

# 延河流域景观格局的演变、预测及优化

——以陕西省延长县为例

王天宇<sup>1</sup>, 惠怡安<sup>1</sup>, 师莹<sup>1</sup>, 芮盼盼<sup>1</sup>, 刘琨<sup>2</sup>

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 2. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** [目的] 分析了黄土丘陵沟壑区延河流域景观格局的演变, 并对其进行预测及优化, 为该区生态环境建设和管理提供理论支撑。[方法] 以延河下游流域的陕西省延长县为例, 在分析历年景观格局指数的基础上, 使用CA-Markov方法对延长县景观格局演变进行模拟, 借鉴人为干扰度分析了景观变化强度及方向, 提出分级管控措施, 并建立了景观安全格局。[结果] ① 2008—2017年延长县景观格局的分离度指数提高了2.1%, 最大斑块指数降低了32.4%。② 未来10a林地景观比基年减少18.5%, 草地面积提高了13.1%。③ 研究区极度、中高度、轻度生态恶化区分别占总面积0.3%, 23.3%和48.4%。生态安全格局包括9个核心生态节点和21个一般节点。人为干扰度能够表征景观阻力。[结论] 通过实行分级管控和构建景观安全格局, 可以有效协调延长县三生空间布局和改善生态环境质量。

**关键词:** 景观格局优化; 人为干扰度; 黄土丘陵沟壑区; CA-Markov

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)06-0130-07

中图分类号: P901, F205

**文献参数:** 王天宇, 惠怡安, 师莹, 等. 延河流域景观格局的演变、预测及优化[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 130-136. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20200929.001; Wang Tianyu, Hui Yian, Shi Ying, et al. Evolution, prediction and optimization of landscape pattern in Yanhe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 130-136.

## Evolution, Prediction and Optimization of Landscape Pattern in Yanhe River Basin

—A Case Study at Yanchang County, Shaanxi Province

Wang Tianyu<sup>1</sup>, Hui Yian<sup>1</sup>, Shi Ying<sup>1</sup>, Rui Panpan<sup>1</sup>, Liu Kun<sup>2</sup>

(1. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China)

**Abstract:** [Objective] The prediction and optimization of the landscape pattern evolution in Yanhe River basin of loess hilly-gully region were studied in order to provide support for the construction and management of the ecological environment in this region theoretically. [Methods] Taking Yanchang County of Shaanxi Province in the lower reaches of Yanhe River basin as an example, based on the analysis of landscape pattern index over the years, the evolution of landscape pattern in Yanchang County was simulated by CA-Markov method, so as to analyze the landscape-change intensity and direction from the perspective of human disturbance. The landscape security pattern was established and hierarchical management and control measures were proposed. [Results] ① The division index of the landscape pattern in Yanchang County increased by 2.1% from 2008 to 2017, and the largest patch index decreased by 32.4%. ② In the coming 10 years, the forest landscape was expected to decrease by 18.5%, and the grassland was expected to increase by 13.1%. ③ The extreme, medium and mild ecological degradation areas in the study area accounted for 0.3%, 23.3%, and

收稿日期: 2020-06-22

修回日期: 2020-06-25

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土丘陵沟壑区乡村地域空间重构”(41901211), “农用地整治对耕地生态系统生态流的影响机制与评价研究: 以巢湖流域为例”(41701107)

第一作者: 王天宇(1996—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 研究方向为景观生态规划和乡村地理。Email: 1017743096@qq.com。

通讯作者: 惠怡安(1982—), 女(汉族), 陕西省米脂县人, 博士, 讲师, 主要从事乡村聚落地理与乡村规划研究。Email: 596060353@qq.com。

48.4% of the total area, respectively. The landscape security pattern included 9 core ecological corridor and 21 general corridor. Human disturbance could represent the landscape resistance. [Conclusion] The implementation of hierarchical management and control, and the construction of landscape security pattern are of great significance for preventing the deterioration of the ecological environment in Yanchang County.

**Keywords:** landscape pattern optimization; hemeroby; loess hilly-gully region; CA-Markov

随着我国城镇化进程的推进,城乡社会经济的重构,由此造成的土地利用转型带来了新的生态与环境问题<sup>[1]</sup>,提高了生态风险的不确定性。陕西省延长县属于典型黄土丘陵沟壑区,同时也是生态环境脆弱区<sup>[2-3]</sup>,生态系统对人类活动的扰动尤为敏感。近年来,大规模的城乡建设加速了其土地利用方式和配置格局的改变。土地利用转型实质上也是景观格局的变化<sup>[4]</sup>,区域景观格局同时影响生态功能发挥和生态系统物质、能量、生物移动,维持着区域生态系统的稳态<sup>[5]</sup>,并在一定程度上反映了生态系统受到人类活动干扰的程度。对景观格局的分析可以揭示生态系统的演化方向,在此基础上,优化景观格局对于维持和控制生态过程,防范生态风险具有重要意义。

目前针对黄土高原土地利用景观格局的研究涉及格局演化的过程特征<sup>[6-7]</sup>,格局与生态过程、自然环境要素的作用关系<sup>[8-10]</sup>,格局模拟预测等方面,模拟方法包 CA-Markov<sup>[11-13]</sup>和 CLUE-S 等<sup>[14]</sup>。这些研究多从单一视角即自然地理出发,关注景观格局的变化、模拟。而在景观格局优化方法中,基于累计耗费距离理论构建安全格局的研究较多<sup>[15-19]</sup>。表征阻力参数的方法为综合评价,包括生态服务功能价值评价<sup>[20-22]</sup>,生态安全评价<sup>[18,23]</sup>、土地综合评价等<sup>[24]</sup>。综合评价指标的选取具有一定主观性,影响阻力表征的准确度。比如生态服务价值评价包含娱乐文化指标,这与景观单元阻力相关性较低。人为干扰度又叫生态干扰度,是指生态系统内各组分的天然性受到人类活动干扰的程度<sup>[25]</sup>,因此可以表征生态流阻力大小。本文以延长县为例,在传统景观生态学研究基础上,从人为干扰这一人文视角出发,结合人为干扰度预测并分析景观变化强度,构建了景观安全格局,以期丰富地理学综合研究,并为延长县生态环境建设和管理提供借鉴。

## 1 研究概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

延长县属于陕西省延安市,东西长 73 km,南北宽 55 km,总面积 2 368.7 km<sup>2</sup>。研究区属于黄土丘陵沟壑区,部分地区有宽梁残塬,生态环境脆弱。1999 年实行退耕还林还草政策以来,林地、草地数量

迅速增加,但是仍然面临水土流失和人均耕地少的情况<sup>[26]</sup>。基于这一情况,延长县开始采取治沟造地的措施,人均耕地有所提高。与此同时,随着城市化进程加深,一方面农村人口外流,造成村庄空心化、耕地撂荒,部分坝地闲置;另一方面,由于苹果产业发展,园地面积增加,产生了废弃套袋等生产污染问题;最后,城乡建设、自然灾害如泥石流、冰雹等都对生态系统产生了一定程度的影响。

### 1.2 数据来源与处理

本研究采取的数据有研究区 2008 和 2013 年 Landsat TM 和 2017 年 Landsat8OLI 夏季遥感影像,延长县 1 弧秒分辨率 SRTM 数字高程数据。遥感影像和 SRTM 地理坐标系为 WGS84。依次对影像进行几何校正、辐射定标和大气校正。提取研究区行政边界裁剪镶嵌后的影像,参考土地利用现状分类标准(GB/T21010-2017)和研究区实际情况,通过支持向量机的监督分类方法将研究区景观划分为林地、草地、耕地、水域、建设用地、滩涂 6 种类型,由于遥感影像分辨率较低,因此解译存在误差(表 1)。经过精度检验,分类精度分别达到 87.5%,83.2%和 86.7%,满足研究要求。

表 1 研究区景观类型划分

景观类型	景观类型描述
林地	乔木林地、竹林地、果园
草地	草地、灌木、撂荒地、年限短的退耕林和淤地坝
耕地	普通耕地、坝地
水域	河流水面、湖泊水面、水库水面
建设用地	建筑、公路、靠近建设用地的裸地
滩涂	河漫滩

## 2 研究方法

### 2.1 景观格局指数

景观格局指数可以用来定量描述景观格局及其变化,一般包括斑块面积指数、形状指数、构型指数、多样性指数等<sup>[27]</sup>。本文从 4 个层面选取指标,即面积、形状、构型和多样性。面积层面选取最大斑块指数 LPI,LPI 范围为 0~100,表示某景观类型最大斑块占总面积比重,用于衡量景观类型的优势度。当景

观只有一种类型时, LPI 等于 100, 该指数降低表明人类活动对主导景观类型的负向扰动增强, 即导致生态系统的恶化。形状层面选取形状指数 SHAPE, 该指数等于斑块周长 1/4 除以斑块面积的平方根, 没有取值限制, 用于衡量斑块形状复杂程度。SHAPE=1 表明形状为正方形, SHAPE 指数增加形状复杂程度相应增加, 斑块形状越复杂表明受到的人为干扰越低<sup>[28]</sup>, 同时利于斑块边缘的物质、能量交换和生物多样性维持, 表明生态系统朝良性发展。构型层面选取蔓延度指数 CONTAG 和连接度指数 CONNECT。其中 CONTAG 指数表示不同斑块类型的聚集程度, 范围为 0~100, 该值为 0 表示斑块类型多样并且分布分散, 值越大斑块类型越单一, 分布越集中, 而生物多样性越低; CONNECT 指数是景观内特定数量斑块之间连接度与最大可能连接度的百分比, 范围为 0~100, 该值越高表明景观连通度越高。景观类型不同, 连通度意义也有所不同, 高连通度的林地景观有利于物质能量交换和生物迁徙, 高连通度的裸地则揭示生态系统的恶化。多样性层面选取香农均度指数 SHEI, 该指数用来表示景观中斑块分布的均匀程度, 范围为 0~1, SHEI 指数越高, 表明面积在景观各类型斑块中分布越均匀, 相应的生物多样性也越高, 生态系统朝良性发展。

## 2.2 CA-Markov 模型

元胞自动机—马尔科夫(CA-Markov)模型是预测土地变化的一个综合模型, 能够同时考虑空间因素和转移概率。本文采用 IDRISI 软件中的 CA-Markov 模块。Markov 模块利用土地利用数据可以生成土地转移概率矩阵和多准则评估(MCE), 结合 CA 模块对未来  $n$  年的土地利用情况进行模拟。Markov 链和 CA 分别可用公式(1)—(2)表示<sup>[29]</sup>:

$$S_{(t+1)} = P_{ij} \cdot S_t \quad (1)$$

$$S_{(t+1)} = f(S_t, N) \quad (2)$$

式中:  $S_{(t+1)}$ ,  $S_t$  分别表示  $t+1$  时刻和  $t$  时刻的土地利用状态;  $P_{ij}$  是土地转移概率矩阵;  $f$  表示局部空间元胞转换规则;  $N$  表示元胞滤波器的大小。

## 2.3 人为干扰度

人为干扰度(HI)是指生态系统内各组分的天然性受到干扰的程度<sup>[30]</sup>。目前, 确定人为干扰度的方法主要有专家判别法及问卷调查。由于研究区所处区域缺少相关研究, 而景观类型与其他区域接近, 因此本文借鉴相关学者对其他区域的研究成果<sup>[31-32]</sup>, 确定不同景观类型人为干扰度的值(表 2)。HI 值在 0~1 之间, HI 接近 1 则说明该景观类型受到人类活

动干扰程度大, 极难恢复自然状态; HI 接近 0 则说明该景观类型处于完全自然状态。根据 HI 的大小, 可以将景观类型分为轻度干扰( $HI < 0.3$ )、中度干扰( $0.3 \leq HI \leq 0.6$ )和重度干扰( $HI > 0.6$ )<sup>[32]</sup>。

表 2 不同景观类型人为干扰度数值

干扰度级别	景观类型	HI
轻度干扰	滩涂	0.15
	水域	0.20
中度干扰	林地	0.55
	草地	0.58
重度干扰	耕地	0.70
	建设用地	0.95

## 2.4 景观变化强度

为了定量描述景观类型变化强度和方向, 借鉴 HI 构建景观变化强度, 以 HI 的差值表征两种景观类型之间自然状态的差距。HI 差值的绝对值表征绝对变化强度, 而差值的符号表示变化的方向。负值表示朝生态恶性循环方向转变, 而正值表示朝生态良性循环方向转变, 即景观类型从高干扰向低干扰转变, 比如退耕还林(表 3)。具体计算公式为:

$$TI = \sum_{k=1}^n G_k \quad (3)$$

$$G_k = 100(H_i - H_j) \quad (4)$$

式中: TI 为变化强度;  $G_k$  为景观类型转移梯度;  $k$  为某一网格内的像元总数;  $H_i$  为前一时态该像元的人为干扰度值;  $H_j$  为变化后该像元的人为干扰度值。

表 3 景观类型转移梯度矩阵

类别	建设用地	耕地	草地	林地	水域	滩涂
建设用地	0	25	37	40	75	80
耕地	-25	0	12	15	50	55
草地	-37	-12	0	3	38	43
林地	-40	-15	-3	0	35	40
水域	-75	-50	-38	-35	0	5
滩涂	-80	-55	-43	-40	-5	0

## 2.5 累计耗费距离

区域内的物质、能量和生物移动是从“源地”向外扩散, “源地”是指那些能促进过程发展的景观类型, 比如大面积的林地、水域<sup>[33]</sup>。累计耗费距离是指生态流通过阻力面到达最近“源地”的累计耗费距离。本文采用人为干扰度评价和成本距离分析的方法, 构建景观累计耗费距离表面。其逻辑是, 景观人为干扰度越高, 生态系统中的物质、能量、生物在该类型景观的流动阻力越大。计算公式为:

$$R_k = \sum_{i=1}^n (100N_i \cdot HI_i) \quad (5)$$

式中: $R_k$  表示第  $k$  个网格的阻力大小;  $N_i$  表示第  $k$  个网格内,第  $i$  种景观类型的像元数;  $HI_i$  表示第  $i$  种景观类型的人为干扰度值。

$$C_i = \min \sum_{i=1}^n (D_i \cdot R_k) \quad (6)$$

$(i=1,2,3,\dots,n; k=1,2,3,\dots,m)$

式中: $C_i$  表示网格  $i$  到“源地”的累计耗费距离;  $D_i$  (km)表示网格  $i$  到“源地”的距离;  $R_k$  表示网格  $k$  的阻力值;  $n$  代表网格总数;  $m$  表示网格  $i$  到“源地”跨越的网格数。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用类型面积变化

延长县属于黄土丘陵沟壑区,总面积 2 361.4 km<sup>2</sup>,景观类型以耕地、林地和草地为主。建设用地主要沿中部的延河两岸分布,耕地主要沿沟道分布,在县域范围内分布较为均匀,林地和草地分别集中在延长县东南部和北部(附图 1)。

2008 年的土地利用类型中,建设用地 9.8 km<sup>2</sup>,占总面积 0.41%;耕地 483.43 km<sup>2</sup>,约占 20.47%;林地 700.94 km<sup>2</sup>,约占 29.68%;草地 1 147.47 km<sup>2</sup>,约占 48.59%;滩涂和水域共 19.79 km<sup>2</sup>,约占总面积 0.84%。2013 年与 2008 年相比,建设用地增加了 65.7%,约 6.44 km<sup>2</sup>;耕地和草地面积下降较多,分别减少了 73.81 km<sup>2</sup>,278.35 km<sup>2</sup>,约占原来面积的 15.3%和 24.3%;林地面积增加了 348.5 km<sup>2</sup>,约 49.7%;水域面积下降了 4.25 km<sup>2</sup>,约 21.9%。2017 年和 2013 年相比,耕地、水域和滩涂面积变化程度不大,建设用地和草地分别增加了 4.37,143.18 km<sup>2</sup>,林地减少了 151.25 km<sup>2</sup>(表 4),减少的林地集中在延长县西部和县城附近。林地面积增加主要受退耕还

林政策的影响,面积减少的原因有很多,2013 年延长县发生了一次大规模泥石流,作者在安沟乡调研时发现除部分塬上村庄以外其余村庄均受到影响,灾后虽然进行了生态保育,但林地恢复缓慢,灌草地恢复较快;延长县西北部长延高速的建设也造成了周边林地的减少;此外,县城及其他乡镇的建设活动也导致了林地面积的下降。耕地减少受退耕还林政策影响较大,2013 年以后耕地略有增加除了解译的误差,主要受到延长县治沟造地的影响。

表 4 延长县 2008—2017 年各景观类型面积 km<sup>2</sup>

年份	建设用地	耕地	林地	草地	水域	滩涂
2008	9.8	483.43	700.94	1147.47	19.44	0.35
2013	16.24	409.62	1049.44	869.12	15.19	1.68
2017	20.61	412.05	898.19	1012.3	16.72	1.57

### 3.2 景观格局指数分析

从景观格局类型水平来看,从 2008—2017 年,建设用地的 LPI 指数持续增加,表明建设用地呈集聚扩展,新增建设用地集中在县城。耕地和草地该指数先减少后增加,结合上文对面积变化的分析,耕地和草地 LPI 降低说明面积减少的斑块为核心斑块,后核心斑块面积又有所增加。林地由于退耕还林的影响,核心斑块面积增加,因此 LPI 升高,后略微降低是受到自然灾害、建设活动的影响;建设用地和水域的 SHAPE\_MN 指数增加较多,表明建设用地的扩展在边界处不规则,主要受到地形的限制,水域的形状变化主要受天气影响。林地 SHAPE\_MN 指数先增加后减少,表明林地的形状的复杂程度先增加后减少,减少是因为受到的人为干扰增加,这可能与灾后重新种植的人工林有关,边界的规则化进而会影响林地斑块与周围环境之间的物质、能量交换(表 5)。

表 5 研究区 2008,2013,2017 年景观格局类型指数

年份	指数	建设用地	耕地	林地	草地	水域	滩涂
2008	LPI	0.031 7	0.474 0	5.013 6	20.553 4	0.233 3	0.001 4
	SHAPE_MN	1.174 3	1.392 3	1.324 1	1.344 8	1.276 1	1.181 1
2013	LPI	0.033 1	0.291 9	6.981 8	10.036 4	0.056 5	0.004 3
	SHAPE_MN	1.164 9	1.395 9	1.380 0	1.334 7	1.488 3	1.175 4
2017	LPI	0.095 9	0.510 7	6.827 6	13.896 8	0.081 1	0.003 3
	SHAPE_MN	1.321 8	1.386 9	1.355 3	1.324 5	1.398 5	1.139 5

从景观水平来看,LPI 和 CONNECT 指数先减少,后略微增加,总体上景观格局呈现轻微破碎化、核

心斑块面积减少趋势;CONTAG 指数持续减少,优势斑块的连接性降低,结合实际来看主要是林地的连通

性降低;SHEI 指数持续增加,景观优势度降低,表明景观类型分布更加分散和均匀,主要原因是由于草地、林地和耕地之间的相互转化(表 6)。

表 6 研究区 2008、2013、2017 年景观指数

年份	LPI	CONNECT	CONTAG	SHEI
2008	20.553 4	0.093 1	55.737 3	0.613 7
2013	10.036 4	0.091 6	54.918 6	0.616 2
2017	13.896 8	0.09 2	54.836 2	0.769 2

### 3.3 景观格局演化分析

3.3.1 CA-Markov 预测结果与分析 以 2017 年为基年,分别对延长县未来 5 和 10 a 的景观格局演化进行预测。先使用 2008 和 2013 年的解译结果对 2017 年的景观格局进行预测,与实际解译结果对比,预测

精度达到 78.6%,证明 CA-Markov 预测结果可信。在此基础上,使用 2013—2017 年的土地利用转移矩阵和相应的适宜性图集,通过元胞自动机模拟 2022 和 2027 年延长县景观格局。模拟结果是根据过去 6 a 的景观类型变化趋势及规则生成,因此在模拟生态系统长时间序列演变的同时会放大短期工程性因素造成的误差。从模拟结果来看,未来 5 和 10 a,延长县北部、西部林地面积减少,林地破碎化程度提高,该结果可看成生态系统自然演变所致,减少的林地多转化为草地(图 1)。

耕地延现状向外扩展,主要由草地转变而来,属于治沟造地工程造成的误差。建设用地增加符合现状,增加部分集中在长延高速及北部乡镇,水域和滩地面积变化不大。

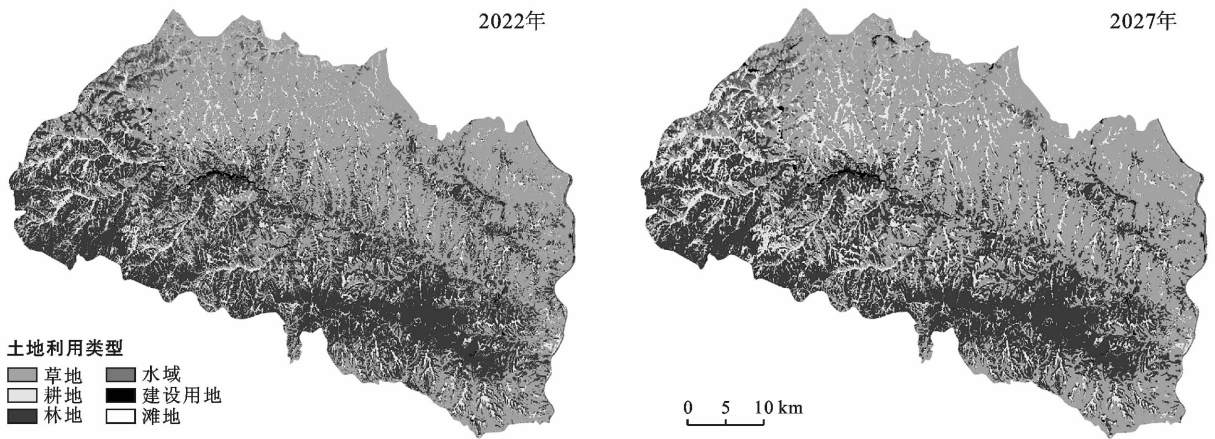


图 1 陕西省延长县景观格局模拟结果

3.3.2 景观变化强度分析 为了更直观分析景观类型的变化强度及方向,利用 2027 和 2017 年景观格局构造景观变化强度。使用自然断点法将景观绝对变化值分为 4 级。轻度或无变化区定义为绝对变化值处于总变化值的 7% 以下,其临界变化值为 199;中度变化区的绝对变化值在总变化值的 7%~18% 之间,即 199~514;高度变化区绝对变化值在 18%~42% 之间,其范围为 514~1 178;极度变化区其绝对变化值大于 42%,即 1 178。从变化强度来看,景观类型变化强度从西北向东南呈阶梯状分布,变化最剧烈区域集中在西北部 and 延河两岸,这与建设用地和水域分布大致重合。此外,延长县北部和东北部一些区域生态环境有良性发展的趋势,即该区域景观类型从高干扰度向低干扰度转变,这些转变与退耕还林、治沟造地有关(图 2)。

对于预测结果中生态恶化程度不同的地区,采用自然断点法将其分为从极度恶化区到轻度恶化区的 4 个级别。轻度恶化区其相对变化值范围为 0~ -198,占总恶化程度的 0~9%;中度恶化区其范围

为 -198~-540,占 9%~21.5%;高度恶化区相对变化值范围为 -540~-1 474,占 21.5%~59%;极度恶化区为相对变化值小于 -1 474 的像元点,恶化程度大于 59%。

由于各级别恶化区域其程度和原因不同,分别对不同级别的生态恶化区域提出分级管控要求。①一级控制区。此类区域属于极度恶化区,景观类型变化极度剧烈,约占总面积 0.3%,主要在延长县延河流域上游,还有长延高速附近,呈点状、线状分布。对于这类区域,要控制长延高速和延河缓冲区内建设用地规模,治沟造地应该以生态修复为主,生产为辅。新增淤地坝可以转变成林地等生态价值较高的景观类型。②二级控制区。这类区域属于景观类型中度或高度恶化区域,约占 23.3%,包括延长县北部大片面状区域和中部部分区域。这些区域的主要生态问题是林地转变成草地。这些区域要加强对于核心林地斑块的保护,保育水土,防止核心林地斑块面积进一步减少。③三级控制区。该类区域属于景观类型轻

度恶化或没有变化区域,约占 48.4%,在延长县境内分布较为零散和均匀,但存在耕地撂荒的情况。因

此,这些区域要通过迁村并点的方式,提高基础设施利用效率,缩小生产半径,合理布置生态空间。

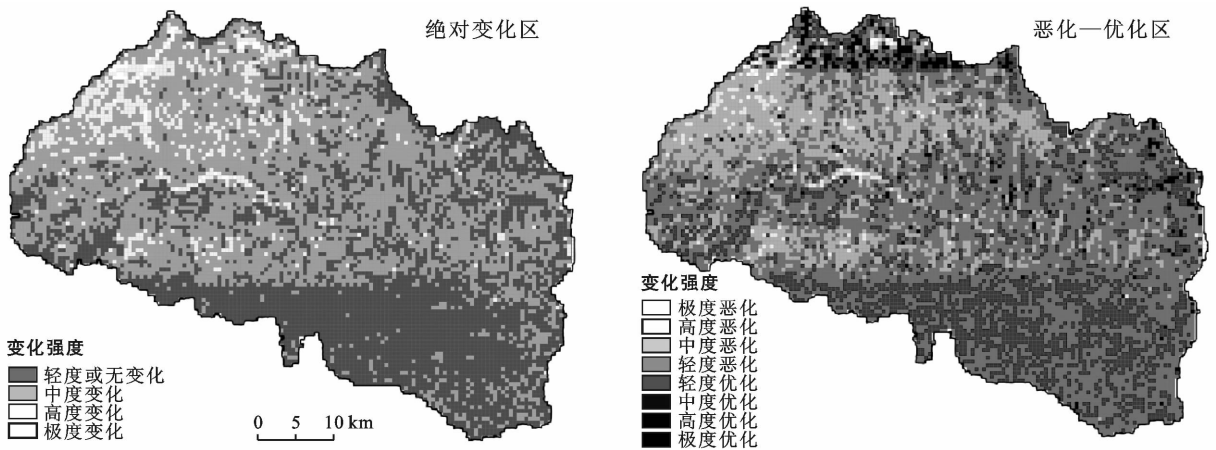


图 2 陕西省延长县景观类型变化强度分区

### 3.4 景观安全格局构建

根据现状分析及 CA-Markov 的预测结果,延长县生态环境的突出问题是景观整体连通性降低以及林地面积减少。因此,一方面需要对高干扰区域实行分级控制,规范人类活动;另一方面需要构建生态节点、廊道、源地结合的生态安全格局,提高生态系统韧性和格局连通性。生态源地是指那些能促进过程发展的景观类型,具有空间扩展性、连续性<sup>[33]</sup>。考虑到草地是研究区分布最广的景观类型且林地有更强的生态功能,因此草地作为基质比较合适,而大面积的林地是研究区的生态源地。根据研究区林地的实际分布情况,提取面积大于 2 km<sup>2</sup> 的林地斑块作为生态源地。生态源地主要在延长县南部呈面状分布,总共 596.5 km<sup>2</sup>,其中最大的源地位于东南部,共 268.2 km<sup>2</sup>,北部源地较少,共计 11.9 km<sup>2</sup>。地形包括沟地(在则沟 8.58 km<sup>2</sup>,崖窑沟 4.3 km<sup>2</sup> 等)、山峰和公园(八岭九连山 5.72 km<sup>2</sup>,翠屏山 7.2 km<sup>2</sup> 等)。生态廊道是连接生态源地,维持生物流、物质流、能量流的重要通道。考虑到生态廊道的连通性和脆弱性,将生态廊道划分为两级:核心生态廊道用以维持生物多样性,对区域整体生态流起到制约作用的同时部分节点具有脆弱性;一般生态廊道供鸟类、小型哺乳动物迁徙,并影响局部地区的生物、物质流动。廊道宽度采取相关学者研究<sup>[34]</sup>,核心廊道宽 100~200 m,研究区共 5 条 111.4 km,主要分布在西南部;一般生态廊道宽 30~60 m,研究区共 18 条 240.8 km,在西南部和东北部呈对称分布。生态节点指在景观格局中连接相邻生态源地(附图 2),对生态流运行起关键作用的区域<sup>[23]</sup>。把最大耗费距离路径和生态廊道的交点作为

生态节点。根据生态节点所处廊道等级,将生态节点分为核心生态节点和一般生态节点。研究区共有核心生态节点 9 个,分别位于雷赤乡、安沟乡、七里村镇(3 个)、张家滩镇、黑家堡镇、郭旗乡、郑庄镇;一般生态节点 21 个,分别位于罗子山乡、安河镇(2 个)、张家滩镇(4 个)、交口镇、安沟乡(3 个)、七里村镇(4 个)、刘家河乡、郭旗乡、黑家堡镇、郑庄镇(3 个)。

## 4 讨论与结论

(1) 根据景观格局指数分析和 CA-Markov 模型预测结果,延长县生态问题体现为林地面积减少,景观格局整体连通性降低 1.2%,进而影响斑块边界与环境之间的物质流、能量流和生物流。

(2) 基于 HI 指数和景观转移梯度矩阵构建的景观变化 TI 指数,能够较好表现景观变化强度和方向,且符合研究区实际的景观类型分布,长延高速和延河两岸是研究区景观变化最剧烈的区域。

(3) 本文尝试利用 HI 指数建立景观阻力面以构建累计耗费距离表面,通过计算最大/最小耗费距离路径建立景观安全格局。研究区共规划了 5 条核心廊道和 18 条一般廊道,以串联 9 个核心节点,21 个一般节点。

(4) HI 指数只能从总体上判断地区生态环境变化方向,对于一些干扰度相近的景观类型,生态功能的强弱还需要另外进行研究。比如景观类型从低干扰的草地转变成耕地,这两者之间的生态功能强弱仅凭 HI 值的高低无法判断,因此对于该像元属于生态优化或恶化难以判断;其次,相比于生态服务价值评价,以 HI 指数构建阻力面能够避免一些非生态功能

对于阻力值评价的干扰。但是,人为干扰度的确定缺少定量研究,目前多采用专家问询法等方法确定该数值,存在主观性。因此,未来需要研究如何通过定量的方法确定人为干扰度数值。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构[J]. 地理学报, 2013, 68(8): 1019-1028.
- [2] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 等. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
- [3] 李裕瑞, 李怡, 范朋灿, 等. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对乡村人地系统的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(5): 241-250.
- [4] 韩文权, 常禹, 胡远满, 等. 景观格局优化研究进展[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1487-1492.
- [5] 邬建国. 景观生态学: 概念与理论[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1): 42-52.
- [6] 钟莉娜, 赵文武, 吕一河, 等. 黄土丘陵沟壑区景观格局演变特征: 以陕西省延安市为例[J]. 生态学报, 2014, 34(12): 3368-3377.
- [7] 花东文, 温仲明, 杨士梭, 等. 黄土丘陵沟壑区土地利用景观格局变化分析: 以延河流域为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(5): 86-91.
- [8] 钟德燕, 常庆瑞. 黄土丘陵沟壑区不同地貌类型土地利用景观格局[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 192-197.
- [9] 潘竟虎, 文岩. 基于 RUSLE-SMA 的黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀评价及景观格局分析: 以庆城县蔡家庙流域为例[J]. 生态学杂志, 2013, 32(2): 436-444.
- [10] 耿莎, 石云. 黄土丘陵区小流域景观格局与生态恢复措施和地形因子耦合关系研究[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(2): 197-203.
- [11] 刘淑燕, 余新晓, 李庆云, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土丘陵区土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 297-303.
- [12] 郭斌, 张莉, 文雯, 等. 基于 CA-Markov 模型的黄土高原南部地区土地利用动态模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 14-18.
- [13] 李志, 刘文兆, 郑粉莉. 基于 CA-Markov 模型的黄土塬区黑河流域土地利用变化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 346-352, 391.
- [14] 田义超, 任志远. 基于 CLUE-S 模型的黄土台塬区土地利用变化模拟: 以陕西省咸阳台塬区为例[J]. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1224-1234.
- [15] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [16] 陈影, 哈凯, 贺文龙, 等. 冀西北间山盆地地区景观格局变化及优化研究: 以河北省怀来县为例[J]. 自然资源学报, 2016, 31(4): 556-569.
- [17] 熊繁, 邵景安. 不同土地利用情景下农村景观生态格局优化[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(2): 11-21.
- [18] 李青圃, 张正栋, 万露文, 等. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [19] 宁立新, 周云凯, 白秀玲, 等. 鄱阳湖区景观格局季相变化及其优化调控研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 439-453.
- [20] 陆禹, 余济云, 陈彩虹, 等. 基于粒度反推法的景观生态安全格局优化: 以海口市秀英区为例[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6384-6393.
- [21] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6969-6984.
- [22] 刘杰, 叶晶, 杨婉, 等. 基于 GIS 的滇池流域景观格局优化[J]. 自然资源学报, 2012, 27(5): 801-808.
- [23] 潘竟虎, 刘晓. 疏勒河流域景观生态风险评价与生态安全格局优化构建[J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 791-799.
- [24] 官冬杰, 赵祖伦, 王秋艳, 等. 三峡库区景观生态安全格局优化研究: 以重庆市开州区为例[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 171-177.
- [25] 张月, 张飞, 王娟, 等. 近 40 年艾比湖湿地自然保护区生态干扰度时空动态及景观格局变化[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7082-7097.
- [26] 贺春雄. 延安治沟造地工程的现状、特点及作用[J]. 地球环境学报, 2015, 6(4): 255-260.
- [27] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来[J]. 生态学报, 2008, 28(11): 5521-5531.
- [28] 刘学录. 盐化草地景观中的斑块形状指数及其生态学意义[J]. 草业科学, 2000, 17(2): 50-52.
- [29] 赵冬玲, 杜萌, 杨建宇, 等. 基于 CA-Markov 模型的土地利用演化模拟预测研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 278-285.
- [30] 陈爱莲, 朱博勤, 陈利顶, 等. 双台河口湿地景观及生态干扰度的动态变化[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1120-1128.
- [31] 李继红, 胡庆磊. 基于生态干扰度的宝清县湿地景观动态分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(5): 154-159.
- [32] 刘吉平, 董春月, 盛连喜, 等. 1955—2010 年小三江平原沼泽湿地景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. 地理科学, 2016, 36(6): 879-887.
- [33] 陈利顶, 傅伯杰, 赵文武. “源”“汇”景观理论及其生态学意义[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1444-1449.
- [34] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2406-2412.