

DOI: 10.5846/stxb201904260858

黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 张嘉晖. 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, Zhang J H. 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.

# 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

黄木易<sup>1</sup>, 岳文泽<sup>2,\*</sup>, 冯少茹<sup>1</sup>, 张嘉晖<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 安徽建筑大学环境与能源工程学院, 合肥 230601

<sup>2</sup> 浙江大学土地管理系, 杭州 310058

**摘要:** 新型城镇化及生态文明建设背景下, 加强中国重要生态功能区的生境质量研究具有重要意义。以皖西大别山区舒城县为例, 基于 InVEST 模型及地形位等方法进行生境质量时空演变与景观格局互动及梯度效应分析, 结果表明: (1) 1995—2015 年, 研究区生境质量指数从 1995 年的 0.6392 下降为 2015 年的 0.6356, 总体降幅不大; 生境退化程度持续上升, 由 0.0133 上升至 0.0142。热点分析表明, 生境质量较差的冷点区主要分布于东北部的城镇及其周边区域, 质量较高的热点区主要位于西南部植被分布区; (2) 生境质量及生境退化分布指数具有显著的地形位梯度效应。高生境质量分布指数与林地分布一致并随地形位梯度上升成主导优势, 而低生境质量分布与建设用地和农地分布一致, 并在低地形位梯度上占主导优势; (3) 分区和整体生境质量与景观格局指数相关性显著, 但不同区域内的二者之间相关性质各异。生境质量演化受地形和景观格局影响较大。研究结果对于大别山重要生态功能区的生境保护及生态系统功能调控具有一定的理论与实践价值。

**关键词:** 生境质量; InVEST 模型; 景观格局; 地形位; 皖西大别山区

## Spatial-temporal evolution of habitat quality and analysis of landscape patterns in Dabie Mountain area of west Anhui province based on InVEST model

HUANG MUYI<sup>1</sup>, YUE WENZE<sup>2,\*</sup>, FENG SHAORU<sup>1</sup>, ZHANG JIAHUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Environmental Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China

<sup>2</sup> Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

**Abstract:** Under the background of new-type urbanization and ecological civilization construction, it is of great significance to strengthen the research on habitat quality of important ecological functional areas in China. Taking the Shucheng County of Dabie Mountain area in west Anhui province as an example, based on InVEST model and terrain gradient method, this study analyzes the spatial-temporal evolution of habitat quality and the interaction between landscape pattern and gradient effect. The results showed that: (1) In the past two decades, the habitat quality index of the study area was 0.6392 in 1995 and 0.6356 in 2015, respectively. The value of habitat quality showed decline trend from 1995 to 2015, but the degree of habitat degradation continued to rise from 0.0133 to 0.0142. Hot spot analysis showed that the cold spot areas with poor habitat quality were mainly located in the northeastern and its peripheral zone of the study area, which is mainly dominated by cities and towns, and the hot spot areas with high habitat quality were mainly located in the southwestern vegetation distribution region. (2) Habitat quality and habitat degradation distribution have significant topographic potential gradient

**基金项目:** 国家社会科学基金重点项目 (14AZD124); 安徽高校人文社会科学研究重大项目 (SK2018ZD043); 安徽省科技创新战略与软科学研究项目 (201806a02020046)

收稿日期: 2019-04-26; 网络出版日期: 2020-01-09

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wzyue@zju.edu.cn

effect. The distribution index of high habitat quality was consistent with that of forest land and became dominant along with the topographic gradient, while the distribution of low habitat quality was consistent with that of construction land and farmland and became dominant along the topographic gradient. (3) There was a significant correlation between habitat quality and landscape pattern indexes at overall region level and sub-region level, but the characteristics of correlation varied greatly among four levels. The evolution of habitat quality is greatly influenced by topography and landscape pattern. The results could have certain theoretical and practical value for habitat protection and functional regulation of ecosystem in west Anhui Dabie Mountain area, which is an important ecological function area in China.

**Key Words:** habitat quality; InVEST model; landscape pattern; terrain gradient; Dabie Mountain area of west Anhui province

生境质量即生态环境为生物生存提供适宜条件的能力<sup>[1-2]</sup>。不同优劣生境质量与区域生态系统服务能力的大小直接关系。土地利用的方式、强度和格局将导致生态系统结构和功能的变化,从而对生物多样性、生境质量产生重要影响,加强生境质量评估可在一定程度上反映区域生态系统功能的优劣状况<sup>[3-4]</sup>。因此,加强生境质量研究对于生物多样性保护、生态安全格局构建、生态系统服务功能具有重要意义,从而促进区域生态平衡、系统健康和国土生态安全等<sup>[5-7]</sup>。

作为自然因素之一的地形地貌对景观格局变化以及城市空间发展约束作用明显,将景观格局指数与相关自然要素综合分析,能更好地解释景观过程与自然和社会经济过程的相互关系<sup>[8-9]</sup>,同时,地形因子对于生态系统的物质交换和能量循环也会产生重要影响<sup>[10]</sup>。国内外相关学者在以流域、丘陵区、海岸带、城市等为对象进行土地利用变化对生境质量影响分析<sup>[11-14]</sup>、应用 InVEST(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)模型进行生境质量评估及与景观格局分析等研究方面取得了丰富的成果<sup>[15-18]</sup>。总体上,相关研究对生境质量与土地利用、景观格局,以及景观格局与地形因子间的探讨较多<sup>[19-22]</sup>,但基于 InVEST 模型的评估结果,综合地形位梯度和景观格局进行大别山重要生态功能区的生境质量研究较少。景观格局对区域生态系统功能影响较大,加强景观优化是维持区域生态系统功能稳定性的重要手段<sup>[23]</sup>,但景观格局指数对生态过程的指示具有一定的局限性<sup>[24]</sup>及表达景观格局变化的复杂性<sup>[25]</sup>,加强生境质量与景观格局耦合关系及地形位梯度效应研究有助于揭示生境质量的景观生态过程效应及挖掘生境质量的地形信息图谱。

皖西大别山区舒城县是大别山区东北部、安徽省西部及巢湖流域西南部的生态敏感和脆弱区,区域内生物资源丰富。精准扶贫背景下,加强大别山区生态安全相关研究对于区域生态系统功能优化、生态产业与社会经济协调发展及生态文明建设具有重要意义<sup>[26]</sup>。本研究区作为“东接巢湖流域西连大别山区”的典型枢纽区域,1995—2015 年间快速发展时期的生境质量状况如何?生境质量是否存在地形梯度变化效应?合理的景观资源配置与调控是生境质量提升的重要途径,但景观格局与生境质量二者间的耦合关系及机制是怎样的?本文针对上述问题开展以下研究:(1)基于 InVEST 模型和空间分析方法定量评估皖西大别山区舒城县生境质量及其时空演化规律;(2)基于地形位梯度分析法揭示生境质量随地形位梯度的变化特征;(3)基于相关分析方法探讨生境质量与景观格局指数的耦合关系。最终揭示皖西大别山区生境质量时空演化特征、生境质量与景观格局相关性及地形梯度效应。研究结果在一定程度上为皖西大别山区生境质量保护、生态系统管控等提供理论决策依据。

## 1 数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况

大别山片区位于鄂豫皖三省交叉处,是中国二十五个重点生态功能区之一<sup>[27-28]</sup>。皖西大别山(即安徽省境内大别山西部区域)与湖北、河南两省相邻。该区域主要包括金寨县、舒城县、岳西县、霍山县的全部地区和六安市辖区的部分地区,区域内旅游资源丰富,也是中国著名的红色旅游景区之一。该地区以中低山和丘

陵地貌为主,属于北亚热带温暖湿润季风性气候,年平均气温 14—16 °C,年平均降雨量 1100—1450 mm,年平均日照时数 2000—2200 h,海拔最高为 1748 m,是安徽省内长江和淮河流域的分水岭。据全国第二次水土流失遥感调查,各县区水土流失等生态问题较为突出,是典型的生态脆弱区<sup>[29]</sup>。本研究区位于皖西大别山区的东南部、巢湖流域西南部的舒城县(图 1)。

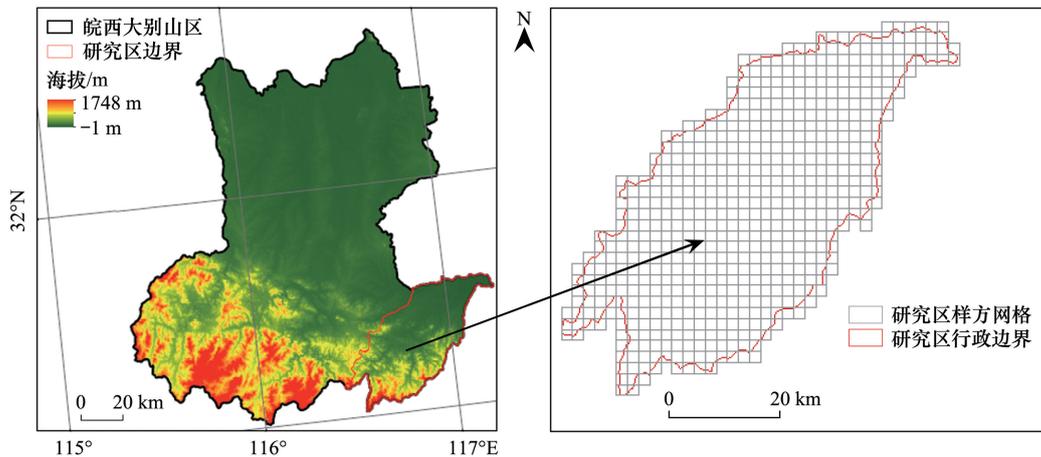


图 1 研究区地理位置及空间采样网格

Fig.1 Scope and location of study area and net sampling

## 1.2 数据来源

研究区的数据来源包括 1995、2005 和 2015 年土地利用数据(30 m 分辨率);DEM 数据(格式为 GRID 的 SRTM 数字高程数据,分辨率 30 m)等数据(均来源于中科院资源环境科学数据中心, <http://www.resdc.cn/>)。其中,土地利用数据是按“中国土地利用/土地覆盖遥感监测数据分类系统”采用三级分类,本研究区土地景观类型的二级类为 13 种,分别为 11 水田、12 旱地、21 有林地、22 灌木森、23 疏林地、31 高覆盖度草地、41 河渠、43 水库坑塘、46 滩地、51 城镇用地、52 农村居民点、53 其他建设用地、66 裸岩石质地。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 基于 InVEST 模型的生境质量计算

InVEST 模型是通过结合景观类型敏感性和外界威胁强度计算生境质量,根据生境质量的优劣来评估生物多样性服务功能<sup>[30]</sup>。地理学和生态学领域中基于 InVEST 模型进行土地利用变化与区域生境质量评价研究已有丰富的成果。植物生态学、兽类生态学或鸟类生态学等倾向于针对区域特定物种及种群等为对象,开展生物多样性服务功能的生境质量<sup>[31-32]</sup>。本研究对象是评估生境质量的优劣,其主要基于 InVEST 3.6.0 中的 Habitat Quality 模块计算生境质量指数,从而反映提供生物多样性服务的功能(InVEST 模型假设生境质量好的地区,其生物多样性也高)。生境质量指数是对区域土地利用类型的生境适宜性和生境退化程度状况进行评价的一个无量纲综合性指标,计算公式如下<sup>[15,33-35]</sup>:

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

式中, $Q_{xj}$ 为第  $j$  种景观类型  $x$  栅格单元的生境质量指数; $H_j$ 为第  $j$  种景观类型的生境适宜性分值,取值范围为 0—1; $z$ 为尺度常数,一般取 2.5; $k$ 为半饱和常数,由用户根据使用数据的分辨率自定义; $D_{xj}$ 为生境退化程度指数,表示生境受胁迫压力后表现出退化的程度,公式<sup>[15,33-35]</sup>如下:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} \left( \omega_r / \sum_{r=1}^R \omega_r \right) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \quad (2)$$

式中, $R$ 为胁迫因子数量; $Y_r$ 为胁迫因子的栅格单元总数; $\omega_r$ 为权重; $r_y$ 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(法律保护度水平,如严格保护区,则取值 1;如为收获型保护取值 0;中间保护水平的可赋值 0—1 之间); $S_j$  表示景观  $j$  对胁迫因子的敏感性,取值范围为 0—1; $i_{rxy}$  为胁迫因子的影响距离,可分为按照线性和指数衰退来计算<sup>[15,33-35]</sup>。

$$\begin{aligned} i_{rxy} &= 1 - (d_{xy}/d_{rmax}) \\ i_{rxy} &= \exp(-(2.99/d_{rmax})d_{xy}) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $d_{xy}$  为栅格  $x$  与  $y$  间的线性距离; $d_{rmax}$  是威胁因子  $r$  的最大作用距离。

该模块中需输入的参数主要有当前土地景观类型图、区域主要生境胁迫因子、胁迫源因子权重和影响距离、景观类型对威胁源的敏感性程度参数等数据。本研究在 *InVEST* 模型手册<sup>[33]</sup> 及相关研究<sup>[15,34-35]</sup> 基础上,结合研究区的实际来确定相关参数数值,并设计 *Habitat Quality* 模块输入参数表(表 1 和表 2)。

表 1 各类型景观对威胁因子的敏感度

Table 1 The sensitivity of different landscapes to threatening factors

地类代码 Land use type code	地类名称 Name	生境适宜性 Habitat suitability	水田 Paddy field	旱地 Non-irrigated arable land	城镇用地 Urban land use	农村居民点 Rural settlements	其他建设用地 Other construction land
11	水田	0.3	0	1	0.5	0.7	0.6
12	旱地	0.3	1	0	0.5	0.7	0.6
21	有林地	1	0.8	0.5	0.5	0.2	0.8
22	灌木林	0.9	0.8	0.5	0.8	0.2	0.7
23	疏林地	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.5
31	高覆盖度草地	0.8	0.8	0.8	0.4	0.7	0.4
41	河渠	0.8	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2
43	水库坑塘	0.7	0.2	0.2	0.3	0.3	0.1
46	滩地	0.5	0.2	0.2	0.7	0.2	0.1
51	城镇用地	0	0	0	0	0	0.2
52	农村居民点	0	0	0	0	0	0.7
53	其他建设用地	0	0	0	0.7	0.6	0
66	裸岩石质地	0.7	0.1	0.5	0.9	0.7	0.6

本文将水田、旱地、城镇用地、农村居民点和其他建设用地五类低生境适宜性的景观类型列为威胁因子

表 2 研究区威胁因子权重

Table 2 Weights for threat factors of the study area

胁迫因子 Stress factors	最大影响距离 Maximum impact distance/km	权重 Weight	衰退类型 Decay type
水田 Paddy field	0.5	0.5	指数衰退
旱地 Non-irrigated arable land	0.5	0.5	指数衰退
城镇用地 Urban land use	10	1	指数衰退
农村居民点 Rural settlements	2	0.7	指数衰退
其他建设用地 Other construction land	1	0.5	指数衰退

### 1.3.2 网格法空间采样

皖西大别山舒城县乡镇单元的平均面积为 100.38 km<sup>2</sup>,为了在更小单元尺度上进行景观格局与生境质量耦合分析,本文基于 ArcGIS 10.2 利用网格化方法对研究区进行 2 km×2 km 的幅度采样,共形成 606 个网格,然后基于 2 km 幅度进行景观格局与生境质量关系分析。在分区对比分析中,将研究区划分为北、中和南部区域,分别提取相应网格单元的生境质量,并与对应网格单元水平的景观格局指数进行相关性分析,探讨生境质量与景观格局之间的相互关系。

### 1.3.3 景观格局指数计算

本文利用 Patch Analysis 模块进行景观格局指数计算,主要分析研究区和各个网格单元的景观水平格局指数。通过对比分析,最终选择五类 12 个指数。主要有:(1)密度大小及差异指标:斑块数目(Number of Patches, NumP)、平均斑块面积(Mean Patch Size, MPS)、斑块大小变异系数(Patch Size Coefficient of Variance, PSCoV);(2)面积-边缘指标:最大斑块指数(Largest Patch Index, LPI)、边缘密度(Edge Density, ED);(3)形状指标:面积加权平均斑块分维指数(Area Weighted Mean Patch Fractal Dimension, AWMPFD)、景观形状指数(Landscape Shape Index, LSI);(4)多样性指标:香农多样性指数(Shannon's Diversity Index, SDI)、香农均匀度指数(Shannon's Evenness Index, SEI)、景观丰度(Patch Richness, PR);(5)核心区指标:核心斑块密度(Core Area Density, CAD)、平均核心斑块面积(Mean Core Area, MCA)。

### 1.3.4 地形位指数和分布指数计算

研究区地形地貌较为复杂,考虑到地形对土地利用、景观格局及生态环境的影响较大<sup>[23-24]</sup>,本文引入地形位指数,对生境质量指数和生境退化程度的空间分布特征进行定量探讨。计算公式<sup>[36-37]</sup>为:

$$T = \lg[(E/\bar{E} + 1) \times (S/\bar{S} + 1)] \quad (4)$$

式中, $T$ 为地形位指数; $E$ 和 $S$ 分别为研究区任意位置的高程值和坡度值; $\bar{E}$ 和 $\bar{S}$ 分别为研究区平均高程值和平均坡度值。其中,高程和坡度值越大的地方,其地形位指数就越大,反之则越小。处于最高和最低值中间的区域其地形位指数处于中间值。

研究地形因素对景观格局的影响可简化为不同地形位梯度上各种景观类型的分布频率<sup>[38]</sup>。为了消除地形梯度下生境质量、生境退化区域面积之间的量纲差异,利用分布指数来探讨生境质量、生境退化在不同地形位指数梯度上的分布特征。本研究将地形位指数分为 15 级,分别探讨不同对象随地形位梯度变化特征。分布指数公式<sup>[38]</sup>为:

$$P = (A_{ie}/A_i) / (A_e/A) \quad (5)$$

式中, $P$ 为分布指数; $A_{ie}$ 为第 $i$ 级生境质量、生境退化在第 $e$ 级地形位梯度内的面积; $A_i$ 为第 $i$ 级生境质量、生境退化类型总面积; $A_e$ 表示第 $e$ 级地形位梯度内的总面积; $A$ 表示研究区总面积;当计算 5 级生境质量和生境退化的地形位梯度分布指数时, $i=5$ ; $e=15$ ,表示地形位梯度的梯度级数。 $P$ 值越大,表明某级对象在该级地形位梯度内的优势越明显。当 $P$ 大于 1 时,表明其处于优势地位;反之则处于劣势<sup>[39]</sup>。

### 1.3.5 空间数据探索及热点分析

本研究利用数据探索和热点工具分析皖西大别山区舒城县的生境质量指数和退化程度的空间集聚及分布特征,主要基于 ArcGIS 10.2 中的空间分析工具对 Global Moran's  $I$  指数和 Hot Spot Analysis 的 Getis-Ord  $G_i^*$  指数进行计算。具体公式参考相关文献<sup>[40-41]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 研究区景观格局与生境质量时空演变特征

#### 2.1.1 研究区景观结构及景观格局指数变化

1995—2015 年皖西大别山区舒城县景观结构和格局变化分析表明,近 20 年来,舒城县主要景观类型的面积变化表现为“三降两升”,即农地、林地、水域呈下降趋势,草地、建设用地呈上升趋势。景观格局分析表明,研究区景观斑块数目下降 5.12%、平均斑块面积上升 5.4%、斑块大小变异系数下降 3.83%、边缘密度上升 2.1%、香农多样性指数上升 1.96%、香农均匀度指数上升 1.75%、核心斑块密度上升 1.64%、平均核心斑块面积下降 1.8%、景观形状指数上升 2.12%。各主要景观类型结构及格局指数变化来看:(1)农地景观总面积下降 2.44%,景观格局变化较大,主要表现在斑块数目增加 50%,平均斑块面积下降 34.96%,斑块大小变异系数上升 22.24%;(2)林地景观的总面积下降率为 0.12%,景观格局指数变化不大,表明舒城县近 20 年来的森林保护较为良好,植被完整性也较高,林地生态系统也相对较为稳定;(3)水域景观总面积下降 0.36%,景观斑

块数上升,平均斑块面积下降;(4)建设用地景观总面积变化最大,近 20 年来增加 34.64%。其景观格局指数的变化显著,其中斑块数目下降率 14.46%,平均斑块面积上升率 57.01%,斑块大小变异系数上升率为 115.78%,平均核心斑块面积上升率为 48.24%,最大斑块指数上升率为 209.09%。总体上,作为研究区重要生态型景观的林地、水域面积下降和建设用地大幅上升,以及相应景观格局变化会对研究区生态系统的功能产生一定影响。

### 2.1.2 研究区生境变化时空特征

基于 InVEST 模型对研究区 1995—2015 年的生境变化进行评估。结果表明:研究区北部主要为生境质量指数低级区,南部主要为高级区,中部主要为混合等级区,空间分布特征明显。近 20 年来,生境质量低等级区在逐渐扩张(图 2);生境退化的重点区域主要位于研究区中部及城镇周边范围,退化中等及以上区域在研究区北部蔓延扩展至东北部(图 3)。时序变化统计分析表明:生境质量指数在 1995、2005、2015 年平均值分别为 0.6392、0.6385 和 0.6356,表明生境质量在逐渐下降;生境质量指数的标准差从 0.3307 上升至 0.3353(表 3),表明空间上栅格单元之间的生境质量差异在扩大。生境退化程度的空间统计表明,1995、2005 和 2015 年平均值分别为 0.0133、0.0136 和 0.0142,生境退化程度的最大值也由 0.1469 上升至 0.1540(表 3),表明生境退化在蔓延同时,其强度也在逐渐增加。

总体上,由于北部区域内主要以农地和城镇用地为主,生境质量相对较差,随着城镇化发展,生境质量下降和退化程度加强,并以城镇区域为核心呈辐射方式分布和扩散(图 2、图 3)。特别是随着巢湖流域、皖江城市带及合肥市经济圈的辐射带动,整个研究区的城市扩张向东北方向延伸,与生境质量降低扩散趋势一致;而中部和南部区域主要以林地为主,植被覆盖较高,生境质量良好,且变化相对稳定。

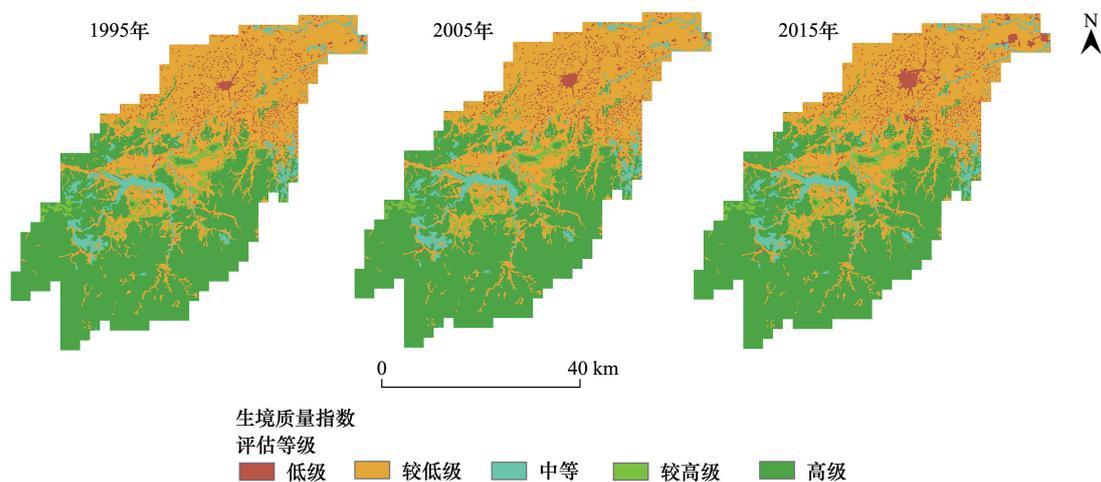


图 2 研究区生境质量时空分布特征(1995—2015 年)

Fig.2 Spatial-temporal distribution characteristics of habitat quality from 1995 to 2015

表 3 研究区生境质量及生境退化空间统计

Table 3 Spatial statistics of habitat quality and degradation in the study area

年份 Year	生境质量统计参数 Statistical parameters of habitat quality				生境退化程度统计参数 Statistical parameters of habitat degradation degree			
	最小值	最大值	平均值	标准差	最小值	最大值	平均值	标准差
1995	0	1	0.6392	0.3307	0	0.1469	0.0133	0.0182
2005	0	1	0.6385	0.3317	0	0.1478	0.0136	0.0183
2015	0	1	0.6356	0.3353	0	0.1540	0.0142	0.0185

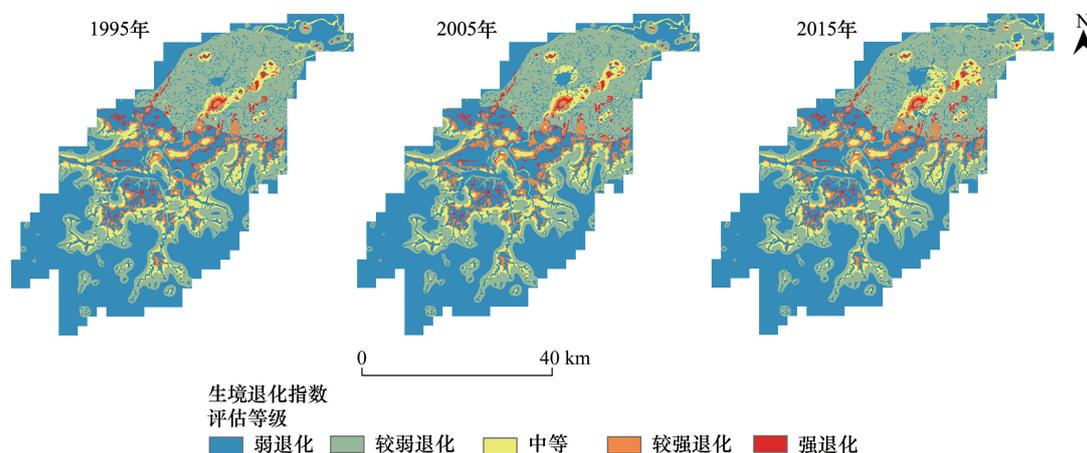


图3 研究区生境退化时空分布特征(1995—2015年)

Fig.3 Spatial-temporal distribution characteristics of habitat degradation from 1995 to 2015

## 2.2 生境变化的空间探索及相关性分析

### 2.2.1 生境质量变化空间分布特征探索分析

空间热点探索可揭示生境质量在空间上的分布特征,为了进一步探讨生境质量和退化程度在空间上的分布规律,本文对网格化生境质量空间分布特征进行全局 Moran's  $I$  和热点分析。研究表明,研究区生境质量和生境退化程度在空间上表现出明显的集聚分布特征(图4)。空间数据探索描述性统计参数显示,1995—2015年,生境质量全局 Moran's  $I$  指数均接近 0.9,  $Z$  值远大于 1.96,表现出显著的空间集聚特征,但全局 Moran's  $I$  由 1995 年的 0.8962 下降为 2015 年的 0.8944,表明生境质量集聚有分散的趋势;1995—2015 年,生境退化程度的 Moran's  $I$  指数均接近 0.7,也呈现显著的空间集聚性,但 Moran's  $I$  由 1995 年的 0.6698 上升为 2015 年的 0.6860(表4),表明生境退化的空间集聚有进一步集中的趋势。

热点分析能展现变量在空间上的冷热点区域。以 2015 年为例,研究表明,生境质量和生境退化程度在空间中具有明显的空间冷热点分布特征。如生境质量在研究区北部主要以冷点和较冷点区分布为主,且以冷点区占主导;研究区南部主要以次热点和热点区为主;中部区域不显著。生境退化热点区主要分布在中北部的中心区;退化冷点区分布在南部的边缘区(图4)。

表4 空间数据探索描述性统计变量

Table 4 Spatial data explore descriptive statistical parameters

年份 Year	生境质量空间探索 Spatial exploration of habitat quality				生境退化程度空间探索 Spatial exploration of habitat degradation degree			
	Moran's $I$	$Z$ -score	$P$ -value	阈值	Moran's $I$	$Z$ -score	$P$ -value	阈值
1995	0.8962	30.3471	0.0000	1.96	0.6698	22.7538	0.0000	1.96
2005	0.8959	30.3388	0.0000	1.96	0.6738	22.8881	0.0000	1.96
2015	0.8944	30.2897	0.0000	1.96	0.6860	23.2987	0.0000	1.96

### 2.2.2 生境质量与景观格局指数相关性分析

加强景观变化与生境质量耦合分析对于探究生态系统功能变化驱动机制具有重要意义。在以研究区为整体进行网格化的基础上,结合生境质量的热点分布特征,进一步采用分区法提取研究区北部、中部和南部网格,分别探讨景观格局指数与生境质量的相关性。结果表明,不同区域的相关性表现各异,同一种景观指数在不同区域也表现出不同的相关性质和强弱特点,主要和各区域景观类型组分及其所形成的景观格局差异有关,即景观格局指数与生境质量的关系主要受到不同区域的主导优势景观类型及其格局的影响而呈现不同的

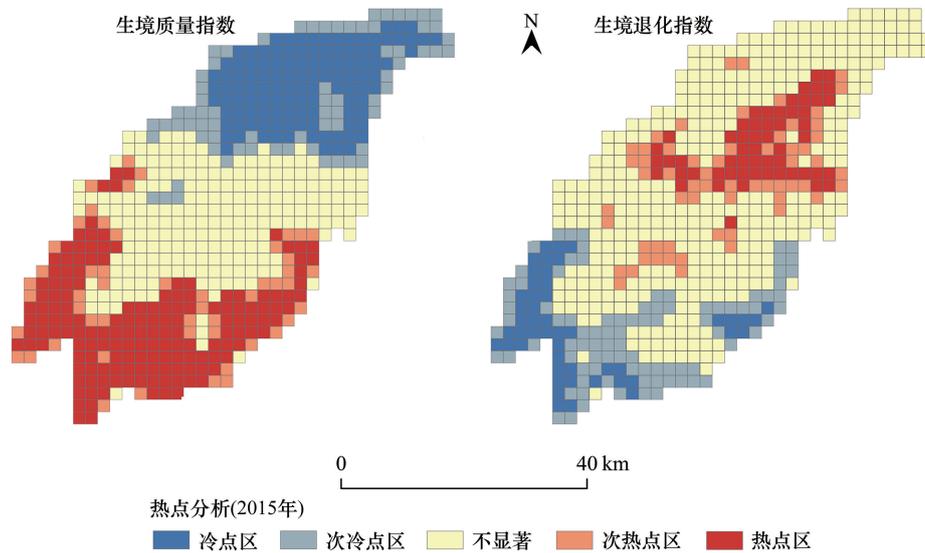


图4 生境质量和生境退化程度热点分析

Fig.4 Study on hot spots of habitat quality and habitat degradation

相关性趋势(图5)。在研究区北部区域,网格单元上的生境质量与景观格局指数达到极显著水平( $n=180$ ,  $\nu>150$ ,  $r_{0.01}=0.208$ )的仅有 LPI、PSCoV、PR 和 SDI;研究区中部区域达到极显著水平( $n=206$ ,  $\nu>200$ ,  $r_{0.01}=0.181$ )的有 Nump、MPS、PSCoV、ED、AWMPED、LSI、CAD、MCA、PR 和 SDI;研究区南部区域各项景观格局指数与生境质量相关性均达到极显著水平( $n=220$ ,  $\nu>200$ ,  $r_{0.01}=0.181$ );研究区整体网格样本的相关性表明,各项指数也均达到极显著水平( $n=606$ ,  $\nu>500$ ,  $r_{0.01}=0.115$ )。

分析显示,研究区北部区域生境质量与 LPI、ED、AWMFPD、LSI 等指标的相关性与南部区域的情况趋于相反,主要由于北部区域以农地斑块和建设用地区块为主,其最大斑块越大,受到胁迫的生境质量就会越差,而适度的形状差异会增加生态异质性,如农地和建设用地区块景观斑块的适度破碎和分离化,会影响植被净初级生产力以及生态景观的连通性,进而影响生态系统气候和气体调节能力、养分保持能力及生态系统孕育能力;而在以林地为主的区域,林地斑块越大,生态服务价值越高,而斑块的减小或绿地斑块的破碎化和形状不规则化会导致生态系统功能的下降,从而影响生境质量<sup>[42]</sup>。其他指数的相关性变化也有类似的原因从而表现出不同的相关性特征。因此,景观格局对生境质量的影响分析表明,生境质量与景观格局二者间的相关关系存在一定的区域差异性,同一景观格局指数在不同景观类型的区域内,其相关系数的指示性可能相反。因此,基于不同景观类型的景观指数对于生态过程效应预测的局限性<sup>[24]</sup>以及景观指数表达景观格局变化的复杂性<sup>[25]</sup>,在生境质量优化过程中的景观生态调控要注意景观格局指数与生境质量相关分析中的区域差异性。

### 2.3 生境质量及生境退化的地形位梯度分布特征

地形是影响种群分布格局、维持群落多样性的重要因子<sup>[43]</sup>,研究区地貌形态较为复杂,景观类型及生境质量的空间分布在很大程度上将受到地形的影响。本文在研究区高程和坡度图基础上,根据式(4)、(5)分别计算出研究区地形位指数(图6)、生境质量分布指数及生境退化分布指数(图7),探讨生境质量、生境退化分布指数随地形位指数梯度变化的分布特征,揭示综合地形变化对生境质量和生境退化空间格局的影响。研究表明,各级生境质量和生境退化在地形位梯度上的空间分布呈现较大差异。在地形位梯度第1—3级上,低、较低和中等生境质量分布指数大于1,占绝对优势,而生境退化分布指数主要以较低退化、较高和高退化为;在第4级上,中等生境和较高生境质量分布指数大于1,占绝对优势,而生境退化以中等退化和较高退化为;因此,该地形位梯度上为混合梯度,生境质量和生境退化并存;4—7级上,主要以中等生境和高生境质量占优,中等退化和低、较低退化为;7级以上,高等级生境质量持续上升,占绝对主导优势,而生境退化也

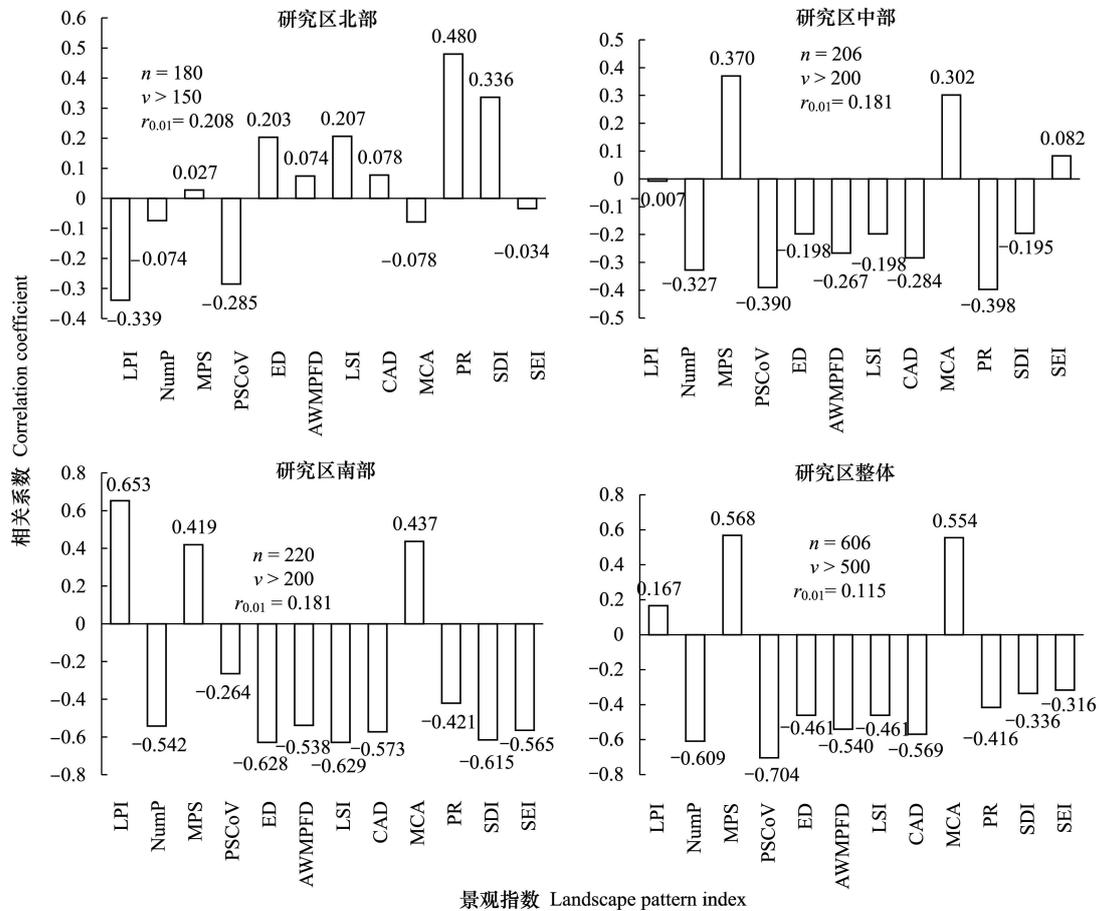


图 5 整体和分区的生境质量与景观格局指数相关性

Fig.5 The correlation between the indices of habitat quality and landscape pattern by different regions

LPI: 最大斑块指数 Largest patch index; NumP: 斑块数目 Number of patches; MPS: 平均斑块面积 Mean patch size; PSCoV: 斑块大小变异系数 Patch size coefficient of variance; ED: 边缘密度 Edge density; AWMPFD: 面积加权平均斑块分维指数 Area weighted mean patch fractal dimension; LSI: 景观形状指数 Landscape shape index; CAD: 核心斑块密度 Core area density; MCA: 平均核心斑块面积 Mean core area; PR: 景观丰度 Patch richness; SDI: 香农多样性指数 Shannon's diversity index; SEI: 香农均匀度指数 Shannon's evenness index

主要以低退化为主。总体上,在 7 级以上,高质量生境和低退化上升,中等及以下生境质量和生境退化指数随地形位梯度的增加而逐渐降低,最后趋于平稳(图 7)。

可见,研究区地形对生境质量和生境退化的空间分布格局具有重要作用,其原因主要由于地貌形态的差异会导致人类活动在空间上对土地利用产生不同的影响<sup>[44-45]</sup>,从而引起生境质量和生境退化程度在空间上的分布上表现出一定的差异。因此,研究区在生境保护和生态规划调控中,应因地制宜充分考虑地形因子的影响。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

生境质量是生态系统服务水平的重要表征,是区域生态安全保障和人类福祉提升的关键<sup>[12]</sup>。国内外大量研究采用生态指标法、AHP 法和综合指标法等进行生境质量评价,但结果的准确性、时效性、空间化、精细化等有待提高<sup>[46]</sup>,不同方法的评价结果也存在较大差异。随着定量模型的不不断提出,如 ARIES、SolVES、HSI、MIMES、EcoAIM、ESValue 模型<sup>[47]</sup>,以及针对中国黄土高原生态系统服务评价的 SAORES 模型<sup>[48]</sup>等,相关学

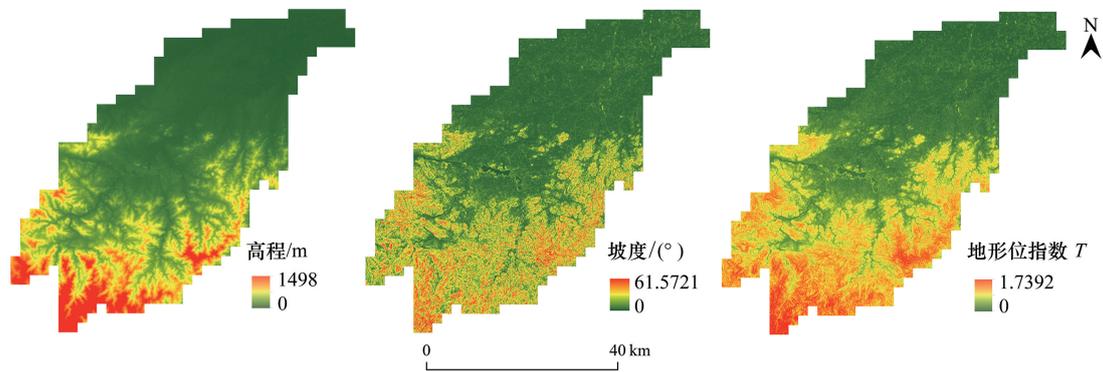


图6 研究区高程、坡度因子及地形位指数

Fig.6 Elevation, slope and terrain index of the study area

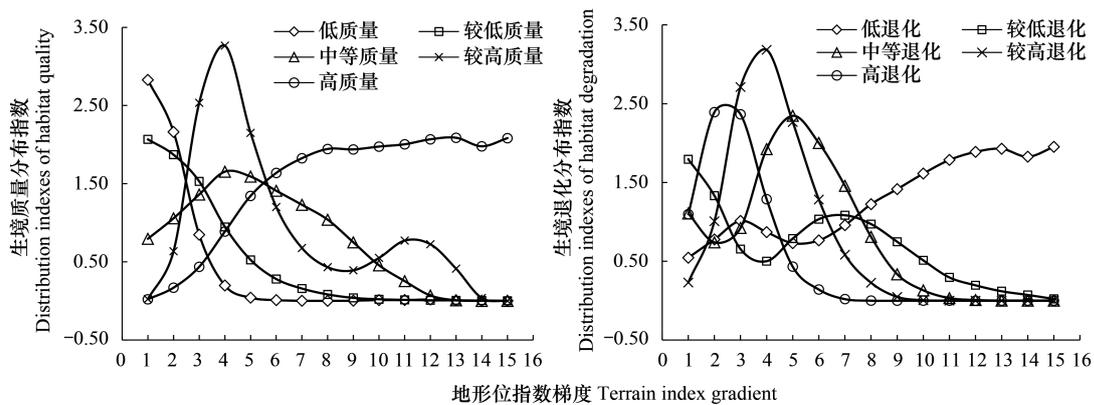


图7 地形位梯度上的生境质量、生境退化分布指数

Fig.7 Distribution indexes of habitat quality and degradation under terrain index gradient

者越来越关注其在生态估评中的应用,模型定量评估法有利于减小评估差异,从而为生态系统管理和决策提供更加可靠的依据<sup>[49]</sup>。本研究基于 InVEST 模型的评估结果,综合地形位指数进行大别山典型区域的生境质量与景观格局耦合及地形梯度效应研究,较好地揭示了近 20 年来研究区生境质量时空演变规律、与景观格局耦合关系及地形梯度效应。研究的不足及需要加强的方面主要有:(1)InVEST 模型相对较为成熟,在空间表达、动态研究等方面优于传统方法<sup>[4,50]</sup>,但计算中的参数设置存在一定的主观性,参数验证及合理性评估值得深入探讨;(2)将进一步加强的斑块水平景观指数及尝试构建新型景观指数与生境质量的耦合分析,探索生境质量变化的景观生态过程机制,为生境质量优化制定生态管理手段及景观调控措施提供更有效的理论依据。

作为“东接生态文明示范区巢湖流域西连大别山贫困区”的典型枢纽区域,舒城县是皖西大别山对接巢湖流域和合肥特大城市圈的桥头堡。近年来,皖西大别山区正经历城镇、交通建设快速发展时期,不合理的资源利用与开发方式造成的水土流失现象日益严重<sup>[29]</sup>。研究表明,1995—2015 年间,研究区日益受到皖江城市带、巢湖流域和合肥特大城市经济圈辐射带动,城镇化在空间上主要沿东北方向拓展,成为土地利用开发重点区域,舒城县生境质量随城市扩张呈下降趋势。该区域土地利用模式应结合承载力与适宜性评价,在生境保护与生态系统管控上,要做好生境质量低且退化热点区的生态优化、生境质量高退化程度冷点区的生态保育。特别是在生境质量低、退化程度热点区的区域,应加强土地利用节约集约用地,提高土地产出强度,限制以摊大饼的方式拓展城镇空间。同时,以新型城镇化为导向,加强城镇中心区景观资源的有效配置来优化城镇土地生态系统功能,提高城镇化发展中的生态质量。

### 3.2 结论

本文基于 InVEST 模型和地形位指数,分析了 1995—2015 年皖西大别山区舒城县的生境质量时空演化规律及其地形效应,并对生境变化与景观格局的相关性进行分析。结果表明,近 20a 来,研究区生境质量整体呈持续下降趋势,但降幅不大。研究区生境质量和生境退化程度具有显著空间聚集性,生境质量的空间集聚呈分散变化趋势,而生境退化程度则进一步集中。热点分析显示,生境质量较差的冷点区主要分布于研究区东北部的城镇及其周边区域,质量较高的热点区主要分布于西南部植被分布区;其次,研究区生境质量及生境退化分布指数具有显著的地形位梯度变化效应,其中,高生境质量分布与林地分布随地形位梯度上升成主导优势,而低生境质量分布与建设用地和农地分布在低地形位梯度上占主导优势;最后,研究区生境质量与景观格局指数具有显著相关性。分区对比分析表明,不同区域由于受景观构成类型等影响,生境质量与景观格局指数之间的耦合机理较为复杂。总体上,南部区域与整个研究区的二者相关性表现趋于一致。

### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, Polasky S, Tallis H, Cameron D. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. *Frontiers in Ecology and The Environment*, 2009, 7(1): 4-11.
- [ 2 ] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G. Integrating ecosystem-service tradeoffs into land-use decisions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109(19): 7565-7570.
- [ 3 ] 王建华, 田景汉, 吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价. *生态学报*, 2010, 30(2): 481-486.
- [ 4 ] 钟莉娜, 王军. 基于 InVEST 模型评估土地整治对生境质量的影响. *农业工程学报*, 2017, 33(1): 250-255.
- [ 5 ] 郑华, 欧阳志云, 赵同谦, 李振新, 徐卫华. 人类活动对生态系统服务功能的影响. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 118-126.
- [ 6 ] Termorshuizen J W, Opdam P. Landscape services as a bridge between landscape ecology and sustainable development. *Landscape Ecology*, 2009, 24(8): 1037-1052.
- [ 7 ] 管青春, 郝晋珉, 石雪洁, 高阳, 王宏亮, 李牧. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究. *自然资源学报*, 2018, 33(2): 195-207.
- [ 8 ] 哈凯, 丁庆龙, 门明新, 许皞. 山地丘陵区土地利用分布及其与地形因子关系——以河北省怀来县为例. *地理研究*, 2015, 34(5): 909-921.
- [ 9 ] Zhang Z M, Wang B, Buyantuev A, He X, Gao W, Wang Y J, ZhaXi D W, Yang Z J. Urban agglomeration of Kunming and Yuxi cities in Yunnan, China: the relative importance of government policy drivers and environmental constraints. *Landscape Ecology*, 2019, 34(3): 663-679.
- [ 10 ] Zhang Z M, Zinda J A, Yang Z J, Yin M, Ou X K, Xu Q, Yu Q C. Effects of topographic attributes on landscape pattern metrics based on redundancy ordination gradient analysis. *Landscape and Ecological Engineering*, 2017, 14: 66-77.
- [ 11 ] 陈妍, 乔飞, 江磊. 基于 InVEST 模型的土地利用格局变化对区域尺度生境质量的影响研究——以北京为例. *北京大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(3): 553-562.
- [ 12 ] 刘春芳, 王川. 基于土地利用变化的黄土丘陵区生境质量时空演变特征——以榆中县为例. *生态学报*, 2018, 38(20): 7300-7311.
- [ 13 ] 冯舒, 孙然好, 陈利顶. 基于土地利用格局变化的北京市生境质量时空演变研究. *生态学报*, 2018, 38(12): 4167-4179.
- [ 14 ] Satir O, Erdogan M A. Monitoring the land use/cover changes and habitat quality using Landsat dataset and landscape metrics under the immigration effect in subalpine eastern Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(15): 1118.
- [ 15 ] 褚琳, 张欣然, 王天巍, 李朝霞, 蔡崇法. 基于 CA-Markov 和 InVEST 模型的城市景观格局与生境质量时空演变及预测. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4106-4118.
- [ 16 ] Sallustio L, De Toni A, Strollo A, Di Febbraro M, Gissi E, Casella L, Geneletti D, Munafò M, Vizzarri M, Marchetti M. Assessing habitat quality in relation to the spatial distribution of protected areas in Italy. *Journal of Environmental Management*, 2017, 201: 129-137.
- [ 17 ] Miguel M, Catarina F, Marta V, Helena C, Artur G. Spatial assessment of habitat conservation status in a Macaronesian island based on the InVEST model: a case study of Pico Island (Azores, Portugal). *Land Use Policy*, 2018, 78: 637-649.
- [ 18 ] Sun X Y, Jiang Z, Liu F, Zhang D Z. Monitoring spatio-temporal dynamics of habitat quality in Nansihu Lake basin, eastern China, from 1980 to 2015. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 716-723.
- [ 19 ] 刘世梁, 尹艺洁, 杨珏婕, 安南南, 王聪, 董世魁. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响. *生态学报*, 2017, 37(2): 619-627.
- [ 20 ] 张平, 陆龙妹, 王世航, 赵明松. 基于地形梯度的皖南地区土地利用分布特征. *土壤*, 2018, 50(5): 1041-1045.
- [ 21 ] 陈铸, 黄雅冰, 朱志鹏, 郑祈全, 阙晨曦, 董建文. 基于地形梯度特征的福州市景观格局演变. *应用生态学报*, 2018, 29(12): 4135-4144.
- [ 22 ] 陈一萌, 于竹筱, 许尔琪. 1965 年以来 6 个时期广东漳湖湿地的景观格局和生境质量. *湿地科学*, 2018, 16(4): 486-492.
- [ 23 ] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 王志涛, 冯菲, 门明新, 丁庆龙. 冀西北间山盆地景观格局变化及优化研究——以河北省怀来县为例. *自然资源*

- 学报, 2016, 31 (4): 556-569.
- [24] 刘宇, 吕一河, 傅伯杰. 景观格局—土壤侵蚀研究中景观指数的意义解释及局限性. 生态学报, 2011, 31(1): 267-275.
- [25] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 胡远满, 问青春, 王绪高, 徐崇刚, 李月辉, 贺红仕. 景观格局指标对不同景观格局的反应. 生态学报, 2004, 24(1): 123-134.
- [26] 黄木易, 岳文泽, 冯少茹, 蔡接接. 基于 MCR 模型的大别山核心区生态安全格局异质性及优化. 自然资源学报, 2019, 34(4): 771-784.
- [27] 黄润, 王升堂, 倪建华, 孙贤斌, 王笑梅. 皖西大别山五大水库生态系统服务功能价值评估. 地理科学, 2014, 34(10): 1270-1274.
- [28] 樊杰. 中国主体功能区划方案. 地理学报, 2015, 70(2): 186-201.
- [29] 赵明松, 李德成, 程先富, 王世航. 皖西大别山区土壤侵蚀空间分布特征及与地形的关系. 安徽师范大学学报: 自然科学版, 2017, 40(3): 265-270.
- [30] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [31] Bhagabati N K, Ricketts T, Sulistyawan T B S, Conte M, Ennaanay D, Hadian O, McKenzie E, Olwero N, Rosenthal A, Tallis H, Wolny S. Ecosystem services reinforce Sumatran tiger conservation in land use plans. *Biological Conservation*, 2014, 169: 147-156.
- [32] 欧维新, 甘玉婷婷. 耦合种群动态的生境格局变化分析粒度与景观因子选择—以盐城越冬丹顶鹤及其生境的变化为例. 生态学报, 2016, 36(10): 2996-3004.
- [33] Sharp R, Tallis H T, Ricketts T, Guerry A D. InVEST 3.2.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. 2014.
- [34] 姚云长. 基于 InVEST 模型的三江平原生境质量评价与动态分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [35] 王蓓, 赵军, 胡秀芳. 基于 InVEST 模型的黑河流域生态系统服务空间格局分析. 生态学杂志, 2016, 35(10): 2783-2792.
- [36] 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. 地理科学, 2001, 21(1): 64-69.
- [37] 斯钧浪, 齐伟, 曲衍波, 李乐. 胶东山区县域土地利用在地形梯度上的分布特征. 应用生态学报, 2009, 20(3): 679-685.
- [38] 武爱彬, 刘欣, 赵艳霞, 秦彦杰. 浅山丘陵区土地利用格局的地形梯度特征与变化研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 181-185.
- [39] 巩杰, 高彦净, 张玲玲, 谢余初, 赵彩霞, 钱大文. 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. 兰州大学学报: 自然科学版, 2014, 50(5): 692-698.
- [40] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24: 189-206.
- [41] 李双成, 马程, 王阳, 王珏, 朱文博, 刘金龙, 李晓静, 李琰, 张津, 高阳. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014: 64-95.
- [42] 黄木易, 岳文泽, 何翔. 巢湖流域地表热环境与景观变化相关分析及其尺度效应. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3123-3133.
- [43] 刘海丰, 桑卫国, 薛达元. 暖温带森林优势种群的地形生境变异性. 生态学杂志, 2013, 32(4): 795-801.
- [44] 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. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2015, 39(5): 99-105.
- [45] 刘世梁, 刘芦萌, 武雪, 侯笑云, 赵爽, 刘国华. 区域生态效应研究中人类活动强度量化评价. 生态学报, 2018, 38(19): 6797-6809.
- [46] 巩杰, 马学成, 张玲玲, 柳冬青, 张金茜. 基于 InVEST 模型的甘肃白龙江流域生境质量时空分异. 水土保持研究, 2018, 25(3): 191-196.
- [47] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [48] Hu H T, Fu B J, Lü Y H, Zheng Z M. SAORES: A spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 547-560.
- [49] 杨园园, 戴尔阜, 付华. 基于 InVEST 模型的生态系统服务功能价值评估研究框架. 首都师范大学学报: 自然科学版, 2012, 33(3): 41-47.
- [50] 吴娜, 宋晓谕, 康文慧, 邓晓红, 胡想全, 石培基, 刘玉卿. 不同视角下基于 InVEST 模型的流域生态补偿标准核算—以渭河甘肃段为例. 生态学报, 2018, 38(7): 2512-2522.