



应用生态学报

Chinese Journal of Applied Ecology

ISSN 1001-9332, CN 21-1253/Q

《应用生态学报》网络首发论文

题目： 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变
作者： 李胜鹏，柳建玲，林津，范胜龙
DOI： 10.13287/j.1001-9332.202012.019
收稿日期： 2020-07
网络首发日期： 2020-09-30
引用格式： 李胜鹏，柳建玲，林津，范胜龙. 基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变. 应用生态学报.
<https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202012.019>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变

李胜鹏¹ 柳建玲¹ 林 津² 范胜龙¹✉

(¹福建农林大学公共管理学院, 福州 350002; ²南京农业大学公共管理学院, 南京 210095)

*通信作者 E-mail: fsl@fafu.edu.cn

摘要 分析土地利用变化所引起生境质量的时空演变特征可为区域生态文明建设提供科学依据。以生态文明先行示范区福建省为例, 以 1980—2018 年土地利用变化数据为基础, 利用 InVEST 模型对福建省生境质量进行评估, 通过地理探测器分析影响因素, 结合土地利用变化规律分析福建省生境质量时空演化特征。结果表明: 研究期间, 福建省主要土地利用变化类型是耕地转为林地和建设用地, 林地转为耕地、草地和建设用地, 草地转为林地, 分别占总土地利用变化面积的 8.4%、14.5%、7.6%、17.1%、6.4%和 31.7%。1980—2018 年, 福建省总体生境质量处于较高级别 (0.6~0.8), 局部区域呈现生境退化和生境质量降低趋势。影响福建省生境质量空间分异的第一主导因素是土地利用类型变化, 社会经济因素对沿海县市生境质量的影响显著高于对全域及内陆县市生境质量的影响。沿海地区建设用地快速侵占周边的林草地使得生境加速退化, 且这个过程具有不可逆性, 内陆地区中心城区的生境退化会经历相似的过程, 只是在速度和规模上可能低于沿海地区。从长远看, 可通过控制城市规模、发展城市生态绿化及构建生态安全格局, 以减缓生境退化的速度。

关键词 生境质量; 土地利用变化; 时空演变; 福建省

DOI: 10.13287/j.1001-9332.202012.019

Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018

LI Sheng-peng¹, LIU Jian-ling¹, LIN Jin², FAN Sheng-long¹✉

(¹ College of Public Administration, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; ² College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract Analyzing the characteristics of spatial-temporal evolution of habitat quality caused by land use change can provide a scientific basis for the coordinated development of regional ecological economy. Taking Fujian Province (the ecological civilization demonstration area of China) as an example, the InVEST model was used to evaluate the habitat quality of the study area based on the land use change data from 1980 to 2018, the influencing factors were analyzed through Geodetector, and the spatial-temporal characteristics of habitat quality was analyzed by combining with the change of land use type. The results showed that the main types of land use included farmland translating to forest land and construction land, forest land translating to farmland, grassland and construction land, and grassland translating to forest land, which accounted for 8.4%, 14.5%, 7.6%, 17.1%, 6.4% and 31.7% of the total land use change, respectively. From 1980 to 2018, the overall habitat quality of Fujian Province was at a high level (0.6-0.8), with local areas showing a trend of habitat degradation and habitat quality reduction. The first leading factor of spatial variation of habitat quality was the change of land use type in Fujian Province, and the impact of socioeconomic factors on the habitat quality of coastal counties and cities was significantly higher than that of the entire region and inland counties and cities. The rapid encroachment of construction land on the surrounding forest and grassland accelerated the degradation of habitat in coastal areas, and the process was irreversible. The

收稿日期: 2020-07-16

基金项目: 本文由国家自然科学基金项目 (41271191) 资助

作者简介: 李胜鹏, 男, 1994 年生, 硕士研究生。主要从事土地资源信息管理研究。E-mail: lsp1302@163.com

Fund: This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41271191).

网络首发时间: 2020-09-30 17:25:27 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1253.Q.20200930.1625.006.html>

habitat degradation of central urban areas would undergo a similar process in inland area, but might be slower than coastal area in terms of speed and scale. In the long term, the speed of habitat degradation could be slowed by controlling the scale of cities, developing urban ecological greening, and building an ecological security pattern.

Key words habitat quality; land use change; spatial-temporal evolution; Fujian Province.

生境质量指生态系统为个体和种群提供适宜、持续性生存条件的能力^[1],一定程度上能够表征区域生物多样性状况^[2],生境质量的优劣决定了人类、其他种群与自然是否和谐与可持续发展^[3]。土地是地表各类生态系统的载体^[4],作为全球变化的核心研究问题^[5],土地利用结构和强度的变化能够深刻影响生境斑块之间的物质流、能量流等交换过程,进而影响生态系统服务功能以此引起生境质量的改变^[6-7]。因此,从土地利用变化的角度出发,评估并分析区域生境质量的演变规律可为区域生态保护与可持续发展提供科学参考。

当前,生境质量评估方法可分为两类:一是通过对研究区进行实地调查获取生境质量参数,在实地样点调查的基础上构建评价指标对生境质量进行综合评价,如刘旻霞^[8]调查评价了敦煌西湖自然保护区生物多样性和生境质量,刘华等^[9]对太湖流域宜兴片河流生境质量开展调查分析,杨建强等^[10]对莱州湾的生境质量开展调查研究。但实地调查采样评估生境质量的方法多倾向于小地理范围或单个物种栖息地环境的研究,且该类方法受时间和人力消耗限制,尤其较难进行长时间跨度的数据分析。二是基于土地利用数据,采用模型评估研究区生境质量,如 InVEST 模型生境质量评估模块^[11]、SoLVES 模型^[12]和 IDRISI 软件中的生物多样性评价模块^[13]等。其中,InVEST 模型生境质量评估模块因参数获取方便、结果分析准确而被广泛应用,如黄木易等^[14]对皖西大别山区的生境质量进行时空演化分析,韩艳丽等^[15]研究土地利用变化对青海湖流域生境质量的影响,郑宇等^[16]对昌黎县的生境质量和景观格局展开评估,也有部分学者结合 InVEST 模型和土地利用变化模拟模型对历史^[17]和未来时期的生境质量^[18]变化情况展开相关研究。由前人的研究成果可知,InVEST 模型在不同的地理空间尺度和时间动态上开展生境质量评估工作具有可行性。

福建省作为我国南方地区重要的生态屏障,在深入实施生态省战略、加快生态文明先行示范区建设过程中,亟待探讨其生境质量时空演变规律。因此,本研究分析 1980—2018 年福建省生境质量时空变化的规律特征,评估区域生境质量演变情况,探讨生境质量空间变化的影响因素,希望为福建省生态修复保护提供参考并促进生态文明建设。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

福建省(23°33'—28°20' N, 115°50'—120°40' E)位于我国东南沿海,境内森林覆盖率高,耕地面积较少且分散。据《福建省统计年鉴 2019》^[19]统计显示,福建省全省陆域面积 12.14 万 km²,行政区下辖 9 个地级市,常住人口 3973 万。改革开放以来福建省经济发展快速,2018 年地区生产总值 3.5 万亿元,是中国经济发展最快的省份之一。但在经济发展过程中,因人口、资源与环境空间配置不均衡、森林等生态用地退化、城市扩张、乡村道路硬化在一定程度上造成了生态破坏,生态环境质量下降。

1.2 数据来源与预处理

1980、1990、2000、2010、2018 年 5 期福建省土地利用数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),其空间分辨率为 30 m^[20],通过 ArcGIS 10.7 软件转换为 Albers 投影。同时,将土地利用数据重新分类为耕地、有林地、灌木林地、疏林地、其他林地、高覆盖度草地、中覆盖度草地、低覆盖度草地、水域、城镇用地、农村居民点用地、其他建设用地、未利用地共 13 个地类。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),归一化植被指数(NDVI)、降雨、气温、土壤亚类、国内生产总值(GDP)、人口密度数据均来自中国科学院资源与环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

1.3 研究方法

1.3.1 InVEST 模型生境质量模块

InVEST 模型生境质量模块是在土地利用变化和对生物多样性威胁信息的基础上绘制生境质量图^[21]，模型假设生境质量好的区域生物多样性高^[14]。生境质量模块通过计算生境质量指数表征生境质量状况，值越大生境质量越好。生境质量指数由生境类型的总威胁水平计算获得，生境退化度与生境质量计算公式如下^[21]：

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^R w_r} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}$$

(1)

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

(2)

式中： D_{xj} 为生境类型 j 在栅格单元 x 的总威胁水平，即生境退化度，生境退化度指生境退化程度，值最小为 0，最大为 1，值越大说明生境退化越严重； r 为胁迫因子； R 为胁迫因子数量； y 为胁迫因子 r 栅格图层中的单个栅格； Y_r 为胁迫因子 r 的栅格单元总数； W_r 为胁迫因子 r 对所有生境的相对权重； i_{rxy} 为胁迫因子 r 对生境的每个栅格产生的影响（线性或指数）； β_x 为生境抗干扰水平； S_{jr} 为每种生境对不同胁迫因子的相对敏感性； Q_{xj} 为生境质量指数，其值在 0~1； H_j 为生境适宜性； k 为半饱和系数，一般为退化度最大值的一半； Z 为模型默认参数^[21]。

InVEST 模型生境质量模块基于土地利用数据、各胁迫因子数据、胁迫因子相对权重和最大胁迫距离、各生境类型的生境适宜性以及胁迫因子的敏感性等 4 个因素计算生境质量指数。本研究选取耕地、建设用地与未利用地等 3 类作为生境威胁因子，原因在于耕地、建设用地受人类活动干扰较大，而福建省内的未利用地主要是沙地、裸土地、裸岩石质地等，自然本底条件较差。考虑到福建省山地、丘陵多，农村居民点分布零散，故将建设用地细化成城镇建设用地、农村居民点、其他建设用地。一般而言，城镇用地对生境干扰最大，其次是农村居民点、其他建设用地，最后是未利用地。InVEST 认为，越天然的生境类型对威胁因子的敏感性越大，即威胁因子对生境退化影响越大，而人为管理因素可以增强环境的修复能力降低敏感性^[21]。InVEST 模型手册指出，因子的敏感性在[0,1]，生境适宜性值越大说明生境质量更好，胁迫因子敏感性越大说明生境类型对威胁源的抗干扰能力差^[22]。结合相关研究^[6,17-18,23-24]与福建省实际情况，对 InVEST 模型生境质量模块中的参数进行赋值（表 1、表 2）。

表1 胁迫因子权重与影响距离
Table 1 Stress factor weight and influence distance

胁迫因子 Stress factor	最大影响距离 Maximum influence distance	权重 Weight	距离递减率 Decay rate with distance
耕地 Cultivated land	1.0	0.6	线性 Linear
城镇用地 Urban land	8.0	0.8	指数 Exponential
农村居民点 Rural residential land	5.0	0.6	指数 Exponential
其他建设用地 Other construction land	2.0	0.7	指数 Exponential
未利用地 Unused land	1.0	0.5	线性 Linear

表2 不同土地利用类型的生境适宜性以及胁迫因子的敏感性
Table 2 Habitat suitability of different land use types and sensitivity to stress factors

土地利用类型 Land use type	生境适宜性 Habitat suitability	胁迫因子 Stress factor				
		耕地 Cultivated land	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural residential land	其他建设用地 Other construction land	未利用地 Unused land
耕地 Cultivated land	0.5	0.0	0.8	0.6	0.7	0.4
有林地 Forest land	1.0	0.7	0.9	0.8	0.8	0.5
灌木林地 Shrubbery	1.0	0.6	0.8	0.6	0.7	0.4
疏林地 Open forest land	0.8	0.7	0.8	0.7	0.8	0.5
其他林地 Other forest land	0.7	0.7	0.8	0.7	0.8	0.4
高覆盖度草地 High coverage grassland	0.9	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
中覆盖度草地 Medium coverage grassland	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
低覆盖度草地 Low coverage grassland	0.5	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7
水域 Water	0.8	0.4	0.7	0.6	0.7	0.4
城镇用地 Urban land	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
农村居民点 Rural residential land	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
其他建设用地 Other construction land	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
未利用地 Unused land	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5	0.0

1.3.2 地学信息图谱

地学信息图谱能够同时表达地理空间结构与时间动态变化，通过对土地利用变化和生境质量进行图谱编码，合成土地利用变化与生境质量变化模式图谱，即根据 1980—2018 年福建省土地利用变化图谱与生境质量变化图谱，得到 1980—2018 年土地利用变化模式涨势图谱、落势图谱和生境质量等级转移图谱，分析福建省土地利用变化及其所引起的生境质量时空演变。图谱单元栅格计算公式为：

$$C = A \times 10 + B \tag{3}$$

式中：C 为研究时段土地利用或生境质量变化新的图谱栅格单元；A 为前一时刻土地利用或生境质量图谱栅格单元属性值；B 为后一时刻土地利用或生境质量图谱栅格单元属性值^[25-27]。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是探测地理现象的空间分异性、揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[28]，适合分析各种空间现象的解释因素以及因子间的交互作用。本研究运用地理探测器识别生境质量空间分异的因素，进而对生境质量空间分异的过程进行讨论。地理探测器分为因子、交互作用、风险与生态探测 4 个模块，本研究使用交互作用探测和因子探测 2 个模块探究生境质量空间分异的影响因素。其中，因子探测可确定影响生境质量空间分异的影响因素，交互作用探测能够明确影响因子之间的交互作用，有非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强 5 种作用，其计算原理详见参考文献^[28]，计算公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \tag{4}$$

式中：q 是某一影响因子对生境质量空间分布的解释程度，值域为[0,1]；L 为影响因子的样本数；N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数；σ²_h 和 σ² 为层 h 和全区生境质量的方差。

2 结果与分析

2.1 福建省土地利用变化特征

1980—2018 年，福建省主要土地利用类型是林地、耕地和草地，占全省陆域面积的 90% 以上（表 3）。研究期间，耕地和草地呈减少趋势，是净流出最显著的用地类型，而用地类型面积增加最显著的是建设用地。福建省耕地面积从 22739.33 km² 减至 20731.49 km²，减幅达 1.7%；草地面积从

20860.76 km² 减至 18499.46 km²，减幅达 1.9%；林地呈先增加后减少状态，在 1990—2000 年间小幅增加，2000—2018 年间小幅减少，相较于 1980 年，2018 年林地面积增加 0.9%；建设用地面积从 1843.78 km² 增到 4967.77 km²，增幅达 2.6%；水域和未利用地的面积相对稳定。研究区土地利用类型的变化主要表现为耕地转为林地和建设用地，林地转为耕地、草地和建设用地，草地转为林地，这 6 种土地利用变化类型分别占总土地利用变化面积的 8.4%、14.5%、7.6%、17.1%、6.4%和 31.7%。

利用地学信息图谱合成 1980—2018 年福建省土地利用变化涨落势图谱。1980—2018 年，福建省建设用地增长主要聚集在泉州市、厦门市和漳州市等东南沿海地带以及福州市、莆田市、龙岩市、南平市、宁德市、三明等区域的中心城区，林地增加区域主要连片集中于尤溪县、柘荣县、南平市辖区、古田县等地（图 1a）；福建省耕地流失集中发生于福建省沿海地区的福州市、莆田市、泉州市、厦门市、漳州市，其中，福州市、泉州市和厦门市的耕地流失尤为显著，龙岩市、南平市、宁德市、三明市等中心城区也有不同程度的耕地流失，草地流失在全省范围内广泛分布，但集中连片流失区主要分布在尤溪县、柘荣县、南平市辖区、宁化县、连江县等地（图 1b）。

由表 4 可以看出，1980—2018 年间，1834.60 km² 的耕地转为建设用地，1927.66 km² 的草地转为林地。福建省建设用地增加主要来源于耕地流失，林地增加主要来源于草地流失，其中，东南沿海地带是建设用地集中增加片区，而林地集中增加片区是内陆尤溪县、柘荣县、古田县等地。

表3 1980—2018年福建省各地类面积的变化
Table 3 Area change of different types of land in Fujian Province from 1980 to 2018

年份 Year	耕地		林地		草地		水域		建设用地		未利用地	
	Cultivated land		Forest land		Grassland		Water		Construction land		Unused land	
	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)	面积 Area (km ²)	比例 Ratio (%)
1980	22739.33	18.7	74601.44	61.3	20860.76	17.1	1604.59	1.3	1843.78	1.5	95.45	0.1
1990	22459.64	18.5	74419.12	61.2	20936.89	17.2	1436.05	1.2	2249.48	1.9	98.96	0.1
2000	22319.54	18.4	76269.95	62.7	19045.34	15.7	1436.04	1.2	2439.92	2.0	89.36	0.1
2010	21221.7	17.5	76069.33	62.6	18403.83	15.1	1517.02	1.2	4286.77	3.5	101.49	0.1
2018	20731.49	17.0	75776.7	62.3	18499.46	15.2	1658.17	1.3	4967.77	4.1	101.02	0.1

表4 1980—2018年福建省土地利用变化转移矩阵
Table 4 Land use change transfer matrix of Fujian Province from 1980 to 2018 (km²)

土地利用类型 Land use type	耕地 Cultivated land	林地 Forest land	草地 Grassland	水域 Water	建设用地 Construction land	未利用地 Unused land
耕地 Cultivated land	19259.34	1111.63	227.34	223.2	1914.45	1.37
林地 Forest land	1003.31	70358.57	2247.57	113.68	841.67	32.96
草地 Grassland	300.52	4175.23	15979.5	33.72	352.65	16.83
水域 Water	86.44	56.22	19.32	1254.90	180.44	5.41
建设用地 Construction land	79.85	41.90	13.34	32.07	1675.75	0.05
未利用地 Unused land	2.02	33.15	12.37	0.61	2.81	44.41

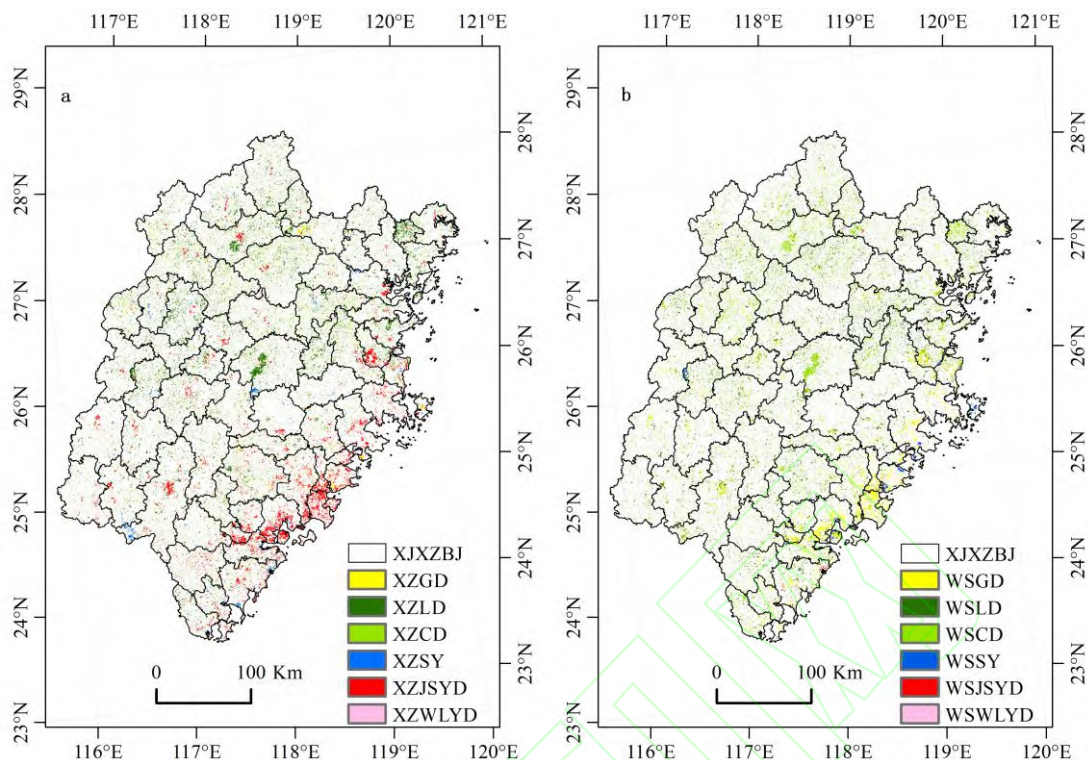


图 1 1980—2018 年土地利用变化涨落势图谱
Fig.1 Land use change fluctuation map from 1980 to 2018.

XJXZBJ: 县级行政边界 County administration boundary. 下同 The same below. a) 涨势图谱 Growth map; b) 落势图谱 Decreased map. XZGD: 新增耕地 Increased cultivated land; XZLD: 新增林地 Increased forest land; XZCD: 新增草地 Increased grassland; XZSY: 新增水域 Increased water; XZJSYD: 新增建设用地 Increased construction land; XZWLYD: 新增未利用地 Increased unused land; WSGD: 萎缩耕地 Decreased cultivated land; WSLD: 萎缩林地 Decreased forest land; WSCD: 萎缩草地 Decreased grassland; WSSY: 萎缩水域 Decreased water; WSJSYD: 萎缩建设用地 Decreased construction land; WSWLYD: 萎缩未利用地 Decreased unused land.

2.2 福建省生境退化度的时空变化

1980—2018 年, 福建省东南沿海地带和中部地带的生境退化度变化较大, 生境退化度呈“高值区减少, 低值区增加”趋势。其中, 福建省西北部生境退化度变化幅度较小, 但东南沿海生境退化低值区不断扩大, 并在生境退化低值区的边缘形成了生境退化高值区, 而中部地带大多数生境退化度低值区的边缘仍是生境退化度低值区。福建省生境退化度高值区主要集中在河流、建成区、耕地边缘, 呈环状结构分布, 如省内经济较为发达的泉州市、厦门市、漳州市、福州市等沿海城市、经济发展较快的内陆城市中心城区和县城中心城区以及耕地较多的南平市西北部等; 生境退化度低值区在空间上广有分布, 如沿海城市建成区、中部地带山脉、河流和耕地内部。

根据自然断点法对福建省生境退化度进行等级划分, 将其划分为轻度退化、中度退化、高度退化、严重退化 4 个等级。由图 2 可以看出, 福建省生境退化等级在空间上呈现两种较为明显的圈层结构。第一种圈层结构是以城镇“轻度退化”为中心, 向外呈“严重退化-高度退化-中度退化-轻度退化”圈层, 主要分布在泉州市-厦门市-漳州市沿海一带连片区与福州市中心城区, 该圈层结构形成的主要原因是城市内部多是建设用地, 建设用地生境破坏严重, 再度退化的可能性降低, 主要呈“轻度退化”, 而距离城市越近生境受到威胁越大, 退化越严重, 呈“严重退化”状态, 随着距离的增加, 生境受威胁程度逐渐递减, 生境退化程度也逐渐减小, 且福建省林地和草地覆盖面广, 其受到人类干扰较小, 生境多处于“轻度退化”。第二种圈层结构是由中心向外呈“中度退化-高度退化-严重退化”圈层, 这种结构主要分布在福建省内陆山区, 即林、草地和河流边缘区, 该圈层结构形成的主要原因是林、草地和河流受到人类干扰程度较低, 但林草地边缘区分布着大量的建设用地区, 使其周边受到的干扰较大。

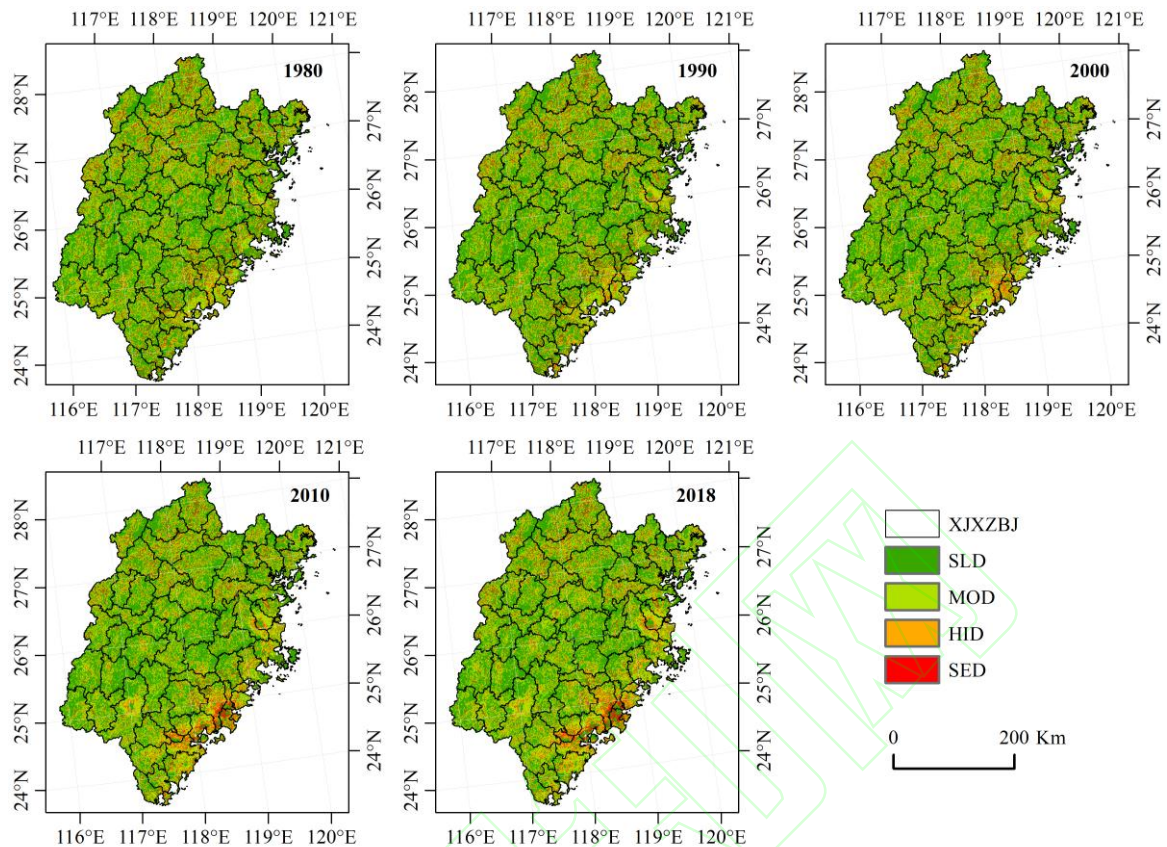


图2 1980—2018 年福建省生境质量退化的变化
Fig.2 Change of habitat quality degradation of Fujian Province from 1980 to 2018.

SLD: 轻度退化 Slight degradation; MOD: 中度退化 Moderate degradation; HID: 高度退化 High degradation; SED: 严重退化 Serious degradation.

2.3 福建省生境质量的时空变化

为了更准确地刻画生境质量空间演变规律, 根据福建省实际情况, 参考已有研究^[17,28]将生境质量划分成低 (0~0.2)、较低 (0.2~0.4)、中等 (0.4~0.6)、较高 (0.6~0.8)、高 (0.8~1) 5 个级别。由图 3 可以看出, 福建省生境质量空间分布格局由东南向西北大体上呈现出“低-高-低”的分布态势, 沿海县市平均生境质量低于内陆县市, 内陆县市城区的生境质量低于内陆其他区域。其中, 福建省东南沿海地势低, 主要地貌类型是平原, 省内工商业以及人口集聚规模较大, 城镇化水平高, 原有自然生境基本被改造, 导致生境质量低或较低; 内陆县市的地貌类型基本为山地、丘陵, 工商业和人口主要分布在城区和乡镇, 因此, 内陆县市生境质量的低值区主要分布在城区和乡镇。内陆生境质量的中、高等级地区分布规律显著, 如尤溪县、大田县、龙岩市辖区、连城县、漳平市等中部地带境内峰岭连绵, 植被覆盖度与生物多样性相对于省内其他区域较为丰富, 区域内生境质量基本为高和较高级别; 闽西北地区耕地分布较多, 城镇化水平低于东南沿海, 区域内生境质量多呈中等级别。1980—2018 年, 生境质量空间格局变化地区主要分布在福州市-莆田市-泉州市-厦门市-漳州市等沿海一带, 低和较低级别的生境质量逐渐在东南沿海地带形成聚集连片区; 内陆城区和乡镇等人口聚集区与城市建成区的扩张, 使得高生境质量的林草地逐渐被低生境质量的建设用地所侵占, 低级别生境质量逐渐增多, 但内陆其他地区覆盖着大量的林、草地, 且耕地受到严格保护, 生境质量相对稳定。

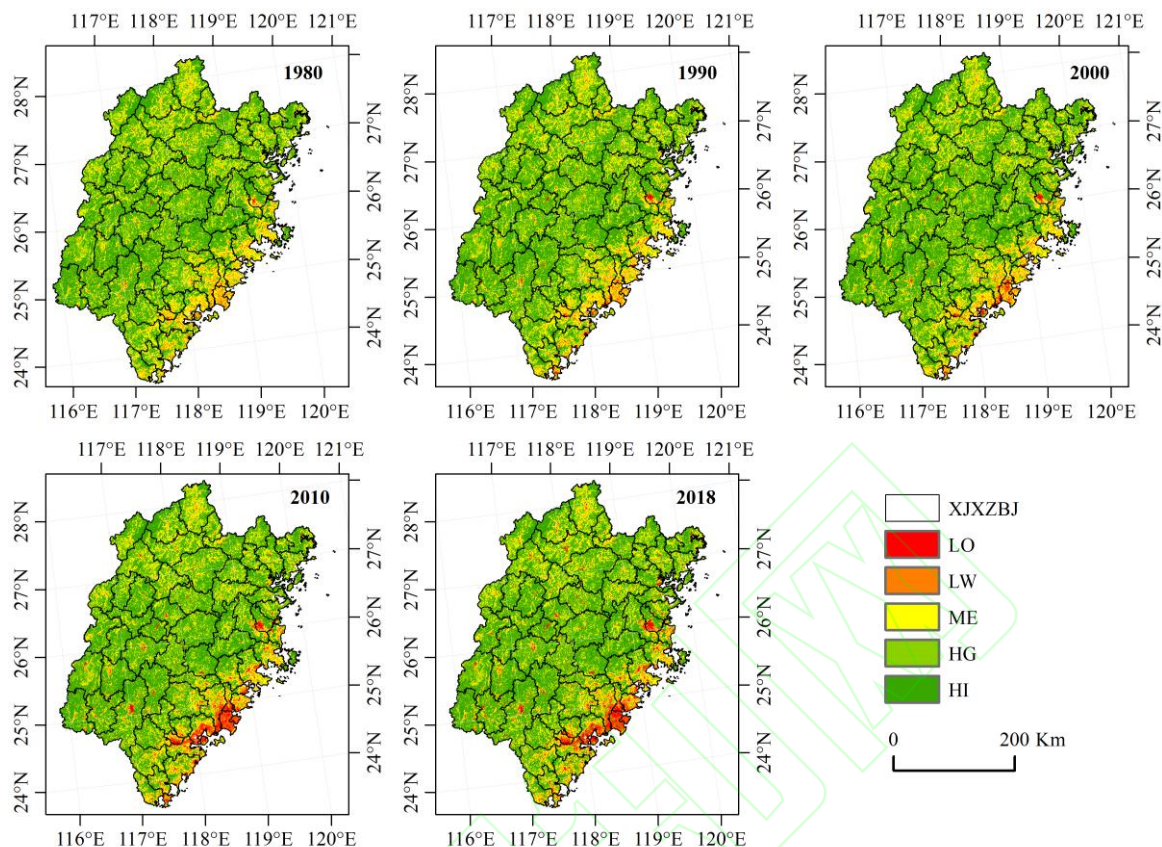


图3 福建省各年份生境质量等级
Fig.3 Habitat quality grade of Fujian Province by year.

LO: 低 Low; LW: 较低 Lower; ME: 中等 Moderate; HG: 较高 Higher; HI: 高 High.

1980—2018 年间, 福建省低、较低、中等、较高、高等级生境质量均值分别为 0.77、0.77、0.77、0.75、0.75, 总体呈现波动降低趋势; 沿海县市各等级生境质量均值分别为 0.68、0.67、0.66、0.62、0.62, 呈持续降低趋势; 内陆县市各等级生境质量均值分别为 0.80、0.80、0.80、0.79、0.78, 呈波动降低趋势。由表 5 可以看出, 研究期间, 福建省高等级生境质量面积占比近 50%, 较高和中等级别各占约 20%, 较低和低两个级别占比均小于 5%。1980—2018 年间, 低等级生境质量面积占比从 1.8% 增到 4.5%, 较低级别从 1.7% 增到 3.0%, 主要原因是建设用地持续增加, 使生境受威胁程度增加而生境适宜性降低, 故生境质量低级别和较低级别面积呈增加趋势; 中等级别的面积占比从 24.8% 降到 22.3%, 该级别的地类主要是耕地, 研究期间, 耕地一直处于减少状态, 导致中等级别的生境质量占比趋于下降。较高等级面积占比在 1980—2000 年间下降、2000—2018 年间增长, 高等级面积占比在 1980—1990 年间下降、1990—2000 年间增长、2000—2018 年间下降, 原因在于 1980—1990 年林地和水域面积减少 0.1%、草地面积增加 0.1%, 导致较高和高等级的面积占比下降; 1990—2000 年草地面积减少 1.5%, 水域面积基本无变化, 林地面积增加 1.5%, 导致较高等级的占比持续降低, 高等级占比大幅增长; 2000—2010 年, 林地面积减少 0.1%, 草地面积减少 0.6%, 生境适宜性降低, 但较高等级生境质量面积增长、高等级生境质量面积出现较大幅度下降, 主要是城市周边的林地受到建设用地快速增长导致的生境威胁增加, 使其生境质量由高等级转为较高等级, 故即使草地面积减少导致的较高级别占比下降但仍不足以抵消林地受到建设用地威胁所造成的级别转换; 2010—2018 年, 草地面积增加 0.1%, 林地面积减少 0.4%, 建设用地扩张速度减慢, 与 2000—2010 年变化规律相似, 较高等级面积占比增长、高等级面积占比下降。1980 年福建省生境质量中等以上级别的土地面积占比为 96.5%, 2018 年降至 92.6%。

表5 1980—2018年福建省生境质量等级面积百分比的变化
Table 5 Percentage change of the habitat quality grade area in Fujian Province from 1980 to 2018 (%)

年份 Year	低 Low	较低 Lower	中等 Moderate	较高 Higher	高 High
1980	1.8	1.7	24.8	21.8	49.9
1990	2.2	1.8	24.6	21.5	49.9
2000	2.4	1.8	24.1	20.7	51.0
2010	4.0	2.8	22.7	21.4	49.1
2018	4.5	3.0	22.3	22.1	48.1

2.4 福建省生境质量空间分异的影响因素

由表 6 可以看出，影响福建省全局生境质量空间变化的主要因素是土地利用类型、高程、归一化植被指数（NDVI）、坡度。其中，土地利用类型是第一主导因素，其解释力达到 70%以上，即土地利用类型的转变对福建省生境质量空间变化有着重要影响；第二主导因素是 NDVI，NDVI 表示植被覆盖情况，解释力在 25%以上；其次是高程、坡度等因子，高程和坡度的 q 值明显高于其他因素，说明地形因素对福建省生境质量空间变化的影响较大。按照内陆、沿海县市分区对生境质量空间变化进行归因，土地利用类型仍是第一主导因素，高程、坡度、NDVI、GDP、人口密度对沿海县市生境质量空间变化的贡献率均明显高于它们对全局和内陆县市生境质量空间变化的贡献率。在因子间的交互作用方面，自然因素与社会经济因素之间呈现出较强的交互作用，无论是福建省全域还是沿海和内陆分区，各因子交互作用对生境质量空间变化均表现出协同增强作用；且自然因素与社会经济因素在沿海县市的交互作用比内陆县市和全域更明显，这与沿海县市社会经济发展水平较高相关。

表6 不同区域生境质量空间分异影响因子的识别
Table 6 Identification of influencing factor of spatial determinants of habit quality in different regions

因子 Factor	全局 Global		内陆县市 Inland counties and cities		沿海县市 Coastal counties and cities	
	q	P	q	P	q	P
坡向 Aspect	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
高程 Elevation	0.23	0.00	0.14	0.00	0.32	0.00
地区生产总值 GDP	0.09	0.00	0.02	0.00	0.18	0.00
土地利用类型 Land use type	0.75	0.00	0.74	0.00	0.76	0.00
归一化植被指数 NDVI	0.28	0.00	0.17	0.00	0.43	0.00
年总降水量 Annual precipitation	0.05	0.00	0.01	0.00	0.12	0.00
人口密度 Population density	0.11	0.00	0.01	0.00	0.19	0.00
温度 Temperature	0.06	0.00	0.01	0.00	0.12	0.00
坡度 Slope	0.16	0.00	0.10	0.00	0.27	0.00
土壤亚类 Subtype of soil	0.07	0.00	0.01	0.00	0.13	0.00

限于篇幅只列出影响因子识别结果，因子间交互作用结果未列出 Limited to the length of the article, only the identification results of impact factors were listed, and the results of interaction between factors were not listed.

不论是全域还是分区，土地利用类型、NDVI、高程和坡度的 q 值均较大，表明自然因素是福建省生境质量空间变化的基础因素；GDP 和人口密度对全域、沿海和内陆县市生境质量空间变化的贡献率都较大，但在沿海县市的影响更显著，即社会经济因素在全局和各分区内均对生境质量空间格局有重要影响，在沿海县市的影响更加明显。自然因素与社会经济因素的交互作用对福建省生境质量变化有增强效应，自然环境和社会经济共同主导着地区的生境质量空间变化。

2.5 福建省生境质量空间分异过程

土地利用类型、高程、坡度、GDP、人口密度、NDVI 是生境质量空间分异的主要驱动力，降雨、气温和土壤类型虽然对生境质量空间分异的解释力较小，但仍然是生境质量空间分异不可或缺的因素。

福建省雨热充足，地貌类型主要是山地和丘陵，省内植被覆盖度高、物种多样性丰富，自然原始生境质量优越。福建省的平原较少且主要分布在沿海地区，平原区适合定居和耕种，而沿海地区经济

贸易活动更加便捷和频繁。随着人口密度逐渐增大,土地利用活动强度增大,土地城镇化速度加快。福建省沿海地区多平原,经济快速发展带动土地城镇化速度加快,在此过程中植被减少、整体生境区被破坏,非生境面积逐渐扩张;内陆地区主要是山地和丘陵,地形将人类活动的范围集中于沿河小平原、山间盆地等地势相对平坦地区,限制了经济发展速度和规模,同时,内陆地区“三五七造林绿化”等政策将其植被覆盖度维持在较高水平。福建省内陆地区的土地利用和人口活动规模以及经济发展规模相较于沿海平原地带较小,故沿海地区的生境先于内陆地区出现大规模的非生境化。福建省沿海与内陆地区呈现不同的驱动力施加的作用,使福建省从优越的生境逐渐形成“东南沿海低-中部地带高-西北部低”的生境质量分布格局。以上生境分异过程令东南沿海地区的生境逐渐由破碎化走向全面退化,而且是一个不可逆的过程;内陆地区的人口集中区,如中心城区等地带也会经历类似的过程,只是规模上可能会低于东南沿海平原区。

3 讨 论

本研究在分析 1980—2018 年福建省土地利用变化的基础上,利用 InVEST 模型估算福建省陆域生境质量,揭示了福建省土地利用变化过程中生境质量的时空变化特征和影响因素。

研究期间,福建省土地利用变化在不同时间段呈现不同的变化特征,驱动因素也有所不同。1980—1990 年,福建省主要发生变化的用地类型是耕地转为建设用地和水域转为建设用地,其中,耕地转为建设用地的区域主要分布在福州市区、泉州市、莆田市、厦门市、漳州市区、龙岩市区,福州市区成片分布较多,其余零散分布在省内其他地方;水域转为建设用地的区域主要分布在泉州市、厦门市、东山岛等地的沿海地区,多数变化是沿海滩涂、坑塘转为沿海晒盐场。1990—2000 年,福建省主要变化的用地类型是林地转为草地、耕地转为建设用地、草地转为林地,其中,林地转为草地主要聚集分布在古田县、闽侯县、罗源县、南平市辖区、闽清县等辖接地带,建瓯市也广有分布;草地转为林地的规模最大,主要是因为 1989 年福建省实施“三五七”造林绿化工程和 1988 年全面实施沿海防护林体系建设工程,导致省内大量草地和荒山转为有林地和灌木林地;耕地转为建设用地主要分布在泉州市、厦门市和漳州市部分地区,主要是因为 20 世纪 90 年代泉州市提出大泉州规划,并向东、向南发展泉州市核心区,而 1994 年厦门市作为计划单列市并成为副省级城市,随着改革开放的推进,经济发展迅速,扩张建设用地成为必要的发展方式。2000—2010 年,福建省主要变化的用地类型是耕地和草地转为建设用地、草地转为林地;在福建省东南沿海地区,尤其是泉州市与厦门市,耕地和草地向建设用地的转变呈现爆发式增长,内陆地区的中心城区,如龙岩市辖区、长汀县、沙县、连城县等地区的建设用地面积也逐渐快速增加,原因在于该时期福建省沿海地区经济发展势头良好,又得益于 2004 年“海峡西岸经济区”的设立,显著提升了福建省的经济发展水平,沿海地区 GDP 约占全省 60%以上,造成城市扩张即建设用地不断侵占城市内或城市周边的耕地和草地;草地转为林地主要是因为福建省持续的造林工程以及在 2002 年实施了“生态省战略”,导致在建设用地大幅扩张的同时林地面积仍能占全省土地的 62.6%。2010—2018 年,福建省主要变化的用地类型是耕地、草地和林地转为建设用地、建设用地转为水域;耕地、林地、草地转为建设用地仍是经济快速发展所致,主要是 2014 年设立中国(福建)自由贸易试验区使福建省的经济再次迅速发展,但沿海和内陆地区的建设用地来源有所不同,沿海地区城市周边耕地较多、内陆城市周边林地和草地较多;建设用地转为水域源于恢复 1980—1990 年被改为建设用地的沿海滩涂和坑塘。

从生境质量空间分异的影响因素看,自然因素和社会经济因素共同主导研究区生境质量的时空变化,其中,土地利用类型是第一主导因素,社会经济因素对沿海县市生境质量空间分异的影响比对全域及内陆县市的影响更显著。研究期间,福建省全局生境质量均处于较高级别但呈波动下降,由西北向东南大体上呈现出“低-高-低”的分布态势,其中,沿海县市的生境质量逐渐降低。林地是福建省的主要土地利用类型,林地连通性好、破碎化程度低,因此保障了全域生境质量处于较高级别。福建省西北部地区多耕地,严格的耕地保护政策限制了该地区耕地向建设用地转化,因此生境质量退化程度有限。福建省中部地区植被覆盖度较高,受人类活动干扰小,生境质量保持在较高水平。福建省沿

海县市主要是平原,是省内经济发展的核心区,经济发展带动建设用地的增加,加大了生境威胁;同时,社会经济因素对沿海县市生境质量空间分异有显著影响,空间分异的过程表明沿海地区特别是东南沿海平原区城市逐渐向内陆扩张,扩张所伴随的生境退化也逐渐向内陆延伸,而内陆山脉连绵,沿海城市向内陆扩张的规模有限,这一系列因素可能促使沿海县市特别是沿海平原区的生境持续退化趋势无法避免。

本研究主要利用相关文献结合福建省实际特征进行 InVEST 模型参数的设置,未来研究中可根据不同生态系统的稳定性与抗干扰能力对各胁迫因子进行实地测算,将实地调查与 InVEST 模型结合使用,以使模型评估更精确。本研究结果表明,土地利用类型是福建省生境质量空间分异的第一驱动力,未来将考虑不同情景下土地利用变化的模拟预测,探讨未来区域生境质量变化情况,更有助于为当地政府部门制定合理的土地利用政策、为生态系统的可持续管理提供理论依据。

在生态文明建设背景下,沿海地区生境质量提升是一个重要问题。当前的生境退化的过程不可逆,但可通过在城市内部与周边的生态绿化措施上多做方案,增加城市的植被覆盖率等方式延缓生境过快退化。虽然建设用地扩张速度在 2010 年以后出现减缓,但在经济发展的过程中,仍需严格控制建设用地的扩张,特别是向内陆方向的扩张,以最小化的建设用地扩张规模提升经济发展,做好城市的内涵挖掘。内陆城市虽然受到地形限制,扩张的范围有限,但随着土地利用活动强度的增加,对城市周边大量的林草地会加大干扰,仍需要警惕经济发展所带来的生境破坏,而现有的自然保护区和生态红线对内陆大部分植被覆盖区起到了保护作用,可将人类干扰程度减小到最小。在生境保护与恢复过程中,必要时可对福建省全局构建生态安全格局以识别重要生境斑块,优化生态系统生态服务功能。

参考文献

- [1] Hall LS, Krausman PR, Morrison ML. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25: 173-182
- [2] 薛晓玉, 王晓云, 段含明, 等. 基于土地利用变化的祁连山地区生境质量时空演变分析. *水土保持通报*, 2020, 40(2): 278-284 [Xue X-Y, Wang X-Y, Duan H-M, et al. Analysis on spatio-temporal evolution of habitat quality in Qilian Mountains based on land use change. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(2): 278-284]
- [3] 彭建, 徐飞雄, 吴见, 等. 典型旅游城市生境质量空间分异及其影响机理研究——以黄山市为例. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(10): 2397-2409 [Peng J, Xu F-X, Wu J, et al. Spatial differentiation of habitat quality in typical tourist city and their influencing factors mechanisms: A case study of Huangshan City. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(10): 2397-2409]
- [4] 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. *Journal of Rural Studies*, 2009, 25: 141-155
- [5] 李秀彬. 全球环境变化研究的核心领域——土地利用/土地覆被变化的国际研究动向. *地理学报*, 1996, 51(6): 553-558 [Li X-B. A review of the international researches on land use/land cover change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(6): 553-558]
- [6] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 等. 基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3457-3466 [Wu J-S, Cao Q-W, Shi S-Q, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei area based on land use change. *Chinese Journal of Applied ecology*, 2015, 26(11): 3457-3466]
- [7] Falcucci A, Maiorano L, Boitani L. Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implications for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, 2007, 22: 617-631
- [8] 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. *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. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009, 23(3): 171-175]
- [9] 刘华, 蔡颖, 於梦秋, 等. 太湖流域宜兴片河流生境质量评价. *生态学杂志*, 2012, 31(5): 1288-1295 [Liu H, Cai Y, Yu M-Q, et al. Assessment of river habitat quality in Yixing district of Taihu Lake basin. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(5): 1288-1295]
- [10] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 等. 基于生境质量和生态响应的莱州湾生态环境质量评价. *生态学报*, 2014, 34(1): 105-114 [Yang J-Q, Zhu Y-G, Song W-P, et al. The eco-environmental evaluation based on habitat quality and ecological response of Laizhou Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(1): 105-114]
- [11] Aneseyee AB, 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. *Remote Sensing*, 2020, 12: 1103-1131
- [12] 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. *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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(6): 1767-1774]
- [13] Shanthala DBS, Murthy MSR, Bijan D, et al. Identification of potential habitat patches for connectivity using weighted linear combination (WLC) and integral index of connectivity (IIC) at East Godavari District, Andhra Pradesh, India. *Journal of the Indian Society of Remote*

- Sensing, 2016, 44: 385-394
- [14] 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空演化及景观格局分析. 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. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (9): 2895-2906]
- [15] 韩艳莉, 陈克龙, 于德永. 土地利用变化对青海湖流域生境质量的影响. 生态环境学报, 2019, 28 (10): 2035-2044 [Han Y-L, Chen K-L, Yu D-Y. Evaluation on the impact of land use change on habitat quality in Qinghai Lake basin. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28 (10): 2035-2044]
- [16] 郑宇, 张蓬涛, 汤峰, 等. 基于 InVEST 模型的昌黎县土地利用变化对生境质量的影响研究. 中国农业资源与区划, 2018, 39 (7): 121-128 [Zheng Y, Zhang P-T, Tang F, et al. The effects of land use change on habitat quality in Changli County based on InVEST model. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39 (7): 121-128]
- [17] 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. 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. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (1): 160-178]
- [18] 黄康, 戴文远, 黄万里, 等. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的土地利用变化对生境影响评价——以福建省福州新区为例. 水土保持通报, 2019, 39 (6): 155-162 [Huang K, Dai W-Y, Huang W-L, et al. Impacts of land use change evaluation on habitat quality based on CA-Markov and InVEST models: Taking Fuzhou New District of Fujian Province as an example. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39 (6): 155-162]
- [19] 福建省统计局. 福建省统计年鉴 2019 [EB/OL]. (2019-09-11) [2020-07-16]. <http://tjj.fujian.gov.cn/tongjinnianjian/dz2019/index.html> [Fujian Provincial Bureau of Statistics. *Fujian Statistical Yearbook 2019* [EB/OL]. (2019-09-11) [2020-07-16]. <http://tjj.fujian.gov.cn/tongjinnianjian/dz2019/index.html>]
- [20] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69 (1): 3-14 [Liu J-Y, Kuang W-H, Zhang Z-X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69 (1): 3-14]
- [21] 肖明. GIS 在流域生态环境质量评价中的应用——以昌化下游为例. 硕士论文. 海口: 海南大学, 2011 [Xiao M. The Application of GIS in Watershed Ecological Quality Evaluation: A Case Study in Changhuajiang Downstream. Master Thesis. Haikou: Hainan University, 2011]
- [22] Sharp R, Douglass J, Wolny S, et al. InVEST 3.8.6 User's Guide. Palo Alto, CA, USA: Stanford University, 2020
- [23] 王燕, 高吉喜, 金字, 等. 基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究. 生态与农村环境学报, 2020, 36 (5): 654-662 [Wang Y, Gao J-X, Jin Y, et al. Habitat quality of farming-pastoral ecotone in Bairin Right Banner, Inner Mongolia based on land use change and InVEST model from 2005 to 2015. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2020, 36 (5): 654-662]
- [24] 包玉斌, 刘康, 李婷, 等. 基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响——以陕西省黄河湿地自然保护区为例. 干旱区研究, 2015, 32 (3): 622-629 [Bao Y-B, Liu K, Li T, et al. Effects of land use change on habitat based on InVEST model-taking yellow river wetland nature reserve in Shanxi Province as an example. *Arid Zone Research*, 2015, 32 (3): 622-629]
- [25] 吕晓, 史洋洋, 黄贤金, 等. 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 [Lyu X, Shi Y-Y, Huang X-J, et al. Geo-spectrum characteristics of land use change in Jiangsu Province, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27 (4): 1077-1084]
- [26] 叶庆华, 刘高焕, 姚一鸣, 等. 黄河三角洲新生湿地土地利用变化图谱. 地理科学进展, 2003, 22 (2): 141-148 [Ye Q-H, Liu G-H, Yao Y-M, et al. Tupu analysis of land use changes in the new-born wetland of the Yellow River Delta (YRD). *Progress in Geography*, 2003, 22 (2): 141-148]
- [27] 张国坤, 邓伟, 张洪岩, 等. 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 [Zhang G-K, Deng W, Zhang H-Y, et al. The Tupu analysis of land use pattern in Xinkai River basin. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (9): 1111-1120]
- [28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72 (1): 116-134 [Wang J-F, Xu C-D. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72 (1): 116-134]

责任编辑 杨弘