

# 耦合 InVEST-PLUS 模型的榆林市生境质量 时空演变及预测分析

冀泳帆<sup>1,2,3</sup>, 贾鲁净<sup>1,2,3</sup>, 杨联安<sup>1,2,3</sup>, 李亚丽<sup>1,2,3</sup>, 董强华<sup>1,2,3</sup>

(1.西北大学陕西省地表系统与环境承载力重点实验室,西安 710127;

2.陕西省黄河研究院,西安 710127;3.西北大学城市与环境学院,西安 710127)

**摘要:** 生境质量是衡量一个地区生态环境优劣的重要参考指标,土地利用变化研究可为区域生境质量时空动态演变特征评估提供科学依据。基于 1980 年、2000 年、2018 年土地利用数据,通过 InVEST 模型、PLUS 模型、地理信息图谱法分析并预测榆林市土地利用变化情况,以此探究陕西省榆林市生境质量时空演变特征。结果表明:(1)榆林市景观基质主要由草地和耕地构成,林地和未利用地次之,水域和建设用地位占比相对较少,退耕还林政策的实施、治沙工程的开展,以及建设用地的开发是土地利用变化的主要驱动因素。(2)从区域整体分析,1980 年、2000 年、2018 年、2030 年生境质量平均值分别为 0.502 8、0.520 9、0.518 3、0.525 9,生境值总体变化不大,呈现先增后降再增的波动变化趋势。从空间格局分析,榆林市生境质量分布具有一定的规律性,整体呈现东高西低的格局。生境退化平均值分别为 0.029 8、0.028 9、0.029 2、0.028 3,具有生境退化的威胁。研究结果对榆林市自然环境的保护和生境质量的提高具有理论支持和政策意义。

**关键词:** 生境质量; 时空动态变化; InVEST 模型; PLUS 模型; 地理信息图谱法

**中图分类号:** Q149;X37

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2023)01-0123-10

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.018

## Spatio-temporal Evolution and Prediction Analysis of Habitat Quality in Yulin City Coupled with InVEST-PLUS Model

Ji Yongfan<sup>1,2,3</sup>, Jia Lujing<sup>1,2,3</sup>, Yang Lian'an<sup>1,2,3</sup>, Li Yali<sup>1,2,3</sup>, Dong Qianghua<sup>1,2,3</sup>

(1.Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying

Capacity, Northwest University, Xi'an 710127; 2.Institute of the Yellow River Research,

Xi'an 710127; 3.College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127)

**Abstract:** Habitat quality is an important reference index to measure the quality of a region's ecological environment, and research on land use change can provide a scientific basis for evaluating the spatio-temporal dynamic evolution characteristics of regional habitat quality. Based on the land use data in 1980, 2000 and 2018, this paper analyzes and predicts the change of land use in Yulin City through the InVEST model, PLUS model, and geographic information map method, so as to explore the spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality in Yulin City, Shaanxi Province. The conclusions are as follows: (1) The landscape matrix in Yulin City is mainly composed of grassland and cultivated land, followed by forest land and unused land, while water and construction land account for a relatively small proportion. The implementation of the policy of returning farmland to forest, the development of desertification control projects, and the development of construction land are the main driving factors of land use change. (2) From the overall analysis of the region, the average habitat quality in 1980, 2000, 2018 and 2030 is 0.502 8, 0.520 9, 0.518 3 and 0.525 9, respectively. The overall habitat value does not change much, showing a fluctuating trend of first increase, then decrease and then increase. From the analysis of the spatial pattern, the distribution of habitat quality in Yulin City has a certain regularity, and the overall pattern is high in the east and low in the west. The average value of habitat degradation in Yulin City is 0.029 8, 0.028 9, 0.029 2 and 0.028 3, respectively,

收稿日期:2022-06-20

资助项目:国家自然科学基金项目(41601290);陕西省农业科技攻关项目(2011K02-11)

第一作者:冀泳帆(1999—),女,硕士研究生,主要从事地理信息系统在农业中的应用研究。E-mail:jiyongfan999@163.com

通信作者:杨联安(1968—),男,博士,副教授,主要从事 GIS 开发与应用研究。E-mail:yanglian@163.com

indicating the threat of habitat degradation. The research results have theoretical support and policy significance for the protection of the natural environment and the improvement of habitat quality in Yulin City.

**Keywords:** habitat quality; spatio-temporal dynamics; InVEST model; PLUS model; geo-information Tupu method

土地是人地耦合系统的重要载体,其变化是反映人类活动与生态环境相互作用的有效途径,是地理学研究地表时空动态变化过程的核心内容。生境质量(habitat quality)是指生境为个体或种群的生存提供适宜条件的能力,是衡量生态文明建设和生态安全格局优化成效的重要参考指标<sup>[1]</sup>。生境质量的优劣程度决定生态系统是否能为种群和人类提供合适的生存条件,自 20 世纪下半叶以来,土地利用变化在高强度人类活动的作用下进入“人类世”阶段<sup>[2]</sup>,全球范围内加快的城市化进程已严重威胁栖息地的生境质量,因此评估土地利用变化特征、了解土地利用发展趋势、探究生境质量变化规律及动因是当下实现土地可持续发展的紧要任务。

目前,土地利用变化的研究方向主要集中在 3 个方面:(1)土地利用变化特征及驱动力分析;(2)土地利用分类方法;(3)土地利用变化模拟预测。其中,土地利用变化预测模型主要包括 CA-Markov 模型、FLUS 模型、CLUE-S 模型等基于元胞自动机构建的模型,但 Markov 模型无法描述空间尺度上的变化,FLUS 模型在反映不同区域土地利用变化的空间差异的问题上存在难度,CLUE-S 模型在应用时忽略非主导地类转化的可能性<sup>[3]</sup>,而 PLUS 模型通过融合转化分析策略和格局分析策略的优势,避免转化类型随着类别的增加呈指数增长的缺陷,保留模型挖掘土地利用在一定时间段的驱动变化机理能力,适用性更强。Liang 等<sup>[4]</sup>以武汉为例,对 PLUS 模型的土地持续驱动力展开研究,使土地利用变化预测进入了新的发展阶段;Zhang 等<sup>[5]</sup>基于 PLUS 模型预测福建三角洲地区的景观生态风险以期更有效地评价土地利用效率。

土地利用变化主要通过影响物质流、能量流在生境各斑块间的循环流动过程来改变生境分布格局,在一定程度上反映人类活动强度的土地利用变化<sup>[6]</sup>,可以衡量区域生境质量变化情况。其中,InVEST 模型<sup>[7]</sup>是美国斯坦福大学、世界自然基金会和大自然保护协会联合开发的生态系统服务和权衡综合评估模型。国内外学者现将其多应用于碳储量、土壤保持、水质净化、生境质量评估及生境退化等相关研究。例如,Imran 等<sup>[8]</sup>基于 InVEST 模型评估山区森林类别的碳储量并进行制图;Deepakshi 等<sup>[9]</sup>利用 CA-Markov 以

及 InVEST 模型评估并预测印度 Sariska 老虎保护区的固碳量;Gong 等<sup>[10]</sup>基于 InVEST 模型分析甘肃省白龙江流域植物生物多样性变化,对保护植物多样性相关政策的制定具有重要意义。

上述 2 种模型应用广泛且适用性强,但耦合 InVEST-PLUS 模型评估预测土地利用时空变化格局并结合地理信息图谱法探究生境质量变化及驱动因素的相关研究较少,InVEST-PLUS 耦合模型相较于单个模型,可以更为精确地反映土地利用斑块级别的变化,因此实现多模型耦合相关分析对土地利用变化模拟研究的发展具有重要意义,为深层次分析生境质量时空分异变化奠定基础。

近年来,黄河流域水资源短缺、水土流失加剧、资源环境承载力减弱等问题日趋严重,流域内生态脆弱区分布广泛。榆林市作为黄河流域典型生态脆弱区,经济发展主要以煤、石油、天然气资源过度开发作为拉动力,在自然环境和人类活动的双重驱动下,近 40 年土地利用变化明显,生态环境保护已经成为该地可持续高质量发展的迫切需要。

本文通过研究近 40 年榆林市土地利用变化情况,基于 InVEST 和 PLUS 模型分析 1980—2018 年生境质量时空演变特征、预测分析 2030 年土地利用及生境质量时空变化特征及新态势,旨在探究榆林地区土地利用与生境质量的演变机制,以期为当地生态环境保护 and 高质量发展提供科学依据。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

榆林市是陕甘宁晋蒙的交界地(36°40′—39°40′N, 107°10′—111°20′E),高程 533~1 922 m,(图 1),属于北方农牧交错带,地貌类型主要由风沙草滩区、黄土丘陵区、梁状低丘陵区 3 部分组成<sup>[11]</sup>,地势整体呈西高东低,风沙草滩区主要位于北部地区,风蚀作用强劲;黄土丘陵区位于南部地区,由于流水侵蚀作用明显造成本地区水土流失严重;梁状低丘陵区主要位于西南部地区。榆林市地处毛乌素沙地和黄土高原的过渡带,内蒙古高原和黄土高原的过渡区<sup>[12]</sup>,属于温带干旱半干旱大陆季风性气候,四季分明,降水多集中于夏季,年平均降水量为 400 mm,境内矿产、石油及天然气资源丰富。

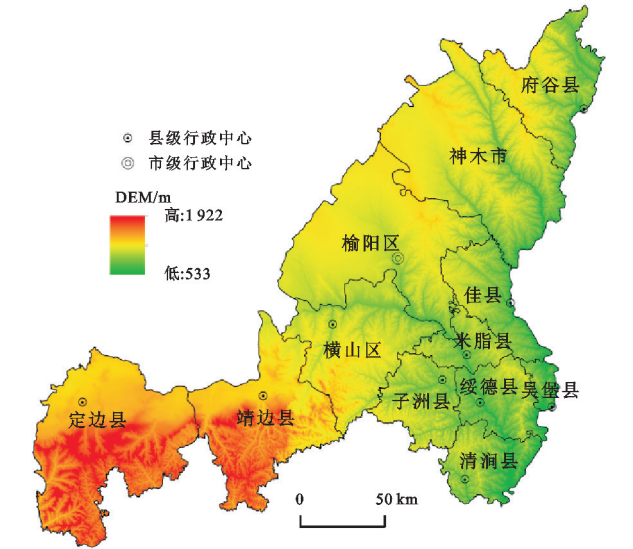


图 1 研究区概况

1.2 数据来源

以榆林市实行家庭联产承包责任制、退耕还林政策,以及退耕还林(草)基本完成为时间节点,于中国科学院资源环境科学与数据中心<sup>[13]</sup>分别选取 1980 年、2000 年、2018 年土地利用数据,分辨率为 30 m×30 m,土地利用类型主要为耕地、草地、林地、水域、建设用地、未利用地 6 类。参照土地利用模拟相关研究,在考虑 PLUS 模型精确性和现实性的基础上,基于研究区概况,以及数据的可获取性、显著性、时效性,从自然和人文角度选取 10 个影响土地利用变化的驱动因子对其展开土地利用模拟研究,具体数据信息见表 1。所有数据均按照 PLUS 模型输入数据要求,以土地利用数据为基准进行坐标系统一和分辨率统一,严格保证行列数一致。

表 1 数据信息

| 数据类型   | 数据名称                       | 数据来源                                                                                               |
|--------|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 土地利用数据 | 1980 年、2000 年、2018 年土地利用数据 | 中科院资源环境科学与数据中心( <a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a> )                          |
| 地形因子   | DEM(数字高程数据)                | 地理空间数据云( <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a> )                           |
|        | 坡度                         | 基于 DEM 提取                                                                                          |
|        | 距河流距离                      |                                                                                                    |
| 可达性    | 距城镇距离                      | OpenStreetMap( <a href="https://www.openhistoricalmap.org">https://www.openhistoricalmap.org</a> ) |
|        | 距公路距离                      |                                                                                                    |
|        | 距铁路距离                      |                                                                                                    |
| 社会因子   | POP(人口分布数据)                | 榆林市统计年鉴                                                                                            |
|        | GDP(国内生产总值数据)              |                                                                                                    |
| 气候因子   | 年平均降水                      | 陕西省气象局                                                                                             |
|        | 年平均气温                      |                                                                                                    |

2 研究方法

2.1 PLUS 模型

PLUS 模型(patch-generating land use simulation)是基于栅格数据所提出的斑块生成土地利用变化模型<sup>[14]</sup>。模型通过转化分析和格局分析 2 种转换规则战略,有效避免以往 CA 模型在探索土地利用变化起因和模拟多种土地利用类型时空尺度斑块级变化 2 个方面的不足。

2.1.1 LEAS 土地扩张分析策略(land expansion analysis strategy,LEAS)通过提取 2 期土地利用扩张数据,采用随机森林算法计算每类用地发展概率<sup>[15]</sup>,并对用地扩张驱动因子进行贡献率分析。其中随机森林分类算法具体公式为:

$$P_{i,k}^d(x)=\frac{\sum_{n=1}^MI(h_n(x)=d)}{M} \tag{1}$$

式中: $d$  取值为 0 或 1,1 表示有其他地类向地类  $k$  转变,0 表示其他任何不包含地类  $k$  在内的土地利用转换; $I(\cdot)$  为决策树的指示函数; $h_n(x)$  为第  $n$  个决策

树的预测类型; $P_{i,k}^d(x)$  为空间单元  $i$  处  $k$  类土地利用类型增长的概率。

2.1.2 CARS 基于多类随机斑块种子的 CA 模型(a CA based on multi-type random patch seeds,CARS)在各类用地发展概率的约束下,结合随机种子生成和阈值递减机制模拟生成斑块。公式为:

$$OP_{i,k}^{d=1,t}=P_{i,k}^d\times\Omega_{i,k}^t\times D_k^t \tag{2}$$

式中; $OP_{i,k}^{d=1,t}$  为空间单元  $i$  处在  $t$  时刻向地类  $k$  转变的综合概率; $P_{i,k}^d$  为空间单元  $i$  处用地类型向  $k$  发展的适宜性概率; $D_k^t$  表示未来需求对地类  $k$  的影响; $\Omega_{i,k}^t$  表示单元  $i$  的邻域效应,是地类  $k$  的土地利用成分在下一个邻域内的覆盖比例。其中,邻域权重参数和过渡转移矩阵见表 2、表 3。过渡转移矩阵中 1 代表允许转变,0 代表限制转变。

表 2 邻域权重参数

| 土地利用类型 | 耕地   | 林地   | 草地   | 水域   | 建设用地 | 未利用地 |
|--------|------|------|------|------|------|------|
| 邻域权重   | 0.85 | 0.83 | 0.84 | 0.82 | 0.85 | 0.65 |

表 3 过渡转移矩阵

| 土地利用<br>类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 建设<br>用地 | 未利<br>用地 |
|------------|----|----|----|----|----------|----------|
| 耕地         | 1  | 1  | 1  | 0  | 1        | 1        |
| 林地         | 1  | 1  | 1  | 1  | 1        | 1        |
| 草地         | 1  | 1  | 1  | 0  | 1        | 1        |
| 水域         | 1  | 0  | 1  | 1  | 0        | 1        |
| 建设用地       | 0  | 0  | 1  | 0  | 1        | 1        |
| 未利用地       | 1  | 1  | 1  | 1  | 1        | 1        |

2.2 InVEST 模型

采用数据易获取、可视化能力强的 InVEST 模型生境质量模块(habitat quality model)对榆林市生境质量进行评估<sup>[16]</sup>,根据生态系统服务评估与权衡模型(3.2.0 版本)使用手册及前人<sup>[17]</sup>在干旱、半干旱区农牧交错带进行的研究并根据研究区具体情况,将易受人类活动影响的生境(水田、旱地、农村居民点、城镇用地、其他建设用地、沙地)设置为威胁源<sup>[18]</sup>,并进行相关参数如生境适宜性指数、半饱和参数以及生境对威胁因子的敏感性程度等的设置(表 4、表 5),具体公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^R \sum_{y=1}^{Y_r} ( \frac{W_r}{\sum_{r=1}^R W_r} ) r_y i_{rxy} \beta_x S_{jr} \tag{3}$$

$$i_{rxy} = 1 - \frac{d_{xy}}{d_{rmax}} \tag{4}$$

$$i_{rxy} = \exp \frac{-2.99 d_{xy}}{d_{rmax}} \tag{5}$$

式中: $D_{xj}$ 为空间单元处  $x$  的生境退化度<sup>[19]</sup>;  $R$  为威胁因子的数量;  $W_r$  为威胁因子的权重值;  $Y_r$  为威胁因子的栅格数量;  $r_y$  为威胁因子的胁迫值;  $i_{rxy}$  为威胁因子对生境的胁迫水平;  $\beta_x$  为威胁因子的可达性;  $S_{jr}$  为生境类型  $j$  对威胁因子的敏感度;  $d_{xy}$  为空间单元  $x$  与空间单元  $j$  的直线距离;  $d_{rmax}$  为威胁因子的最大胁迫距离。

$$Q_{xj} = H_j (1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + K^z}) \tag{6}$$

式中: $Q_{xj}$ 为生境类型  $j$  在空间单元  $x$  处的生境质量指数,值域为 $[0,1]$ ,值越大生境质量越好;  $H_j$  为生境类型  $j$  的生境适宜度<sup>[20]</sup>;  $K$  为半饱和参数,通常取值为 0.5,为生境退化度最大值的 1/2;  $D_{xj}^z$  为生境类型  $j$  中空间单元  $x$  的生境退化度;  $z$  为模型默认参数。

表 4 威胁源属性

| 威胁因子   | 最大威胁<br>距离 | 权重   | 距离衰减<br>类型 |
|--------|------------|------|------------|
| 水田     | 4          | 0.60 | 线性型        |
| 旱地     | 4          | 0.60 | 线性型        |
| 农村居民点  | 8          | 1.00 | 指数型        |
| 城镇用地   | 8          | 1.00 | 指数型        |
| 其他建设用地 | 8          | 0.90 | 指数型        |
| 沙地     | 5          | 0.75 | 指数型        |

表 5 生境类型及其对威胁源的敏感性

| 生境类型   | 生境<br>适宜性指数 | 水田   | 旱地   | 农村<br>居民点 | 城镇用地 | 其他<br>建设用地 | 沙地   |
|--------|-------------|------|------|-----------|------|------------|------|
| 水田     | 0.50        | 0.25 | 0.30 | 0.40      | 0.50 | 0.50       | 0.40 |
| 旱地     | 0.40        | 0.30 | 0.25 | 0.40      | 0.50 | 0.50       | 0.60 |
| 有林地    | 0.90        | 0.70 | 0.70 | 0.80      | 0.80 | 0.80       | 0.65 |
| 灌木林    | 0.85        | 0.70 | 0.70 | 0.75      | 0.75 | 0.75       | 0.70 |
| 疏林地    | 0.80        | 0.70 | 0.70 | 0.75      | 0.75 | 0.75       | 0.70 |
| 其他林地   | 0.80        | 0.70 | 0.70 | 0.70      | 0.70 | 0.70       | 0.65 |
| 高覆盖度草地 | 0.70        | 0.60 | 0.70 | 0.70      | 0.75 | 0.80       | 0.80 |
| 中覆盖度草地 | 0.70        | 0.60 | 0.70 | 0.70      | 0.65 | 0.65       | 0.80 |
| 低覆盖度草地 | 0.50        | 0.35 | 0.35 | 0.50      | 0.50 | 0.40       | 0.60 |
| 河渠     | 0.30        | 0.20 | 0.20 | 0.30      | 0.30 | 0.30       | 0.20 |
| 湖泊     | 0.80        | 0.65 | 0.65 | 0.70      | 0.70 | 0.75       | 0.75 |
| 水库坑塘   | 0.80        | 0.50 | 0.50 | 0.70      | 0.70 | 0.75       | 0.50 |
| 滩地     | 0.85        | 0.75 | 0.70 | 0.65      | 0.60 | 0.70       | 0.60 |
| 城镇用地   | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |
| 农村居民点  | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |
| 其他建设用地 | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |
| 沙地     | 0.10        | 0.10 | 0.10 | 0.30      | 0.30 | 0.50       | 0.10 |
| 盐碱地    | 0.10        | 0.10 | 0.10 | 0.30      | 0.30 | 0.40       | 0.60 |
| 沼泽     | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |
| 裸土     | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |
| 裸岩     | 0           | 0    | 0    | 0         | 0    | 0          | 0    |

2.3 地理信息图谱法

基于地理信息图谱法建立准则<sup>[21]</sup>,对前后 2 期生境质量图谱单元进行地图代数叠加运算,计算公式为: $W=10B+Q$ 。式中: $W$  为生境质量等级变化的图谱单元栅格图; $B$  为前一时刻生境质量图谱单元栅格属性值; $Q$  为后一时刻生境质量图谱单元栅格属性值。由此可得榆林市 1980—2000 年、2000—2018 年、2018—2030 年 3 个时期的生境质量变化图谱。

基于构建的生境质量图谱模型,引入变化比率和空间分离度指标对生境质量变化图谱进行表征分析,计算公式为:

$$V_{ij}=(P_{ij}/\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n P_{ij})\times 100\% \quad (i\neq j) \quad (7)$$

$$R_{ij}=\frac{1}{2}\times\sqrt{\frac{D_{ij}/\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n P_{ij}}{P_{ij}/\sum_{i=1}^n\sum_{j=1}^n P_{ij}}} \quad (8)$$

式中: $V_{ij}$  为变化比率; $R_{ij}$  为空间分离度; $D_{ij}$  和  $P_{ij}$  分别为初期( $t$ )第  $i$  等级生境质量向末期( $t+\Delta t$ )第  $j$  等级生境质量变化的图谱单元数和面积;空间分离度反映的是生境质量图谱单元在空间分布上的离散程度,值越大,离散程度越大。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

基于 PLUS 模型利用榆林市 2000 年土地利用

数据预测 2018 年土地利用数据,通过计算 Kappa 系数及总体精度与 2018 年实际土地利用数据进行对比分析。结果表明,总体精度为 0.886 3,Kappa 系数为 0.825 1,PLUS 模型准确性较高,能够较为准确地反映研究区不同时间段的土地利用变化状况,在研究区具有较强的普适性。因此,以 2018 年土地利用数据为基础预测 2030 年土地利用并进行分析。

由图 2、图 3 可知,草地和耕地为榆林市景观基质的重要构成,未利用地、林地次之,水域和建设用地占比相对较少。其中,耕地占比达 35%~40%,以风沙草滩地貌为界,南部分布较为密集,破碎化程度高,景观斑块呈东北—西南向分布,平均中心点位于中心区域,向东南方向迁移,标准椭圆变化不明显;林地占比 4%~6%,呈点状零星分布于榆林市,东南部 6 县密集程度较高,景观斑块呈东北—西南向分布,平均中心点位于中南部地区;草地占比达 40%~46%,分布广而密,主要集中在榆林市南部和东部地区,形成耕草混合地貌,重心迁移不明显;水域占比较少,主要以线状分布,平均中心向东北方向迁移;建设用地在城市化进程的驱动下变化较大,主要分布于榆林市中部地区,平均中心位于中西部地区,标准椭圆向东北方向迁移;未利用地占比达 8%~14%,为毛乌素沙地东南部地带,是榆林市进行生态优化的关键攻克区域,平均中心位于西部地区,整体变化不大。

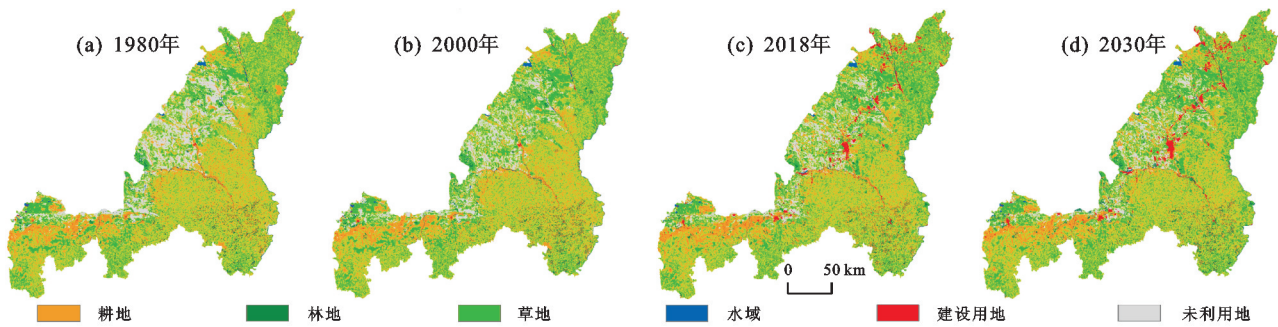


图 2 土地利用分布

由图 4 可知,1980—2000 年,耕地主要向草地转移,占比 1.63%,面积为 27 207 hm<sup>2</sup>;林地主要向耕地和未利用地转移,分别占比 1.31%,1.87%;草地向耕地、未利用地转移较多,分别占比 1.63%,6.94%;建设用地和水域占比面积少,变化较小。2000—2018 年,耕地向草地转移 173 880 hm<sup>2</sup>,占比 11.0%;林地主要向耕地、草地转移,分别占比 17.08%,9.54%;草地向耕地和未利用地分别转移 223 973,27 335 hm<sup>2</sup>;水域面积缩减 2 280 hm<sup>2</sup>;建设用地由 16 359 hm<sup>2</sup>激增至 1 096 226 hm<sup>2</sup>;未利用地面积大幅减少,由 464 692 hm<sup>2</sup>缩减至 423 749 hm<sup>2</sup>。2018—2030 年,建设用地呈增长状态,但增速放缓;未利用地在生态优化的大环境下持

续缩减,得到充分的开发和利用,榆林市地处西北干旱半干旱地区,在全球变暖的境况下,蒸发量上升且降雨量无明显变化造成水域面积缩减。耕地面积仍呈缩减态势;林地面积略微减少;草地面积呈增长状态,是榆林市景观基质的关键构成部分。

3.2 生境质量时空格局演变

生境质量高低在 InVEST 模型中表现为 0~1 连续变化的值<sup>[22]</sup>,值越接近于 1,生境质量越高,为更加直观表示生境质量分布情况,统计不同时期不同等级占比以及空间分布情况,本文基于 ArcGIS 软件采用相等间隔法将 InVEST 模型运行结果重分类为 5 个等级,分别为:差(I)、较差(II)、中(III)、较好(IV)、优(V),划分间隔设置为 0.2。

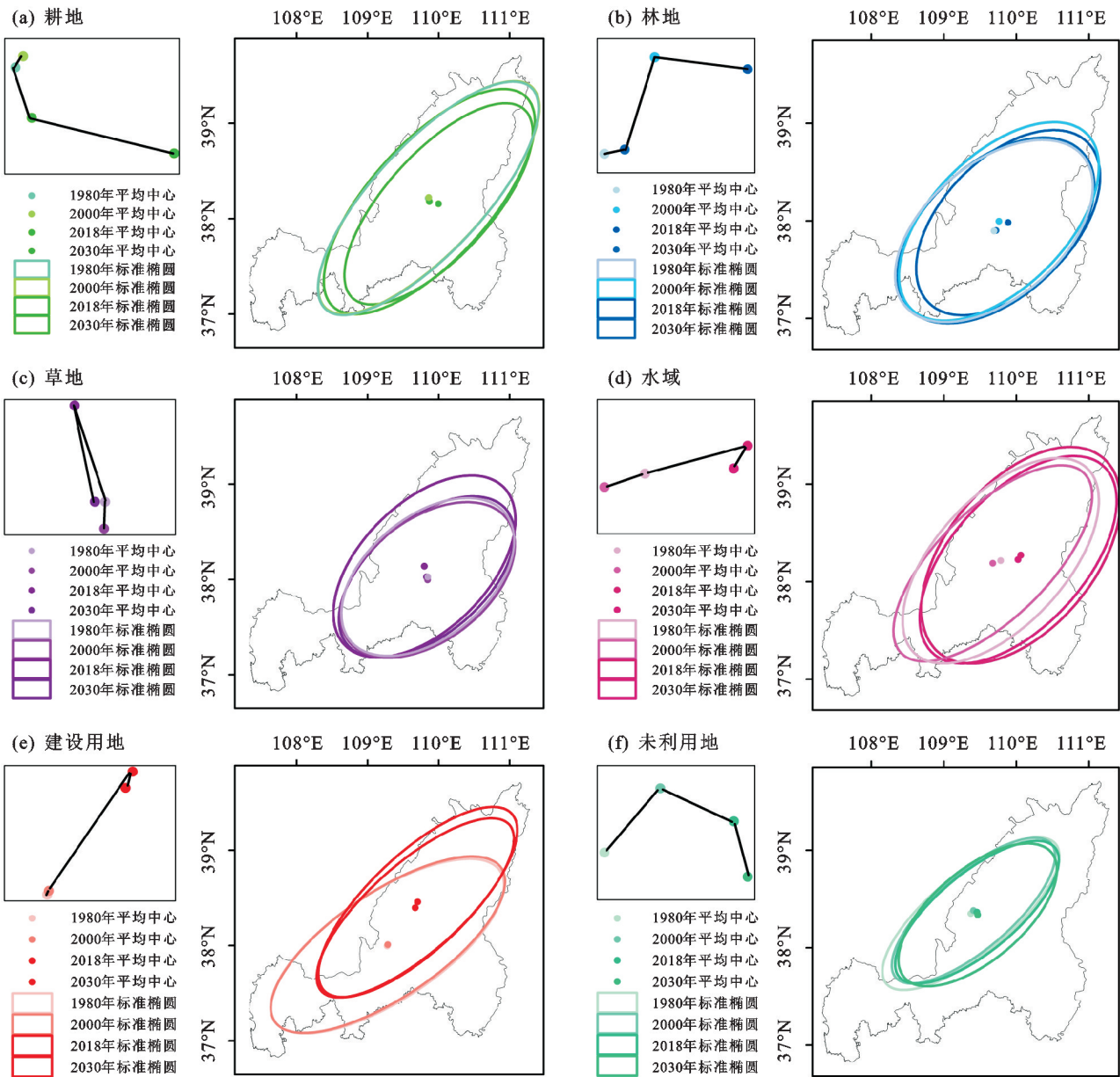
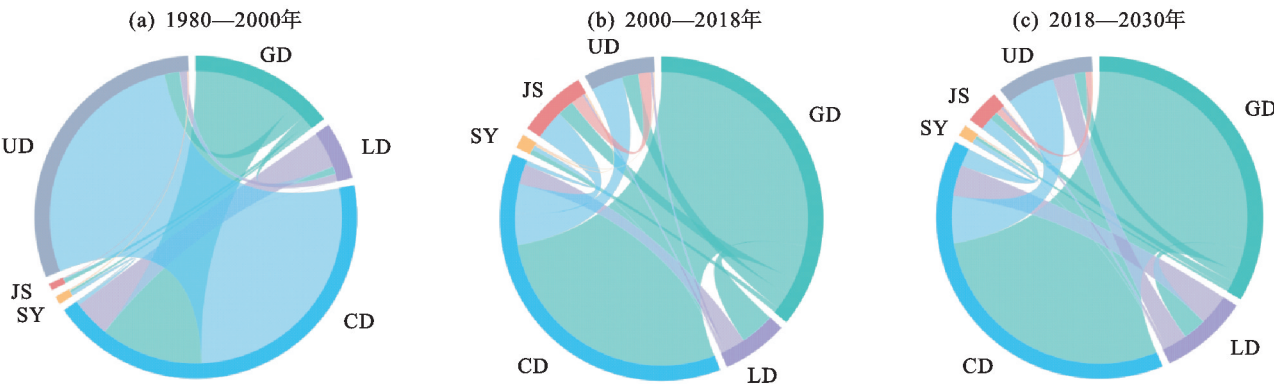


图 3 土地利用重心转移



注：GD:耕地;LD:林地;CD:草地;SY:水域;JS:建设用地;UD:未利用地。

图 4 土地利用转移

由图 5 可知,从区域整体分析,1980 年、2000 年、2018 年、2030 年生境质量平均值分别为 0.502 8, 0.520 9,0.518 3,0.525 9,生境值总体变化不大,呈现先增后降再增的波动变化趋势。从空间格局分析,榆

林市生境质量分布具有一定的规律性,整体呈现东高西低、南北高中部低的格局,主要以 II 和 IV 为主。其中,I 等级区域占比达 11%~15%,主要分布于榆阳区、神木市西南部地区、定边县、靖边县北部地区、横

山区西部,即风沙草滩区地貌所分布区域;II 等级占比达 35%~39%,主要集中在风沙草滩区以南地区,分布较为广泛;III 等级占比较少,从时间尺度而言占比,基本无变化,分布位置与榆林市境内无定河水系

分布相吻合;IV 等级区域占比达 42%~48%,以点状分布于全局,破碎化程度高,东北部和西南部地区分布密度大于东南部地区;V 等级区域占比达 4%~6%,主要集中于水域周边。

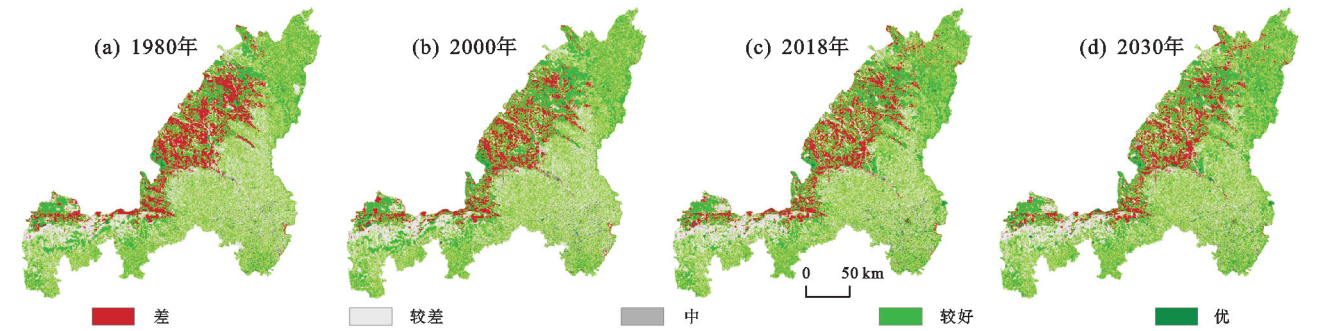


图 5 生境质量分布

基于地理信息图谱法,通过 1980—2000 年、2000—2018 年、2018—2030 年 3 个时间段对榆林市生境质量时空格局变化展开分析,图谱占比分布见表 6。

未发生变化图谱(11,22,33,44,55)在 3 个时间

段分别占比89.11%,81.06%,96.47%。其中,较好—较好(44)占比最大,分别占比 39.01%,37.18%,44.81%;中—中(33)占比最小,分别占比 0.38%,0.36%,0.28%。

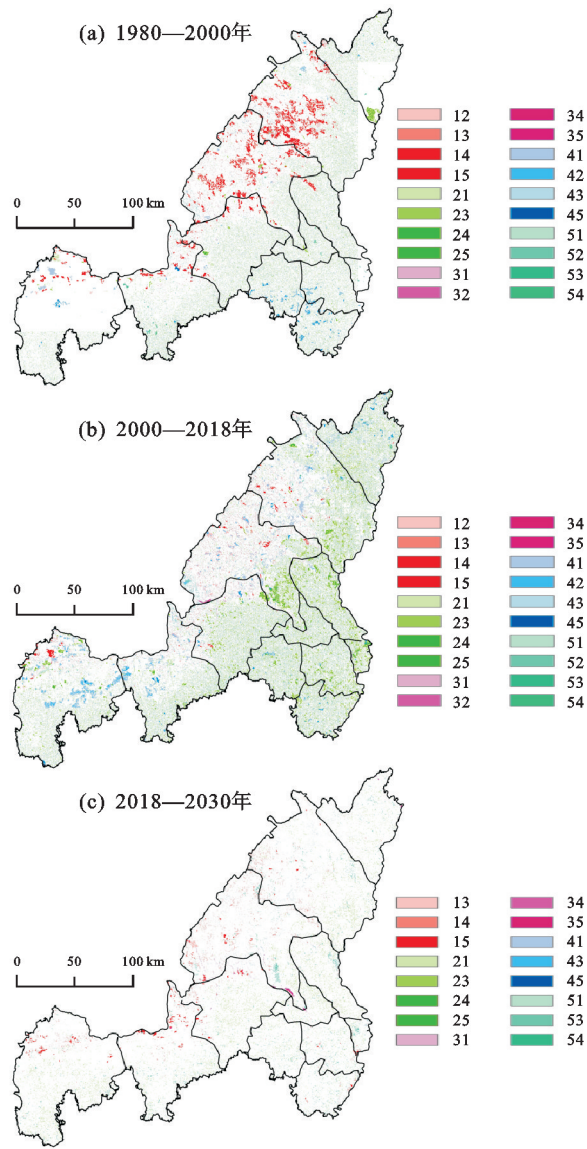
表 6 生境质量等级变化统计

| 序号 | 1980—2000 年 |         |        |                    | 2000—2018 年 |         |        |                    | 2018—2030 年 |         |        |                    |
|----|-------------|---------|--------|--------------------|-------------|---------|--------|--------------------|-------------|---------|--------|--------------------|
|    | 编码          | 像元数量    | 变化率/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 编码          | 像元数量    | 变化率/%  | 面积/km <sup>2</sup> | 编码          | 像元数量    | 变化率/%  | 面积/km <sup>2</sup> |
| 1  | 35          | 325     | 0.01   | 0.29               | 35          | 836     | 0.01   | 0.75               | 23          | 21      | 0.00   | 0.02               |
| 2  | 53          | 463     | 0.01   | 0.42               | 53          | 906     | 0.01   | 0.82               | 43          | 214     | 0.01   | 0.19               |
| 3  | 32          | 2808    | 0.05   | 2.53               | 23          | 4499    | 0.05   | 4.05               | 53          | 1108    | 0.07   | 1.00               |
| 4  | 34          | 3777    | 0.07   | 3.40               | 32          | 7286    | 0.08   | 6.56               | 34          | 3744    | 0.22   | 3.37               |
| 5  | 31          | 4885    | 0.09   | 4.40               | 13          | 8345    | 0.09   | 7.51               | 25          | 7288    | 0.44   | 6.56               |
| 6  | 13          | 5139    | 0.10   | 4.63               | 43          | 10620   | 0.12   | 9.56               | 45          | 10832   | 0.65   | 9.75               |
| 7  | 43          | 7964    | 0.15   | 7.17               | 31          | 15135   | 0.17   | 13.62              | 21          | 15408   | 0.92   | 13.87              |
| 8  | 51          | 10878   | 0.21   | 9.79               | 34          | 17056   | 0.19   | 15.35              | 35          | 21997   | 1.32   | 19.80              |
| 9  | 23          | 14382   | 0.28   | 12.94              | 15          | 25927   | 0.29   | 23.33              | 31          | 35118   | 2.11   | 31.61              |
| 10 | 15          | 52673   | 1.01   | 47.41              | 51          | 79884   | 0.88   | 71.90              | 13          | 42729   | 2.56   | 38.46              |
| 11 | 12          | 87774   | 1.69   | 79.00              | 54          | 139119  | 1.54   | 125.21             | 51          | 87442   | 5.25   | 78.70              |
| 12 | 21          | 92544   | 1.78   | 83.29              | 52          | 199980  | 2.22   | 179.98             | 41          | 119185  | 7.15   | 107.27             |
| 13 | 54          | 94264   | 1.81   | 84.84              | 12          | 266552  | 2.95   | 239.90             | 54          | 225305  | 13.52  | 202.77             |
| 14 | 52          | 105423  | 2.03   | 94.88              | 45          | 301614  | 3.34   | 271.45             | 15          | 238087  | 14.29  | 214.28             |
| 15 | 25          | 126116  | 2.43   | 113.50             | 21          | 341600  | 3.78   | 307.44             | 14          | 315073  | 18.91  | 283.57             |
| 16 | 41          | 219004  | 4.22   | 197.10             | 14          | 423363  | 4.69   | 381.03             | 24          | 542876  | 32.58  | 488.59             |
| 17 | 45          | 219915  | 4.23   | 197.92             | 25          | 495603  | 5.49   | 446.04             |             |         |        |                    |
| 18 | 42          | 1281115 | 24.66  | 1153.00            | 41          | 868635  | 9.62   | 781.77             |             |         |        |                    |
| 19 | 24          | 1325025 | 25.50  | 1192.52            | 42          | 2639307 | 29.24  | 2375.38            |             |         |        |                    |
| 20 | 14          | 1540701 | 29.66  | 1386.63            | 24          | 3180735 | 35.24  | 2862.66            |             |         |        |                    |
| 总计 |             | 5195175 | 100.00 | 4675.66            |             | 9027002 | 100.00 | 8124.30            |             | 1666427 | 100.00 | 1499.78            |

由图 6、图 7 可知,1980—2000 年,生境质量变化区域总面积达 4 675.66 km<sup>2</sup>,主要集中在差—较好、较差—较好、较好—较差(14,24,42)转换,在生境质量总变化中分别占比 29.66%,25.50%,24.66%。其中,差—较好(14)主要集中在榆阳区、神木市一带;较差—较好(24)分布较为广泛,集中于榆林市中东部地区;较好—较差(42)以点状分布于全区域。空间分离

度可以定量地表征生境质量变化分布的离散程度,差—较好(14)的空间分离度最低,空间集聚程度最高,与空间分布相吻合。此阶段,生境质量有所改善,主要表现为 I(差)等级占比减少 2.9%,IV(较好)等级占比增加 2.6%。榆林市在家庭联产承包责任制和三北防护林体系的影响下,将农业置于发展中心,扩大农田种植面积,耕地改为园地,种植苹果、红枣等

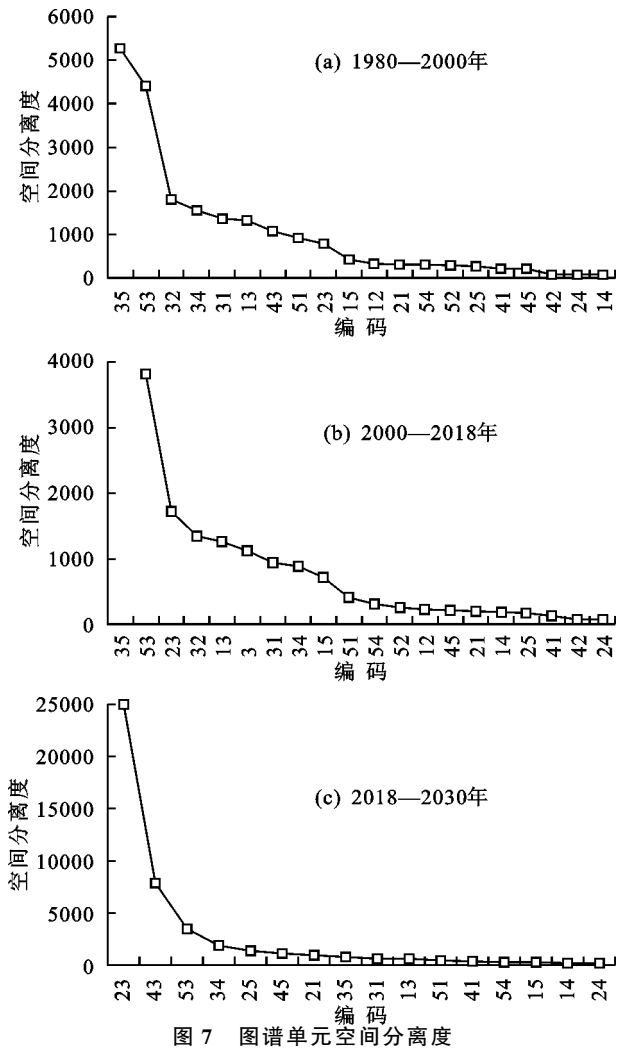
农产品促使地区经济效益最大化,耕地面积迅速增长,且榆林市中西部地区未利用地分布广泛,适合连片开发,规模化经营,这个时期未利用地向草地和耕地大批转移,一方面沙地治理,改善生态环境,有利于可持续化发展;另一方面,开发整治沙地,发展规模化农业经济对促进榆林市经济效益发展具有重大意义。



**图 6 1980—2030 年生境质量等级变化空间分布**

2000—2018 年,生境质量变化区域总面积达8 124.30 km<sup>2</sup>,相比前一阶段增加 3 448.64 km<sup>2</sup>。主要集中在较差、较好(24,42)和差、较好(41,14)的相互转换以及较差—优(25)转换,在生境质量总变化中共占比 84.28%。其中,较差—较好(24)主要集中在横山区与榆阳区交界且无定河流经地带,说明生境质量得到改善;较好—较差(42)主要集中于定边县中部地区,环境有所恶化;较好—差(41)分布与建设用地增长区域相吻合。此阶段,榆林市生境质量呈恶化状态,但相比 1980 年生境质量整体处于提升状态,恶化主要表现在 I(差)

等级占比增加 1.2%。榆林市从 1999 年开始实施“退耕还林(草)”政策,沙漠化防治、水土流失治理、天然林自然保护工程、生态修复工程的实施促使沙地面积急剧减少,未利用地和耕地等生境向林地转移,生境质量得到改善;但在城市化进程的驱动下建设用地的急剧扩张以及高强度的人类活动迫使耕地和园地等生境向建设用地这一低等级生境转化,对生态环境产生恶劣影响。



**图 7 图谱单元空间分离度**

2018—2030 年,生境质量变化区域总面积达1 499.78 km<sup>2</sup>,相比之前 2 个阶段,生境质量变化趋于稳定,变化主要集中于较差—较好、差—较好、差—优(24,14,15),在生境质量的总变化中共占比 65.78%,I(差)等级占比减少 0.7%,IV(较好)等级占比增加 2%,II(较差)等级占比减少 1.3%。其中,较差—较好、差—较好、差—优(24,14,15)均属于正向变化,但空间分离度指数整体偏大,与生境质量变化空间分布一致,破碎化程度高。此阶段,榆林市生境质量值呈小幅增长,达 0.525 9,这主要是因为草地面积的持续增长、增速放缓的建设用地,以及面积持续缩减的未利用地使得榆林市生境恶化在一定程度上得到缓解,生境质量得到改善,整体处于优化阶段。

3.3 生境退化时空分布特征

生境退化值的大小反映生境受威胁因子的影响大小。生境退化值越大,生境退化度越大。本研究基于 ArcGIS 软件采用自然间断点分级法将生境退化类型分为 4 档,其中 I(0~0.02)为轻度退化,II(0.02~0.04)为中度退化,III(0.04~0.05)为高度退化,IV(0.05~0.11)为极高度退化。

由图 8 可知,从整体而言,1980—2030 年,榆林市生

境退化平均值分别为 0.029 8,0.028 9,0.029 2,0.028 3,数值先减小后增大再减小,与生境变化趋势相吻合,但仍具有生境退化的威胁。大约 70%~75%的地区处于退化程度较低区间,轻度退化区占比 40%左右,生境受威胁因子的影响较小。极高度退化区集中分在榆阳区、横山区一带以及神木市南部地区;高度和轻度退化区分布较为广泛;中度退化区主要分布在北部府谷县、横山区中部以及定边县和靖边县地区。

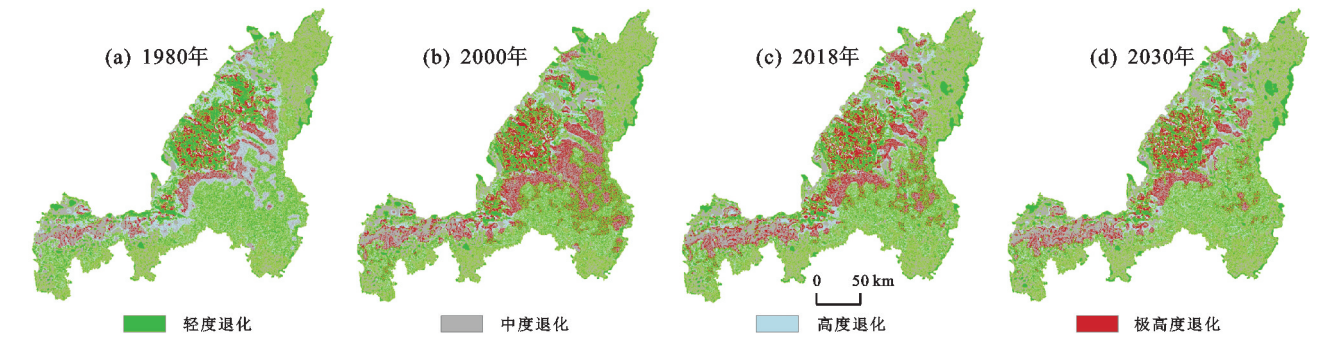


图 8 生境退化分布

1980—2000 年,生境退化状况有所改善,主要表现在高度退化区占比减少 9.1%,这个阶段农业仍居主导地位,耕地、草地、林地占比大,土地仍处于开发阶段,未对生态环境造成大的破坏。2000—2018 年,退化程度提高,与此阶段加快的城市化、工业化进程、高强度不合理的人类活动以及急剧扩张的建设用地相关,对生态环境产生胁迫效应,但生境退化整体变化较小,退耕还林政策的实施在一定程度上缓解生境的恶化程度。2018—2030 年,生境退化平均值大幅减小,由 0.029 2 缩减至 0.028 3,此阶段生境质量变化起伏小,轻、中度退化占比达 74.2%,生境质量有所改善。

4 讨论

榆林市作为黄河流域范围内的典型生态脆弱区,其土地利用空间格局分布和生境质量动态演变关乎土地利用结构的优化配置和生态环境的高效治理,对统筹地区高质量发展和生态文明建设等方面具有重要意义<sup>[23]</sup>。从土地利用空间格局分布来看,建设用地的急剧扩张在一定程度上导致城市发展不平衡,榆林市应摒弃先污染后治理的错误思想,高效优化生态安全格局,全方位统筹区域协同发展,通过建设生态廊道等措施持续优化区域生境质量,实现区域高质量发展。从 PLUS 模型预测结果来看,榆林市生境质量有所改善,结合《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》来看,榆林市应继续严格控制区域内矿产资源的开发,认真贯彻落实生态修复<sup>[24]</sup>、退耕还林政策,提高植被覆盖度,治理水土流失,防止生态环境进一步退化,推进生态文明建设。

本研究主要利用 InVEST 模型将土地利用类型与生境建立联系,但生境质量模块主要考虑的是受人类影响的威胁因子,在一定程度上忽略如天敌、种族竞争等生境内部威胁,并且威胁因子以及生境适宜度数值设置主观性比较强,因而模型还有待改进优化<sup>[25]</sup>。由于受到数据限制,采用 InVEST-PLUS 耦合模型结合地理信息图谱法仅预测研究区惯性发展情景下的土地利用变化,在后续的研究中可以加入多种限制性数据进行多情景评估分析,并重点探究优化参数设置及模型预测精度等相关问题,为区域精准决策提供技术支撑。

5 结论

- (1)1980—2018 年榆林市景观基质主要由草地和耕地构成,林地和未利用地次之,水域和建设用地区占比相对较少。土地利用变化主要特征为:耕地流失严重,主要向草地转移,变化速率突出,面积减少;建设用地面积在城市化发展的驱动下急剧增加;未利用地面积在生态优化的大环境下持续缩减,得到充分的开发和利用。
- (2)PLUS 模型预测结果表明,2018—2030 年榆林市土地利用变化与前一阶段基本保持一致,但变化速率普遍降低。建设用地呈增长状态,但增速放缓,水域面积小幅减少,耕地和未利用地面积缩减,草地面积持续增长,但仍为榆林市景观基质的关键构成部分。
- (3)从空间格局分析,榆林市生境质量分布具有一定的规律性,整体呈现东高西低、南北高中部低的格局。1980—2000 年,生境质量水平呈上升趋势,具体表现为生境质量等级为差和较差区域向生境质量

等级为较好区域的转变,主要集中在榆阳区、神木市一带;2000—2018 年,生境质量呈恶化状态,具体表现为急速扩张的建设用地,以及高强度人类活动所造成的恶劣影响促使低质量生境面积增加;2018—2030 年,生境质量变化强度下降,数值呈小幅增长,生境质量空间分布格局变化较小。

#### 参考文献:

- [1] 杨志鹏,许嘉巍,冯兴华,等.基于 InVEST 模型的东北地区土地利用变化对生境的影响研究[J].生态科学,2018,37(6):139-147.
- [2] 李广东.全球土地覆被时空变化与中国贡献[J].地理学报,2022,77(2):353-368.
- [3] 乔治,蒋玉颖,贺瞳,等.土地利用变化模拟研究进展[J].生态学报,2022,42(2):5165-5176.
- [4] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85(6): 101569-101583.
- [5] Zhang S H, Zhong Q L, Cheng D L, et al. Landscape ecological risk projection based on the PLUS model under the localized shared socioeconomic pathways in the Fujian Delta region[J]. Ecological Indicators, 2022, 136(9): 108642-108655.
- [6] Zhang X R, Zhou J, Li G N, et al. Spatial pattern reconstruction of regional habitat quality based on the simulation of land use changes from 1975 to 2010[J]. Journal of Geographical Sciences, 2020, 30(4): 601-620.
- [7] Karimi J D, Corstanje R, Harris J A. Bundling ecosystem services at a high resolution in the UK: Trade-offs and synergies in urban landscapes[J]. Landscape Ecology, 2021, 36(6): 1817-1835.
- [8] Imran M, Din N. Geospatially mapping carbon stock for mountainous forest classes using InVEST model and Sentinel-2 data: A case of Bagrote valley in the Karakoram range[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(9): 756-768.
- [9] Deepakshi B, Arendran G, Meheub S, et al. Assessment and prediction of carbon sequestration using Markov chain and InVEST model in Sariska Tiger Reserve, India[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 27(8): 123-140.
- [10] Gong J, Xie Y C, Cao E J, et al. Research on the change of mountain plant diversity based on the InVEST habitat quality model and landscape pattern index: Taking the Bailong River Basin in Gansu as an example[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(7): 1193-1210.
- [11] 李亚丽,杨粉莉,杨联安,等.近 40 年榆林市土地利用空间格局变化及影响因素分析[J].干旱区地理,2021, 44(4): 1011-1021.
- [12] 党晶晶,孙斌,龚直文.榆林市土地利用变化的驱动因素研究[J].西安工业大学学报,2018,38(1):74-80.
- [13] 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.
- [14] 王子尧,黄楚梨,李惊,等.耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J].生态学报,2022,42(14):1-10.
- [15] 李琛,高彬媛,吴映梅,等.基于 PLUS 模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J].浙江农林大学学报,2022, 39(1):84-94.
- [16] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于 1980—2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].应用生态学报,2020,31(12):4080-4090.
- [17] 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[J].生态学报,2018,38(20):7300-7311.
- [18] 王燕,高吉喜,金字,等.基于 2005—2015 年土地利用变化和 InVEST 模型的内蒙古巴林右旗农牧交错带生境质量研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(5): 654-662.
- [19] 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[J].北京大学学报(自然科学版),2016,52(3):553-562.
- [20] Jlanhua H, Junlong H, Chun L. The evaluation for the impact of land use change on habitat quality: A joint contribution of cellular automata scenario simulation and habitat quality assessment model[J]. Ecological Modelling, 2017, 35(5): 366-378.
- [21] 杨存建.地学信息图谱思想与实践探索[J].地球信息科学学报,2020,22(4):697-704.
- [22] Ding Q L, Chen Y, Bu L T, et al. Multi-Scenario analysis of habitat quality in the Yellow River Delta by Coupling FLUS with InVEST Model[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(5): 2389-2408.
- [23] Yang L Y, Sun Z H, Li J F, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces of land-use and land-cover change in the Mu Us Sandy Land, China from 1980 to 2018[J]. Arid Land Research and Management, 2022, 36(1): 109-124.
- [24] 包玉斌,刘康,李婷,等.基于 InVEST 模型的土地利用变化对生境的影响:以陕西省黄河湿地自然保护区为例[J].干旱区研究,2015,32(3):622-629.
- [25] Song Y N, Wang M, Sun X F, et al. Quantitative assessment of the habitat quality dynamics in Yellow River Basin, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(9): 614-614.