

DOI: 10.5846/stxb202104010847

岳文泽, 夏皓轩, 吴桐, 熊锦惠, 钟鹏宇, 陈阳. 浙江省生境质量时空演变与生态红线评估. 生态学报, 2022, 42(15): 6406-6417.

Yue W Z, Xia H X, Wu T, Xiong J H, Zhong P Y, Chen Y. Spatio-temporal evolution of habitat quality and ecological red line assessment in Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6406-6417.

浙江省生境质量时空演变与生态红线评估

岳文泽^{1,*}, 夏皓轩¹, 吴桐¹, 熊锦惠¹, 钟鹏宇¹, 陈阳²

¹ 浙江大学土地管理系, 杭州 310058

² 宁波大学法学院, 宁波 315211

摘要: 生境质量是反映生物多样性状况与局地生态功能的重要指标, 在高质量发展背景下研究区域生境质量的时空演变具有重要意义。以浙江省为研究区, 基于 InVEST 模型、热点分析及地理探测器模型探究生境质量的时空演变与影响因素, 并利用生境质量结果对浙江省生态红线开展了定量评估。结果表明: (1) 2000—2015 年, 浙江省生境质量均值呈减速下降趋势, 空间上形成了西北、西南、中东高和东北、中部低的分布格局; 生境退化度呈现“中心—外围”的圈层辐射结构。(2) 热点分析显示, 生境质量与生境退化度在乡镇尺度上集聚特征相似, 冷热点空间分布趋势相反。(3) 地理探测分析发现, 地形(高程、坡度)是影响浙江省生境质量的主要因素, 植被因素(NPP、NDVI)的贡献度随时间推移逐渐增大; 浙江省生境质量空间分异受到自然因子与社会经济因子的协同作用。(4) 浙江省生态红线的生境质量整体较高且稳定, 不同红线类型的生境质量存在差异; 高生境质量区与生态红线的错位区域主要分布在浙西南、西北部山区, 而北部、中部以及东部相对较少。基于此, 对生态红线调整、区域生态功能区划提出对应的策略, 以期提升浙江省生态空间管控。

关键词: InVEST 模型; 生境质量; 土地利用; 生态红线; 浙江省

Spatio-temporal evolution of habitat quality and ecological red line assessment in Zhejiang Province

YUE Wenzhe^{1,*}, XIA Haoxuan¹, WU Tong¹, XIONG Jinhui¹, ZHONG Pengyu¹, CHEN Yang²

¹ Department of Land Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

² School of Law, Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Habitat quality is an important index to estimate the biodiversity status and local ecological functions. Exploring the spatio-temporal evolution of regional habitat quality is of great importance in the context of high-quality development. Taking Zhejiang as the case study, we investigated the spatio-temporal evolution and influencing factors of habitat quality based on the InVEST model, the hot spot analysis, and the Geodetector. Meanwhile, we computed the habitat quality within the ecological red line areas in Zhejiang using the above assessment results. The results show that: (1) from 2000 to 2015, the mean value of habitat quality in Zhejiang showed a decelerating downward trend, and spatially formed a distribution pattern of high in the northwest, the southwest, the middle east, but low in the northeast and the middle; the habitat degradation presented a ‘center-periphery’ sphere radiation structure. (2) Based on the hotspot analysis, the agglomeration characteristics of habitat quality and habitat degradation were similar on the township scale, while the spatial distribution trends of cold and hot spots were opposite. (3) Based on the Geodetector, terrain factors (elevation and slope) showed the most significant impact on habitat quality, and the contribution to habitat quality from vegetation factors (NPP, NDVI) increased gradually with time. Meanwhile, the synergy of natural and socio-economic factors affected the spatial variation of

基金项目: 国家社会科学基金重大项目(21ZDA064); 国家自然科学基金项目(41871169)

收稿日期: 2021-04-01; 网络出版日期: 2022-04-07

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

habitat quality in Zhejiang. (4) The habitat quality of the ecological red line area in Zhejiang was relatively high and stable, and with differences among different types of ecological red lines. The areas with high habitat quality but not designated as ecological red line areas were mainly distributed in Zhejiang's southwest and northeast mountain areas, while less were found in the northern, central, and eastern Zhejiang. Therefore, we proposed complementary strategies to adjust the ecological red line areas, delimit the regional ecological function zonings, and finally improve ecological spatial management and control in Zhejiang.

Key Words: InVEST model; habitat quality; land use; ecological red line; Zhejiang Province

21 世纪以来,人类活动对自然生境的胁迫日益增加,改变了生态系统物质循环的总量或效率,致使生境破碎化严重,生物多样性的降幅相较以往更大,并对人类福祉产生不利影响^[1-3]。自联合国于 2015 年提出了可持续发展目标后^[4],生态环境评估在可持续发展领域受到了更多关注。步入新时代,我国正处于迈向高质量发展的转型期^[5],提升空间治理能力、解决国土空间开发与保护之间的结构性矛盾是当前亟需研究的重点。生境质量作为衡量生态环境的重要指标,是指生态系统所能提供适宜个体或种群生存条件的能力^[6],一定程度上反映了区域生物多样性状况以及生态系统服务功能^[7]。对于生物多样性维护^[8]、生态系统服务权衡与协同^[9]、生态安全格局构建^[10]等研究具有重要意义。

国内外生境质量评估研究主要可以分为生态学视角与地理学视角的两个方面。早期研究重点关注野生动植物的生境质量以及人类活动对生境质量造成的影响^[11],研究方法与内容更偏向于生态学范畴,主要以单一物种的生境条件入手,分析影响其生存的自然或人为因素,通常采用野外调查方法获取生境质量的相关参数,并构建指标体系进行综合评价^[12-14]。此类评估方法多适用于微观地理单元,囿于时间与人力成本,往往较难获取大尺度、动态性的数据进行分析^[15]。随着土地利用/覆被(LULC)变化成为全球变化研究的焦点,不少学者重点关注 LULC 对生境质量的影响^[16],利用遥感、GIS 等技术的量化、可视化、精细化评估生境质量的模型被广泛应用于实践^[17],基于地理学视角的研究范式逐渐形成。现有研究对生境质量评估主要集中于流域^[18]、自然保护区^[19]、都市区^[20]、城市群^[16]、省域^[21]等尺度,而在省域层面的研究大多围绕生境质量的时空演变特征^[22-24],对于其影响因素的分析相对较少,且未能结合新时代空间治理的新需求。

十八大提出加快生态文明建设的战略性目标,2017 年全国开始划定生态保护红线并制定配套的生态保护政策,以生态保护红线为抓手的生态空间管控机制备受重视。浙江省作为首批划定的生态保护红线的省区,于 2018 年完成划定方案并获批。《生态保护红线划定指南》的重点是识别生态功能重要性与生态脆弱性地区,高生境质量区域在逻辑上应该优先划入生态红线,因此生境质量可作为评估生态红线政策效度的重要指标。因此,本研究首先基于 2000、2005、2010、2015 年四期土地利用数据,应用 InVEST 模型对全省生境质量开展定量评估,通过热点分析和地理探测器模型探究生境质量的时空分异与驱动因素,在此基础上,对生态红线区域的生境质量进行评估,以期识别红线布局优化的区域,为国土空间生态管理提供科学支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

浙江省位于中国东南沿海,长江三角洲南翼,下辖 11 个地级市、90 个县级区划,陆域面积 10.55 万 km²,仅占全国的 1.1%(图 1)。地势呈现西南高东北低的特征,地形复杂,由平原、山地、丘陵、盆地、岛屿构成。地处亚热带中部,属季风性湿润气候^[25]。浙江是“两山理论”的发源地与实践地,不仅拥有“百湖千峰四湾千岛”等丰富的自然生境,并且在生态环境治理与保护方面处于国际先进水平,目前已成为全国首个生态省,对全国生态文明建设具有重要借鉴意义。与此同时,由于“七山一水二分田”的资源禀赋约束,浙江省形成了资源、环境、人口、经济的空间结构失衡,导致生境质量变化,对生态空间的管控提出了全新挑战。

1.2 数据来源与处理

本研究采用 2000、2005、2010、2015 年共 4 期浙江省土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn>),空间分辨率为 30m,通过 ArcGIS10.2 将其重新分为耕地、有林地、灌木林地、疏林地、其它林地、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、其它建设用地、未利用地共 13 类。另外,归一化植被指数(NDVI)、国内生产总值(GDP)数据也来源于中国科学院资源环境科学与数据中心。浙江省行政边界矢量数据与 2017 年生态保护红线数据来自浙江省自然资源厅。降水量、气温数据来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>),通过投影和克里金插值得到年降水量和平均气温的栅格数据。数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn/)。植被净初级生产力(NPP)和人口密度数据分别采用 MODIS 的 MOD17A3 数据产品和 WorldPOP 人口网格数据集。最终将多源栅格数据精度统一至 100m。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 InVEST 模型的生境质量评估

InVEST 模型是由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界自然基金会(WWF)联合开发的用于评估生态系统服务功能量及其经济价值、支持生态系统管理与决策的模型系统^[26]。生境质量模块是通过结合不同土地利用类型对威胁源的敏感程度和外界威胁强度来计算生境退化度,进一步计算生境质量,根据生境质量高低评估生物多样性服务功能^[27-29],计算公式^[30]如下:

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

$$i_{rxy} = \begin{cases} 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \\ \exp \left[- \left(\frac{2.99}{d_{rmax}} \right) d_{xy} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中, D_{xj} 为生境类型 j 中 x 栅格的生境退化度; r 为威胁源个数; y 为威胁源 r 中的栅格; ω_r 为不同威胁源的权重; r_y 为栅格 y 的胁迫值; β_x 为生境抗干扰水平; S_{jr} 为不同生境对不同威胁因子的相对敏感程度; i_{rxy} 为栅格 y 中的威胁源 r 对栅格 x 的影响; d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 之间的距离; d_{rmax} 为威胁因子的最大影响距离。

在此基础上计算生境质量,公式如下:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \quad (3)$$

式中, Q_{xj} 为生境类型 j 中栅格 x 的生境质量; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度; z 为归一化常量,通常取 2.5; k 为半饱和系数,一般为最大生境退化度的一半^[31]。

本研究中 InVEST 模型生境质量模块的主要参数包括土地利用类型栅格图、威胁源数据图、威胁源因子权重和最大影响距离、土地利用类型对威胁源的敏感度参数等数据,重点参考 InVEST 模型手册^[30]和相关研究^[15,21,32-33],结合研究区实际情况确定相关参数,如表 1 和表 2 所示。

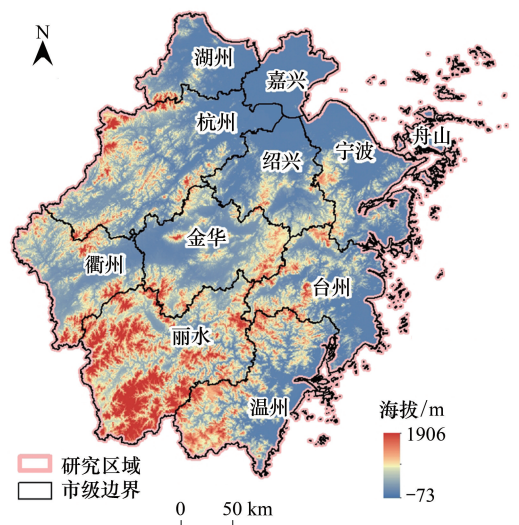


图 1 研究区概况

Fig.1 Location of study area

表 1 研究区威胁因子权重与影响距离
Table 1 Weights and impact distance of threat factors in study area

威胁源 Threats	最大影响距离/km Max distance of influence	权重 Weight	衰减类型 Decay type
耕地 Cropland	1	0.6	线性衰减
城镇用地 Urban land	8	1	指数衰减
农村居民点 Rural settlements	6	0.8	指数衰减
其它建设用地 Other construction land	5	0.6	指数衰减
未利用地 Unused land	3	0.5	线性衰减

表 2 研究区不同土地利用类型生境适宜度及对威胁因子的敏感性
Table 2 Habitat suitability of different land use types and sensitivity to threat factors in study area

土地利用类型 Land-use types	生境适宜度 Habitat	威胁因子敏感度 Sensitivity				
		耕地 Cropland	城镇用地 Urban land	农村居民点 Rural settlements	其它建设用地 Other construction land	未利用地 Unused land
耕地 Cropland	0.5	0	0.8	0.7	0.6	0.4
有林地 Forest	1	0.6	0.9	0.8	0.8	0.5
灌木林地 Shrub	0.8	0.6	0.8	0.6	0.7	0.5
疏林地 Sparse woodland	0.7	0.5	0.7	0.7	0.8	0.4
其它林地 Other woodland	0.6	0.5	0.7	0.7	0.8	0.4
高覆盖度草地 High covered grassland	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6
中覆盖度草地 Medium covered grassland	0.6	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6
低覆盖度草地 Low covered grassland	0.5	0.5	0.7	0.7	0.7	0.6
水域 Waters	0.8	0.4	0.7	0.6	0.7	0.4
城镇用地 Urban land	0	0	0	0	0	0
农村居民点 Rural settlements	0	0	0	0	0	0
其它建设用地 Other construction land	0	0	0	0	0	0
未利用地 Unused land	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5	0

1.3.2 热点分析

为探究浙江省生境质量与生境退化度的空间聚类分布特征,本研究采用热点分析方法,识别生境质量和生境退化度在空间分布上是否存在统计上显著的高值区(热点)与低值区(冷点)^[34]。通过 ArcGIS10.2 的空间统计工具,采用 Getis-Ord Gi 指数进行计算,在乡镇尺度上统计生境质量与生境退化度的均值,分析其空间集聚特征。

1.3.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分层异质性,揭示其背后驱动因子的一种统计学方法,主要包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测四个工具,主要用于分析各种现象的驱动因子以及多因子的交互作用^[35]。本研究主要采用分异及因子探测和交互作用探测,通过 ArcGIS10.2 按 5km×5km 对研究区进行网格化采样,避免根据乡镇尺度采样导致的样点分布不均匀,共采集评价单元 4813 个,采用自然断点法将高程、坡度、年降水量、年平均气温、NDVI、NPP、GDP、人口密度等自变量的原始数据分为 5 类,探究驱动因子对生境质量(因变量)结果变化的解释程度,并通过交互作用探测识别各因子相互叠加对生境质量的影响^[36—37]。计算公式如下:

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

(4)

式中, q 为某驱动因子对生境质量的解释程度; $h = 1, \dots, L$ 为生境质量或驱动因子的分层; N 、 σ^2 分别为研究区样本数和方差; N_h 、 σ_h^2 为分层 h 的样本数和方差。 q 的值域为 $[0, 1]$, 数值越大说明驱动因子对生境质量的解释程度越大。

交互作用探测主要是判断不同驱动因子之间的交互作用, 评估两个因子共同作用时是否会增加或减弱对生境质量的解释程度, 或因因子之间不存在相互影响^[35], 具体如下(表 3):

表 3 两个驱动因子对生境质量交互作用的类型
Table 3 Types of interaction between two covariates to habitat quality

判断依据 Judgments based	交互作用 Interaction	判断依据 Judgments based	交互作用 Interaction
$q(X1 \cap X2) < \min(q(X1), q(X2))$	非线性减弱	$q(X1 \cap X2) = q(X1) + q(X2)$	独立
$\min(q(X1), q(X2)) < q(X1 \cap X2) < \max(q(X1), q(X2))$	单因子非线性减弱	$q(X1 \cap X2) > q(X1) + q(X2)$	非线性增强
$q(X1 \cap X2) > \max(q(X1), q(X2))$	双因子增强		

2 结果分析

2.1 生境质量与生境退化度的时空演变

结果表明, 浙江省生境质量空间格局呈现明显的分异特征(图 2), 浙西北、浙西南以及浙中东生境质量较高, 浙东北、浙中地区的生境质量较低。从时间变化上看, 浙江省 2000、2005、2010、2015 年生境质量均值分别为 0.7915、0.7803、0.7727、0.7655, 总体呈下降趋势, 但是下降率逐渐放缓, 2000—2005 年、2005—2010 年和 2010—2015 年的生境质量下降率为 1.41%、0.97% 和 0.93%。从空间上来看, 生境质量下降的区域主要集中在浙北平原、金衢盆地以及东南沿海平原, 这些区域人类活动相对频繁, 城镇化程度较高, 而浙西中山丘陵、浙南山地和浙东丘陵主要以林地为主, 生境质量较好且相对稳定。

为进一步了解生境质量的变化, 参考已有研究^[15, 29, 32]将其划分为低、较低、中等、较高和高共五个等级(表 4)。浙江省超 50% 的区域位于高生境质量区域, 但总体上呈减少趋势, 占比从 2000 年的 55.54% 下降到 2015 年的 53.89%。而低生境质量区域的面积显著增加, 从 2000 年的 3534.37km² 增加到 2015 年的 7859.49 km²。相较于 2000 年, 2015 年浙江省生境质量空间分异特征进一步凸显, 产生变化的主要原因是杭州、宁波、温州三大都市区的扩张使低生境质量区域呈现蔓延式发展, 同时, 耕地、林地、草地分别有 3583.38km²、495.73km²、36.49km² 被占用为建设用地, 威胁因子的变化影响了生境质量的空间格局。

表 4 2000—2015 年浙江省生境质量各等级面积与占比变化
Table 4 Area and percentage change of the habitat quality grade in Zhejiang Province from 2000 to 2015

生境质量等级 Habitat quality level	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	面积/km ² Area	比重/% Proportion	面积/km ² Area	比重/% Proportion	面积/km ² Area	比重/% Proportion	面积/km ² Area	比重/% Proportion
低[0—0.2) Low	3534.37	3.35	5667.11	5.37	6557.05	6.21	7859.49	7.44
较低[0.2—0.4) Poor	40.31	0.04	39.72	0.04	40.35	0.04	45.85	0.04
中等[0.4—0.6) Medium	30609.27	28.98	28550.50	27.03	28245.95	26.75	27253.43	25.81
较高[0.6—0.8) Good	12773.70	12.10	13272.07	12.57	13840.63	13.11	13533.27	12.81
高[0.8—1) High	58649.71	55.54	58077.96	54.99	56923.38	53.90	56915.32	53.89

生境退化度反映了生境类型受威胁因子的影响程度, 根据自然断点法对浙江省生境退化度划分为弱退化、较弱退化、中等退化、较强退化和强退化 5 个等级, 浙江省生境退化度分布格局呈现了时空尺度上的异质性特征(图 3)。浙江省生境退化度的等级呈现明显的圈层辐射结构, 主要以杭州市、宁波市、温州市、金华市为“辐射中心”, 对周边的生境产生一定影响, 并且这种结构随着时间推移有逐渐扩大的趋势, 尤其以 2000—2005 年最为明显, 城镇用地快速扩张, 增加了威胁因子分布, 导致生境退化加剧。

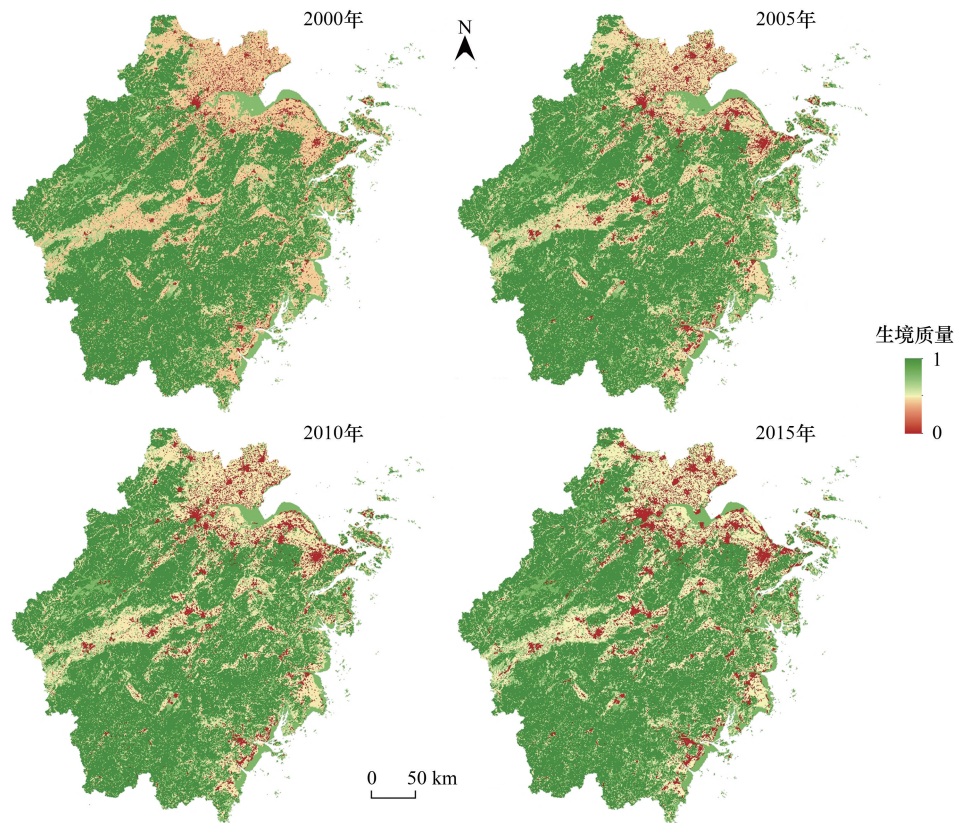


图2 2000—2015年浙江省生境质量时空演变

Fig.2 Spatial-temporal evolution of habitat quality in Zhejiang Province from 2000 to 2015

2.2 生境质量与生境退化度热点分析

在时间序列上,2000—2015年生境质量与生境退化度热点的空间格局总体相似。以2015年为例(图4),研究发现生境质量与生境退化度在乡镇尺度上的空间分布表现出明显的集聚特征。生境质量的热点分析中,热点区域包括浙西北中山丘陵、浙南山地与浙东丘陵,包括601个乡镇(街道),面积占全省面积的44.93%,该区域受人类干扰程度较小,植被覆盖度高;冷点区域主要位于浙北平原、金衢盆地以及温台平原,包括522个乡镇(街道),面积占全省面积的22.12%,这些区域地势平坦,分布有大量城镇、农村居民点与其他建设用地,形成低值集聚区。生境退化度的热点分析中,冷点与热点区域的空间分布与生境质量呈现有相反的趋势,热点区域大部分集聚在浙北平原,另外在金华、台州和温州也有形成小型集聚,包括547个乡镇(街道),中部区域不显著,而冷点区域则集中于浙西北与浙南地区,包括468个乡镇(街道)。

2.3 生境质量差异的影响因素分析

生境质量演化存在明显的时空分异特征,利用地理探测器模型进一步探究浙江省生境质量变化的驱动因子及演化机制。因子探测的结果显示,不同年份各驱动因子的 p 值均通过0.01水平的显著性检验,并且不同驱动因子对浙江省生境质量的解释程度 q 值存在一定差异(图5)。就各因子的 q 均值来看,解释程度从大到小依次为坡度>高程>NDVI>单位面积GDP>人口密度>NPP>年降雨量>平均气温。综合而言,地形因素(坡度、高程)显著影响了研究区生境质量空间分布格局,相较于植被(NDVI、NPP)、社会经济(单位面积GDP、人口密度)、气象(年降雨量、平均气温)等因素对生境质量空间分布的解释程度更大。在时间维度上,高程、坡度、年降雨量、平均气温、单位面积GDP与人口密度等6个因子的 q 值相对稳定,而NDVI与NPP的 q 值呈波动上升的趋势。由此可见,研究区的地形因素是影响生境质量空间分异特征的主导方面,同时社会经济因素对生境质量空间格局有重要影响,植被因素对于生境质量的提升起到一定作用。

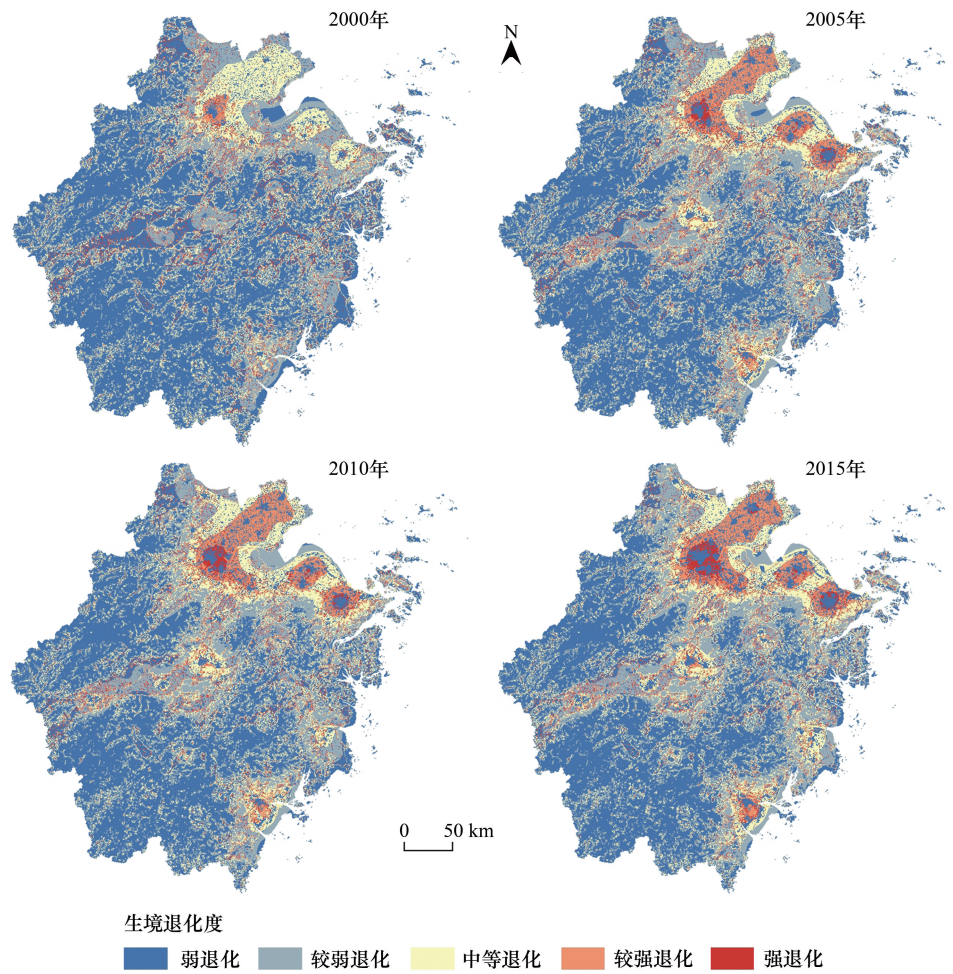


图 3 2000—2015 年浙江省生境退化度时空演变

Fig.3 Spatial-temporal evolution of habitat degradation in Zhejiang Province from 2000 to 2015

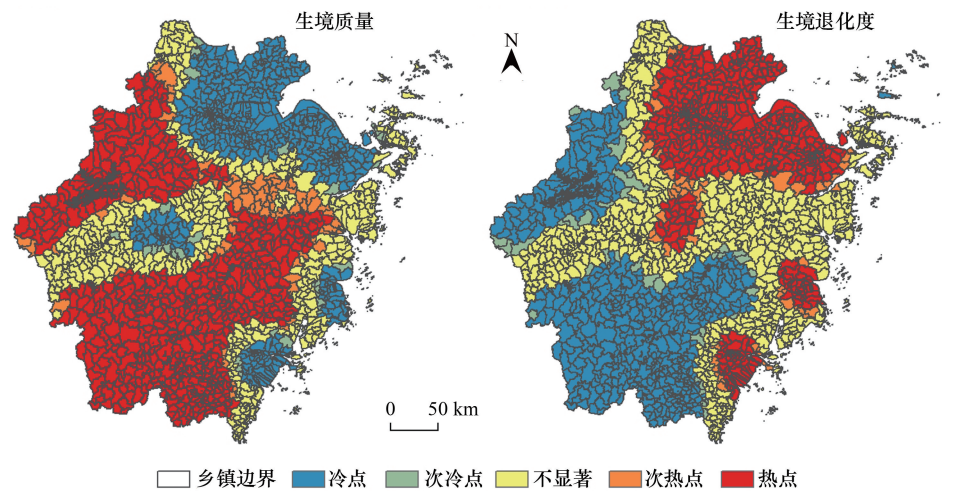


图 4 浙江省生境质量与生境退化度热点分析(2015 年)

Fig.4 Study on hot spots of habitat quality and habitat degradation in Zhejiang Province (2015)

进一步研究不同因子间的交互作用对浙江省生境质量的影响,结果表明(图6),四个年份各因子之间对生境质量变化均呈现协同增强的特征,即任意两个驱动因子的交互作用均大于单因子的影响,交互关系表现为双因子增强型和非线性增强型。总体来看,地形因素(高程、坡度)与其他因子的交互作用相对较大,气象因素(年降雨量、平均气温)与其他因子的交互作用相对较小。时间维度上,2000年、2005年、2010年交互作用对生境质量空间分异影响最强的是坡度∩单位面积GDP, q 值分别为0.444、0.459、0.447;2015年交互作用影响程度最高的为坡度∩NDVI, q 值为0.482;植被因素(NPP和NDVI)的交互作用及其与社会经济(单位面积GDP、人口密度)的交互作用逐渐增强。由此可见,地形因素、植被因素与社会经济因素的交互作用增强了对生境质量变化的解释程度,主要是由于浙江省“七山一水两分田”的自然地理格局,山区的地势起伏大、植被覆盖程度高,为动植物提供适宜生存的环境,形成了生境质量高、物种丰富的生态空间。与此同时,社会经济活动造成耕地和建设用地侵占了部分生态空间,影响了城镇周边地区的生境质量,使因子间交互作用更为凸显。

2.4 生态红线区生境质量空间分布

为探究浙江省生态红线区生境质量时空分布特征,首先统计分析2000—2015年不同类型生态红线的生境质量变化情况(表5),结果表明:15年来,浙江省生态红线整体生境质量均值大于0.9,并且处于一个相对稳定的范围内。从不同类型的生态红线来看,地质公园的生境质量均值最高,其次是自然保护区,二者在时间序列上均稳定在0.96以上,而湿地公园的生境质量均值相较于其他类型生态红线明显偏低,主要原因是红线中不同的生境类型影响到生境质量大小。此外,风景名胜区和饮用水源保护地的生境质量均值也小于整体生境质量均值,主要是因为此类区域中人为扰动相对密切,对生境质量产生一定影响。

表5 2000—2015年浙江省不同类型生态红线生境质量均值

Table 5 Average value of habitat quality of different types of ecological red line in Zhejiang Province from 2000 to 2015

年份 Year	红线整体 Overall	地质公园 Geology park	风景名胜区 Scenic area	森林公园 Forest park	湿地公园 Wetland park	饮用水源 保护地 Drinking water source	自然保护区 Natural reserve	其他区域 Other areas
2000	0.9411	0.9665	0.9265	0.9585	0.7002	0.9163	0.9625	0.9440
2005	0.9395	0.9633	0.9249	0.9531	0.7051	0.9145	0.9629	0.9427
2010	0.9351	0.9636	0.9218	0.9485	0.6996	0.9138	0.9606	0.9377
2015	0.9354	0.9636	0.9215	0.9487	0.6986	0.9145	0.9606	0.9380

结合前述的生境质量影响因素对生态红线中不同等级区域进行分析,从北至南识别出四个典型区域(图7)。嘉兴市的典型区域中,红线中存在较多生境质量等级中等和低的区域,主要原因是典型区地处杭嘉湖平原,区内中间斑块的红线类型为风景名胜区,上下两个斑块为湿地公园,周边存在大量建设用地与耕地,人类活动相对频繁;杭州市的典型区域中,红线中局部存在生境质量等级中等和低的区域,主要原因是该区域位于富春江与浦阳江交汇处的丘陵地带,红线类型为饮用水源保护地,但同时存在乡镇与农田生境类型,故生境质量等级较高和高的区域呈环绕状的分布;台州市的典型区域中,红线中局部存在中等级区,主要原因是在华顶国家森林公园东部存在部分农田生境类型,这种具有浙江特色的梯田兼具农业功能和生态功能,从而影响生境质量评估结果;丽水市的典型区域中,红线中有零星的生境质量低等级区和分散状的中等级区,主要原因是

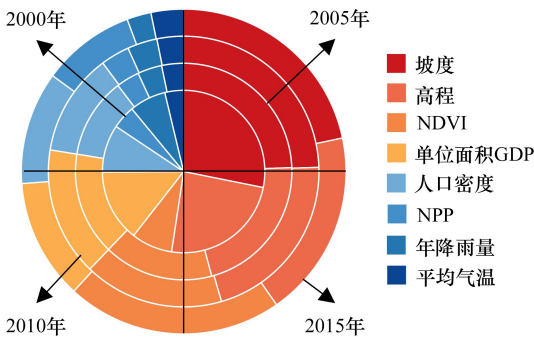


图5 2000—2015年浙江省生境质量因子探测结果

Fig.5 Detection results of driving factors of habitat quality in Zhejiang Province from 2000 to 2015

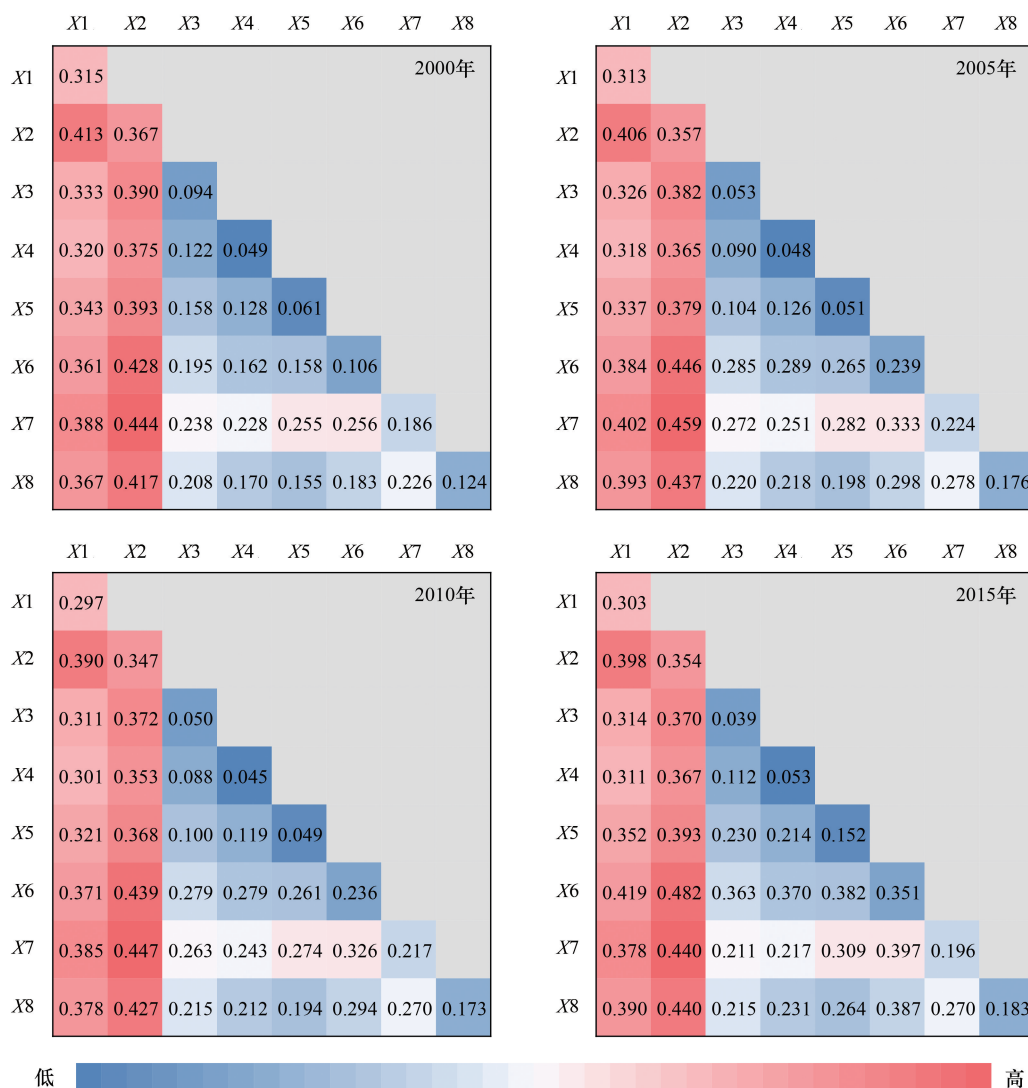


图6 2000—2015年浙江省生境质量交互探测结果

Fig.6 Interactive detection results of driving factors of habitat quality in Zhejiang Province from 2000 to 2015

X1: 高程; X2: 坡度; X3: 年降水量; X4: 平均气温; X5: NPP; X6: NDVI; X7: 单位面积 GDP; X8: 人口密度

该区域属于自然保护区, 总体生境质量较高, 然而其中分布有少量村庄和农田。

进一步将生态红线与生境质量高等级区进行叠加分析, 并在乡镇尺度上统计二者错位区域面积(即属于生境质量高等级区但是暂未划入生态红线的面积), 根据分位数法将错位区域占乡镇面积的比例划分为五个等级(图8), 以期在乡镇尺度上探讨生态红线的调整。从错位面积的空间格局来看, 主要分布在浙西北和浙西南山区, 而在杭嘉湖平原、金衢盆地以及浙东沿海平原的分布较为匮乏。在乡镇尺度上形成错位面积占比的分级, 可以在一定程度上反映生态红线调整的潜力区域, 其空间分异特征与错位面积的空间格局相似。值得注意的是, 淳安县下辖乡镇的调整潜力较低, 主要原因是区域内已分布有大量红线, 故错位面积相对较少; 浙南区域存在大量的人工商品林以及国家级、省级公益林, 导致该区域具有较大调整潜力, 后续可结合实地情况与管控要求进行重点乡镇的再评估。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究运用 InVEST 模型评估 2000—2015 年浙江省生境质量时空格局, 并通过空间冷热点分析和地理探

测器模型对其演变特征与驱动因素进行分析,并结合生态红线探讨二者的关系,得到以下结论:

(1)15 年来,浙江省生境质量均值总体呈减速下降趋势,并且形成了浙西北、浙西南、浙中东高与浙东北、浙中低的生境质量空间分异特征。生境退化度空间格局呈现明显的以都市区为中心向周围蔓延的圈层辐射结构,并且该结构有逐渐扩大的趋势。

(2)生境质量与生境退化度在乡镇尺度上表现出集聚明显、趋势相反的特征。整体上,生境质量热点区域(高—高集聚区)主要位于浙西北中山丘陵、浙南山地与浙东丘陵,冷点区域(低—低集聚区)主要位于浙北平原、金衢盆地以及温台平原。

(3)基于地理探测器模型的因子探测和交互作用探测分析表明,地形(高程、坡度)是影响浙江省生境质量的主要因素,气象因素(年降水量、平均气温)对其影响程度相对较低,从时间尺度来看,植被因素(NPP、NDVI)的贡献度在逐渐扩大。浙江省生境质量空间分异是自然因子与社会经济因子协同增强共同作用的结果。

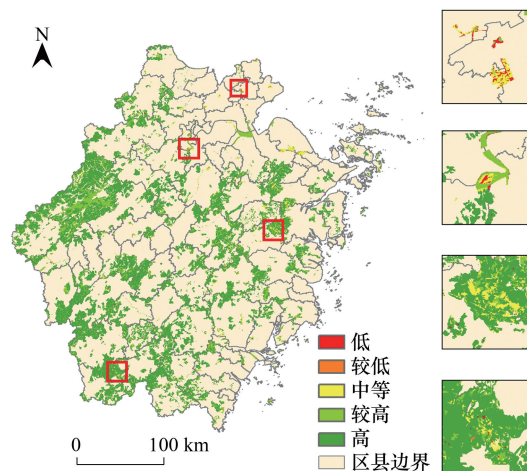


图7 浙江省生态红线的生境质量等级分布及典型区概况

Fig.7 Distribution of habitat quality grades of ecological red line in Zhejiang Province and overview of typical areas

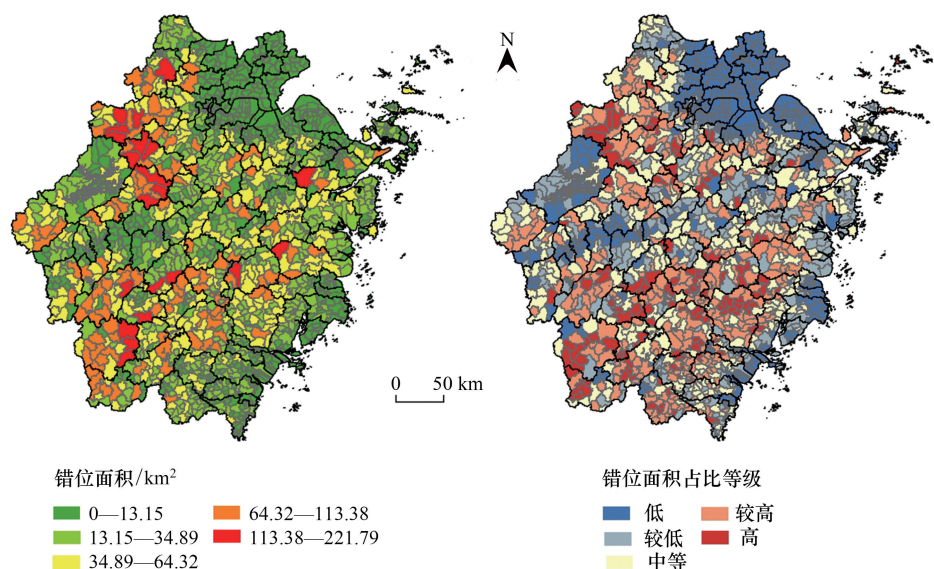


图8 浙江省生境质量高等级区与生态红线的空间关系分析

Fig.8 Analysis of the spatial relationship between the high-grade habitat quality areas and the ecological red line in Zhejiang Province

(4)浙江省生态红线内生境质量均值整体较高,且相对稳定;不同红线类型中,地质公园整体生境质量最高,湿地公园相对较低;红线内或周边存在的乡镇、农田会导致生境质量的下降;高生境质量区域与生态红线的错位面积呈现明显的空间分异特征,浙江省西南、西北部山区较多,而北部、中部以及东部较少,应结合实地情况采取差异化红线调整策略。

3.2 讨论

生境质量不仅是生物多样性维护与生态系统稳定的基础前提,更是影响区域可持续发展与维系人类福祉的重要因素^[11,31]。传统的综合生态指标方法适配于小范围内的生境质量评估,本研究在全域、全要素统筹的

价值取向,采用大尺度、动态性、空间化的评估范式,为生态环境评估与决策提供全局性视角。根据研究结论,未来浙江省生态红线管控应当重点把握以下三点:首先,建立差异化的生态红线管制制度,尤其是对于杭州、宁波等中心城市,生态红线内开发建设活动管理应严格审批。其次,坚持以自然修复为主、人工干预为辅的生态保护修复,持续提升植被覆盖度和净初级生产能力,降低人类活动对自然格局的改造。最后,强化自然保护地体系建设,维护生物多样性网络与生态安全格局。此外,研究的不足与未来可改进的方向主要包括三个方面:其一,尽管 InVEST 模型的应用已相对广泛^[17],但是其中关键参数的确定大多基于前人研究,后续应结合实地调研的数据来优化胁迫因子的参数设置,提高区域生境质量评估的精确性;其二,生态保护成效评估是当前国际生态学领域的前沿问题,生态红线的划定管控、成效评估与可持续性因而受到国内外的广泛关注,因此,构建多维生态红线政策评估框架是优化红线布局的有力抓手^[38],本研究对生态红线的生境质量时空演变与典型区域展开分析,后期可结合其他生态系统服务开展更为系统性的研究;其三,目前生态红线管控遵循“自上而下”的治理逻辑,而布局优化实践中采用“自下而上”的调整策略,下一步研究可以从尺度理论的视角切入^[39],从功能空间、实体空间、管理空间三个维度厘清生境质量优化生态红线布局的治理模式^[40],并且可以从更为宏观的尺度如城市群尺度^[41]考虑跨区域生态红线布局优化的路径。

参考文献 (References):

- [1] Rands M R W, Adams W M, Bennun L, Butchart S H M, Clements A, Coomes D, Entwistle A, Hodge I, Kapos V, Scharlemann J P W, Sutherland W J, Vira B. Biodiversity conservation: challenges beyond 2010. *Science*, 2010, 329(5997): 1298-1303.
- [2] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. *生态学报*, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [3] Haddad N M, Brudvig L A, Clobert J, Davies K F, Gonzalez A, Holt R D, Lovejoy T E, Sexton J O, Austin M P, Collins C D, Cook W M, Damschen E I, Ewers R M, Foster B L, Jenkins C N, King A J, Laurance W F, Levey D J, Margules C R, Melbourne B A, Nicholls A O, Orrock J L, Song D X, Townshend J R. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 2015, 1(2): e1500052.
- [4] United Nations. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015.
- [5] 方创琳. 中国新型城镇化高质量发展的规律性与重点方向. *地理研究*, 2019, 38(1): 13-22.
- [6] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.
- [7] 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.
- [8] 荣月静, 张慧, 王岩松. 基于 Logistic-CA-Markov 与 InVEST 模型对南京市土地利用与生物多样性功能模拟评价. *水土保持研究*, 2016, 23(3): 82-89.
- [9] Goldstein J H, Caldarone G, Duarte T K, Ennaanay D, Hannahs N, Mendoza G, Polasky S, Wolny S, Daily G C. 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.
- [10] 郑群明, 申明智, 钟林生. 普达措国家公园生态安全格局构建. *生态学报*, 2021, 41(3): 874-885.
- [11] 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.
- [12] Goertz J W. The influence of habitat quality upon density of cotton rat populations. *Ecological Monographs*, 1964, 34(4): 359-381.
- [13] Carter M C, Dixon F G. Habitat quality and the foraging behaviour of Coccinellid Larvae. *Journal of Animal Ecology*, 1982, 51(3): 865-878.
- [14] 欧阳志云, 刘建国, 肖寒, 谭迎春, 张和民. 卧龙自然保护区大熊猫生境评价. *生态学报*, 2001, 21(11): 1869-1874.
- [15] 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*, 2020, 31(12): 4080-4090.
- [16] 吴健生, 曹祺文, 石淑芹, 黄秀兰, 卢志强. 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.
- [17] 谢余初, 巩杰, 张素欣, 马学成, 胡宝清. 基于遥感和 InVEST 模型的白龙江流域景观生物多样性时空格局研究. *地理科学*, 2018, 38(6): 979-986.
- [18] 侯红艳, 戴尔阜, 张明庆. InVEST 模型应用研究进展. *首都师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 39(4): 62-67.
- [19] 包玉斌, 刘康, 李婷, 胡胜. 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.
- [20] 戴云哲, 李江风, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. *地理科学进展*, 2018, 37(10): 1340-1351.

- [21] 刘智方,唐立娜,邱全毅,肖黎姗,许通,杨丽. 基于土地利用变化的福建省生境质量时空变化研究. 生态学报, 2017, 37(13): 4538-4548.
- [22] 王瑞,安裕伦,王培彬,马良瑞. 贵州省生物多样性热点地区研究. 水土保持研究, 2014, 21(6): 152-157.
- [23] 赵晓同,王建,苏军德,孙巍,晋王强. 基于 InVEST 模型和莫兰指数的甘肃省生境质量与退化度评估. 农业工程学报, 2020, 36(18): 301-308.
- [24] 梁晓瑶,袁丽华,宁立新,宋长青,程昌秀,王翔宇. 基于 InVEST 模型的黑龙江省生境质量空间格局及其影响因素. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2020, 56(6): 864-872.
- [25] 浙江省人民政府. 自然地理. (2021-03-10) [2021-03-12]. http://www.zj.gov.cn/art/2021/3/10/art_1229398249_59024806.html.
- [26] 王良杰,马帅,许豫昌,朱殿珍,张金池. 基于生态系统服务权衡的优先保护区选取研究——以南方丘陵山地带为例. 生态学报, 2021, 41(5): 1716-1727.
- [27] 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.
- [28] Aneseyee A B, Noszczyk T, Soromessa T, Elias E. 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(7): 1103.
- [29] 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.
- [30] Sharp R, Douglass J, Wolny S. InVEST User Guide. [2021-03-12]. <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html>.
- [31] 黄鑫,程文仕,李晓丹,杨昌裕,邢秀为. 甘肃省生境质量变化的图谱特征. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3131-3140.
- [32] Xu L T, Chen S S, Xu Y, Li G Y, Su W Z. Impacts of land-use change on habitat quality during 1985-2015 in the Taihu Lake Basin. *Sustainability*, 2019, 11(13): 3513.
- [33] Zhu C M, Zhang X L, Zhou M M, He S, Gan M Y, Yang L X, Wang K. Impacts of urbanization and landscape pattern on habitat quality using OLS and GWR models in Hangzhou, China. *Ecological Indicators*, 2020, 117: 106654.
- [34] 张华,韩武宏,宋金岳,李明. 祁连山国家公园生境质量时空演变. 生态学杂志, 2021, 40(5): 1419-1430.
- [35] 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.
- [36] 黄木易,岳文泽,方斌,冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [37] 刘春芳,王川,刘立程. 三大自然区过渡带生境质量时空差异及形成机制——以榆中县为例. 地理研究, 2018, 37(2): 419-432.
- [38] 江波,王晓媛,杨梦斐,蔡金洲. 生态系统服务研究在生态红线政策保护成效评估中的应用. 生态学报, 2019, 39(9): 3365-3371.
- [39] 张衍春,胡国华,单卓然,李焯. 中国城市区域治理的尺度重构与尺度政治. 地理科学, 2021, 41(1): 100-108.
- [40] 陈阳,岳文泽,张亮,夏皓轩,候勃. 国土空间规划视角下生态空间管制分区的理论思考. 中国土地科学, 2020, 34(8): 1-9.
- [41] 张衍春,唐承辉,许顺才,岳文泽. 中国城市群空间规划的历史演化与空间逻辑——基于新国家空间视角. 城市规划, 2021, 45(5): 21-29.