

DOI: 10.5846/stxb201710101800

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): - .

Liu C F, Wang C. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the Loess Hilly Region based on land use change: a case study in Yuzhong county. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): - .

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

刘春芳^{1,2,*}, 王 川^{1,2}

1 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

2 甘肃省土地利用与综合整治工程研究中心, 兰州 730070

摘要: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环节,评估土地利用变化引起的生境质量时空演变可为区域生态保护和土地管理提供科学依据。以典型黄土丘陵区县域——榆中县为例,基于 ArcGIS 平台和 InVEST 模型探讨了该县 1995、2005 和 2015 年生境质量空间格局及其演变特征。主要结论如下:①研究区土地类型和景观格局变化明显,主要土地利用变化是耕地转向建设用地和林地,以及草地和耕地之间的相互转变,这些变化导致景观异质性增强和破碎度上升。②生境质量空间格局一直表现为“南部高、中部居中、北部低”的态势。生境质量上升区域主要在北部,原因是“退耕还林”及“生态北山”工程的实施使得林地面积增加,下降区域主要在中部,主要是由建设用地扩张占用耕地造成的。③生境质量热点以及“H-H”型聚集区主要位于南部山区,而冷点和“L-L”聚集区主要位于北部黄土丘陵区,2015 年生境质量空间集聚程度较 1995 年有所增强,“H-H”聚集区增加 0.68%，“L-L”聚集区增加 0.67%。论文对该类型区域生境质量优化也提出了相应的政策建议。

关键词:土地利用变化;InVEST 模型;生境质量;时空格局;榆中县

Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in the Loess Hilly Region based on land use change: a case study in Yuzhong county

LIU Chunfang^{1,2,*}, WANG Chuan^{1,2}

1 Geography and Environment College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

2 Gansu Engineering Research Center of Land Utilization and Comprehension Consolidation, Lanzhou 730070, China

Abstract: Habitat quality is an important representation and reflection of the level of ecosystem services, as well as the key link in guaranteeing regional ecological security and improving human welfare. Assessment of the temporal and spatial changes in habitat quality caused by land use change can provide a scientific basis for a region's ecological protection and land management, especially in ecologically fragile areas. For a long time, the Loess Hilly Region has been a typical ecologically vulnerable area in China, and since the 1990s the social and economic conditions of Chinese counties have undergone rapid development. Considering these factors, we used a typical Loess Hilly Region county, Yuzhong county in Gansu province, as an example, and based on ArcGIS platform and the InVEST model, using the land use data of Yuzhong county in 1995, 2005, and 2015, studied for the first time the changes in land use, landscape patterns, and habitat quality from 1995 to 2015; we then analyzed the response of habitat quality to land use change and landscape pattern change, using

基金项目:国家自然科学基金项目(41771130)

收稿日期:2017-10-10; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuchunfang@nwnu.edu.cn

hot spot analysis and LISA clustering analysis to study and identify the spatial distribution, clustering type, and evolution characteristics of habitat quality of the Loess Hilly Region in 1995, 2005, and 2015. The main conclusions are the following: 1) During the study period, both the land use type and landscape pattern changed obviously, and the main land use changes in the study area were that cultivated land was converted to construction land and forest, and there was mutual conversion between grassland and cultivated land; these changes led to an improvement in landscape heterogeneity and the degree of fragmentation; 2) The spatial distribution of habitat quality was: high in the southern areas, medium in the middle areas, and low in the northern areas. During the study period, the area in which habitat quality improved was mainly in the north of the county because of the implementation of the “Grain for Green Project” and the “Ecological Beishan” project; the area of deterioration was primarily located in the center of the county, mainly due to the expansion of construction land, which occupied the farmland and led to an increased degree of fragmentation and a decline in connectivity; 3) The hot spot areas and areas of “High-High” habitat quality type clusters were mainly located in the southern mountain area, while the cold spot areas and areas of “Low-Low” habitat quality type clusters were mainly located in the Loess Hilly Region in the north. Compared with 1995, the degree of habitat quality clustering in 2015 was enhanced: the areas of both the “High-High” type clustering and the “Low-Low” type clustering increased from 1995; the “High-High” type clustering area increasing by 0.68% and the “Low-Low” type clustering area increasing by 0.67%. The paper also puts forward policy suggestions for the optimization of habitat quality in similar areas.

Key Words: land use change; InVEST model; habitat quality; spatial and temporal pattern; Yuzhong county

工业化、城市化的快速增长与资源配置流动性的不断增强对区域土地利用空间结构产生了深远影响,同时也对区域生境产生了较大冲击。土地利用变化会改变区域生境的结构与组成要素,随之对生境斑块之间的物质流、能量流循环过程产生影响,进而改变了区域生境的生产能力和服务功能^[1]。生境质量是指在一定的时间和空间中生态系统提供适宜个体与种群持续发展与生存条件的能力,是对人类生存繁衍、生产生活的适宜程度,是一切生态系统功能和服务的前提和基础,更是人类福祉提升的关键环节^[2-3]。评估、模拟和预测生境质量的状态、趋势及其对人类福祉的影响,是当前国际生态系统服务研究领域的重要任务,也是国际生态学与地理学领域研究的热点议题^[4-7]。

早期的研究侧重于对野生动物生境质量的评价,以及人类活动对生境质量的影响。如 Goertz 等^[8]通过草原棉鼠种群数量来评价生境质量的高低, Thiel^[9]探讨了乡村道路密度与狼的生境适宜性的关系, Engel^[10]研究了人类活动对鱼类生境结构和功能的影响。随着国际地圈生物圈计划(IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划(IHDP)、世界气候研究计划(WCRP)等国际项目将土地利用/覆被变化(LUCC)作为全球变化的核心研究问题,国内外学者开始广泛关注土地利用变化对区域生境质量的影响。学者们探讨了土地利用、气候变化与生物多样性之间关系,指出了土地转化和气候变化已经对生物多样性和相关生态系统服务产生重大影响。农用地面积的增长会使区域生境受损,也会引起生境破碎化并增加对周围自然或半自然生境的农业化学品的投入^[11]。许多研究也关注了土地利用变化对野生动物生境的影响,如 Jetz 等^[12]分析了在未来土地利用变化下鸟类可能遭受因气候变化和土地转换而带来的危害。Otto^[13]的实证研究表明土地利用的变化降低了蜜蜂对生境的适应性。Sieber^[14]则研究了苏联解体后全国土地利用变化对大型哺乳动物的栖息地生境的影响。2000 年以来,国内学者针对土地利用变化产生的自然生境影响进行了实证研究^[15-16],近几年开始关注区域、流域等尺度土地利用变化所带来的生境质量效应^[17-18]。目前对生境质量的研究方法主要分两类:一是基于模型的评价方法,如 HIS 模型^[19]、InVEST 模型^[20]、SolVES 模型^[21]等;二是基于指标体系的方法^[22-23]。总体来看,早期的生境质量研究以单一时点的野外动植被调查数据为基础,建立包括生物丰度指数、植被覆盖度等生境质量评价指标系统和评分标准测算生境质量指数,对区域或群落生境质量水平进行静态研究。由于数据积累及研究方法等的限制,对生境质量动态变化及其空间集聚状况关注较少。近些年来,数理模型方法以

及 3S 技术的应用,学者们开始关注生境质量的时空差异,尤其是 InVEST 模型的使用,对国家、省、流域等较大尺度生境质量的研究逐渐增多。

黄土丘陵区作为我国典型的生态脆弱区,集中了大量发展需求迫切的贫困人口,社会经济发展与生态保护之间的矛盾非常突出^[24],1990 年以来,中国县域经济开始得到较快发展,其生境质量变化也最为显著和典型,而已有研究对县域尺度的关注较少。基于此,本文以榆中县为例,通过对该县 1995—2015 年生境质量空间格局及演变特征进行分析,探索了生境质量的变化规律及其对黄土丘陵区土地利用变化的响应。这一方面能丰富黄土丘陵区生境质量变化的理论探索,拓展县域尺度的生境质量研究;另一方面也能为黄土丘陵区生态安全格局构建和空间优化提供重要的理论基础与实践指导。

1 研究区概况

榆中县地处黄土高原西部、甘肃省中部、兰州市东郊(103°49′15″—104°34′40″E,35°34′20″—36°26′30″N),总面积 3308.64km²,海拔 1363—3670m,总人口 44.45 万(2015 年)。该县由地势地貌迥异的 3 个区域组成(图 1):南部为高寒石质山区,气候湿润,最高海拔 3670m,位于西南部的兴隆山自然保护区是国家级自然保护区,区内植被茂密,是全县的生态屏障;北部为干旱少雨、植被稀疏、沟壑纵横的黄土丘陵区,最高海拔 2495m;中部是川塬河谷区,地势平坦、交通便利、光照充足、水源丰富,是县内主要农业区,县城也位于该区,海拔介于 1363—2000m。该县属于典型的温带干旱、半干旱大陆性气候,年均气温 6.7℃,年均降雨量区域差异明显,从南部的 500mm 左右向北逐渐减少到 200mm 左右,降雨量季节分配不均,70%集中在 7—9 月,蒸发量 1350mm 左右。

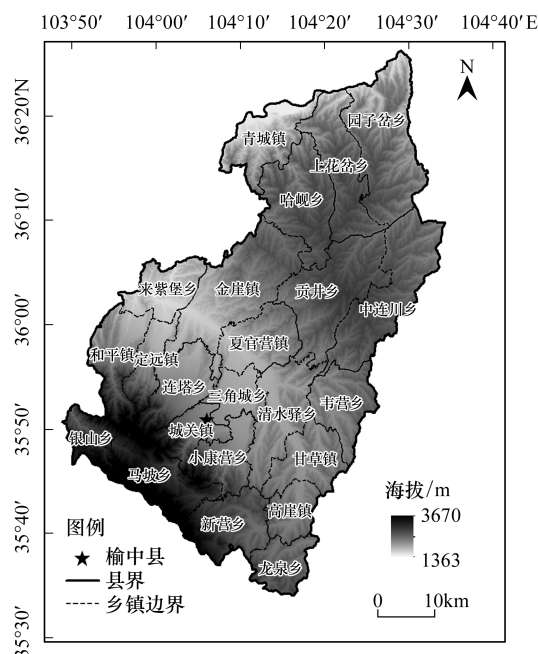


图 1 研究区位置及高程图

Fig.1 Location and elevation of study area

2 数据获取与研究方法

2.1 数据获取与预处理

选择 1995、2005 和 2015 年 3 个时段,对研究区的生境质量空间格局及演变特征进行分析。土地利用数据源于美国地质调查局(USGS)对地观测资源与科学中心提供的空间分辨率为 30m、秋季无云覆盖的 Landsat TM 遥感数据(行列号 130/35)(<http://glovis.usgs.gov/>)。为提高解译精度,基于 2015 年榆中县土地利用变更调查数据,首先解译 2015 年数据,再参照 2015 年解译结果对 1995 和 2005 年影像进行解译,统一采用 WGS_1984 坐标系,通过野外实地考察和谷歌地球高清影像验证,三期分类数据判读精度优于 93%。参考土地利用现状分类标准(GB/T 21010—2007)及研究区土地利用特点建立二级分类体系(表 1)。数据处理和图形生成通过 ArcMap 10.2 和 GeoDa 1.10 软件共同实现。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化及景观格局变化分析

首先基于 ArcGIS 平台分析 1995—2015 年土地转移变化,进一步利用 Fragstats 软件计算景观指数研究榆中县景观格局特征和演变趋势。通常,景观中的斑块大小、连通性及景观多样性等对生物多样性及各种生态过程都有重要影响^[25]。结合类似研究^[17-18,20],考虑黄土丘陵区土地利用斑块数量大、破碎度较高等特点,本文选取斑块数量、破碎度等七个相关指数来度量该区域的景观变化(表 2)。利用 Fragstats 4.2 软件,可以计算

出除破碎度以外的所有指标。破碎度则是在已有斑块数目的基础上,利用公式(1)计算得到^[25]:

$$FN = (NP - 1)/NC \quad (1)$$

式中, FN 为研究区景观破碎度; NP 为景观中各类斑块总数; NC 为景观总面积。

表 1 土地利用分类体系

Table 1 Land use classification

一级地类 Class 1	二级地类 Class 2	一级地类 Class 1	二级地类 Class 2
耕地 Cultivated land	水浇地 旱地	水域 Water	水库坑塘 内陆滩涂 河流
林地 Forest	有林地 灌木林地 其他林地	建设用地 Construction land	城镇 农村居民点 公路 铁路 工矿用地
草地 Grassland	天然草地 其他草地	未利用地 Unused land	裸地
园地 Garden	果园		

表 2 景观指数及其生态学含义

Table 2 The landscape indices and their ecological meaning

景观指数 Landscape indices	生态学含义 Ecological meaning
斑块数量 NP	景观中斑块总数,值越大表明景观异质性越高,同时景观破碎度也越高
平均斑块面积 AREA_MN	景观总面积与斑块数量的比值,值越大景观破碎度越低
形状指数 SHAPE	用来反映各斑块形状的复杂程度,其值越接近 1 表示斑块形状越规则、集聚程度越高
内聚力指数 COHESION	用来测度同一类型斑块的连通度,其值越高表示斑块集聚度越高
蔓延度指数 CONTAG	表征景观类型的蔓延程度,值越高表明景观中存在某种连通性较好的斑块
香农多样性指数 SHDI	反映景观的丰富度,描述不同景观面积大小的均匀程度,值越大表明各类斑块在景观中分布越均衡
破碎度 FN	表征景观被分割的程度,反映景观空间结构的复杂性,可在一定程度体现人类对景观的干扰度

NP: Number of Patches; AREA_MN: Mean of Patch Area; SHAPE: Shape Index; COHESION: Cohesion Index; CONTAG: Contagion Index; SHDI: Shannon's Diversity Index; FN: Fragmentation Index

2.2.2 基于 InVEST 模型的生境质量评估

InVEST 模型中的生境是指被物种占有并可为其提供资源和生存及繁育的空间^[26]。模型运行需要设定威胁源和生境类型,在威胁源设定时考虑到建设用地是所有土地利用类型中人类活动较为集中的地类,它会对区域生物多样性造成威胁,因此将所有建设用地设为威胁源,而耕地作为半人工半自然且经常受到人为干扰的地类,也被设定为威胁源,其余不同的地类代表了不同的生境类型。模型结合生境的敏感度和外界威胁强度来计算生境质量。首先计算生境退化度:

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

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{线性衰减}) \quad (3)$$

$$i_{rxy} = \exp \left(\frac{-2.99 d_{xy}}{d_{rmax}} \right) \quad (\text{指数衰减}) \quad (4)$$

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; W_r 为威胁源 r 的权重; Y_r 为威胁源的栅格数; r_y 为栅格 y 的胁迫值; i_{rxy} 为栅格 y 的胁迫值 r_y 对栅格 x 的胁迫水平; β_x 为威胁源对栅格 x 的可达性(受法律保护的区域为 0,其余区域为 1); S_{jr} 为生境类型 j 对威胁源 r 的敏感度; d_{xy} 为栅格 x 与栅格 y 的直线距离; d_{rmax} 为

威胁源 r 的最大胁迫距离。

在此基础上计算生境质量:

$$Q_{xj} = H_j \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right] \tag{5}$$

式中, Q_{xj} 为生境类型 j 中 x 栅格的生境质量指数; H_j 为生境类型 j 的生境适宜度, 值域为 $[0, 1]$; k 为半饱和常数, 取最大生境退化度(由模型运算一次得到)的一半; z 为归一化常量, 通常设为 $2.5^{[26]}$ 。

由于模型中相关参数需要根据研究区具体情况进行调整, 因此在考虑模型使用说明基础之上, 向熟悉该区域的中国科学院寒区旱区环境与工程研究所、兰州大学、甘肃农业大学、榆中县国土资源局、榆中县环保局等单位的 25 位相关领域专家发放调查问卷, 根据研究区的实际情况对威胁源的胁迫距离和权重、各土地利用类型的生境适宜度以及对各类威胁源的敏感度进行打分, 采用德尔菲法(Delphi)综合确定各项参数最终值(表 3、表 4)。

表 3 威胁源及其最大威胁距离、权重及衰减类型
Table 3 Threat and its maximum effect distance, weight and spatial decay type

威胁源 Threats	最大威胁距离/km Maximum distance of influence	权重 Weight	空间衰减类型 Spatial decay type
工矿用地 Industrial and mining land	4	0.5	指数
城镇 Town	5	1	指数
村庄 Village	3	1	指数
耕地 Cultivated land	1	0.15	线性
铁路 Railway	2	0.4	线性
公路 Road	3	0.6	线性

表 4 生境适宜度及其对不同威胁源的相对敏感程度
Table 4 Habitat suitability degree and its relative sensitivity to each threat

生境类型 Habitat type	生境适宜度 Habitat suitability	村庄 Village	工矿用地 Industrial and mining land	城镇 Town	铁路 Railway	公路 Road	耕地 Cultivated land
有林地 Arbor forest land	1	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.3
灌木林地 Shrub land	0.7	0.7	0.8	0.8	0.6	0.5	0.3
其他林地 Other forest land	0.6	0.6	0.5	0.7	0.7	0.8	0.2
天然草地 Nature grassland	0.7	0.7	0.6	0.7	0.4	0.4	0.3
其他草地 Other grassland	0.4	0.7	0.6	0.7	0.4	0.4	0.5
河流 River	0.8	0.6	0.8	0.8	0.4	0.6	0.3
水库坑塘 Reservoir and pond	0.7	0.5	0.7	0.8	0.4	0.5	0.5
内陆滩涂 Inland beach	0.6	0.7	0.7	0.8	0.5	0.6	0.6
旱地 Dry land	0.2	0.7	0.5	0.7	0.4	0.5	0.3
水浇地 Irrigable land	0.3	0.8	0.6	0.8	0.6	0.6	0.2
果园 Orchard	0.4	0.7	0.5	0.7	0.5	0.5	0.3
裸地 Bare land	0	—	—	—	—	—	—

2.2.3 生境质量热点分析及空间自相关分析

研究局部区域聚类分布特征的方法称为热点分析, 可用来表示生境质量在空间分布上是否存在统计上显著的高值和低值。基于 ArcGIS 平台, 本文使用 Getis-Ord G^* 指数来刻画榆中县生境质量冷热点^[27]。该统计量通过计算一个栅格的生境质量值及其周围栅格的生境质量值的总和与所有栅格生境质量值的总和进行比较, 用来分析生境质量在局部空间上的集聚情况。当 G^* 值显著为正时, 生境质量呈高值集聚, 为热点区域, 当 G^* 值显著为负时, 生境质量呈低值集聚, 为冷点区域^[28], 其中 99% 置信水平上的 G^* 值对应的区域视为为

热点和冷点,95%置信水平上的 G^* 值对应的区域为次热点和次冷点。计算公式为^[27]:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{x} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{ij})^2]}{n-1}}} \quad (6)$$

式中, x_j 为栅格 j 的生境质量; w_{ij} 为栅格 i 与栅格 j 的空间权重矩阵(通过 queens 准则计算空间权重矩阵),若 i 与 j 相邻,其空间权重为 1,否则为 0; $\bar{x}$ 为生境质量平均值; S 为生境质量标准差; n 为栅格总数。

空间自相关是指地理事物的某一属性在不同空间位置上的相关程度,分为全局自相关和局部自相关。生境质量在空间分布上会表现出一定的规律性,全局自相关可用于描述生境质量在整个区域上是否有集聚效应,本文采用全局 Moran's I 指数来估计,其值域为 $[-1, 1]$, >0 为正相关且越接近 1 集聚程度越高, <0 为负相关,等于 0 表示随机分布^[29]。局部空间自相关分析可以用来衡量观测单元生境质量与周边单元生境质量的差异程度及其显著性。本文采用 Anselin^[30] 提出的空间关系局域指标 LISA (Local indicators of spatial associations) 来识别榆中县每个栅格的生境质量与其周围栅格生境质量的局部关联和差异,揭示生境质量在空间上的集聚和离散特征,进而为土地利用优化与生境质量提升提供决策依据。通过 LISA 集聚分析可知道生境质量空间集聚或离散的具体位置,它将生境质量的空间格局分为 5 种类型,即 H-H(高高集聚,表示一个生境质量高值被高值包围)、H-L(高低离散,生境质量高值被低值包围)、L-H(低高离散,生境质量低值被高值包围)、L-L(低低集聚,生境质量低值被低值包围)和 NS(不显著,不存在显著的空间集聚现象),其中, H-H 和 L-L 为正相关类型, H-L 和 L-H 为负相关类型,详细计算原理请参见文献[30]。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

1995—2015 年间,草地、耕地和林地一直是榆中县的主要地类,合计占土地总面积的 80% 以上,是该县景观基质的重要构成。20 年来,变化较大的地类是耕地、林地和建设用地。1995—2005 年,耕地减少 4356 hm^2 , 减幅为 3.32%; 林地增加 4041 hm^2 , 增幅为 13.02%; 建设用地增加 1361 hm^2 , 增幅为 9.98%。2005—2015 年,耕地减少 1169 hm^2 , 建设用地增加 1694 hm^2 , 林地增加 466 hm^2 。总体来看,20 年间耕地和草地分别减少 5525、1872 hm^2 , 减幅为 4.47% 和 1.37%; 建设用地和林地分别增加 3055、4507 hm^2 , 增幅为 29.74% 和 14.5%; 园地减少 201 hm^2 , 裸地和水域变化不大。可见,建设用地急剧扩张,林地逐渐增加和耕地持续减少是榆中县土地利用变化的主要特点。

构建土地利用转移矩阵可以进一步解释 20 年来榆中县土地利用转移情况(表 5)。1995—2015 年,耕地向建设用地和林地分别转移了 3150 hm^2 和 3948 hm^2 。这说明耕地是榆中县建设用地增加的重要来源,且“退

表 5 1995—2015 年榆中县土地利用类型转移矩阵/ hm^2

Table 5 Transition matrix of land use of Yuzhong County from 1995 to 2015

年份 Year	土地类型 Land type	2015						
		耕地 Cultivated land	园地 Garden	林地 Forest	草地 Grassland	建设用地 Construction land	水域 Water	裸地 Bare land
1995	耕地 Cultivated land	124226	111	3948	117	3150	0	0
	园地 Garden	56	539	0	0	270	0	0
	林地 Forest	235	0	30715	0	77	0	0
	草地 Grassland	1004	0	705	134297	438	20	322
	建设用地 Construction land	476	14	166	258	12568	34	25
	水域 Water	29	0	0	8	78	2813	0
	裸地 Bare land	0	0	0	234	15	0	12560

耕还林”工程也取得了较好的效果。研究期内有约 87% 的林地较为稳定,仅与耕地、建设用地和草地发生了较少数量的转移。草地与其他地类转换较为频繁,其中主要向耕地转移了 1004hm²,向林地转移了 705hm²,是因为 2005 年以来,榆中县实施了一系列的土地开发项目以及“生态北山”项目。水域和裸地的变动均较小。总体来看,1995—2015 年榆中县各类土地均发生一定程度的变化,主要表现为耕地转向林地和建设用地,以及草地转向耕地和林地。

3.2 景观格局变化分析

在类型水平上分析表明:研究期内草地和耕地的 NP、AREA_MN 和 COHESION 均较大,说明草地和耕地是榆中县的优势景观。草地的 NP 和 SHAPE 逐渐增加而 AREA_MN 减小,表明破碎化程度增加;林地的 NP、AREA_MN 和 SHAPE 增加而 COHESION 减小,表明林地面积增加但形状趋于复杂化,集聚程度有所下降,这是由于 2000 年以来各乡镇陆续实施“退耕还林”工程的结果。建设用地的 NP、AREA_MN 和 COHESION 均逐渐增大,反映了 20 年来建设用地呈集聚性扩张趋势。水域和园地的 NP、AREA_MN 和 COHESION 均较小,说明榆中县水域和园地数量较少且分散。3 个时期草地、耕地和林地的 COHESION 均较高,说明这 3 种地类分布较为集中。

景观水平上分析结果(表 6)表明:1995—2015 年,榆中县 NP 持续增加,AREA_MN 持续下降,表明景观趋于破碎化,FN 指数的增加也进一步验证了这一特征;CONTAG 在研究期内的降低表明景观中斑块数目增加、集聚度下降,同时也说明这一时期榆中县主要地类的连通度有所下降,这与 NP 增加和 AREA_MN 减小是一致的;1995—2015 年,SHDI 从 1.27 增加到 1.31,表明景观中各组分面积差异减小,景观异质性增强,这主要是由于耕地、草地面积减少的同时林地和建设用地面积增加,从而使得这些主要地类之间的面积差异减小导致的。

表 6 景观水平上景观格局指数

Table 6 Landscape indexes of landscape level

年份 Year	斑块数量 NP/个	平均斑块面积 AREA_MN/ hm ²	蔓延度 CONTAG/%	香农多样性指数 SHDI	破碎度 FN
1995	3481	94.66	41.75	1.27	0.01056
2005	3598	92.87	40.54	1.29	0.01077
2015	3628	91.58	40.18	1.31	0.01092

3.3 生境质量时空格局分析

3.3.1 生境质量时空格局变化分析

运行 InVEST 模型,得到榆中县 1995—2015 年生境质量空间分布,为便于比较生境质量的变化情况,在 ArcGIS 中使用自然断点法将其分类为高(I)、较高(II)、中(III)、较低(IV)和低(V)5 个等级(图 2),统计 3 个时期各等级的栅格比例及生境质量平均值(表 7),并结合土地利用变化及景观指数变化来分析生境质量对 LUCC 的响应。

表 7 各等级生境比例及生境平均值

Table 7 Percentage of each habitat level and average value of habitat quality

等级 Level	分值区间 Value interval	1995 年		2005 年		2015 年	
		比例 Proportion/%	生境质量平均值 Average value of habitat quality	比例 Proportion/%	生境质量平均值 Average value of habitat quality	比例 Proportion/%	生境质量平均值 Average value of habitat quality
I	0.8—1	4.63		4.61		4.56	
II	0.5—0.8	8.95		10.17		10.32	
III	0.3—0.5	38.57	0.3523	38.26	0.3555	37.81	0.3530
IV	0.1—0.3	39.83		38.6		38.04	
V	0—0.1	8.02		8.36		9.28	

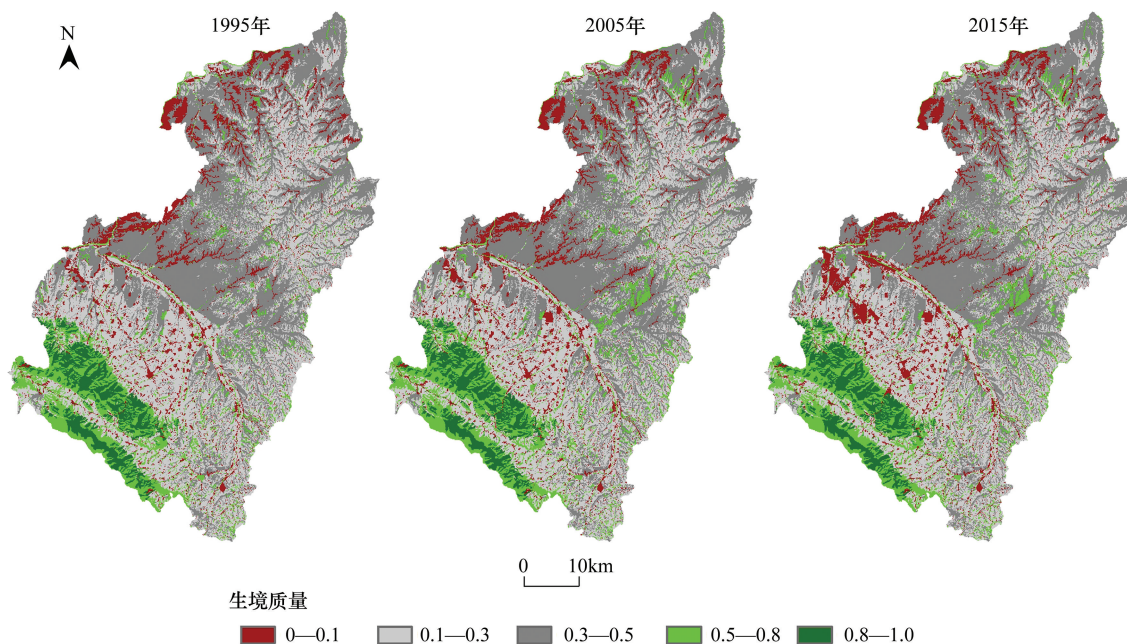


图2 1995—2015年榆中县生境质量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of habitat quality of Yuzhong county from 1995 to 2015

从空间格局来看(图2),全县生境质量整体表现为南部高、中部居中、北部低的态势。生境质量分布与土地利用类型分布大体一致,林地和天然草地分布区域的生境质量较高,裸地和旱地生境质量较低。全县以Ⅲ等级和Ⅳ等级生境为主,其中Ⅲ等级分布在中部和北部,Ⅳ等级主要分布在中部,土地类型以耕地和荒草地为主。Ⅰ等级和Ⅱ等级生境主要分布在南部山区,该区域有大量的林地和天然草地,并且是兴隆山自然保护区所在地,受到人为干扰较小,生境质量普遍较高。Ⅴ等级生境在北部有较大面积的分布,主要土地类型是裸地和农村居民点;在中部也有分布,主要的土地类型为居住地及工矿用地。

从时间尺度上看(表7),1995—2005年,Ⅰ等级变化较小,Ⅱ等级斑块数量有明显的上升,其比例从8.95%上升到10.17%。主要原因是榆中县自2000年以来大力推进“退耕还林”政策,尤其是“生态北山”等工程项目的具体实施,促使耕地、荒草地等较低等级生境向林地这一高等级生境转化。Ⅲ等级和Ⅳ等级斑块比例则分别下降0.31%和1.23%,Ⅴ等级的斑块增加0.34%,究其原因:一方面可从土地利用变化来解释,1995—2005年建设用地增加1361hm²,其来源主要是耕地和园地。建设用地占用耕地、园地不仅会导致生境受损还会胁迫周围的生境,此外,有少部分荒草地退化为裸地也导致了生境质量下降;另一方面,从景观指数来看,这一时期草地和耕地斑块数目分别增加8个和32个,平均斑块面积分别减小2.6hm²和1.2hm²,景观蔓延度指数下降1.21%,生境斑块之间分离度增大。同时,建设用地的斑块数目增加在一定程度上也加剧了威胁源对生境的胁迫水平,从而导致低等级生境斑块增加。2005—2015年,生境变化与上一阶段相似,表现为Ⅱ、Ⅴ等级的斑块增加,Ⅲ、Ⅳ等级生境减少,其中Ⅱ等级增加0.15%,增幅较上一阶段有所下降。这主要是因为该时期林地面积增幅下降且平均斑块面积有轻微下降,Ⅴ等级斑块增加0.92%。这一时期建设用地的增幅较上一时期更大,从而对生境的胁迫作用也更加强烈。

总体来看,全县1995、2005和2015年平均生境质量分别为0.3523、0.3555和0.3530,表明该县生境质量状况略有提升且呈先升后降的变化特征,由于组成该县景观基质的草地和耕地的比例较为稳定,全县整体生境变化较小。1995—2005年,在“退耕还林”的推动下林地面积大幅增加,而2005—2015年建设用地增加18.01%,增幅较大,且斑块数和平均斑块面积分别增加23个和3.3hm²,而林地面积增幅较小,仅为1.33%。1995—2015年,榆中县Ⅰ等级斑块比例变化较小,“退耕还林”、“生态北山”等工程的实施促使林地平均斑块面积增大、集聚度增加,进而使得Ⅱ等级生境斑块增加1.37%。Ⅲ、Ⅳ等级生境分别减少0.76%和1.79%,Ⅴ

等级生境增加 1.26%,究其原因,该时期内有 3150hm²耕地转为建设用地,建设用地斑块数的增加,势必对生境斑块造成胁迫并使生境趋于破碎化。

为更加深入了解生境质量变化的时空特征,使用 ArcGIS 得到生境质量变化图(图 3)。从图 3 可看出,1995—2005 年,榆中县生境质量上升区域主要位于北部,其中又以贡井和园子岔分布最为广泛,而生境质量下降的区域位于中部,以和平、夏官营和城关等乡镇为主。2005—2015 年,生境质量呈现普遍小幅下降,尤其是中部的和平、定远和金崖有较大面积的下降区域出现,而上升区域仅在北部和南部有少量分布。总体来看,1995—2015 年,大部分地区生境质量无明显变化,生境质量上升区域主要分布于北部,主要原因是“退耕还林”以及“生态北山”等工程的实施。生境质量下降区域主要位于中部,特别是定远、和平、连塔这几个乡镇分布较多,原因在于兰州市近年来实施城市东扩,居住地、工矿用地以及交通运输用地等建设用地快速增加,进而胁迫周围生境,并导致生境破碎度加剧、连通性变差,最终使得这些区域的生境质量下降。

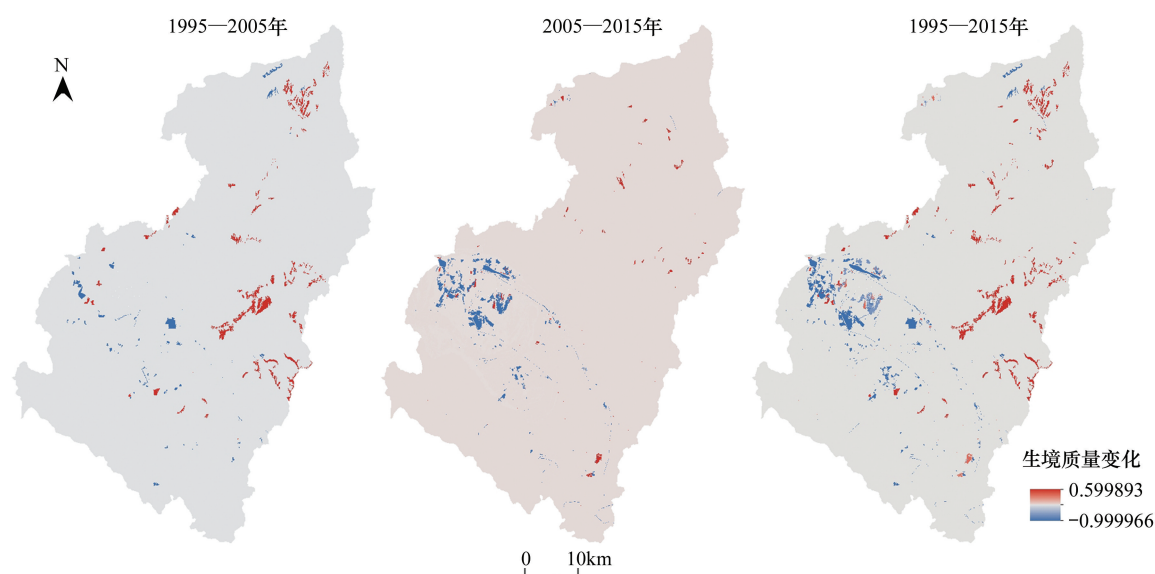


图 3 榆中县生境质量变化空间分布

Fig.3 Habitat quality change map of Yuzhong county

3.3.2 生境质量空间热点分析

从图 4 看出,榆中县生境质量空间冷热点分布呈现出“南热北冷”的格局。热点区域主要位于南部,包括马坡、新营和小康营 3 个乡镇,这一区域雨水充沛,植被覆盖度高,且是兴隆山保护区所在地,生境质量普遍较高(平均生境质量 0.6 以上);冷点主要分布于北部黄土丘陵区,以园子岔、上花盆等乡镇为主,这一区域常年干旱少雨,植被稀疏,地形破碎,主要土地类型为荒草地和旱地,因而生境质量普遍较低(平均生境质量 0.25 左右);中部有次冷点分布,这些区域主要分布有大量的居民点、道路等建设用地,由于胁迫效应导致区内生境质量较低。从时间变化来看,1995—2005 年,中部次冷点范围有所下降,而北部次冷点范围增加,热点区域变化不大;2005—2015 年,中部和北部部分次冷点转变为不显著,南部山区与平原区交界处有次冷点出现,西南部有小部分热点转为次热点。

3.3.3 生境质量空间自相关分析

由全局空间自相关分析可知,榆中县 1995、2005 和 2015 年生境质量的全局 Moran' s I 值分别为 0.160、0.156 和 0.172($P < 0.01$),表明该县生境质量分布具有一定空间正相关性,在空间上存在集聚现象,且 2015 年 Moran' s I 的增大表明生境质量的空间集聚性有所增强。

根据生境质量 LISA 集聚分析得到图 5,从中可看出在 95%的置信水平上,榆中县生境质量局部空间关联类型特征为:大部分区域表现为 NS(不显著),“H-H”集聚区域主要分布于南部的兴隆山和马啣山,表明该区

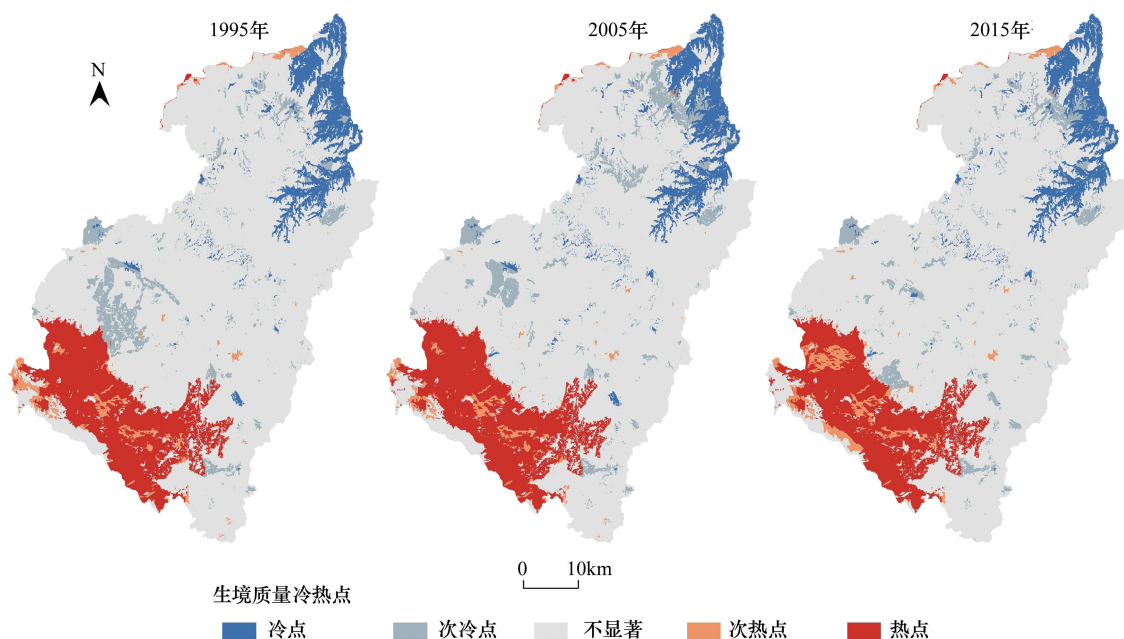


图4 榆中县生境质量热点分布

Fig.4 Hotspots distribution of habitat quality of Yuzhong county

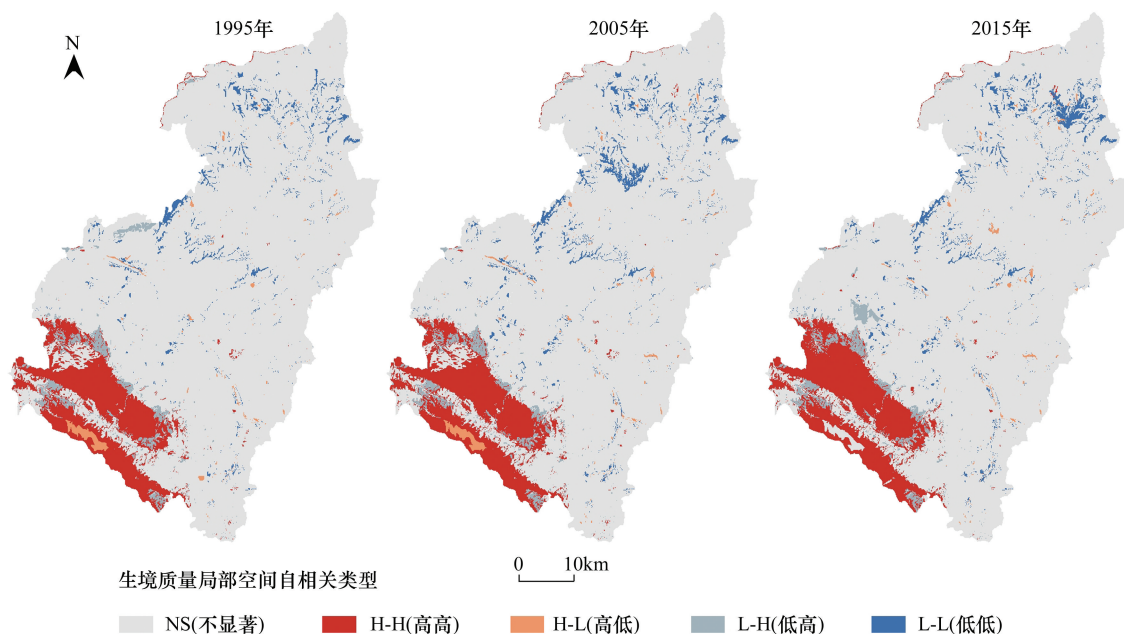


图5 榆中县生境质量 LISA 集聚图

Fig.5 LISA clustering map of habitat quality of Yuzhong county

域总体生境质量较好,可定义为生态涵养区。1995—2015年,“H-H”集聚区增加0.68%,并向西扩展,体现了近年来生态保护的效果。“H-L”和“L-H”离散区未出现明显的集中分布,主要位于中部川区靠近兴隆山周边的区域,且在1995—2015年间呈逐渐增加趋势。这一方面体现了城镇扩张对生境的威胁,另一方面也说明未来需要对此类区域采取更为严格的生态治理与保护。“L-L”集聚区主要位于北部园子岔、上花盆和哈岷等乡镇,1995—2015年间上升了0.67%,表明这一区域生境质量有所下降,未来应加强这一区域的退耕还林还草及生态保育。

4 结论与讨论

本文以典型黄土丘陵区——甘肃省榆中县为例,采用 InVEST 模型分析了该县生境质量的时空分异特征,并探讨了生境质量对土地利用变化及景观格局变化的响应。论文将生境质量的研究拓展到了县域尺度,丰富了黄土丘陵区生境质量时空变化的研究,对该区域生态安全构建与格局优化也有着积极的政策价值。

分析表明:1995—2015 年,榆中县土地利用变化呈现出建设用地急剧增加,耕地快速减少,林地逐渐增加的特点。主要的土地转变类型是耕地转变为建设用地和林地,草地转变为耕地和林地。上述土地利用变化导致景观斑块数量增大,平均斑块面积降低,景观破碎度上升。总体来看,全县生境质量稳中略有提升,但县域内部生境质量由南向北逐渐递减,呈现出“南热北冷”的空间格局。研究期内,生境质量升高区域主要位于北部,原因是近年来实施的“退耕还林”工程和“生态北山”工程;生境质量下降区域主要位于中部,原因是城镇化的推进导致区内耕地、园地及水域面积的下降。20 年来,全县生境质量的空间集聚性有所增强,表现为南部“H-H”集聚区有所增加,北部“L-L”集聚区有所增加,而随着城镇化的推进,中部“L-H”离散区有所增加。论文对县域尺度生境质量变化的时空特征进行了分析,但对生境威胁源之间的相互作用关系以及它们对生境胁迫的内在机制方面还有待进一步的研究。

区域生境质量直接影响居民的生计与福祉。随着社会经济的发展和人口的增长,人地矛盾不断增大,人为干扰对生境的影响越来越大。尽管部分乡镇由于“退耕还林”和“生态北山”等工程的实施,区内生境质量有明显改善。但快速城镇化使得该区域大量耕地被建设用地占用,导致生境的丧失和破碎化,进而使得该区域低生境质量区域有所增加,并且与 2005 年相比,2015 年山区与平原交界处生境存在降低的风险。因此,需要针对区域内部不同地域的生境特征与差异性制定相应的调整与优化策略。

区域生态建设要加强对山区的连片植树造林及已有林地的保育,同时还应重点关注山区和平原交界地区,可通过限制浅山区开发及建立生态缓冲区来保护这一区域的生境。就榆中县生态建设与保护而言,未来要加强对北部地区的生态整治,南部兴隆山可划定生态保护红线,以减小城镇扩张对该区域生境质量的威胁。由于不同土地类型提供物种持续发展的能力有差异,土地的空间布局也会影响区域生境质量,今后的土地规划和生态保护工作要统筹安排与合理布局各类土地,重点保护森林、草地等生态源地,积极推进退耕还林还草,降低建设用地扩张对生态源地和生态廊道的破坏,提高生境的斑块面积及斑块间的连通度,进而提高黄土丘陵区区域整体生境质量。

参考文献(References):

- [1] McKinney M L. Urbanization, Biodiversity, and Conservation: the impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems. *BioScience*, 2002, 52(10): 883-890.
- [2] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, Clevenger A P, Cutshall C D, Dale V H, Fahrig L, France R L, Goldman C R, Heanue K, Jones J, Swanson F, Turrentine T, Winter T C. *Road Ecology: Science and Solutions*. Washington, DC: Island Press, 2003.
- [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] 严岩, 朱捷缘, 吴钢, 詹云军. 生态系统服务需求、供给和消费研究进展. *生态学报*, 2017, 37(8): 2489-2496.
- [5] 于丹丹, 吕楠, 傅伯杰. 生物多样性与生态系统服务评估指标与方法. *生态学报*, 2017, 37(2): 349-357.
- [6] Sala O E, Chapin III F S, Armesto J J, Berlow E, Bloomfield J, Dirzo R, Huber-Sanwald E, Huenneke L F, Jackson R B, Kinzig A, Leemans R, Lodge D M, Mooney H A, Oesterheld M, Poff N L, Sykes M T, Walker B H, Walker M, Wall D H. Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287(5459): 1770-1774.
- [7] 王大尚, 郑华, 欧阳志云. 生态系统服务供给、消费与人类福祉的关系. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1747-1753.
- [8] Goertz J W. The influence of habitat quality upon density of cotton rat populations. *Ecological Monographs*, 1964, 34(4): 359-381.
- [9] Thiel R P. Relationship between road densities and wolf habitat suitability in Wisconsin. *American Midland Naturalist*, 1985, 113(2): 404-407.
- [10] Engel D W, Thayer G W, Evans D W. Linkages between fishery habitat quality, stressors, and fishery populations. *Environmental Science & Policy*, 1999, 2(6): 465-475.

- [11] Donald P F, Green R E, Heath M F. Agricultural intensification and the collapse of Europe's farmland bird populations. *Proceedings of the Royal Society B Biological Sciences*, 2001, 268(1462): 25-29.
- [12] Jetz W, Wilcove D S, Dobson A P. Projected impacts of climate and land-use change on the global diversity of birds. *PLoS Biology*, 2007, 5(6): e157.
- [13] Otto C R V, Roth C L, Carlson B L, Smart M D. Land-use change reduces habitat suitability for supporting managed honey bee colonies in the northern Great Plains. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(37): 10430-10435.
- [14] Sieber A, Uvarov N V, Baskin L M, Radeloff V C, Bateman B L, Pankov A B, Kuemmerle T. Post-Soviet land-use change effects on large mammals' habitat in European Russia. *Biological Conservation*, 2015, 191: 567-576.
- [15] 盛学斌, 刘云霞, 孙建中. 近 50 年冀北高原土地利用变化的土壤生境效应. *应用生态学报*, 2004, 15(4): 589-592.
- [16] 吴未, 张敏, 许丽萍, 欧名豪. 土地利用变化对生境网络的影响——以苏锡常地区白鹭为例. *生态学报*, 2015, 35(14): 4897-4906.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 刘红玉, 李兆富, 白云芳. 挠力河流域东方白鹤生境质量变化景观模拟. *生态学报*, 2006, 26(12): 4007-4013.
- [20] 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.
- [21] 杨芝歌, 周彬, 余新晓, 樊登星, 张艺, 王奇. 北京山区生物多样性分析与碳储量评估. *水土保持通报*, 2012, 32(3): 42-46.
- [22] 杨建强, 朱永贵, 宋文鹏, 张娟, 张龙军, 罗先香. 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.
- [23] 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.
- [24] 刘春芳, 谢国林, 李锋. 新常态下黄土丘陵区土地整治规划探索与实践. 北京: 科学出版社, 2017.
- [25] 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26] Tallis H, Ricketts T, Guerry A, Wood S, Sharp R, Chaplin-Kramer R. InVEST 3.3.0 User's Guide: Integrated Valuation of Environmental Services and Tradeoffs. 2015. [2017-10-10]. http://data.naturalcapitalproject.org/invest-releases/documentation/3_0_0/.
- [27] Getis A, Ord J K. The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24(3): 189-206.
- [28] Ord J K, Getis A. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis*, 1995, 27(4): 286-306.
- [29] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [30] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.