趋势。

表 11 2000—2020 年闽东南地区生境质量全局空间自相关
Table 11 Spatial autocorrelation of habitat quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

年份	全局 Moran's <i>I</i>	<i>Z</i> -score	<i>p</i> -value	阈值
2000	0.845286	30.521127	0.000000	2.58/0.01
2010	0.867593	31.314768	0.000000	2.58/0.01
2020	0.860509	31.057933	0.000000	2.58/0.01

由局部自相关聚类图(图 6)可知,生境质量“低低”型聚类区主要分布于各市辖区及其邻近区域,且向周围扩张的趋势明显,福州市辖区在 2010 年和 2020 年分别新增建新镇、新店镇,莆田市辖区在 2020 年新增拱辰街道,泉州市辖区在 2010 年新增北峰街道,厦门市辖区在 2010 年新增滨海街道、侨英街道、西柯镇及洪塘镇,并于 2020 年新增新店镇,漳州市辖区在 2010 年新增芝山镇、石亭镇、九湖镇、榜山镇;生境质量“高高”型聚

类区在乡镇(街道)总数中占比始终维持在 25%以上,主要分布在研究区西北部山区,因远离经济发达的城市地区,其数量和分布形态在研究期内保持基本稳定,而值得注意的是 2010—2020 年期间分布于平潭综合试验区的“高高”型聚类区全部消失。

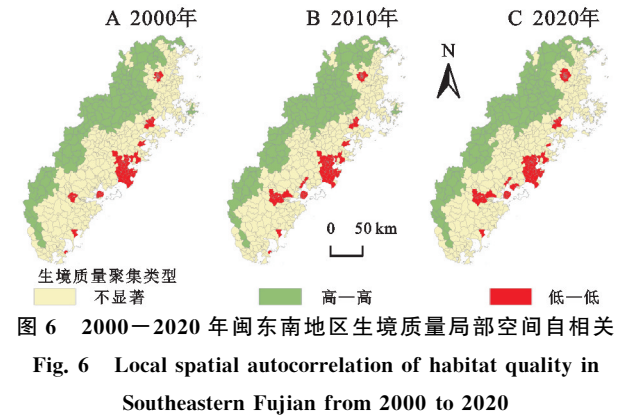


图 6 2000—2020 年闽东南地区生境质量局部空间自相关
Fig. 6 Local spatial autocorrelation of habitat quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

2.3.2 生境质量热点分析 以乡镇(街道)为单位对研究区生境质量进行热点分析(图 7),结果显示,闽东南地区生境质量在西北部乡镇主要分布热点区(99%置信度)和次热点区(95%或 90%置信度),呈现以热点区为主,由西北向东南延伸出次热点区的格局;冷点区(99%置信度)和次冷点区(95%或 90%置信度)集中分布在东南沿海城市中心及周边乡镇。研究期内,热点区与冷点区的数量分别由 65 个和 85 个增加到 71 个和 96 个,表明研究区生境质量的东西部差异趋于扩大。

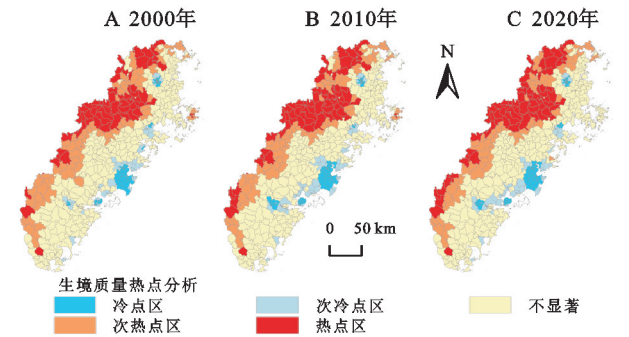


图 7 2000—2020 年闽东南地区生境质量热点分析
Fig. 7 Study on hot spots of habitat quality in Southeastern Fujian from 2000 to 2020

2.4 闽东南地区生境质量时空演变与土地利用变化相关性探讨

根据上述研究结果,进一步在分析土地利用格局形成及其变化原因的基础上,对闽东南地区生境质量时空演变与土地利用变化间的关联影响展开探讨。

研究区土地利用格局及其变化受到自然环境与社会经济因素的多方面影响。在自然条件上,闽东南地区依山傍海,地势西北高东南低,城市建设及耕地分布集中于东南沿海的狭窄平原地带,而地势崎岖、

面积广大的西北部和中部山地、丘陵,以及雨热同期的亚热带海洋性季风气候为林地和草地提供了良好的生长环境,林地、草地加上数量众多的耕地构成了研究区的景观基态。从社会经济角度来看,闽东南地区是海峡西岸经济区的核心部位,其经济发展动力强劲,2000年、2010年、2020年的区域生产总值分别为2 848.48亿元、10 986.8亿元、33 752.28亿元,2000—2010年、2010—2020年、2000—2020年各时间段内增长率达285.71%,207.21%,1 084.92%。20 a间,闽东南地区三大产业的产值增长率分别为271.72%,1 039.68%,1 429.03%,产业结构由13.6:48:38.4调整为4.3:46.2:49.5,第二三产业发展势头迅猛而第一产业增速较慢。产业结构的优化调整,为社会创造了大量的就业岗位,区域人口随之增加,2000—2020年闽东南地区户籍人口由1 894.28万人增长到2 381.54万人,增长率为25.72%。经济的高速发展以及人口的增长带来了工业用地、居住用地等建设用地需求的增加,研究期内建设用地面积持续扩张,不断侵占以耕地、林地和草地为主的非建设用地,其中耕地由于环绕城市分布,受到的冲击最为严重,成为新增建设用地的最主要来源。同时,建设用地扩张速率在研究后期远低于研究前期,且景观整体的破碎程度先升后降,符合闽东南地区经济增速由快到缓的趋势,经济发展方式的逐渐转变以及生态文明建设的深入推行为区域土地的集约节约利用创造了有利条件。

研究区生境质量时空格局演变与土地利用变化间存在着紧密联系。闽东南地区西北部和中部多山地、丘陵,主要分布林地、草地,是重要的生态功能区,而东南部海拔较低、地势平坦,主要分布耕地、建设用地,是人类活动密集区域,因此生境退化度及生境质量分别呈现出“西北部中部轻而东南部重”和“西北部中部高而东南部低”的分布格局。得益于始终保持在67%以上的植被覆盖度,研究区总体的生境退化度较低,生境质量较高。经济发展带动土地利用类型转移和城镇化水平提高,从而导致对生境的威胁上升,整体上看,伴随建设用地的迅速扩张,研究区的生境退化强度不断提高,生境质量持续衰退,生境退化度高值区与生境质量低值区由沿海向内陆蔓延,而生境退化速度及生境质量下降速率呈现先加快后变慢的特征,同土地利用变化速率在研究前后期的动态一致。对比土地利用类型和生境质量等级的转移可知,生境质量等级下降的斑块与林地、草地、水域向建设用地、耕地、未利用地转化的斑块高度吻合,其中较为典型的区域有“厦漳泉”的市辖区及平潭综合试验区,二者受到建设用地持续扩张影响,前者的生境质量“低低”

型聚类区不断向周围乡镇(街道)蔓延,后者的5个生境质量“高高”型聚类区在研究末期全部消失,进一步佐证生境质量时空演变深受土地利用变化的影响。

3 讨论与结论

3.1 讨论

区域生境质量的维持与提升关乎到新时代下人民的生计保障与福祉增进,是生态文明建设的重要课题。基于景观格局指数、InVEST模型及空间分析等方法,探究了闽东南地区近20 a来土地利用和生境质量的时空演变及格局分布特征,研究成果能为该地区及相似沿海经济区的土地资源优化配置、生境质量评估与保护,以及经济、生态协调发展提供一定决策参考。但在某些方面研究存在局限,有待加强:首先,通过模型方法测算区域生境质量,通常是基于前人在相似地域的研究成果对有关参数进行修正调整,难免存在主观性,在后续研究中可实地调研不同胁迫因子对各类生境的干扰水平,以获得更加精确的参数结果,同时如何实现对参数设置合理性的评估也有待探索;其次,研究发现生境质量时空演变深受土地利用变化影响,但其具体的耦合过程尚未清楚,未来考虑结合多种可能因素对二者间的影响机理进行揭示。

既是海峡西岸重要生态屏障,也是省内经济核心增长极的闽东南地区,在过去的建设历程中虽有广袤的植被覆盖作为天然保障以及“生态省战略”等政策支持,但快速城镇化进程依然为区域的景观格局和生境质量带来了较难逆转的负面影响。闽东南地区的未来发展应基于土地承载力与适宜性,合理规划和调整城镇布局结构,严格控制建设用地侵占耕地、林地及草地,加强土地节约集约利用,激活经济发展内生动力,以减少对城镇外部空间拓展的依赖性。同时,推动城乡建设向“低碳环保”转型,做好生境退化高值区和生境质量冷点区的生态治理工作;提升林地、草地资源质量和抗风险能力,做好生境退化低值区和生境质量热点区的生态保育工作,以此缩小区域生境质量的东西地区差异,从而实现经济与生态协同的绿色发展。

3.2 结论

(1) 2000—2020年构成闽东南地区景观基态的林地、耕地及草地数量逐期减少,景观优势度下降,成为新增建设用地的主要来源。建设用地作为变动最强烈的土地利用类型,其连片式扩张加剧了区域景观破碎化程度,使景观空间形态趋向复杂。

(2) 2000—2020年闽东南地区生境退化度持续增强,生境退化高值区域由东南沿海向内陆蔓延,生境退化水平在空间上表现出圈层式演化的分布形态。

生境质量水平整体尚好但呈持续下降态势,“较低”和“高”等级生境质量区域极易分别向“低”和“较高”等级转化,且等级向下转移后难以恢复,多见于城市建成区及城镇交界处。

(3) 2000—2020年闽东南地区生境质量分布带有明显空间聚集特征,集中于东南部、以市辖区为中心的生境质量低值冷点区逐步向周边乡镇扩散,同时,分布于西北部、倚靠山地丘陵的生境质量高值热点区也缓慢延展,使得研究区东西部生境质量差异趋于扩大。

(4) 2000—2020年闽东南地区在经济发展、产业调整、人口增长的过程中土地利用格局明显变动,对区域生境保护产生不利影响,东南沿海都市圈建设用地爆发式扩张是造成区域生境破碎、退化和质量下滑的首要原因。

参考文献:

- [1] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, et al. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity[J]. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [2] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J].*地理学报*, 2022, 77(3): 534-546.
Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: An analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 534-546.
- [3] Johnson M D. Habitat quality: A brief review for wildlife biologists[J]. *Transactions of the Western Section of the Wildlife Society*, 2005, 41(1): 31-41.
- [4] Hillard E M, Nielsen C K, Groninger J W. Swamp rabbits as indicators of wildlife habitat quality in bottom-land hardwood forest ecosystems[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 79: 47-53.
- [5] 褚琳,黄翀,刘庆生,等.2000—2010年辽宁省海岸带景观格局与生境质量变化研究[J].*资源科学*, 2015, 37(10): 1962-1972.
Zhu L, Huang C, Liu Q S, et al. Changes of coastal zone landscape spatial patterns and ecological quality in Liaoning Province from 2000 to 2010[J]. *Resources Science*, 2015, 37(10): 1962-1972.
- [6] Fleskens L, Duarte F, Eicher I. A conceptual framework for the assessment of multiple functions of agro-ecosystems: A case study of Trás-os-Montes olive groves[J]. *Journal of Rural Studies*, 2009, 25(1): 141-155.
- [7] 王超,常勇,侯西勇,等.基于土地利用格局变化的胶东半岛生境质量时空演变特征研究[J].*地球信息科学学报*, 2021, 23(10): 1809-1822.
Wang C, Chang Y, Hou X Y, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of habitat quality in Jiaodong Peninsula based on changes of land use pattern[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2021, 23(10): 1809-1822.
- [8] 欧阳志云,刘建国,肖寒,等.卧龙自然保护区大熊猫生境评价[J].*生态学报*, 2001, 21(11): 1869-1874.
Ouyang Z Y, Liu J G, Xiao H, et al. An assessment of giant panda habitat in Wolong Nature Reserve[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [9] 刘旻霞.敦煌西湖自然保护区生物多样性特征及生境质量评价[J].*干旱区资源与环境*, 2009, 23(3): 171-175.
Liu M X. Biodiversity characters and eco-environment quality evaluation on nature reserve of Xihu in Dunhuang[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(3): 171-175.
- [10] Aneseyee A B, Noszczyk T, Soromessa T, et al. The InVEST habitat quality model associated with land use/cover changes: A qualitative case study of the Winike watershed in the Omo-Gibe basin, Southwest Ethiopia[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1103.
- [11] 王玉,傅碧天,吕永鹏,等.基于 SolVES 模型的生态系统服务社会价值评估:以吴淞炮台湾湿地森林公园为例[J].*应用生态学报*, 2016, 27(6): 1767-1774.
Wang Y, Fu B T, Lyu Y P, et al. Assessment of the social values of ecosystem services based on SolVES model: A case study of Wusong Paotaiwan Wetland Forest Park, Shanghai, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1767-1774.
- [12] 吴庆明,王磊,朱瑞萍,等.基于 maxENT 模型的丹顶鹤营巢生境适宜性分析:以扎龙保护区为例[J].*生态学报*, 2016, 36(12): 3758-3764.
Wu Q M, Wang L, Zhu R P, et al. Nesting habitat suitability analysis of red-crowned crane in Zhalong Nature Reserve based on maxENT modeling[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(12): 3758-3764.
- [13] 马良,金陶陶,文一惠,等.InVEST 模型研究进展[J].*生态经济*, 2015, 31(10): 126-131.
Ma L, Jin T T, Wen Y H, et al. The research progress of InVEST model[J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(10): 126-131.
- [14] 彭建,吴见,徐飞雄,等.基于价值评估的黄山生境质量时空演变特征分析[J].*生态学报*, 2021, 41(2): 665-679.
Peng J, Wu J, Xu F X, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in typical tourism cities based on value evaluation: A case study of Huangshan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(2): 665-679.
- [15] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].*地理学报*, 2020, 75(1): 160-178.
Zhang X R, Zhou J, Li M M. Analysis on spatial and temporal changes of regional habitat quality based on the spatial pattern reconstruction of land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(1): 160-178.
- [16] 周婷,陈万旭,李江风,等.神农架林区人类活动与生境质

- 量的空间关系[J].生态学报,2021,41(15):6134-6145.
- Zhou T, Chen W X, Li J F, et al. Spatial relationship between human activities and habitat quality in Shennongjia Forest Region from 1995 to 2015 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(15):6134-6145.
- [17] 王军,严有龙,王金满,等.闽江流域生境质量时空演变特征与预测研究[J].生态学报,2021,41(14):5837-5848.
- Wang J, Yan Y L, Wang J M, et al. Temporal-spatial variation characteristics and prediction of habitat quality in min River Basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14):5837-5848.
- [18] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等.基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时刻演化及景观格局分析[J].生态学报,2020,40(9):2895-2906.
- Huang M Y, Yue W Z, Feng S R, et al. Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui province based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020,40(9):2895-2906.
- [19] 王耕,王佳雯.丹东沿海地区土地利用变化对生境质量的影响研究[J].生态环境学报,2021,30(3):621-630.
- Wang G, Wang J W. Study on the impact of land use change on habitat quality in Dandong coastal area[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(3): 621-630.
- [20] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].2版.北京:高等教育出版社,2007.
- Wu J G. *Landscape Ecology: Pattern, Process, Scale and Hierarchy*[M]. 2nd edition. Beijing: Higher Education Press, 2007.
- [21] 邓元杰,姚顺波,侯孟阳,等.退耕还林还草工程对生态系统碳储存服务的影响:以黄土高原丘陵沟壑区子长县为例[J].自然资源学报,2020,35(4):826-844.
- Deng Y J, Yao S B, Hou M Y, et al. Assessing the effects of the Green for Grain Program on ecosystem carbon storage service by linking the InVEST and FLUS models: A case study of Zichang County in hilly and gully region of Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020,35(4):826-844.
- [22] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].应用生态学报,2020,31(12):4080-4090.
- Li S P, Liu J L, Lin J, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [23] 江伟康,吴隽宇.基于地区 GDP 和人口空间分布的粤港澳大湾区生境质量时空演变研究[J].生态学报,2021,41(5):1747-1757.
- Jiang W K, Wu J Y. Spatio-temporal evolution of habitat quality in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on regional GDP and population spatial distribution[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021,41(5): 1747-1757.
- [24] 胡其玉,陈松林.厦漳泉地区生态系统服务价值时空分布格局演变[J].水土保持研究,2019,26(5):334-339,345.
- Hu Q Y, Chen S L. Spatiotemporal pattern evolution of ecosystem service value in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region[J]. *Research of Soil Water Conservation*, 2019,26(5):334-339,345.
- [25] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics[J]. *Geographical Analysis*, 1992,24(3):189-206.

(上接第 344 页)

- [30] 邱国强,牛潜,吴振华,等.苏锡常城市群土地利用冲突空间测度及异质性分析[J].水土保持研究,2022,29(4):400-406,414.
- Qiu G Q, Niu Q, Wu Z H, et al. Spatial evaluate and heterogebeity analysis of land use conflict in Su-Xi-Chang Urban Agglomeration[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):400-406,414.
- [31] 陈竹安,冯祥瑞,洪志强,等.南昌市土地利用的空间冲突风险评估及分区优化研究:基于“三生空间”视角[J].世界地理研究,2021,30(3):533-545.
- Chen Z A, Feng X R, Hong Z Q, et al. Research on spatial conflict calculation and zoning optimization of land use in Nanchang City from the perspective of “three living spaces” [J]. *World Regional Studies*, 2021,30(3):533-545.
- [32] 曾昉,魏媛.城市土地利用生态冲突诊断及影响因素研究:以贵阳市为例[J].改革与战略,2016,32(9):107-113.
- Zeng F, Wei Y. Study on the influencing factors of ecological conflict of urban land use in China: Take Guiyang as example[J]. *Reformation & Strategy*, 2016,32(9):107-113.
- [33] 李雪冬,杨广斌,周越,等.基于 3S 技术的岩溶地区城市景观生态安全评价:以贵阳市为例[J].中国岩溶,2016,35(3):340-348.
- Li X D, Yang G B, Zhou Y, et al. Evaluation of urban landscape ecological security in karst areas based on 3S technologies: An example of Guiyang City[J]. *Carso-logica Sinica*, 2016,35(3):340-348.