

# 基于模糊伽马模型的河南省生态空间辨识与格局优化

张驭航<sup>1,2</sup>, 李玲<sup>1,2</sup>, 王秀丽<sup>1,2</sup>, 路婕<sup>2</sup>, 李珊珊<sup>3</sup>

(1.河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450002;

2.河南省土地整治与生态重建工程技术研究中心, 郑州 450002; 3.河南省煤田地质局物探测量队, 郑州 450002)

**摘要:**生态空间的辨识与格局优化是保障区域内土地生态安全的有效途径。为明晰研究区内生态空间整体格局, 清查研究区整体资源清单, 了解土地自然生态系统现状, 通过综合生态系统服务重要性评价模型和生态系统敏感性评价模型, 以河南省为研究区域, 依托 ArcGIS 10.5 平台, 根据研究区生态本底状况选择评价指标, 基于模糊逻辑理论利用模糊伽马模型辨识生态空间, 并提出了生态空间优化格局方案。研究表明: 研究区域生态空间分为生态保护空间、限制约束空间、控制缓冲空间、优化开发空间 4 种类型, 生态保护空间面积为 13 668.73 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 8.3%, 限制约束空间面积为 19 161.78 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 11.63%, 控制缓冲空间面积 9 434.67 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 5.72%, 优化开发空间面积为 122 480.73 km<sup>2</sup>, 占研究区总面积的 74.34%。根据生态空间辨识结果提出研究区生态空间格局优化方案, 将研究区域划分为“三区、两带、3 块”, 分别为太行山生态红线保护区、大别山生态红线保护区、伏牛山生态红线保护区; 沿黄河生态保护带、沿淮河生态保护带; 豫东平原生态保护块、豫西丘陵生态保护块和豫北丘陵生态保护块。

**关键词:**土地生态; 生态空间; 模糊伽马模型; 生态系统服务重要性; 生态系统敏感性

**中图分类号:** X171.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2020)06-0211-07

## Ecological Spatial Identification and Pattern Optimization in Henan Province Based on Fuzzy Gamma Model

ZHANG Yuhang<sup>1,2</sup>, LI Ling<sup>1,2</sup>, WANG Xiuli<sup>1,2</sup>, LU Jie<sup>2</sup>, LI Shanshan<sup>3</sup>

(1.College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002,

China; 2.Henan Engineering Research Center of Land Consolidation and Ecological Restoration,

Zhengzhou 450002, China; 3.Geophysical Survey Team of Henan Coalfield Geology Bureau, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Land ecological security is related to the development of human society. In order to clarify the overall pattern of ecological space in the study area, check the list of overall resources in the study area, and understand the current situation of land natural ecosystem, the identification and pattern optimization of ecological space is an effective way to ensure the ecological security of land in the region. Based on the comprehensive ecosystem service importance evaluation model and ecosystem sensitivity evaluation model, ArcGIS 10.5 platform, selecting evaluation indicators according to the ecological background of the study area, Henan Province was taken as the study area, fuzzy gamma model was used to identify the ecological space based on the fuzzy logic theory, and the scheme of ecological space optimization pattern was put forward. The results show that there are four types of ecological spaces in the study area: ecological protection space, restriction space, control buffer space and optimization development space; the area of ecological protection space is 13 668.73 km<sup>2</sup>, accounting for 8.3% of the total study area, the area of restriction space is 19 161.78 km<sup>2</sup>, accounting for 11.63% of the total study area, the area of control buffer space is 9 434.67 km<sup>2</sup>, accounting for 5.72% of the total study area; the area of optimized development space is 122 480.73 km<sup>2</sup>, accounting for 74.34% of the total study area. According to the results of ecological space identification, the optimization scheme of ecological space pattern in the study area is proposed. The study area is divided into three areas, two belts and three blocks, which are Taihang Mountain ecological red line protection area, Dabie Mountain

收稿日期: 2019-12-31

修回日期: 2020-01-19

资助项目: 河南省科技攻关项目(182102110073); 河南科技智库调研课题(HNKJZK-2020-24C); 河南省哲学社会科学规划项目(2019BJJ040)

第一作者: 张驭航(1993—), 男, 河南登封人, 硕士研究生, 研究方向为土地评价与整治。E-mail: zhangyuhang993@163.com

通信作者: 李玲(1973—), 女, 河南息县人, 教授, 博士, 主要从事土壤地理、土地复垦研究。E-mail: ndlling@163.com

ecological red line protection area, Funiu Mountain ecological red line protection area, Yellow River ecological protection belt, Huaihe River ecological protection belt, east Henan plain ecological protection block, west Henan hills ecological protection block and north Henan hills ecological protection block.

**Keywords:** land ecology; ecological space; fuzzy Gamma model; importance of ecosystem services; ecosystem sensitivity

城镇化与工业化的进程加速了城乡人口流动与土地要素的使用,密集的人口聚集在城市使区域生态环境负荷较大,区域内景观结构破碎,生态空间被侵占从而导致生态空间结构布局的不合理<sup>[1-3]</sup>。《国家乡村振兴战略规划(2018—2022 年)》提出:“要严格保护生态空间,树立山水林田湖草是一个生命共同体的理念,加强对自然生态空间的整体保护,修复和改善乡村生态环境,提升生态功能和服务价值”。生态空间的识别以及区域内的布局优化,是强化土地生态质量,保障土地生态安全的重要途径。

生态空间作为提供生态服务或生态产品的国土空间,具有自然属性。近年来,国内外专家在生态空间的占用、承载能力及生态足迹的测算<sup>[4-7]</sup>、城市生态空间结构和功能演变规律<sup>[8-10]</sup>、生态空间辨识模型构建<sup>[11-15]</sup>等方面取得了许多研究成果。但在生态空间辨识方面,也存在一些可以进一步拓展之处。其一,研究尺度往往集中在县、市尺度上,集中于省级行政区的研究不多,尺度小往往较难根据大区域内地质、气候、经济等差异提出建设性布局优化建议与措施;其二,指标体系较为庞杂,其范围涵盖经济、土壤、气象、水分、地形地貌等诸多方面,但指标的选取通常偏重于考虑生态用地斑块自身功能属性,而忽略了斑块在整个基质景观中的空间结构重要性以及与周围环境间的关系<sup>[16]</sup>;其三,往往采用空间加权叠加评价指标的方式来进行生态空间的辨识,而指标权重的计算方式多样,具有较强的主观性。鉴于此,研究运用模糊数学理论,将空间实体上的指标数据运用相应的规则模糊为一个隶属度合集,依靠模糊伽马模型定量构建生态空间识别体系。

本文研究区域为河南省,河南省东部大面积的平原宜耕地区使之成为中国粮食的主产区。研究区内地形地貌、降水、土壤、植被均差异明显,河南省作为生态空间辨识与格局优化的研究区域就显得尤为有代表性。因此,根据河南省生态环境现状与生态基底状况,选择构建生态系统服务功能重要性模型和生态系统敏感性模型。借助 ArcGIS 10.5 软件,运用模糊数学理论,将各评价因子模糊化利用模糊伽马模型叠加各指标,定量对河南省生态空间进行辨识,依据辨识结果,探索河南省生态空间格局优化途径,以期为

区域内生态空间安全提供相应的指引,为相关政策的制定提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

河南省地处我国中东部、黄河中下游,地理坐标位于北纬  $31^{\circ}23'$ — $36^{\circ}22'$ ,东经  $110^{\circ}21'$ — $116^{\circ}39'$ 。东邻山东、安徽,西连陕西,北接河北、山西,南界湖北。总面积约 16.7 万  $\text{km}^2$ ,占全国总面积的 1.74%。地势西高东低,地貌类型复杂多样,主要由中低山地、丘陵和平原组成。地跨北亚热带和暖温带、湿润和半湿润地区,属季风气候,有较明显的过渡特征。年平均气温  $12.1\sim 15.7^{\circ}\text{C}$ ,年均降水量  $500\sim 1\,200\text{ mm}$ 。土壤类型多样,以棕壤、黄棕壤、褐土、潮土、砂姜黑土、盐碱土和水稻土为主。

### 1.2 数据来源及处理

根据河南省目前的生态环境现状以及自然环境演变过程中出现的生态问题,参考国家环境保护部制定的《生态保护红线划定指南》(2017)<sup>[17]</sup>中关于生态系统服务功能重要性和生态环境敏感性的评价因子及分级标准,在研究生态系统服务功能重要性时重点构建了 3 个模型,即水源涵养功能重要性模型、水土保持功能重要性模型、生物多样性维护功能重要性模型;在研究生态敏感性时重点构建了 3 个模型,即水土流失敏感性模型、土地沙化敏感性模型、石漠化敏感性模型。结合河南省的生态特点和指标数值分布特征,将生态系统服务功能重要性模型评估结果依次划分为一般重要、中度重要、重要、极重要 4 个等级;将生态敏感性模型评估结果依次划分为轻度敏感、中度敏感、高度敏感和极敏感 4 个等级。各项指标数据来源及处理过程见表 1。数据均通过 ArcGIS 相关工具转化成分辨率为  $100\text{ m}\times 100\text{ m}$  的栅格图层,统一至同一投影坐标系中,方便进行多数据的空间分析与运算。

### 1.3 研究方法

以模糊伽马模型叠加生态系统服务功能重要性和生态系统敏感性评价结果,进行生态空间辨识,并提出区域内生态格局的优化策略<sup>[19]</sup>。

1.3.1 指标标准化 因各数据指标量纲不同,不存

在可比性,故采用最小最大值法对各指标进行归一化处理。处理公式为:

正向指标:

$$X=\frac{(X_i-X_{\max})}{(X_{\max}-X_{\min})}$$

(1)

负向指标:

$$X=\frac{(X_{\max}-X_i)}{(X_{\max}-X_{\min})}$$

(2)

式中: $X$  为归一化处理后的值; $X_i$  为指标原始值; $X_{\min}$  为指标最小值; $X_{\max}$  为指标最大值。

表 1 数据来源及处理过程

评价因子	来源	处理过程
NPP(多年植被净初级生产力)	中国科学院资源环境科学数据中心 ( <a href="http://www.resdc.cn/">http:// www. resdc.cn/</a> )	
降雨侵蚀力		汇总王万忠 <sup>[18]</sup> 等计算的全国 140 多个重点站的年 $R$ 值,采用 GIS 空间插值获得研究区 $R$ 值分布图
土壤可蚀性	河南省 1:20 万土壤数据库	
地形起伏度	GDEMDEM 30 M 分辨率数字高程数据(地理空间数据云 <a href="http://www.gscloud.cn/">http:// www. gscloud.cn/</a> )	在 ArcGIS 10.5 中计算高程数据集的最大值和最小值,并运用 ArcGIS 工具栅格计算器以最大值—最小值计算,获取地形起伏度
植被覆盖度	中国年度植被指数(NDVI)空间分布数据集(中国科学院资源环境科学数据中心 <a href="http://www.resdc.cn/">http:// www. resdc.cn/</a> )	
干燥度指数	中国气象数据背景集 Aridity 干燥度数据集(中国科学院资源环境科学数据中心 <a href="http://www.resdc.cn/">http:// www. resdc.cn/</a> )	
起沙风天数	河南省全省气象站点日值数据(2010 年)(中国气象科学数据共享服务网: <a href="http://cdc.cma.gov.cn/">http://cdc.cma.gov.cn/</a> )	计算冬春季风速 $\geq 6$ m/s 的起沙风天数,通过 ArcGIS 10.5 空间插值获得空间分布图
土壤质地	河南省 1:20 万土壤数据库	
气象数据	中国气象科学数据共享服务网: <a href="http://cdc.cma.gov.cn/">http://cdc.cma.gov.cn/</a>	
行政区划图	河南省测绘地理信息局(审图号:豫 S(2019)013 号)	

1.3.2 生态系统服务功能重要性及生态系统敏感性评估 生态系统服务功能重要性选取水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性维护功能 3 种生态系统服务来定量评价。水源涵养功能是指生态系统中植物的根茎叶对降水进行截留、渗透以及蓄留,进而补充地下水。另外植物的蒸腾作用与外界进行水循环,从而达到缓和地表径流、补充地下水水源水位、滞洪填枯、涵养水源的作用<sup>[20]</sup>。水土保持功能是指生态系统通过其自身结构及过程来减少水蚀作用对土壤的侵蚀<sup>[21]</sup>。生物多样性维护功能是生态系统在维护基因、物种、生态系统多样性中发挥的作用,是生态系统提供的最主要功能之一<sup>[22]</sup>。各功能评价因子模型及解释见表 2。

生态系统敏感性选取水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性 3 种生态系统敏感性因子来定量评价。水土流失是研究区内较严重的生态问题之一,在前人研究基础上<sup>[23]</sup>,选取降雨侵蚀力、土壤可蚀性因子、坡长坡度和植被覆盖度 4 个指标计算水土流失敏感性指数。影响土地沙化的指标因素较多,结合研究区情况与数据支持,本文选取干燥度指数、起沙风天数、土壤质地及植被覆盖度 4 个指标来计算土地沙化敏感性指数。研究区内地形复杂,植被覆盖条件差距较大,岩石裸露在区域内有所体现。故选取裸岩出露百分比、地形坡度及植被覆盖度 3 个指标进行

石漠化敏感性评价。各评价因子模型及评价指标分级标准分别见表 2,表 3。

1.3.3 生态空间辨识方法 模糊逻辑理论是由 L.A. Zadeh<sup>[24]</sup>教授提出。模糊逻辑并不模糊,而是将“模糊”进行处理,进而消除模糊的一种逻辑方式。其主要思路为将地图或空间地理信息上的空间实体看做隶属于某个数据集的元素,用相应的规则进行模糊处理事物,将经典集合特征函数的值域 $\{0,1\}$ 推广至闭区间 $[0,1]$ <sup>[25]</sup>。如水源涵养功能重要性,生物多样性维护功能等评价因子对生态空间的影响是一个动态渐变的过程,其影响程度的取值范围为 $[0,1]$ 。

(1) 指标模糊化。指标模糊化就是将指标图层通过合适的隶属度函数映射至 $[0,1]$ 的值域区间。在 ArcGIS 10.5 中,有 7 种模糊隶属度函数:Gaussian, Small, Large, Near, MSLarge, MSSmall, Linear。其中,Linear 函数指对输入图层进行线性变换,在其最大值处隶属度为 1。本文选用 Linear 函数作为隶属度函数。

(2) 模糊叠加。模糊叠加主要有 5 种模型<sup>[26]</sup>:模糊与模型 Fuzzy And,模糊或模型 Fuzzy Or,模糊代数积模型 Fuzzy Product,模糊代数和模型 Fuzzy Sum 和模糊伽马模型 Fuzzy Gamma。定义为:

$$F:[0,1]n\rightarrow[0,1]$$

(3)

其中,模糊与模型为各单元网格中最小的隶属度



组合;模糊或模型为各单元网格中最大的隶属度组合;模糊代数积模型为各单元网格隶属度之积,其得到的结果往往小于单一图层的隶属度;模糊代数和模型并非单一的各单元网格隶属度之和,其结果一般大于或等于单一图层的隶属度,使同时支持命题的证据相互增强,从而对命题进一步肯定。假设 A 图层隶属度为 0.3,B 图层隶属度为 0.8,其模糊代数和的结果为  $1-(1\sim 0.3)\times(1\sim 0.8)=0.86$ ,即模糊叠加结果大于 A,B 图层;模糊伽马模型通常综合多个图层隶属度,使其综合结果处于最大隶属度与最小隶属度之间,取得较恰当的值。本文选用的建模型为模糊

伽马模型。模糊伽马模型公式如下:

$$\mu_s = [1 - \prod_{k=1}^m (1 - \mu_{sk})]^\gamma \times (\prod_{k=1}^m \mu_{sk})^{1-\gamma} \quad (4)$$

式中: $\mu_s$ 为模型的输出值; $\mu_{sk}$ 为  $k$  图层栅格单元的模糊隶属度,值域为  $[0,1]$ ;  $m$  为输入图层数,本文为 6 个图层,分别为水源涵养功能重要性、水土保持功能重要性、生物多样性维护功能重要性、水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性模糊集; $\gamma$  可取  $0\sim 1$  之间任一值,当  $\gamma=1$  时,叠加结果与模糊代数和结果相同;当  $\gamma=0$  时,叠加结果与模糊代数积结果相同。本文  $\gamma$  取值 0.9。

表 2 生态系统各评价因子及模型解释

评价因素	评价因子	评价模型	备注
生态系统 服务功能 重要性	水源涵养功能	$S_{wr} = NPP \times F_{sic} \times F_{pre} \times (1 - F_{slo})$	$S_{wr}$ 为生态系统水源涵养服务能力指数;NPP 为多年植被净初级生产力平均值; $F_{sic}$ 为土壤渗流因子归一值; $F_{pre}$ 为多年平均降水量归一值; $F_{slo}$ 为坡度归一值
	水土保持功能	$S_{pro} = NPP \times (1 - K) \times (1 - F_{slo})$	$S_{pro}$ 为水土保持服务能力指数;NPP 为多年植被净初级生产力平均值; $F_{slo}$ 为坡度指数归一值; $K$ 为土壤可蚀性因子归一值
	生物多样性维护功能	$S_{bio} = NPP \times F_{pre} \times F_{tem} \times (1 - F_{alt})$	$S_{bio}$ 为生物多样性维护服务能力指数;NPP 为多年植被净初级生产力平均值; $F_{pre}$ 为多年平均降水量归一值; $F_{tem}$ 为多年平均气温归一值; $F_{alt}$ 为海拔归一值
生态系统 敏感性	水土流失敏感性	$SS_i = \sqrt[4]{R_i \times K_i \times LS_i \times C_i}$	$SS_i$ 为 $i$ 栅格单元水土流失敏感性指数; $R_i$ 为 $i$ 栅格单元降雨侵蚀力; $K_i$ 为 $i$ 栅格单元土壤可蚀性因子; $LS_i$ 为 $i$ 栅格单元坡长坡度; $C_i$ 为 $i$ 栅格单元地表植被覆盖度
	土地沙化敏感性	$D_i = \sqrt[4]{I_i \times W_i \times K_i \times C_i}$	$D_i$ 为 $i$ 栅格单元土地沙化敏感性指数; $I_i$ 为 $i$ 栅格单元干燥度指数; $W_i$ 为 $i$ 栅格单元起沙风天数; $K_i$ 为 $i$ 栅格单元土壤质地; $C_i$ 为 $i$ 栅格单元地表植被覆盖度
	石漠化敏感性	$S_i = \sqrt[3]{D_i \times P_i \times C_i}$	$S_i$ 为 $i$ 栅格单元石漠化敏感性指数; $D_i, P_i, C_i$ 分别为 $i$ 栅格单元区域裸岩出露面积百分比、地形坡度、植被覆盖度

表 3 生态系统敏感性评价指标分级标准

评价指标	轻度敏感	中度敏感	敏感	极敏感
植被覆盖度	$\geq 0.6$	$0.4\sim 0.6$	$0.2\sim 0.4$	$\leq 0.2$
起沙风天数/d	$\leq 20$	$20\sim 30$	$30\sim 40$	$\geq 40$
干燥度指数	$\leq 1$	$1\sim 1.5$	$1.5\sim 5$	$\geq 5$
降雨侵蚀力	$\leq 100$	$100\sim 400$	$400\sim 600$	$\geq 600$
坡长坡度	$\leq 50$	$50\sim 300$	$300\sim 500$	$\geq 500$
土壤可蚀性	$\leq 0.19$	$0.19\sim 0.2$	$0.2\sim 0.21$	$\geq 0.21$
地形坡度/(°)	$\leq 5$	$5\sim 15$	$15\sim 30$	$\geq 30$
土壤质地	石砾	黏质	壤质	砂质
分级赋值	1	3	5	7

本文生态空间辨识方法是将生态系统服务功能及生态系统敏感性各指数栅格单元进行线性变换计算隶属度,将其值模糊化为值域为  $[0,1]$  的模糊集,即隶属度区间。采用模糊伽马模型来对各生态指数的模糊集进行叠加处理,对处理结果运用自然断点法按照值的大小将其依次分为 4 类。

2 结果与分析

2.1 生态系统服务功能重要性评价结果

根据生态系统服务功能重要性评价方法,对研究区的水源涵养功能重要性、水土保持功能重要性、生物多样性维护功能重要性分别进行评价。在水源涵养功能重要性评价方面,重要和极重要区域面积分别为  $12\,552.98\text{ km}^2$ ,  $3\,492.28\text{ km}^2$ , 分别占研究区总面积的 7.6% 和 2.11% (图 1)。这些区域主要分布在研究区南部桐柏大别山南部低山区,大致在桐柏、董家河、柳林、苏家河、沙窝、苏仙石一线以南,主要由低缓的低山组成,由于降水量大,这些区域水源涵养与水质维护能力强,能起到补充地下水位,维护水资源安全的作用。在水土保持功能重要性评价方面,重要和极重要区域面积分别为  $50\,641\text{ km}^2$ ,  $17\,929.98\text{ km}^2$ , 分别占研究区总面积的 30.16% 和 10.68%。这些区域主要分布在研究区南部桐柏大别山南部低山区、西

南部的浙川喀斯特化低山丘陵区、伏牛山东南部低山丘陵区、黄河南岸沙丘沙地、豫北太行山地丘陵区。这些区域海拔相对较高,土壤类型以潮土、粗骨土、黄棕壤以及砂姜黑土为主。在生物多样性维护功能重要性维护功能评价方面,重要和极重要区域面积分别

为 16 701.33 km<sup>2</sup>,6 577.71 km<sup>2</sup>,分别占研究区总面积的 10.1%和 3.98%。这些区域主要分布在研究区南部桐柏大别山南部低山区及桐柏大别山北部丘陵区。这些地区气候温暖多雨,植被覆盖率高,地形以低缓的低山和丘陵为主,适合大部分生物物种栖息繁衍。

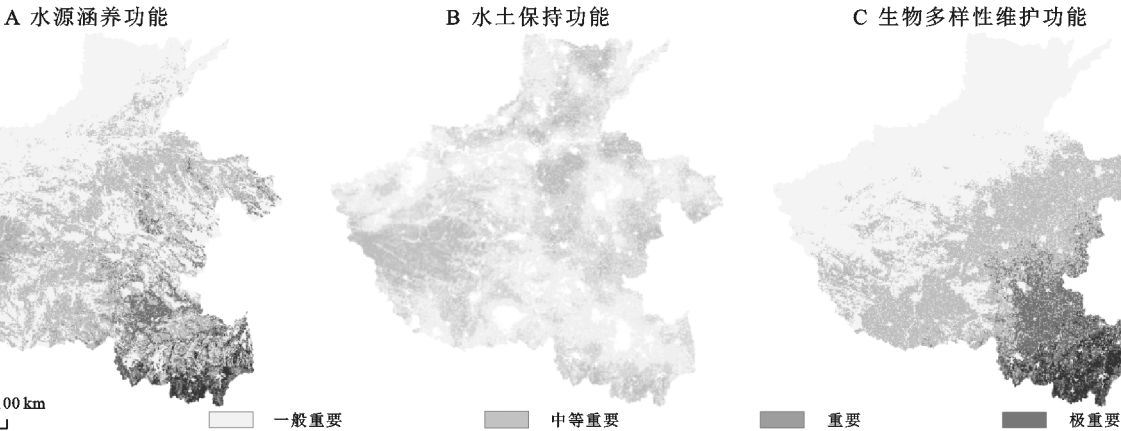


图 1 生态系统服务功能重要性分布

2.2 生态系统敏感性评价结果

根据生态系统敏感性评价方法,对研究区的水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性分别进行评价。在水土流失敏感性方面,轻度敏感和中度敏感区域分别占研究区面积的 34.96%和 50.8%,在空间分布上,轻度敏感和中度敏感区域主要分布在研究区南部桐柏大别山南部低山区及桐柏大别山北部丘陵区(图 2)。这些区域地貌类型以低山丘陵为主,降雨充沛,山间源短流急,易发生水土流失。在土地沙化敏感性方面,研究区以中度敏感和敏感区域为主,分别

占研究区总面积的 35.82%和 37.42%。在空间分布上,敏感性程度呈南部向北部逐渐增加的趋势。极敏感区域主要分布在研究区中部地区,其原因为中部地区起沙风天数较多且降水量较少。在石漠化敏感性方面,研究区轻度敏感区域面积为 111 416.5 km<sup>2</sup>,占研究区面积的大部分,部分中度敏感及敏感区域主要分布于豫北太行山沿线和西南部伏牛山沿线,这些区域土壤类型以石质土、粗骨土为主,岩石出露面积比较大,从而导致石漠化敏感性较为敏感。

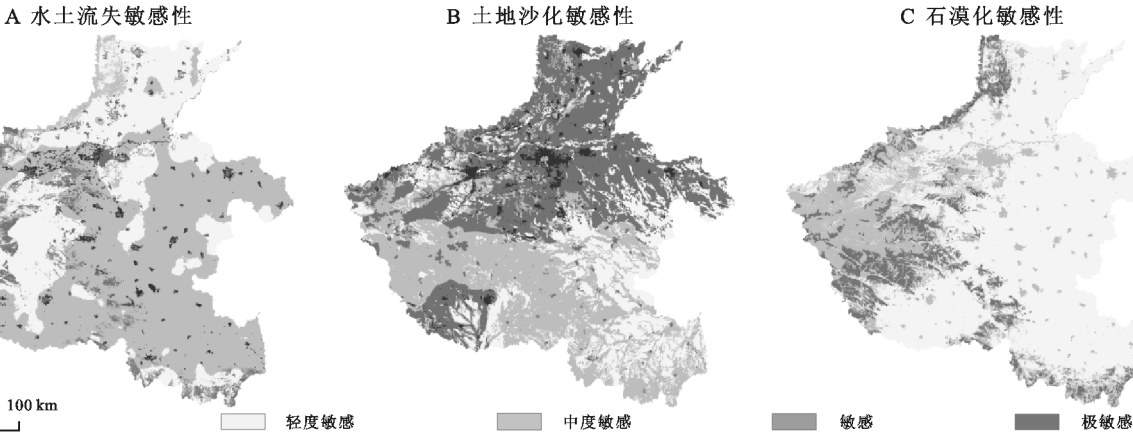


图 2 生态系统敏感性分布

2.3 生态空间辨识

根据生态系统服务功能重要性评价结果与生态系统敏感性评价结果,依据前文确定的生态空间辨识方法,将河南省生态空间分为 4 种类型,根据得分高低依次分别是生态保护空间、限制约束空间、控制缓冲空间、优化开发空间。

研究区内,生态保护空间面积为 13 668.73 km<sup>2</sup>,主

要分布于沿黄河两岸的中部地区及西部地区、豫北太行山沿线、豫南桐柏大别山山区以及豫西南伏牛山系。这些区域是河南省生态保护的核心区域,应禁止开发建设活动,维护好这些区域的生态平衡,对河南省的生态安全起着重要的作用。限制约束空间与控制缓冲空间面积占比分别为 11.63%和 5.72%。限制约束空间成片分布于豫西南伏牛山沿线及黄河南岸豫中地区。这些区

域应加强生态设施建设,严格控制开发,合理规划。控制缓冲空间分布于限制约束空间与优化开发空间之间,分布较为集中,在生态角度上起缓冲作用。优化开发空间面积最大,为 122 480.73 km<sup>2</sup>,其成片分布于东部平原区以及中南部地势较低洼区域(表 4)。这些区域受到人类活动影响,生态功能较弱,应在生态保护的基础上,进行有序合理的建设开发。

表 4 生态空间辨识结果

名称	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
优化开发空间	122480.73	74.35
控制缓冲空间	9434.67	5.72
限制约束空间	19161.78	11.63
生态保护空间	13668.73	8.30

2.4 生态空间优化

基于生态空间的辨识结果,考虑研究区内景观、斑块分布情况提取生态空间辨识结果中生态保护空间部分与限制约束空间并矢量化,剔除细小破碎斑块,根据研究区内总体生态格局进行细分与优化,将研究区确定为“三区、两带、3 块”的生态格局,见图 3。

“三区”分别是太行山生态红线保护区、伏牛山生态红线保护区、大别山生态红线保护区。太行山生态红线保护区位于河南西北部,系太行山脉展布区。地貌类型以断块构造中山为主,山体完整,分布集中,山势陡峭,植被覆盖度最差。该区是研究区内重要的生态屏障,但近年来也面临一系列生态问题,如裸岩率较高、森林稀疏、水资源短缺等。应探索山水林田湖草生态综合治理保护新模式,加强水土资源保护与监管。大别山生态红线保护区地貌类型除部分地区为构造低山和中山外,多以侵蚀剥蚀的低山和丘陵为主。土质粘重,地表残积层厚。该区特点为生物多样性维护功能好,降雨充沛,气候适宜且植被覆盖程度高。但浅山丘陵区水土流失较为严重,致使生物多样性受到一定影响。应加强水土保持林建设,坚持数量质量并举。伏牛山生态红线保护区位于河南西部,地质构造复杂,山岭连绵,地貌类型多样,除伏牛山、小秦岭、崤山等各种成因类型的中山低山集中分布区内,也有部分丘陵和河谷平原。该区为南水北调中段工程水源地,降水充足,水资源较为丰沛,水土保持功能重要,但水土流失严重,沟壑纵横,应以土地整治工程为抓手,以缓坡耕地改梯田和小型蓄排水工程建设为重点。

“两带”分别是沿黄河生态保护带和沿淮河生态保护带。沿黄河生态保护带自西向东分布,途径三门峡、济源、洛阳、焦作、郑州、新乡、开封 7 个城市。该区生态问题较多,植被覆盖条件不足,水土流失严重,应重点建设生态防护林、水源涵养林等,防风固沙。需要注意的

是,该生态保护带东部与西部生态问题并不一致,应分类施测,因地制宜。沿淮河生态保护带途经南阳、驻马店、信阳等市。该带内生态保护空间斑块较为破碎,但有连接成带成片的趋势。该区域雨水充足,植被覆盖条件好,生物多样性维护功能在研究区全域最优,应着力保护优化,使该生态保护带辐射扩散,与大别山生态红线保护区连接,产生生态效应的集聚。“3 块”分别为豫东平原生态保护块、豫西丘陵生态保护块和豫北丘陵生态保护块。其中豫东平原生态保护块和豫北丘陵生态保护块分布位于商丘市睢阳区和鹤壁市清丰县,斑块面积较小,两地植被覆盖程度均有待提升。豫西生态保护块主要位于郑州市登封市及平顶山市北部,占地面积较大。该区块所在位置海拔相对较高,土壤质地以黏质和壤质土为主。

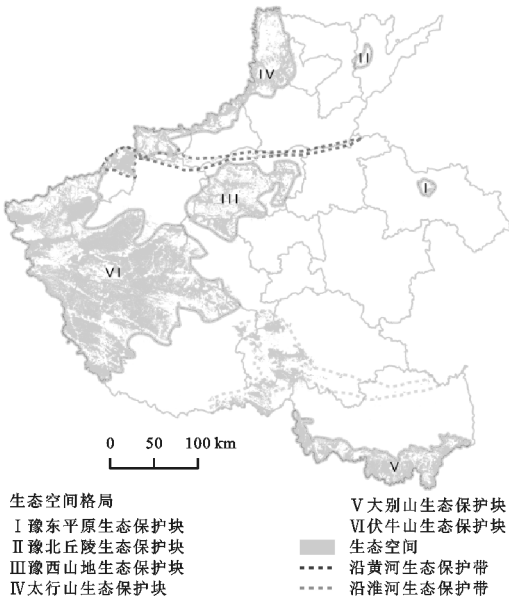


图 3 河南省生态空间格局优化

3 讨论

生态空间的辨识及格局优化对区域土地的安全及生态良好起着至关重要的作用<sup>[27-29]</sup>。从空间上,将区域内的土地借重要性和敏感性量化指标进行辨识可以较为全面地反映生态进程。从方法上,利用模糊伽马模型进行重要性和敏感性模型叠加处理,更有助于发挥栅格数据的本底优势。本文从生态系统服务功能重要性和生态敏感性两个角度着手,选择水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性维护功能、水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性 6 个指标,以 100 m×100 m 栅格为评价单元,基于 ArcGIS 10.5 平台构建辨别划分生态空间的模型,划分河南省生态空间为生态保护空间、限制约束空间、控制缓冲空间、优化开发空间 4 种类型,明确研究区内各种生态类型的分布,揭示它们的分布特征和规律,对土地利用规划、高标准基本农田的划定、山



水林田湖草生态保护与修复等工作有一定的参考价值。在研究过程中也有一些问题,在数据处理过程中运用到了 GIS 空间内插的方法,研究结果可能受到数据处理误差的影响;因以栅格为评价单元,部分以行政区划为评价单元的社会经济评价指标无法使用,对文章结果也有一定的影响;NPP 数据为中国科学院资源环境科学数据中心统计的单一年份全国数据,利用 ArcGIS 掩膜提取河南省 NPP 数据,在反映生态安全格局动态变化上有一定局限性,希望在接下来的研究中,提取连年连续的影响因子数据,探究研究区内生态空间的时空演变规律,更好地理解研究区的生态进程,并基于此对研究区生态空间的演变提供科学合理的预测。

## 4 结论

(1) 选取水源涵养功能、水土保持功能、生物多样性维护功能 3 个指标构建生态系统服务功能重要性评价模型,将评价结果划分为一般重要、中等重要、重要和极重要 4 个等级。其中,水源涵养功能极重要区域面积为  $3\,492.28\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 2.11%;水土保持功能重要性极重要区域面积为  $17\,929.98\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 10.68%;生物多样性维护功能重要性维护功能极重要区域面积为和  $6\,577.71\text{ km}^2$ ,占研究区总面积 3.98%。

(2) 选取水土流失敏感性、土地沙化敏感性、石漠化敏感性 3 个指标构建生态系统敏感性评价模型,将评价结果划分为轻度敏感、中度敏感、敏感、极敏感 4 个等级。其中水土流失敏感性极敏感区域面积为  $4\,667.81\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 2.83%;土地沙化敏感性极敏感区域面积为  $5\,996.6\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 3.63%;石漠化敏感性极敏感区域面积为  $313.34\text{ km}^2$ ,占研究区总面积的 0.19%。

(3) 综合生态系统服务功能重要性评价模型和生态系统敏感性评价模型,基于模糊伽马模型进行研究区生态空间的辨识和划分,依据自然断点法根据叠加分值由低到高依次分为 4 种生态空间类型,分别为:优化开发空间、控制缓冲空间、限制约束空间及生态保护空间。其中研究区内生态保护空间和限制约束空间面积分别为  $13\,668.73\text{ km}^2$ ,  $19\,161.78\text{ km}^2$ ,分别占研究区总面积的 8.3%和 11.63%。

(4) 根据生态空间辨识结果,提取生态保护空间及限制约束空间将研究区划分为“三区、两带、3 块”,分别为太行山生态保护区、大别山生态保护区、伏牛山生态保护区;沿黄河生态保护带、沿淮河生态保护带;豫东平原生态保护区、豫西丘陵生态保护区和豫北丘陵生态保护区。

## 参考文献:

- [1] 李晓文,方精云,朴世龙.上海城市用地扩展强度、模式及其空间分异特征[J].自然资源学报,2003,18(4):412-422.
- [2] 陈利顶,孙然好,刘海莲.城市景观格局演变的生态环境效应研究进展[J].生态学报,2013,33(4):1042-1050.
- [3] 刘彦随,刘玉,翟荣新.中国农村空心化的地理学研究整治实践[J].地理学报,2009,64(10):1193-1202.
- [4] 谢高地,鲁春霞,成升魁,等.中国的生态空间占用研究[J].资源科学,2001,25(6):20-23.
- [5] 白艳莹,王效科,欧阳志云,等.苏锡常地区生态足迹分析[J].资源科学,2003,27(6):31-37.
- [6] 曹淑艳,谢高地.基于投入产出分析的中国生态足迹模型[J].生态学报,2007,27(4):1499-1507.
- [7] 鲁春霞,谢高地,成升魁,等.青藏高原自然资源利用的生态空间占用评价[J].资源科学,2001,25(6):29-35.
- [8] 郭荣朝,苗长虹.城市群生态空间结构研究[J].经济地理,2007,27(1):104-107,92.
- [9] 李锋,叶亚平,宋博文,等.城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变:以常州市为例[J].生态学报,2011,31(19):5623-5631.
- [10] 陈爽,刘云霞,彭立华.城市生态空间演变规律及调控机制:以南京市为例[J].生态学报,2008,28(5):2270-2278.
- [11] 谢花林,李秀彬.基于 GIS 的区域关键性生态用地空间结构识别方法探讨[J].资源科学,2011,35(1):112-119.
- [12] 张骞,高明,杨乐,等.1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J].生态学报,2017,37(2):566-575.
- [13] 李玉平,蔡运龙.河北省土地生态安全评价[J].北京大学学报:自然科学版,2007,53(6):784-789.
- [14] 周锐,王新军,苏海龙,等.平顶山新区生态用地的识别与安全格局构建[J].生态学报,2015,35(6):2003-2012.
- [15] 张亮,岳文泽.城市生态空间多元综合识别研究:以杭州市为例[J].生态学报,2019,39(17):6460-6468.
- [16] 吴健生,张理卿,彭建,等.深圳市景观生态安全格局源地综合识别[J].生态学报,2013,33(13):4125-4133.
- [17] 环境保护部,国家发展改革委员会办公厅.生态保护红线划定指南[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728\\_418679.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgt/201707/t20170728_418679.htm) 2017:5.
- [18] 王万中,焦菊英,郝小品,等.中国降雨侵蚀力  $R$  值的计算与分布(I)[J].水土保持学报,1995,9(4):5-18.
- [19] 谢花林,姚干,何亚芬,等.基于 GIS 的关键性生态空间辨识:以鄱阳湖生态经济区为例[J].生态学报,2018,38(16):5926-5937.
- [20] 杨娜.基于生态安全评价的祁门县阊江河流景观提升策略研究[D].合肥:安徽建筑大学,2019.
- [21] 孙文义,邵全琴,刘纪远.黄土高原不同生态系统水土保持服务功能评价[J].自然资源学报,2014,29(3):365-376.

light-use efficiency[J]. *Global Change Biology*, 1999,5 (S1):56-64.

[8] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvements of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005,95(2):164-176.

[9] Peng D, Zhang B, Wu C, et al. Country-level net primary production distribution and response to drought and land cover change[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,574:65-77.

[10] Fensholt R, Sandholt I, Rasmussen M S, et al. Evaluation of satellite based primary production modelling in the semi-arid Sahel[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006,105(3):173-188.

[11] 李登科,范建忠,王娟.基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征[J].*生态学杂志*,2011,30(12):2776-2782.

[12] 李金珂,杨玉婷,张会茹,等.秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析[J].*生态学报*,2019,39(22):8504-8515.

[13] 刘玉红,张筠,张春华,等.2000—2015 年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J].*生态学杂志*,2019,38(5):1464-1471.

[14] 李登科,王钊.基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析[J].*生态环境学报*,2018,27(3):397-405.

[15] 孙庆龄,冯险峰,肖潇.武陵山区植被净第一性生产力的时空格局及其与地形因子的关系[J].*地球信息科学学报*,2014,16(6):915-924.

[16] 潘洪义,黄佩,徐婕.基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究[J].*生态学报*,2019,39(20):7621-7631.

[17] 刘宪锋,潘耀忠,朱秀芳,等.2000—2014 年秦巴山区植被覆盖时空变化特征及其归因[J].*地理学报*,2015,70(5):705-716.

[18] 袁丽华,蒋卫国,申文明,等.2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J].*生态学报*,2013,33(24):7798-7806.

[19] 蔡博峰,于嵘.基于遥感的植被长时序趋势特征研究进展及评价[J].*遥感学报*,2009,13(6):1170-1186.

[20] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].3 版.北京:高等教育出版社,2017.

[21] 陈彦光.地理数学方法:基础和应用[M].北京:科学出版社,2019.

[22] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.

[23] Nemani R R. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. *Science*, 2003,300(5625):1560-1563.

[24] 周伟,刚成诚,李建龙,等.1982—2010 年中国草地覆盖度的时空动态及其对气候变化的响应[J].*地理学报*,2014,69(1):15-30.

[25] 仲晓春,陈雯,刘涛,等.2001—2010 年中国植被 NPP 的时空变化及其与气候的关系[J].*中国农业资源与区划*,2016,37(9):16-22.



(上接第 217 页)

[22] 马孟泉,张慧,高吉喜,等.生物多样性维护生态保护红线划定方法对比[J].*生态学报*,2019(19):1-7.

[23] 王效科,欧阳志云,肖寒,等.中国水土流失敏感性分布规律及其区划研究[J].*生态学报*,2001(1):14-19.

[24] Zadeh L A. Fuzzy sets[J]. *Ieee Information and Control*, 1965,8:338-353.

[25] 操丽,邓清禄,耿丹,等.基于 GIS 与模糊逻辑法的川气东送管道地质灾害危险性评价[J].*安全与环境工程*,2013,20(6):38-42,48.

[26] Graeme F, Bonham-Carter. Geographic information systems for geoscientists. Modelling with GIS.[J]. Pergamon, 1994, 13.

[27] 龙花楼,刘永强,李婷婷,等.生态文明建设视角下土地利用规划与环境保护规划的空间衔接研究[J].*经济地理*,2014,34(5):1-8.

[25] 杨姗姗,邹长新,沈渭寿,等.基于生态红线划分的生态安全格局构建:以江西省为例[J].*生态学杂志*,2016,35(1):250-258.

[29] 蒋大林,曹晓峰,匡鸿海,等.生态保护红线及其划定关键问题浅析[J].*资源科学*,2015,37(9):1755-1764.