

# 山地城市生境质量时空演变及地形梯度效应研究

## ——以三明市区为例

曾 真,艾婧文,陈凌艳,何天友,郑郁善

(福建农林大学风景园林与艺术学院,福建 福州 350002)

[摘要] 城市建设用地的扩张一直是影响城市生态系统的主要因素,山地城市因其复杂、敏感的自然环境特征,生物多样性更容易受到冲击。因此,深入分析山地城市的生境质量是改善当地生境质量、保护生物多样性的必要措施。本次研究选用 InVEST 模型对三明市区 2011、2021 年的生境质量进行模拟测算,评估三明市区范围的生境等级,结合地形位指数分析生境质量的梯度效应;运用地理探测器对研究区内的生境质量进行驱动力分析,探寻影响生境质量的主要因素。结果表明:(1) 2011、2021 年三明市区的平均生境质量指数分别为 0.539 9、0.595 3,生境质量水平总体处于中上水平,空间上呈现出外高内低的现象。(2) 三明市区的生境质量展现出明显的空间集聚特征,以高质量生境区域集聚和低质量生境区域集聚作为主要集聚特征。(3) 三明市区的生境质量分布指数具有显著的地形位梯度效应,高生境质量在高地形梯度有绝对优势,低生境质量在低地形位梯度上有绝对优势。(4) 在研究区域的生境质量驱动力分析中,自然环境的影响高于社会因素。研究结果加强了对山地城市生境质量时空变化的认知,对三明市区生境质量提升与保护具有一定的理论与实践价值。

[关键词] 山地城市,生境质量,地形梯度效应,三明市区

[中图分类号] X321 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2023)01-0100-10

## Research on the Temporal and Spatial Evolution of Habitat Quality and Terrain Gradient Effect in Mountainous City: Taking the Urban Area of Sanming as an Example

Zeng Zhen, Ai Jingwen, Cheng Lingyan, He Tianyou, Zheng Yushan

(College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forest University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** The expansion of urban construction land had always been the main factor affecting the urban ecosystem. Due to its complex and sensitive natural environment, mountain cities were more vulnerable to the impact of biodiversity. Therefore, in-depth analysis of the habitat quality of mountain cities were a necessary measure to improve local habitat quality and protect biodiversity. In this study, the InVEST model was used to simulate and calculate the habitat quality of the urban area of Sanming in 2011 and 2021, to evaluate the habitat level of the urban area of Sanming, and to analyze the gradient effect of the habitat quality in combination with the terrain level index. The driving force analysis of the habitat quality in the study area was carried out by using geodetector, and the main factors affecting the habitat quality were explored. The results showed that, (1) The average habitat quality index in Sanming urban area in 2011 and 2021 was 0.539 9 and 0.595 3, respectively. The habitat quality level was generally at the upper-middle level, showing a phenomenon of high outside and low inside. (2) The habitat quality in the urban area of Sanming showed obvious spatial agglomeration characteristics, with regional agglomeration of high-quality habitats and regional agglomeration of low-quality habitats as the main agglomeration characteristics. (3) The habitat quality distribution index in the urban area of Sanming has a significant terrain gradient effect. High habitat quality had an absolute advantage in high terrain gradient, and low habitat quality had an absolute advantage in low terrain gradient. (4) In the driving force analysis of habitat quality in the study area, the influence of natural environment was higher than that of social factors. The research results

收稿日期:2022-05-30.

基金项目:福建省科技重大项目(2011N5002)、福建省区域发展项目(2015N3015).

通讯作者:郑郁善,教授,博士生导师,研究方向:风景园林规划设计,园林植物应用. E-mail: zys1960@163.com

strengthen the cognition of the temporal and spatial changes of the habitat quality of mountain cities, and had certain theoretical and practical value for the improvement and protection of the habitat quality in Sanming urban area.

**Key words:** mountainous city, habitat quality, terratin gradient effect, Urban area of Sanming

作为与人类社会生存和发展的重要基础,生物多样性一直为社会的稳定和可持续发展提供了根本的保障<sup>[1]</sup>. 全球化的快速发展带来了人类社会的极大进步,但人口数量的激增以及人类活动足迹的不断扩张,许多原生态的自然栖息地遭到人类活动的破坏、侵占. 近年来,全球物种灭绝的速度持续加快,生物多样性的失衡成为了当前人类生存和发展不得不面临的问题<sup>[2-3]</sup>. 作为全球生物多样性最为丰富的 12 个国家之一,中国所要面临的影响和挑战也极其严峻<sup>[4]</sup>. 生境是生物个体、种群或群落出现的全部空间范围,一般指维持生物正常生命活动所依赖的环境资源的总和<sup>[5]</sup>. 高水平的生境质量能为更多的物种提供良好的栖息条件,低水平的生境质量则无法提供良好的栖息条件供物种生存和繁衍,区域的生境质量受到破坏,是导致区域内生物多样性下降的主导因素<sup>[6]</sup>. 因此,对区域内生境质量的深入调查并开展评估工作对于加强生态系统保护及可持续发展有着重要意义<sup>[7]</sup>. 早期对于生境质量的相关评估工作主要还是以生物多样性和栖息地实地调查为主,但是该方法存在可操作性较差、局限性大的问题,对于小区域、自然保护区的生境质量评估调查更为合适<sup>[8]</sup>,不适用于大中尺度区域的生境质量评估. 因此,在中尺度上常以建立生态模型来进行生境质量评估,如 MIMES 模型<sup>[9]</sup>、SolVES 模型<sup>[10]</sup>、InVEST 模型<sup>[11]</sup>等.

InVEST 模型凭借其所需的数据量不高、操作容易上手等优势在生境质量评估的相关研究中得到了广泛的认可与应用. 近些年来,相关学者基于 InVEST 模型在不同空间尺度上进行了生境质量的相关研究,包括在流域<sup>[12]</sup>、县市<sup>[13-14]</sup>、自然保护区<sup>[15]</sup>等,但相关研究的聚焦点多集中在研究区域的生境质量可视化、生境质量与土地利用、景观格局等的关系. 作为重要的自然地理要素之一,地形与生境质量存在着紧密的联系,是影响生态系统服务空间格局分异的重要因子<sup>[16]</sup>. 近年有部分学者进行了生境质量随地形梯度变化的相关研究<sup>[17-18]</sup>,但结合地形梯度与生境质量对山地城市的研究较少. 地形因子作为自然生态环境中的重要因素,对地表物质的迁移与能量的转换有着显著影响,从地形角度开展生境质量分析,进一步深入分析生境质量在空间层面的特征表达,对于理解区域生境质量的空间分布有重大意义.

山地城市生态环境复杂,相比平原地区,山地城市受地形因素的影响更为明显. 所以从地形角度来对生态敏感的山地城市进行生境质量评估有助于深入认识山地生境质量时空分异机制及生态系统管理的有效开展<sup>[19-20]</sup>. 三明市作为典型的山地城市,在拥有良好的生态条件的同时,由于周边密集的山地分布与地形的影响,城市的外拓发展受到限制,不可避免地显现出内聚化的发展特征<sup>[21]</sup>. 高强度的城市化发展模式与山地地区脆弱的生态系统规律相悖,资源开发与生态保护的矛盾在快速城市化进程中日益突出. 如何在资源开发和生态保护的双重背景下,确保山地城市的生境质量稳定,是山地城市高质量发展所面临的大问题.

因此,本研究选择采用 InVEST 模型,系统分析三明市区 2011—2021 年生境质量的时空演变特征,引入地形位梯度,借助 GIS 空间分析方法,进一步探索了研究区生境质量的地形梯度分异特征,有助于识别山地城市生物多样性保护的重点区域,为研究区生态空间修复以及生态安全维护工作提供有益理论参考. 结合地理探测器分析影响生境质量空间异质性的主要因子,目的在于全面认知区域生境质量变化规律及其空间分异机制,是实现区域生态、农业和城镇三空间合理布局,充分保护生物多样性的基础<sup>[22]</sup>.

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区域概况

三明市是福建省辖地级市,位于福建省中部连接西北隅,地处北纬 25°30′~27°07′、东经 116°22′~118°39′. 三明市境内森林覆盖率高,以低山及丘陵为主,溪流密布,河谷与盆地错落分布于其间. 三明市境内气候总特征:气候温暖湿润,四季特征明显,降雨量充足. 作为中国最绿省份的最绿城市,三明市 2016 年被授予“国家森林城市”的称号. 三明市的市辖区原本为三元区和梅列区,经过重新规整,于 2021 年正式将原来的三元区和梅列区合并为三元区,增设沙县区,因此,本次研究区域为三元区和沙县区(图 1).

### 1.2 数据来源与处理

本研究所用数据主要有:三明市区(三元区及沙县区)2011 年 4 月的 Landsat7ETM、2021 年 3 月的

Landsat8OLI\_TIRS 影像数据、DEM 数据源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>), 运用 ENVI5.3 对影像图进行监督分类(图 2), 研究区的景观类型分为林地、建设用地、水域、农田、裸地. 人口数据源于 WorldPop (<https://www.worldpop.org>)、年均温度、年均降雨量、年均 PM2.5 均源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn/index.html>).

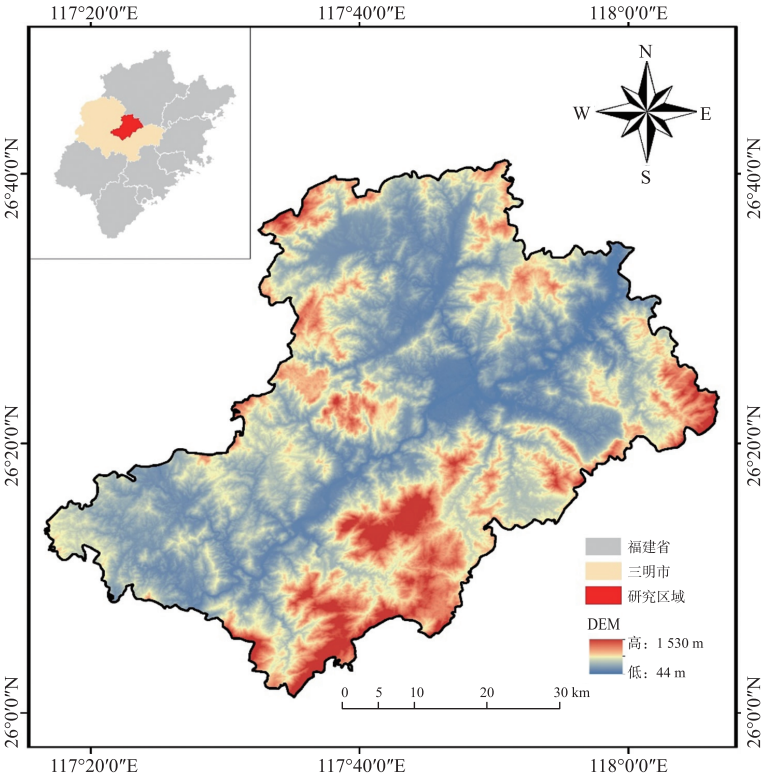


图 1 研究区域  
Fig. 1 Research region

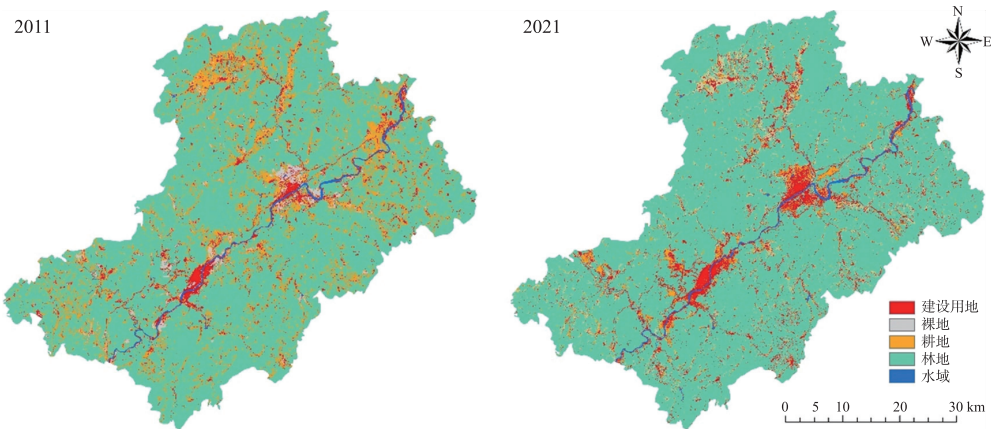


图 2 三明市区土地利用分类  
Fig. 2 Classification of land Use in Sanming Urban Area

1.3 研究方法

1.3.1 生境质量评价

InVEST 模型是一款生态系统服务评估工具,可以模拟评估区域的生境质量并呈现出良好的可视化效果<sup>[23]</sup>. 通过输入研究区域的土地分类数据、设定胁迫的因子以及敏感度的相关参数设定等,最终可以模拟生成所需区域的生境质量栅格数据,其取值范围为 0—1. 通过参考 InVEST 模型手册及相关文献<sup>[24-25]</sup>,考虑研究区域的实际情况设置相应的模型参数(表 1、2). 模型主要运算公式如下:

$$Q_{xj}=H_j\left[1-\left(\frac{D_{xj}^2}{D_{xj}^2+K^2}\right)\right],$$

(1)

式中, $Q_{xj}$ 为某种土地利用类型 $j$ 中的栅格 $x$ 的生境质量; $K$ 为半饱和常数; $H_j$ 为第 $j$ 种景观类型的生境适宜性分值; $D_{xj}$ 是某种土地利用代表的生境类型 $j$ 中栅格 $x$ 的生境胁迫水平。 $D_{xj}$ 满足如下公式:

$$D_{xi} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \frac{W_r}{\sum_{r=1}^R} \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr}, \quad (2)$$

式中, $R$ 为胁迫因子的个数, $W_r$ 为权重; $Y_r$ 为胁迫因子的栅格单元个数; $r_y$ 为栅格单元上的胁迫因子个数; $\beta_x$ 为栅格 $x$ 的可达性水平; $S_{jr}$ 表示景观 $j$ 对胁迫因子的敏感性; $i_{rxy}$ 为胁迫因子的影响距离,其随距离变化满足如下公式:

$$i_{rxy} = 1 - (d_{xy}/d_{rmax}), \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp(-(2.99/d_{rmax})d_{xy}). \quad (4)$$

式(3)、(4)中, $d_{xy}$ 为栅格 $x$ 与栅格 $y$ 之间的直线距离, $d_{rmax}$ 为胁迫因子 $r$ 的最大影响距离。

表 1 胁迫因子及其最大影响距离、权重及衰减类型

Table 1 Threat factors and their maximum impact distance, weight and attenuation types

胁迫因子	最大距离/KM	权重	衰减类型
耕地	5	0.6	线性
建设用地	8	1	指数
裸地	6	0.5	线性

表 2 不同土地利用类型对胁迫因子的敏感度

Table 2 Sensitivity of different land use types to threat factors

土地利用类型	生境适宜度	胁迫因子		
		耕地	建设用地	裸地
建设用地	0	0	0	0
水域	0.6	0.4	0.4	0.2
耕地	0.1	0.2	0.8	0.5
裸地	0.4	0.5	0.4	0.2
林地	1	0.6	0.4	0.2

### 1.3.2 地形位指数和分布指数计算

研究区域的地形位指数由高程和坡度两个部分组成,消除单一的从高程或者坡度层面对研究区域进行空间上的区分,深入分析在不同的地形位置梯度上,所需衡量指标的空间分布特征及细节信息<sup>[26-27]</sup>。

本次研究引入地形位指数,对三明市区范围的生境质量指数的空间分布及差异化特征进行深入分析,计算公式<sup>[28]</sup>为:

$$T = \lg \left[ \left( \frac{E}{\bar{E}} + 1 \right) \times \left( \frac{S}{\bar{S}} + 1 \right) \right], \quad (5)$$

式中, $T$ 为地形位指数; $E$ 代表研究区域中任一位置的相应高程值, $S$ 代表研究区域中任一位置的相应高程值; $\bar{E}$ 和 $\bar{S}$ 分别代表整个研究区域的高程平均值以及坡度的平均值。在研究区域范围内,高程数值越高、坡度数值越高的地方,地形位指数就越大,反之则越小。探讨地形要素对于研究区域景观格局的影响可以转化为各种景观类型在不同地形位梯度上的直观数值体现<sup>[29]</sup>。

分布指数可以用来解决地形梯度下生境质量区域面积之间的量纲差异问题。因此,运用分布指数来剖析研究区域在不同等级的地形位指数中,区域生境质量的分布差异性。将研究区域的地形位指数分为5级,以便后续对生境质量在不同地形位梯度下的变化展开更进一步的分析。计算公式<sup>[28]</sup>为:

$$P = (S_{ij}/S_i) / (S_j/S), \quad (6)$$

式中, $P$ 为分布指数; $S_{ij}$ 表示第 $i$ 级的生境质量在第 $j$ 级地形位梯度内的面积; $S_i$ 为第 $i$ 级生境质量总面积; $S_j$ 表示第 $j$ 级地形位梯度内的总面积; $S$ 表示研究区总面积。在同一级别的地形梯度内,通过对比多个等级的生境质量分布指数,生境质量分布指数值越高的等级,代表着该级别的生境质量在这一地形梯度内的主导地位越高。当生境质量分布指数高于1时,表明其处于优势地位;反之则处于劣势<sup>[30]</sup>。

### 1.3.3 空间自相关

空间自相关反映了空间上某一变量的分布特征及其关联集聚程度,包括全局空间自相关和局部空间



自相关,常用测度指标为 Moran's I 指数和局部空间关联指数 LISA. Moran's I 指数主要可以体现出研究区域的某项指标的空间相关性以及存在的规律,LISA 用来进一步将研究区域的某项指标的局部空间分布特征进行可视化,识别出某项指标的高数值—高数值的聚落、低数值—低数值的聚落,高数值—低数值的聚落,低数值—高数值的聚落.

1.3.4 地理探测器

地理探测器可以对空间异质性及其驱动因子进行有效探测<sup>[31]</sup>,选用借助地理探测器可用来分析各设定的驱动力因子对某项指标的解释力,其计算公式为

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2}, \tag{7}$$

式中, $q$  为某项驱动力因子对所测指标的解释力度, $q$  的取值范围在 0-1, $q$  值越大,说明该驱动力因子对所测指标的解释力越强; $N$  为研究区样本数; $\sigma^2$  为指标方差; $h$  为指标分级, $L$  为分级层数, $h=1,2,\cdots,L$ .

通过参阅相关文献<sup>[32]</sup>,选取海拔、坡度、年均降水量、年均温度、年均 PM2.5、人口密度 6 个指标作为自变量,并选用自然断点法将 6 个自变量的数值分为 5 级制的分类变量.

2 结果与分析

2.1 土地利用变化

如表 3 所示,从 2011—2021 年三明市区不同土地利用类型面积占比来看,在 2011 年、2021 年林地始终占据着最大面积比,均超过总面积的 75%. 2011 年耕地面积占比仅次于林地,达到了 15.47%,其次为建设用地、裸地、水域. 2021 年建设用地面积占比位列第二,其次为耕地、裸地、水域. 从地类面积的变化程度来看,耕地面积比变化最大,从 15.47%下降至 6.8%,林地面积占比增加了 5.64%,建设用地面积占比增加了 2.59%. 裸地面积占比提升了 0.61%,水域面积占比下降了 0.17%.

表 3 2011—2021 年不同土地类型面积  
Table 3 Area of different types of land from 2011 to 2021

土地利用类型	2011 年		2021 年		2011 年—2021 年	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积变化/km <sup>2</sup>	百分比变化/%
建设用地	130.478 4	4.43	206.776 8	7.01	76.298 4	2.59
水域	29.233 8	0.99	24.285 6	0.82	-4.948 2	-0.17
耕地	456.141 6	15.47	200.529 9	6.80	-255.611 7	-8.67
裸地	74.510 1	2.53	92.483 1	3.14	17.973 0	0.61
林地	2257.515 0	76.58	2423.803 5	82.22	166.288 5	5.64

运用 ArcGIS 将三明市区 2011 年、2021 年土地分类数据进行重新赋值并叠加分析,得到三明市区 2011 年—2021 年不同土地利用类型面积转移矩阵(表 4),2011 年—2021 年期间,三明市区的土地利用类型转化最为明显的是耕地转为林地,达到了 243.653 4 km<sup>2</sup>. 流失的建设用地主要转为林地,部分水域被建设用地占据,但水域面积变化波动较小. 耕地、林地作为建设用地的主要转入源,面积分别为 56.708 1 km<sup>2</sup> 和 52.467 3 km<sup>2</sup>. 裸地主要转化为建设用地,林地主要转化为建设用地和耕地.

表 4 研究区土地利用转移矩阵  
Table 4 Land use transfer matrix in the study area

土地利用类型		2021 年				
		建设用地	水域	耕地	裸地	林地
2011 年	建设用地	65.902 5	1.341 9	12.284 1	9.993 6	40.956 3
	水域	4.806 0	21.245 4	1.465 2	0.419 4	1.297 8
	耕地	56.708 1	0.873 9	123.849 0	31.057 2	243.653 4
	裸地	26.892 9	0.545 4	11.161 8	22.017 6	13.892 4
	林地	52.467 3	0.279 0	51.769 8	28.995 3	2 124.004

2.2 生境质量变化

运用 InVEST 模型对三明市区 2011 年、2021 年的生境质量进行分析,2011 年和 2021 年的平均生境质

量指数分别为 0.539 9、0.595 3,生境质量水平总体处于中上水平,呈现上升趋势. 为了更好地探究生境质量的变化情况,利用 ArcGIS 中的重分类功能,将其划分为 5 个等级,等级越高,生境质量越高. 如表 5 所示,从各级生境所占面积比来看,4、5 级生境所占面积比在两个年份均排前两位. 2011 年的 1 级生境所占面积比超过了 20%,其次为 3 级生境、2 级生境,2021 的生境等级所占面积的后三位排序依次为 3 级生境、1 级生境、2 级生境,三者均低于 20%. 2011—2021 年,1 级生境面积变化最高,面积占比减少了 6.65%,其次为 4 级生境,面积扩增了 181.773 9 km<sup>2</sup>,2 级生境的面积占比也下降了 3.40%,5 级生境的面积占比提高了 3.07%. 从生境质量的空间分布(图 3)来看,研究区域的中部及北部存在较为集中的建设用地和耕地,生境质量较差. 随着与建设用地及耕地集中区域的距离逐步增大,可以发现生境质量逐步升高,研究区域外围的土地利用类型以林地为主,丰富的植被资源决定了良好的生境质量. 从 2011—2021 年不同等级生境面积转移矩阵(表 6)来看,1 级生境向 4 级生境的跳级式变化最为明显,达到了 115.717 5 km<sup>2</sup>,2 级生境向 3 级生境转化的面积最为明显,达到 113.956 2 km<sup>2</sup>,3 级生境向 4 级生境转换的面积最高,达到了 174.055 5 km<sup>2</sup>,4 级生境向 5 级生境转换的面积占主导地位,达到 171.176 4 km<sup>2</sup>. 在生境质量退化方面,以 5 级生境退化为 4 级生境的面积最高,140.823 9 km<sup>2</sup> 也最为明显. 从中可以看出,除了 1 级生境的转化出现了明显的跳跃,其余等级的生境质量转换还是以逐级变化为主.

表 5 不同等级生境面积及比例

Table 5 Habitat area and proportion of different levels

土地利用类型	2011 年		2021 年		2011 年—2021 年	
	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%	面积/km <sup>2</sup>	百分比/%
1	632.799 0	21.47	436.846 5	14.82	-195.952 5	-6.65
2	259.072 2	8.79	158.985 0	5.39	-100.087 2	-3.40
3	509.913 0	17.30	533.592 9	18.10	23.679 9	0.80
4	912.174 3	30.94	1 093.948 2	37.11	181.773 9	6.17
5	633.920 4	21.50	724.506 3	24.58	90.585 9	3.07

表 6 研究区生境质量转移矩阵

Table 6 Habitat quality transfer matrix in the study area

生境等级		2021 年				
		1	2	3	4	5
2011 年	1	305.557 2	60.263 1	89.265 6	115.717 5	61.995 6
	2	38.168 1	61.551 0	113.952 6	39.802 5	5.598 0
	3	31.872 6	22.335 3	265.721 4	174.055 5	15.928 2
	4	41.743 8	11.093 4	64.611 9	623.548 8	171.176 4
	5	19.504 8	3.742 2	0.041 4	140.823 9	469.808 1

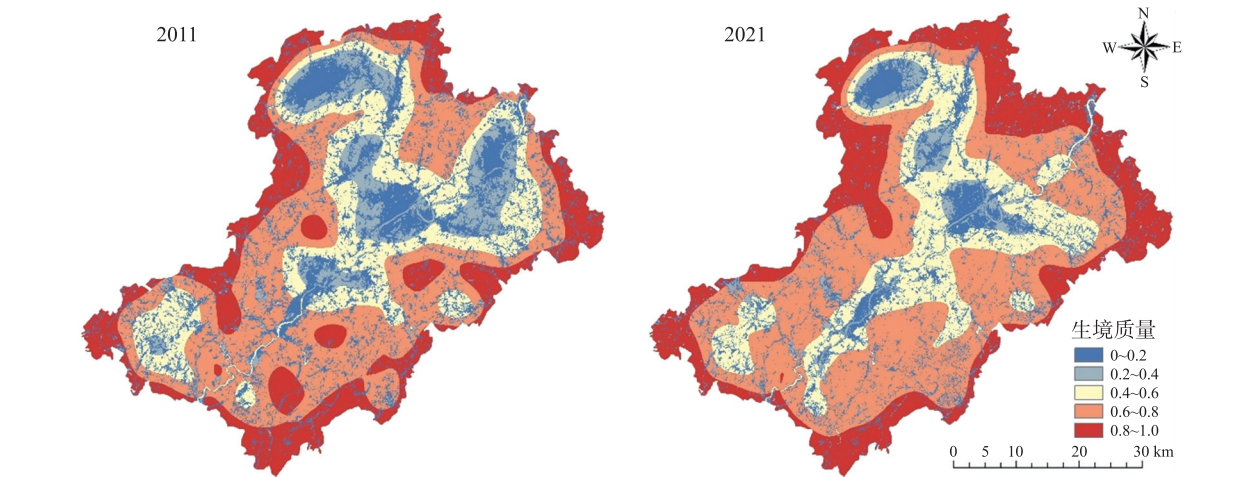


图 3 2011—2021 年三明市区生境质量分布

Fig. 3 Habitat quality distribution in Sanming urban area from 2011 to 2021

2.3 空间自相关

采用 GeoDa 软件,对三明市区 2011 年、2021 年的生境质量结果进行全局自相关分析. 结果显示,在显著性水平  $P<0.05$  情况下,2011 年和 2021 年 Moran's  $I$  值分别为 0.847、0.848,表明了三明市区的生境质量在空间上呈现出明显的集聚特征.

采用局部自相关 LISA 识别局部空间景观生态风险(图 4). 三明市区生境质量呈现出局域自相关,LISA 指数计算结果如图 5 所示,2011—2021 年三明市区生境质量的空间集聚特征表现明显:集聚状态以高数值与高数值集聚和低数值与低数值集聚为主,高低和低高数值集聚类型分布较少. 具体来说:高数值与高数值集聚区域连续分布在研究区外围,低数值与低数值集聚区域主要集中在研究区域中部及北部. 2011 年研究区域的中间部分还有零散区域呈现出高数值与高数值集聚,到 2021 年这些区域变为不显著状态,从中可以发现随着城市区域的扩张,对于生境空间的集聚产生很大影响. 低数值与低数值集聚区域主要集中于三明市区的建设用地及大面积耕地的区域.

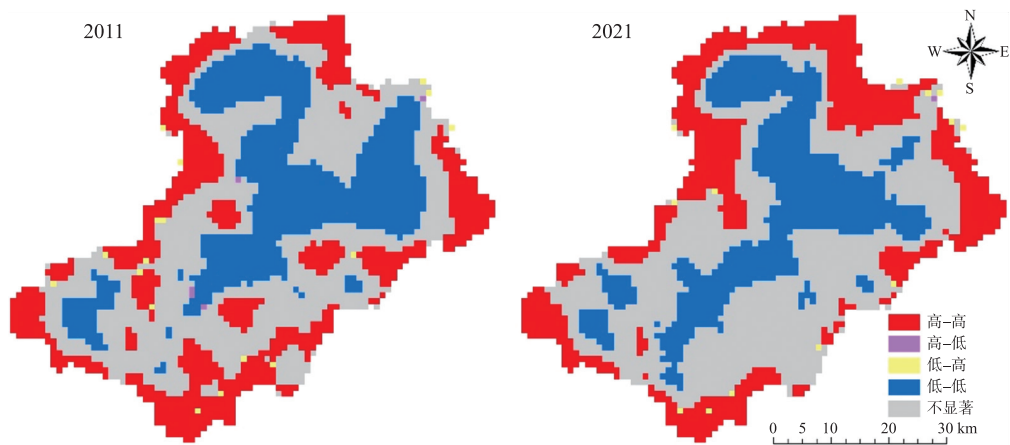


图 4 生境质量局部自相关分析  
Fig. 4 Local autocorrelation analysis of habitat quality

2.4 基于地形位数的生境质量分布

运用 ArcGIS 的栅格计算器及重分类工具,根据公式(5)、(6)得到三明市区的地形位指数以及生境质量分布指数. 如图 5 所示,虽然三明市区在 2011 年与 2021 年的各级生境质量在不同地形位梯度上所呈现的数值有所变化,但图形的走势以及在每个地形位梯度所占优势的生境级别存在较高的相似性. 地形位梯度处于 1 级上,1 级、2 级生境质量分布指数大于 1,占据主导地位. 当地形位梯度到 2 级时,1 级、2 级生境质量分布指数下降,中等生境质量分布指数上升,均超过 1. 到了第 3 级地形位梯度时,3 级生境质量分布指数下降,4 级、5 级生境质量分布指数持续上升. 在第 4 级地形位梯度上,较高、高生境质量分布指数占据了主导地位. 当地形位梯度达到 5 级时,5 级生境质量分布指数占据绝对优势. 1 级、2 级生境质量随着地形位梯度的升高,逐渐降低. 5 级生境质量分布指数随着地形位梯度的升高,保持持续上升的趋势. 说明三明市区内的地形对于生境质量在空间上的分布有着很大的影响,造成这一现象的主要原因是人类活动

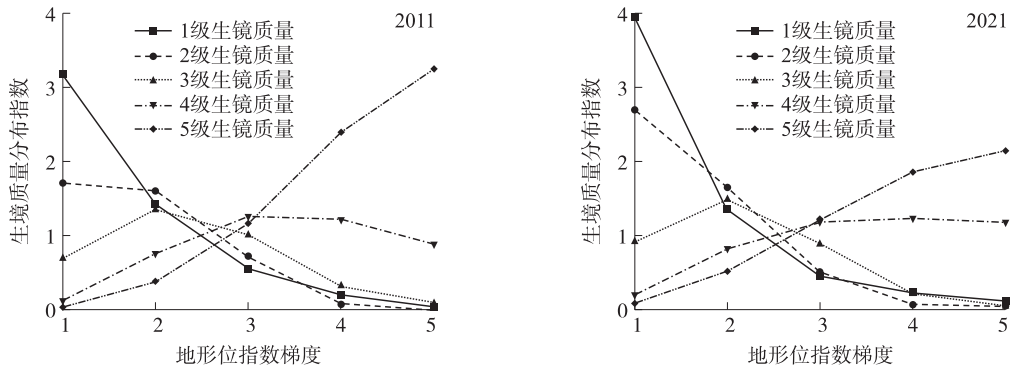


图 5 地形位梯度上的生境质量分布指数  
Fig. 5 Distribution indexes of habitat quality under terrain index gradient



受到地形地貌的影响,不同的地形会对人类活动范围、强度产生不同的效果<sup>[33-34]</sup>,导致区域土地利用类型的不同,所以生境质量在不同的空间上呈现出差异性。

基于地形位梯度的生境质量分布可以发现,1级、2级生境质量分布的区域主要集中在低地形位梯度(1级、2级),涵盖了较大范围的建设用地,区域人口密度较多、人类活动相对密集。需要科学的规划土地利用水平,避免区域内的湿地、湖泊受到破坏,防止退化效应的产生。对部分区域继续实行退耕还林政策,加强城市生物多样性保护工作的实施。在城市规划的工作及宣传中需要进一步强调河流、湿地、绿地等区域作为生物栖息地的重要性,科学统筹城市蓝绿空间的规划,合理构建滨水与森林生态廊道。3级、4级生境多主要集中于中地形位梯度(3级),作为低地形位梯度和高地形位梯度的过度空间,可以将其划为城市生境恢复区域,减少高速公路、铁路等交通路线对其的影响,依托原有的自然资源加强生态廊道的规划,提高区域内生物活动的可达性,防止生境质量退化。5级高生境质量在高地形位区域(3级、4级)占据主导地位,需要严格保证该区域的生境质量,强化此区域内的景区、森林公园、自然保护区等生态保护,加强监管力度。科学协调该区域生态与民生、保护与发展之间的关系,大致可将其分为核心保护区域及生态游憩区域,对于核心保护区域,除了相关的工作人员以外,禁止游人进入,避免人为破坏生态系统,对于生态游憩区域提倡实行对生境质量造成影响最小化的生态旅游活动。对于高生境质量区域实行分区管理有针对性的对区域实行保护。

2.5 生境质量驱动力分析

运用地理探测分析 2011—2021 年三明市区生境质量演变驱动力机制,得到各影响因素解释力( $P$  值均 $<0.05$ )。由表 7 可知,2011 年各指标解释力由大到小依次为高程(0.328 4) $>$ PM2.5(0.302 8) $>$ 年均温度(0.275 6) $>$ 年降雨量(0.210 0) $>$ 坡度(0.091 9) $>$ 人口密度(0.012 8);2021 年各指标解释力由大到小依次为高程(0.260 2) $>$ 年均温度(0.216 1) $>$ PM2.5(0.164 9) $>$ 年降雨量(0.128 7) $>$ 坡度(0.105 1) $>$ 人口密度(0.037 1)。2011—2021 年高程对于研究区的生境质量解释力最强,年均温度、年均 PM2.5、年降雨量的解释力明显下降,坡度与人口密度的解释力略微上升。总体来看,研究区域的自然环境因子影响力明显高于社会因素因子,说明高程、年降雨量等自然因素在三明市区的生境质量驱动力分析中占据了主导作用,但是人口密度的影响逐步增强,也说明了随着城市化的发展,建设用地的扩张对于生境质量的影响也逐步上升。

表 7 2011—2021 年研究区生境质量影响因子探测  $q$  值统计  
Table 7 Statistics of  $q$ -values of habitat quality impact factors in the study area from 2011 to 2021

年份	自然环境因子				社会因素因子	
	年均温度	坡度	年均降雨量	高程	人口数量	年均 PM2.5
2011	0.275 6	0.091 9	0.210 0	0.328 4	0.012 8	0.302 8
2021	0.216 1	0.105 1	0.128 7	0.260 2	0.037 1	0.164 9

3 结论

本文对三明市区 2011 年、2021 年的土地利用类型进行分类,运用 InVEST 模型进行生境质量评估,并引入地形位指数深入剖析生境质量的地形梯度效应,运用地理探测器分析三明市区生境质量的影响因素,研究结论如下:(1)林地始终是三明市区的主要土地利用类型,两个时期的林地面积均超过研究区域总面积的 75%。2011—2021 年,耕地转为林地,在三明市区的土地利用类型转化中最为显著,转化面积达到了 243.653 4 km<sup>2</sup>。(2)三明市区 2011 年和 2021 年的平均生境质量指数分别为 0.539 9、0.595 3,生境质量水平总体处于中上水平,呈现上升趋势,空间上呈现出外高内地的现象。(3)2011 年和 2021 年 Moran's  $I$  值分别为 0.847、0.848,表明三明市区的生境质量在空间上呈现出明显的集聚特征,呈现出生境质量高数值与高数值集聚,低数值与低数值集聚为主。(4)1 级、2 级生境质量随着地形位梯度的升高,逐渐降低。5 级生境质量分布指数随着地形位梯度的升高,始终保持明显的上升趋势。(5)各影响因素对生境质量的空间分布都具有一定的解释力,2011—2021 年高程对于研究区的生境质量解释力最强,年均温度、年均 PM2.5、年降雨量的解释力明显下降,坡度与人口密度的解释力略微上升。

InVEST 模型在现有的生境质量相关研究中应用较为成熟,在数据需求、空间可视化、模拟速度快等方



面优于传统方法,但在分析过程中,部分参数的数值设定存在一定的主观性,例如威胁因子的选择、权重大小、影响范围的设定等,精确参数验证及合理性评估值得未来更深入的探讨。研究区域的平均生境质量与研究范围有关,本次研究以三明市区范围为研究区域,区域内的建设用地所占比相对较高,因此整体生境质量的均值评估受到了一定的限制。因此,对于区域的生境质量研究除了关注其整体生境质量数值的高低,还需要从空间分布、生境变化等多方面来进行探讨,多重视角的分析才能进一步提升研究成果的科学性与指导意义。

### [参考文献]

- [1] 侯焱臻,赵文武,刘焱序. 自然衰退“史无前例”,物种灭绝率“加速”——IPBES 全球评估报告简述[J]. 生态学报, 2019,39(18):6943-6949.
- [2] MORI A S, LERTZMAN K P, GUSTAFSSON L. Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: a research agenda for applied forest ecology[J]. Journal of applied ecology, 2016,54(1):12-27.
- [3] SOLIVERES S, Van der PLAS F, MANNING P, et al. Biodiversity at multiple trophic levels is needed for ecosystem multifunctionality[J]. Nature, 2016,536(7617):456-459.
- [4] 环境保护部. 中国生物多样性保护战略与行动计划[Z]. 2010.
- [5] JOHNSON M D. Habitat quality: A brief review for wildlife biologists[J]. Transactions of the Western Section of the Wildlife Society, 2005,41(10):31-41.
- [6] WILSON M C, CHEN X Y, CORLETT R T, et al. Habitat fragmentation and biodiversity conservation: key findings and future challenges[J]. Landscape ecology, 2016,31(2):219-227.
- [7] 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[J]. 生态学报, 2020,40(9):2895-2906.
- [8] MILLER J R, GROOM M, HESS G R, et al. Biodiversity conservation in local planning[J]. Conservation biology, 2009,23(1):53-63.
- [9] BOUMANS R, ROMAN J, ALTMAN I, et al. The Multiscale Integrated Model of Ecosystem Services (MIMES): Simulating the interactions of coupled human and natural systems[J]. Ecosystem services, 2015,12:30-41.
- [10] BROWN G, BRABYN L. The extrapolation of social landscape values to a national level in New Zealand using landscape character classification[J]. Applied geography, 2012,35(1-2):84-94.
- [11] 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):1103-1131.
- [12] 刘纯军,周国富,黄启芬,等. 基于 InVEST 模型的山地流域生境质量时空分异研究——以贵州省境内赤水河流域为例[J]. 人民长江, 2021,52(10):62-69.
- [13] 陈雅倩,赵丽,陶金源,等. 基于 InVEST 模型的裸地开发前后生境质量评价——以唐县为例[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020,28(7):1093-1102.
- [14] 冯文彬,林媚珍,龚建周,等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中山市生境质量时空分异特征[J]. 生态科学, 2022,41(3):16-23.
- [15] 王耕,常畅,韩冬雪,等. 老铁山自然保护区景观格局与生境质量时空变化[J]. 生态学报, 2020,40(6):1910-1922.
- [16] 徐彩仙,巩杰,李焱,等. 基于地形梯度的甘肃白龙江流域典型生态系统服务分布特征[J]. 生态学报, 2020,40(13):4291-4301.
- [17] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等. 2000—2020 年陕西秦巴山区生境质量时空演变及其地形梯度效应[J]. 长江流域资源与环境, 2022,31(2):398-413.
- [18] 周晓艳,何依依,黄欣,等. 三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2021,37(11):259-267.
- [19] YU Y Y, LI J, ZHOU Z X, et al. Response of multiple mountain ecosystem services on environmental gradients: How to respond, and where should be priority conservation? [J]. Journal of cleaner production, 2020,278:123264.
- [20] 邓伟,戴尔阜,贾仰文,等. 山地水土要素时空耦合特征、效应及其调控[J]. 山地学报, 2015,33(5):513-520.
- [21] 邱宏,吴斌,卢亚娟. 区域协同理念下山地城市空间统筹的规划应对——以福建省三明市为例[J]. 规划师, 2016, — 108 —

- 32(1):35-39.
- [22] 卢茵怡,李天翔,龚建周. 广东省不同地貌形态类型区生境质量归因[J]. 生态科学,2022,41(3):24-32.
- [23] 韩依纹,李英男,李方正. 城市绿地景观格局对“核心生境”质量的影响探究[J]. 风景园林,2020,27(2):83-87.
- [24] 王丽容,冯晓蕾,常青,等. 基于 InVEST-MCR 复合模型的城市绿色空间生境网络格局构建研究[J]. 中国园林,2020,36(6):113-118.
- [25] 陈泓宇,李雄. 基于 MSPA-InVEST 模型的北京中心城区绿色空间生境网络优化[J]. 风景园林,2021,28(2):16-21.
- [26] 喻红,曾辉,江子瀛. 快速城市化地区景观组分在地形梯度上的分布特征研究[J]. 地理科学,2001(1):64-69.
- [27] TONG X W,WANG K L,BRANDT M,et al. Assessing future vegetation trends and restoration prospects in the Karst regions of Southwest China[J]. Remote sensing,2016,8(5):357.
- [28] XUE L Q,ZHU B L,WU Y P,et al. Dynamic projection of ecological risk in the Manas River basin based on terrain gradients[J]. Science of the total environment,2019,653,283-293.
- [29] 武爱彬,刘欣,赵艳霞,等. 浅山丘陵区土地利用格局的地形梯度特征与变化研究[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(1):181-185.
- [30] 巩杰,高彦净,张玲玲,等. 基于地形梯度的景观生态风险空间分析——以甘肃省白龙江流域为例[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2014,50(5):692-698.
- [31] 王劲峰,徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报,2017,72(1):116-134.
- [32] AI J W,YU K Y,ZENG,Z,et al. Assessing the dynamic landscape ecological risk and its driving forces in an island city based on optimal spatial scales: Haitan island,China[J]. Ecological indicators,2022,137,108771.
- [33] 韩会庆,杨广斌,张凤太. 基于地貌特征的贵州省土地利用时空变化分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(5):99-105.
- [34] 刘世梁,刘芦萌,武雪,等. 区域生态效应研究中人类活动强度定量化评价[J]. 生态学报,2018,38(19):6797-6809.

[责任编辑:黄 敏]