

DOI: 10.5846/stxb202101070063

吕彦莹, 王晓婷, 于新洋, 孔祥斌, 齐伟. 山东省自然生态空间系统化识别与差异化管控研究. 生态学报, 2022, 42(7): 3010-3019.

Lü Y Y, Wang X T, Yu X Y, Kong X B, Qi W. Systematic identification and differential control of natural ecological space in Shandong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 3010-3019.

# 山东省自然生态空间系统化识别与差异化管控研究

吕彦莹<sup>1</sup>, 王晓婷<sup>1</sup>, 于新洋<sup>1,2</sup>, 孔祥斌<sup>3</sup>, 齐伟<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> 山东农业大学资源与环境学院, 泰安 271018

<sup>2</sup> 中国科学院地理科学与资源环境研究所, 北京 100101

<sup>3</sup> 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100193

**摘要:** 在城市化背景下, 生态系统受到来自人类社会日益严重的威胁, 自然生态空间遭到破坏。对自然生态空间进行识别与管控可以更好地建设和保护国土空间生态资源, 促进生态保护与社会经济耦合协同发展, 保障区域的生态安全。融合多源数据及方法, 从生态服务重要性和生态环境敏感性两方面评价和识别生态源地的空间范围; 基于最小累积阻力模型 (Minimum Cumulative Resistance, MCR) 提取关键和优化生态廊道, 系统化识别山东省自然生态空间并进行差异化管控。研究结果表明: 山东省生态源地集中分布在鲁中山区和胶东半岛地区, 总面积为 21165.10 km<sup>2</sup>, 关键生态廊道和优化生态廊道长度分别为 1078.32、511.25 km, 土地利用类型以耕地和林地为主, 主要分布在鲁中山区和鲁北平原区, 可形成联系紧密的生态网络。本研究将自然生态空间划分为生态源地、生态保育区、其它生态用地三种类型, 根据不同空间类型提出具有针对性的分类管控措施, 为自然生态空间的系统化识别与管控提供理论参考和方法保障, 能够更好地实现省级国土空间规划的战略性和协调性目标。

**关键词:** 国土空间生态资源; 生态安全格局; 生态源地; 生态廊道; 山东省

## Systematic identification and differential control of natural ecological space in Shandong Province

LÜ Yanying<sup>1</sup>, WANG Xiaoting<sup>1</sup>, YU Xinyang<sup>1,2</sup>, KONG Xiangbin<sup>3</sup>, QI Wei<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

<sup>2</sup> Institute of Geographic Sciences and Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

<sup>3</sup> College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China

**Abstract:** In the context of urbanization, the ecosystem is increasingly threatened by human society and the natural ecological space is destroyed. The identification and management of natural ecological space can better construct and protect the ecological resources of land and space, promote the coordinated development of ecological protection and socio-economic coupling, and ensure the ecological safety of the region. This study integrates multi-source data and methods, evaluates and identifies the spatial range of ecological sources from two aspects of the importance of ecological services and the sensitivity of ecological environment; extracts key and optimized ecological corridors based on the least cumulative resistance model, and systematically identifies the nature of ecological space and differentiated management and control in Shandong Province. The results show that the ecological sources of Shandong Province are concentrated in the central mountainous area and the Jiaodong Peninsula, with a total area of 21,165.10 km<sup>2</sup>. The lengths of key ecological corridors and the optimized ecological corridors are 1078.32 km and 511.25 km, respectively. The main land use types are the cultivated land and forest land, mainly distributed in the central mountainous area and northern plain area, which can form a closely connected ecological

**基金项目:** 国家社会科学基金重大项目 (19ZDA096); 山东省级国土空间规划专题研究采购项目 (SDGP370000201902003281)

**收稿日期:** 2021-01-07; **网络出版日期:** 2021-12-15

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qiwei@sdau.edu.cn

network. The research divides the natural ecological space into three types: ecological source area, ecological conservation area, and other ecological land. According to different space types, targeted classification management and control measures are proposed to provide theoretical references and methodological guarantees for the systematic identification and management of natural ecological spaces, which can better achieve the strategic and coordinated goals of provincial territorial space planning.

**Key Words:** land and space ecological resources; ecological security pattern; ecological source area; ecological corridor; Shandong Province

城市化背景下,生态系统遭到人类活动的破坏,区域的生态空间减少严重。系统化识别自然生态空间并进行差异化管控<sup>[1]</sup>可以更好地建设和保护国土空间生态资源,实现区域的可持续发展。长期以来,自然资源的粗放利用和城市扩张使得生态资源保护形势严峻,国土空间用途管制新机制亟待探索。明确生态屏障、生态廊道和生态系统保护格局,确定生态保护与修复的重点区域是保护的生态空间和国土生态资源的基础,目前我国构建生态空间上存在生态系统思想体现不足,难以承担生态底线作用的问题<sup>[1]</sup>。因此,从维护区域生态系统安全和质量的角度出发识别自然生态空间,明确各级需要保护的生态空间布局,并实行差异化管控<sup>[1,2]</sup>成为生态文明建设的必然要求。

自然生态空间的构建和管控必须严守生态安全格局的底线思维<sup>[2-3]</sup>,应将所有需要保护和合理利用的重要生态功能和生态脆弱敏感区域纳入自然生态空间范围,使得跨区域的自然生态空间能够有效连接<sup>[4]</sup>。遵循景观生态学中格局与过程相互反馈的原理,识别生态系统可以保障生物生存安全的关键区域、节点和廊道,并落实于具体的空间位置<sup>[5]</sup>。突破国土空间规划中“一核五圈四带”等思维定式<sup>[1]</sup>,基于效率和品质构筑生态安全格局并实行差异化管控成为当前发展的必然趋势。在模式构建方面,国内外学者通过生态功能评价<sup>[6-8]</sup>、形态学<sup>[9]</sup>、生态红线划定<sup>[10]</sup>等方面来进行生态安全格局构建,逐步形成了“源地识别—阻力面构建—廊道提取”的主流范式<sup>[11-13]</sup>。在差异化用途管控方面,当前研究多集中在探索中尺度的用途管控理论和制度方面<sup>[14]</sup>,自然空间的连续性和生态系统服务的空间流动性决定了在大尺度上更需要进行差异化管控研究。山东省土地利用集约化程度高,生产、生活、生态空间冲突明显。本研究以山东省为研究区,集成地理信息模型与方法,耦合格局和过程<sup>[15]</sup>,根据生态重要性和敏感性系统化识别重要生态空间,构建完整的生态网络,并针对性的分类提出用途管制措施,为更好的建设和保护国土生态资源和发挥省级国土空间规划的战略指导性作用提供参考。

## 1 研究方法数据来源

### 1.1 研究区概况

山东省处于中纬度沿海地区(34°22.9'—38°24.01'N, 114°47.5'—122°42.3'E),北临渤海,东部和南部被黄海环绕,南部与安徽省、江苏省交界,西部与河南省连接,是一个海陆兼备的省份。全省陆地面积 15.79 万 km<sup>2</sup>,占全国总面积的 1.66%。山东省中部山区地势较高,西南、西北部平原区地势平坦,形成以山地丘陵为主、平原盆地交错环列其间的地形环境,是探讨自然生态空间系统化构建与差异化管控研究的理想区域。立足于省域资源禀赋和社会经济发展要求,明确生态屏障、生态廊道和生态系统保护格局,确定生态保护与修复的重点区域,构建系统化的自然生态空间十分必要。

### 1.2 数据来源与预处理

本研究采用多源数据,包括土地利用数据、高程和坡度数据、MODIS 植被净初级生产力数据(Net Primary Productivity, NPP)、土壤数据等。土地利用空间分布数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心;数字高程模型(DEM)数据来自国家基础地理数据中心;植被净初级生产力数据采用美国地质调查局地球资源环境观察和科学中心的 MODIS17A 影像;土壤数据来自于世界土壤数据库(HWSD)。由于研究区域范围较广,本

研究的基本空间单元为 1 km 的栅格数据。

### 1.3 研究方法

本研究技术路线图如图 1 所示,结合山东省地域特征,通过生态服务功能重要性和生态环境敏感性评价,提取具有重要生态价值的斑块,识别生态源地,利用夜间灯光指数修正基于土地利用类型和人为干扰程度赋值的基本阻力面,通过最小累积阻力模型识别并区分关键生态廊道和优化生态廊道,以构建山东省自然生态空间,并提出差异化的管控措施。

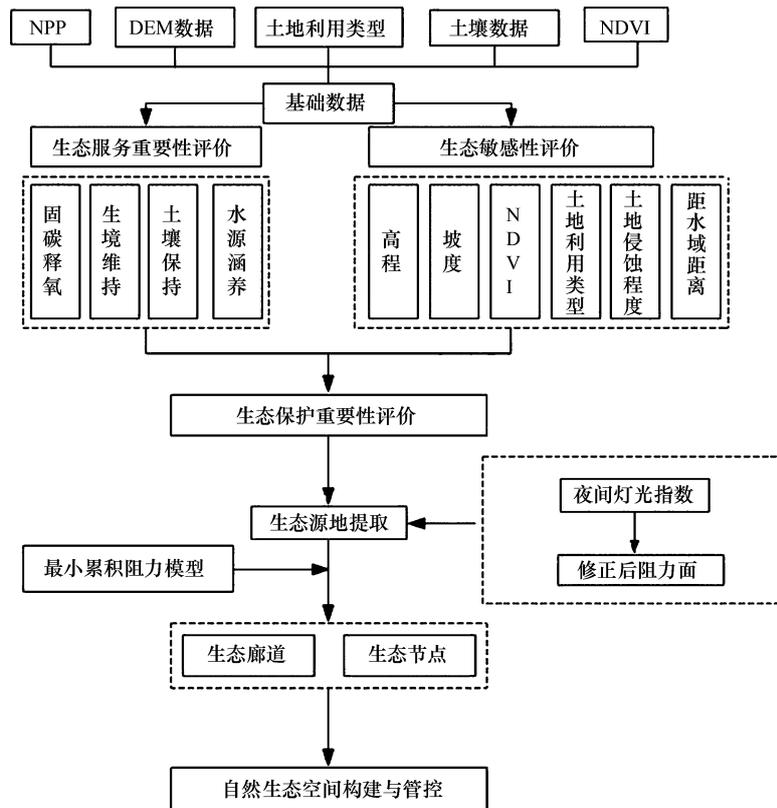


图 1 技术路线图

Fig.1 Technology route

#### 1.3.1 生态服务重要性评价

生态系统服务是生态安全的前提和保障,一个地区生态系统服务价值越高,其生态环境越好,抵抗生态风险的能力也越高。根据山东省自然特征,从水源涵养、土壤保持、固碳释氧、生境维持四个方面评价生态服务功能重要性,并筛选出具有较高价值的斑块。

水源涵养能力是生态系统通过特有的结构与水互相作用,对降水进行截留、渗透、蓄积,并通过蒸散发实现对水循环的调控。本文采用生态系统水源涵养能力指数的方法,具体表达式为:

$$WR = NPP_{MEAN} \times F_{sic} \times F_{pre} (1 - F_{sio})$$

式中,WR 为生态系统水源涵养服务能力指数,  $NPP_{MEAN}$  为多年植被净初级生产力平均值,  $F_{sic}$  为土壤渗流因子,  $F_{pre}$  为多年平均降水量因子,  $F_{sio}$  为坡度因子<sup>[16]</sup>。

土壤保持功能是一项基本的陆地生态功能,反映了区域应对特定侵蚀并保持生态安全的水平。目前国内最常用的是采用通用水土流失方程(RUSLE)计算水土保持量,表征研究区域土壤保持的重要程度。采用RUSLE(修正土壤流失方程模型)进行土壤保持服务能力的评价,反映区域应对特定侵蚀并保持生态安全的水平。具体表达式为:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C)$$

式中,  $A_c$  为水土保持量( $t \text{ hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ );  $A_p$  为潜在土壤侵蚀量;  $A_r$  为实际土壤侵蚀量;  $R$  为降雨侵蚀力因子( $\text{MJ mm hm}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ a}^{-1}$ );  $K$  为土壤可蚀性因子( $t \text{ hm}^2 \text{ MJ mm}$ );  $L, S$  为地形因子,  $L$  表示坡长因子,  $S$  表示坡度因子;  $C$  为植被覆盖因子<sup>[17]</sup>。

固碳释氧能力是绿色生态系统功能服务能力的直接体现,绿色植物通过光合作用释放氧气,产生 NPP,能起到维持碳氧平衡,调节区域气候的作用。采用 NPP 表示绿色生态系统功能的固碳释氧能力。

山东省生物种类丰富,生物多样性保护需基于良好的生境,生境质量可以作为衡量生态系统可以提供物种生存繁衍条件潜力的大小的标准。采用 InVEST 模型(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)中的生境质量模块来表征生境维持功能的高低,具体计算公式如下:

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

式中,  $Q_{xj}$  为生境类型  $j$  中栅格  $x$  的生境质量,  $D_{xj}$  为生境类型  $j$  中栅格  $x$  的胁迫水平,  $K$  为半饱和常数,  $H_j$  为生境类型  $j$  的适宜性<sup>[15]</sup>。

将各项功能评价结果划分为 5 个等级(图 1—图 2),并按功能值从高到低分别赋值 5、4、3、2、1,将分级后的图层等权叠加,获得生态服务功能重要性图层。

### 1.3.2 生态敏感性评价

生态敏感性的高低反映了在受到自然环境变化和人类不合理活动侵扰下发生生态问题的可能性<sup>[17]</sup>,对于生态敏感性高的地区应该加强生态环境保护和恢复,限制人为活动干扰。本研究结合山东省的实际情况,参考相关研究<sup>[18-20]</sup>,选取高程、坡度、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、土地利用类型、土壤侵蚀强度和距水域距离 6 类指标作为评价因子,建立生态敏感性评价指标体系(表 1)。土壤侵蚀强度评价结果为用 RUSLE 模型计算,相应的分级标准参考前人的研究成果,赋值加权得到评价结果,划分为 5 个等级,并按功能值从高到低分别赋值 5、4、3、2、1,得到生态敏感性评价图。

表 1 生态敏感性指标体系

Table 1 Ecological sensitivity index system

敏感性赋值 Sensitivity value	植被覆盖度 NDVI	高程 Elevation	坡度 Slope	土地利用类型 Landuse types	土壤侵蚀强度 Soil erosion	距水域距离 Distance
5	0.78—0.92	>300	>25	林地、水域	极强烈侵蚀	<1000
4	0.65—0.78	150—300	15—25	草地	强烈侵蚀	1000—2000
3	0.5—0.65	100—150	6—15	未利用地	中度侵蚀	2000—3000
2	0.25—0.5	50—100	2—6	耕地	轻度侵蚀	3000—4000
1	0—0.25	<50	0—2	建设用地	微度侵蚀	>4000

NDVI:植被指数 Normalized difference vegetation index;NPP:净初级生产力 Net primary productivity;DEM:高程 Digital elevation model

### 1.3.3 最小累积阻力面构建和修正

物种在不同景观单元之间进行迁移时需要克服阻力,构建阻力面是计算其在需要克服阻力情况下扩散路径的基础。本研究参考相关研究<sup>[20-21]</sup>,将山东省不同土地利用类型对物种和生态系统的阻力系数设定在 1—100 之间;选取土地利用类型、植被覆盖度(NDVI)、高程和坡度等因子综合构建阻力面(表 2),使其更加科学合理。仅以土地覆被类型为基础立阻力系数,在一定程度上忽略了相同土地覆被类型下差异化的土地利用方式和强度,夜间灯光数据能够较好地表征出城市经济发展情况、人口密度等人类活动因子<sup>[17]</sup>,体现同一用地类型内部受人类影响水平的差异,因此本研究基于夜间灯光数据来对基本阻力面进行修正,具体公式为:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R$$

式中,  $R_i$  为经夜间灯光数据修正后土地利用类型因子的阻力值;  $NL_i$  为栅格  $i$  的夜间灯光指数;  $NL_a$  为栅格  $i$

对应的土地利用类型  $a$  的平均灯光指数;  $R$  为栅格  $i$  的基本阻力系数<sup>[15]</sup>。

表 2 阻力值设置  
Table 2 Resistance value setting

阻力因子 Resistance factors	权重 Weights	指标 Index	阻力系数 Resistance value	阻力因子 Resistance factors	权重 Weights	指标 Index	阻力系数 Resistance value
土地利用类型 Landuse types	0.42	建设用地	100	坡度/(°) Slope	0.15	0—2	100
		未利用地	90			2—6	70
		耕地	50			6—15	50
		水域	30			15—25	30
		草地	10			>25	10
		林地	1	高程/m Elevation	0.15	<50	100
NDVI	0.28	0—0.25	100			50—100	70
		0.25—0.5	70			100—150	50
		0.5—0.65	30			150—300	30
		0.65—0.78	10			>300	10
		0.78—0.92	1				

### 1.3.4 生态廊道提取

生态廊道可以使区域优质生态源地间形成相互连接的通路,是沟通重要生态源地的桥梁和通道,有利于生物迁徙运动和生态因子的交流<sup>[17-18]</sup>。Knaapen 等提出的最小累积阻力模型得到广泛应用,该模型计算物种从源到目的斑块所受阻力,选取阻力最低的通道作为生态廊道。其基本公式为:

$$MCR = f \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$

式中,  $MCR$  为最小累积阻力值;  $f$  是最小阻力与生态活动的正相关关系;  $D_{ij}$  是物种从源  $j$  到景观单元  $i$  的距离;  $R_i$  是景观单元的阻力系数。

## 2 结果分析

### 2.1 生态重要性评价和生态敏感性评价

研究区生态服务功能评价结果如图 2 所示。固碳释氧能力由植被净初级生产力(NPP)体现,总体分布情况是自东部向西部递减,这是由于东部地区以丘陵为主,植被丰富多样,是全省森林资源最丰富的地区;西北地区植被较为稀少,沙化荒漠化土地面积较大,生态环境较脆弱。水源涵养功能高值区主要分布山东省西南部和中部地区,主要是由于省内多条河流流经于此,且植被资源丰富,是重要的水源涵养区;生境维持功能高值区主要分布在鲁中山区和东部地区,这是由于这些地区山脉众多,植被覆盖度高,生物多样性丰富,低值区则分布在人类活动聚集区,范围较广;土壤保持功能高值区主要分布在鲁中山区,低值区分布较广。

基于山东省固碳释氧、水源涵养、生境维持、土壤保持将四种生态服务评价结果的栅格图层进行等权叠加并划分为五个等级:一般重要、较重要、中等重要、高度重要、极重要<sup>[19]</sup>,得到山东省生态服务重要性空间分布图(图 3)。极重要区域面积为 14352.07 km<sup>2</sup>。占全区总面积 9.06%,面积较小,主要分布在鲁中山区,泰山、沂山、徂徕山、蒙山等地,区内植被丰富,森林资源较多,河流众多,生态服务功能值最高。生态服务功能高度重要区域面积为 37698.63 km<sup>2</sup>,占全区总面积的 23.79%,主要分布在鲁中山区和鲁西南部分地区,鲁东山区也有零散分布。

生态敏感性评价分级评价结果如图 3、表 3 所示:生态极敏感区域面积为 7312.20 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 4.73%,多分布于山脉丘陵以及河流附近。山地区域植被覆盖率高,水体附近生态敏感且脆弱,人为活动容易对生态环境产生难以恢复的破坏。生态环境敏感性高度敏感区域面积为 21881.73 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的

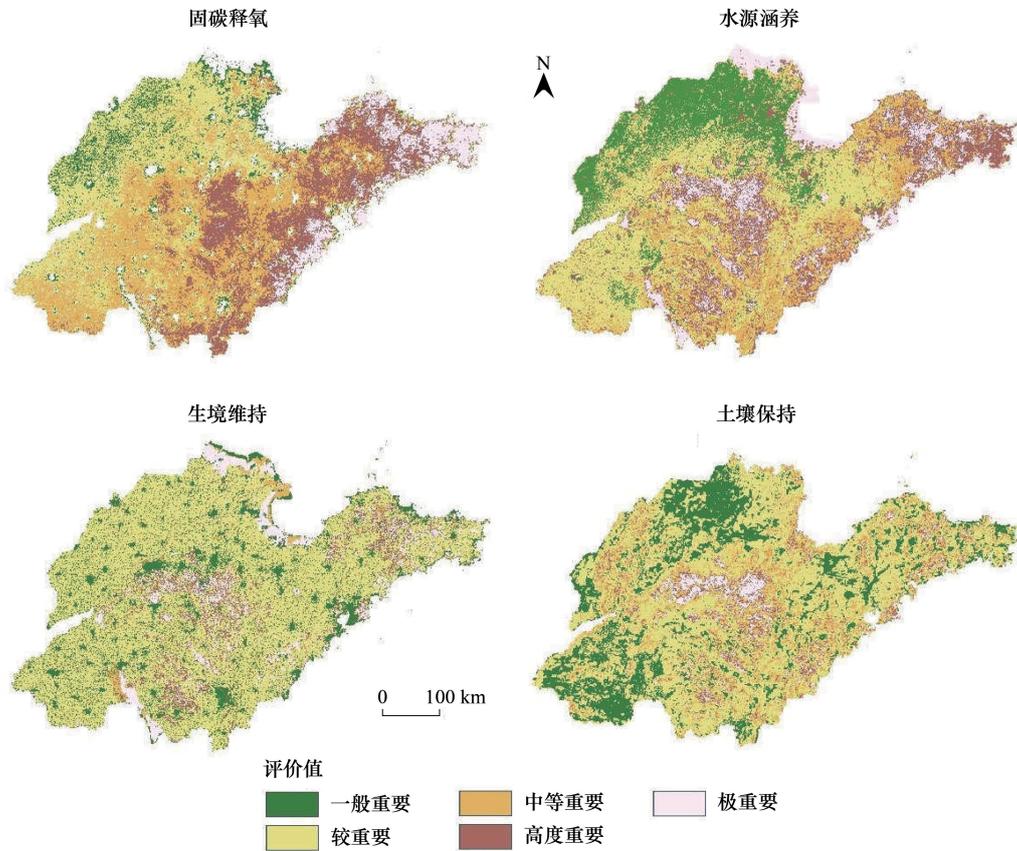


图 2 生态要素空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecological elements

14.14%,零散分布在生态环境极敏感区的附近。

利用自然断点法将山东省生态服务功能重要性和生态环境敏感性等权叠加形成生态保护重要性空间格局,用自然段点法将其分为 4 个等级:一般重要、中等重要、高度重要和极重要。如图 4 所示,生态保护极重要区域面积为 20829.09 km<sup>2</sup>,主要集中在鲁中山区和胶东半岛地区,这些地区生态环境良好,具有丰富的生物多样性,是生态服务功能和生态敏感性的高值区域,应加强对此区域自然环境的保护。高度重要区域面积为 47211.99 km<sup>2</sup>,在研究区分布范围较广,但主要集中山脉丘陵及河流湖泊沿岸,这些地区生态脆弱,人为开发或自然灾害对生态环境造成不可恢复的破坏。

表 3 生态服务重要性、生态敏感性评价结果

Table 3 Evaluation results of the importance of ecological services and ecological sensitivity

生态服务重要性 Importance of ecosystem services			生态环境敏感性 Eco-environmental sensitivity		
评价等级 Level	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Proportion	评价等级 Level	面积/km <sup>2</sup> Area	比例/% Proportion
一般重要 Low important area	15470.48	9.76	不敏感 Sensitivity area	33060.76	21.36
较重要 Uore important area	39413.49	24.87	轻度敏感 Low sensitivity area	54616.91	35.29
中等重要 Moderate important area	51558.33	32.53	中度敏感 Moderate sensitivity area	37874.60	24.48
高度重要 High important area	37698.63	23.79	高度敏感 High sensitivity area	21881.73	14.14
极重要 Extreme important area	14352.07	9.06	极敏感 Extreme sensitivity area	7312.20	4.73

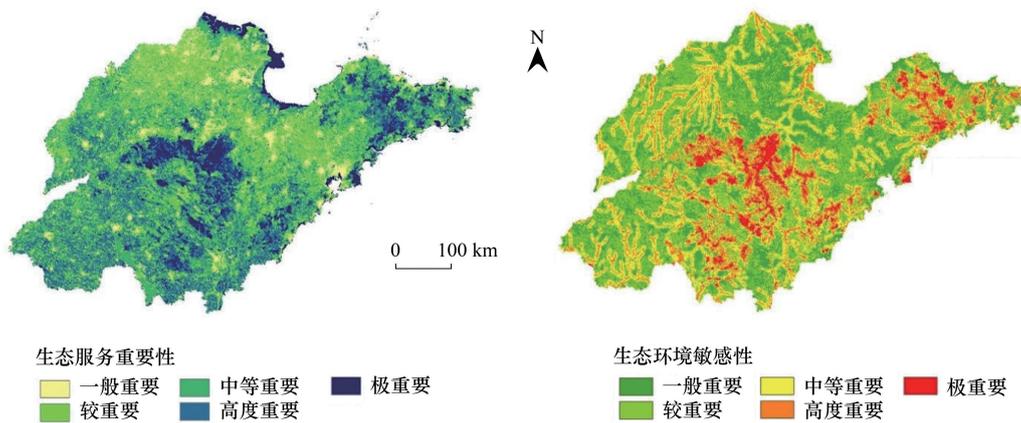


图3 生态服务重要性和生态环境敏感性空间格局

Fig.3 The importance of ecological services and the spatial pattern of ecological environmental sensitivity

2.2 自然生态空间的系统化构建

2.2.1 生态源地提取与阻力面修正

将山东省生态服务重要性评价结果和生态环境敏感性的评价结果等权叠加得到生态保护重要性图层,如图5所示,极重要斑块面积为20829.09 km<sup>2</sup>,高度重要斑块面积为47211.99 km<sup>2</sup>,分别占研究区面积的13.46%和30.51%。考虑生物多样性因素,将山东省内面积较大的黄河三角洲和南四湖国家级自然保护区的核心区作为研究区生态源地。将其他区域剔除掉破碎斑块后,选取生态保护重要性分级中极重要区域和高度重要区域的中面积前30的斑块作为研究区的生态源地,将生态保护重要性评价中中等重要、高度重要和极重要区域作为研究区的生态用地,构建研究区自然生态空间。生态源地面积为21165.10 km<sup>2</sup>,占山东省总面积的13.50%,除黄河三角洲地区和南四湖地区外,集中分布在鲁中南地区,鲁东山地丘陵区有少量分布。

自然条件和人类活动对阻力值都有较大的影响,基于夜间灯光数据对基本阻力面进行修正的结果如图5所示。综合阻力值高值区分布于人类活动较为密集的地区,低值区则分布于鲁中和鲁东植被覆盖率较高的山地丘陵地区。增加高程、坡度和植被因子构建的阻力面在反映生态源地扩张难易程度方面更为精细。

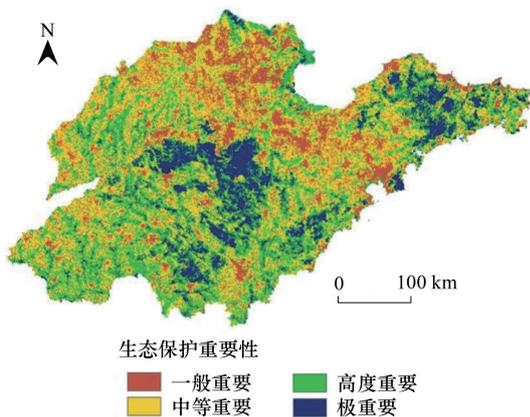


图4 生态保护重要性空间格局

Fig.4 The spatial pattern of the importance of ecological protection

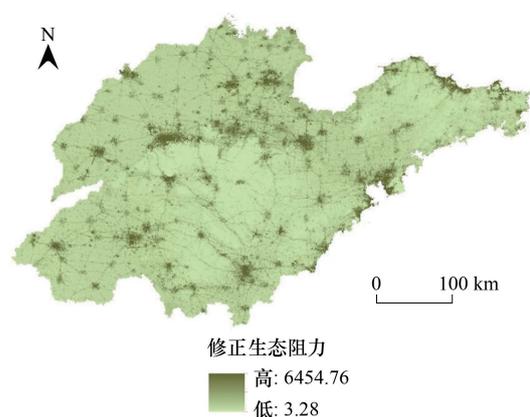


图5 生态阻力值空间分布

Fig.5 Spatial distribution of ecological resistance

2.2.2 生态廊道提取

大型河流既是重要的生态源地,也是关键的生态廊道。将区域内的一二级河流和部分能够连通生态源地

的支流作为天然生态廊道加以保护。黄河和京杭大运河部分河段贯穿省域,沂河和沭河的部分支流连接了中部和南部的生态源地,起到了良好的生态连通作用。基于生态源地和阻力面,提取各个源地的几何中心点作为生态节点,以每个节点为汇,以剩余的点为源<sup>[15]</sup>,求得最小耗费路径作为区域内的关键生态廊道。为实现区域内尺度上生态功能的延续和景观斑块的连通,以断开的生态节点为源,向其他节点求得次最小耗费路径,得到 5 条优化生态廊道。山东省关键、优化生态廊道长度为 1078.32 km、511.25 km,主要分布于鲁中南地区和鲁东地区。从土地利用现状来看(表 4),生态源地和生态廊道分布于生态环境良好的区域,生态廊道的现状土地利用类型以林地和耕地为主,但仍有少量的建设用地,面临着较大的生态阻力,应配套退建还林还草的措施。

表 4 生态廊道长度分地类统计表

Table 4 Statistics of the length of ecological corridors by land

地类 Land types	林地 Forest land	耕地 Grassland	草地 Orchard land	水域 Waters	建设用地 Construction land	总计 Total
关键生态廊道长度/km Length of key ecological corridor	306.01	515.30	189.84	22.26	44.89	1078.32
优化生态廊道长度/km Optimize the length of the ecological corridor	95.80	317.14	52.10	15.66	30.55	511.25

### 2.3 自然生态空间差异化管控新机制

本研究将所有生态服务功能和生态敏感性较高的地区纳入国土空间用途管制范畴,建构了系统化、网络化的自然生态空间,使得国土空间用途管制从由零散地块拓展到整体网络<sup>[15]</sup>,在此格局构建基础上,就如何更好的开展国土空间生态资源保护和用途管制新机制展开探索。自然生态空间用途管制要维护自然生态系统原真性,减少人为干扰,为生物营造良好的栖息地范围。针对山东省自然空间生态保护重要程度对应不同的分类管控措施,对三生空间整体进行整体权衡优化,提出以下建议。

#### 2.3.1 生态源地实行原生态保护

将生态源地、关键生态廊道和优化生态廊道纳入原生态保护区,主要包括鲁中山地丘陵区、黄河三角洲自然保护区和南四湖自然保护区。在本文所识别的生态源地中,黄河三角洲和南四湖国家自然保护区水体、湿地的面积较大,应当在河流水域两岸建立生态缓冲区,增加植被和湿地数量,建立重要湿地生态补水长效机制,恢复湿地功能。黄河三角洲地区生态环境脆弱,需在保护现有海防林的基础上,对海岸带附近的生态区进行生态修复与保护,通过加强沿海绿色生态屏障以筑牢区域海防线。该区域要严格禁止城镇化建设、矿产资源开发和农业资源开发活动,保护原有自然生态资源。针对区域内生态产品以及服务利用行为,按照规划开展维护、修护和提升生态功能的活<sup>[21-22]</sup>,建立生态保护补偿机制,引导地方政府对区域生态环境加强保护,建设生态功能区;将生态环保资金安排使用向重要生态功能区、自然保护区倾斜,加强污染防治项目建设;对生态保护红线区域内的林地、草地、湿地等自然生态系统,采取各级部门协同治理的方法。

#### 2.3.2 生态保育区实行利用性保护

将生态保护重要性三级和四级区域划分为生态保育区,该区域多分布在生态源地的周围,生态功能价值较高,生物资源丰富,植被覆盖率高。该区域要保持生态系统结构的完整性,提升水源涵养、水土保持、防风固沙等生态功能;坚持利用性保护原则,合理利用生产、生活,严格控制建设用地的开发强度和性质,避免对周边环境造成不利影响。依据区域生态特点、保护现状、生态功能恢复的情况来统筹制定开发保护措施。建立健全生态补偿机制,鼓励社会资金参与生态建设,并开展土地整治和生态修复工程。

#### 2.3.3 其他生态用地实行融合性保护

将除了生态源地、生态保育区和建设用地以外的区域归为其他生态用地。其他生态用地面积最大,在研究区分布范围比较广泛,应实行融合性保护。贯彻“绿色、开放、发展”理念,兼顾生态保护与开发建设,多发展生态防护、旅游观光、休闲娱乐等对区域生态涵养与保护有利的项目;打造特色的生态旅游基地,加快旅游

资源的开发和利用。遵循存量规划的理念,在保证区域生产需求的同时,促进生态利用保护,兼顾建设与生态保护之间的平衡,促进区域生产、生活和生态空间的高效利用。

### 2.3.4 生产和生活空间实行建设性保护

非生态用地要注重发挥土地利用的多功能性,将农业生产、土地利用和生态保护结合起来,充分利用现有建设耕地,在保证耕地和基本农田的基础上开展城镇建设,提高土地利用效率。同时,改造低效用地,提高空间集约化程度,避免占用自然生态空间。在保障区域未来发展的可持续性的基础上,有效实现利用与开发相结合的保护策略。对工业聚集区加大污染治理力度,强化工业企业达标治理,实行重点污染物排放等量或减量置换,因地制宜治理生产、生活污染,提高农业污染的废弃物资源化利用水平。

## 3 结论与讨论

本研究以山东省为研究区,将所有生态服务功能和生态敏感性较高的地区纳入自然生态空间的范围,构建系统性、整体性的生态安全格局,形成了由生态节点、生态源地和生态廊道构成的点-线-面的省域生态网络体系。

研究结果表明:将山东省内面积较大的黄河三角洲自然保护区、南四湖自然保护区的核心区作和生态保护重要性分级中极重要区域和高度重要区域的中面积前30的斑块作为研究区的生态源地。山东省生态源地集中分布在鲁中山区和胶东半岛地区,总面积为 21165.10 km<sup>2</sup>,从土地利用类型来看,生态源地以林地、河流水域为主。选取土地利用类型、高程和坡度、NDVI 四个因子构建综合阻力面,得到综合阻力值高值区分布于人类活动较为密集的地区,低值区则分布于研究区中部和东部植被覆盖率较高的丘陵山地区。将区域内的一二级河流和部分能够连通生态源地的支流作为天然生态廊道,基于生态源地和阻力面提取山东省关键生态廊道和优化生态廊道,长度分别为 1078.32 km、511.25 km,生态廊道土地利用类型以耕地和林地为主,主要分布在鲁中山区和鲁北平原区,可形成联系紧密的生态网络。

在维护研究区生态安全基础上,本研究对应不同国土空间资源类型提出了具有针对性的差异化管控措施。相对于传统的将自然保护区或者森林公园直接作为生态源地的方法,基于生态服务重要性评价和生态敏感性评价的方法具有更强的理论基础和客观性<sup>[30]</sup>,将需要重点保护的区域纳入自然空间范畴;山东省的地形以山地丘陵为主,仅利用土地利用类型赋值难以估量地形等因素对生物空间运动的影响。本文在构建阻力面的过程中,增加高程、坡度和植被因子等因子,构建综合阻力面,较以往仅仅采用夜间灯光指数修正的土地利用类型的阻力面,在反映生态源地扩张难易程度方面更为精细,可以更好地模拟现实场景,保证廊道识别的准确性。

在维护研究区生态安全基础上,本研究对应不同国土空间资源类型提出了具有针对性的差异化管控措施。相对于传统的将自然保护区或者森林公园直接作为生态源地的方法,基于生态服务重要性评价和生态敏感性评价的方法具有更强的理论基础和客观性<sup>[30]</sup>,将需要重点保护的区域纳入自然空间范畴;山东省的地形以山地丘陵为主,仅利用土地利用类型赋值难以估量地形等因素对生物空间运动的影响。本文在构建阻力面的过程中,增加高程、坡度和植被因子等因子,构建综合阻力面,较以往仅仅采用夜间灯光指数修正的土地利用类型的阻力面,在反映生态源地扩张难易程度方面更为精细,可以更好地模拟现实场景,保证廊道识别的准确性。

通过生态安全格局来对自然生态空间进行构建和管控,有利于突破国土空间规划中单一的思维定式,从系统和整体的角度优化生态系统要素配置,构建点-线-面的生态安全格局。本文针对山东省自然空间生态保护重要程度划分不同区域,探索出适应每个分区的管理模式,有针对性的制定优化管控措施,为保障区域生态安全提供合理空间指引,是构建生态安全格局新范式的一次尝试。但本研究仅对自然生态空间的识别及管控进行了初步探索,生态廊道宽度的设定对生态功能的发挥有着直接的影响<sup>[23-26]</sup>,目前对廊道最优宽度暂无定论,不同体型的动物对迁移廊道的宽度要求也有不同,对于廊道宽度对生态过程的影响未有涉及,未来还需深入研究。在自然空间差异化管控方面<sup>[27-30]</sup>,本研究仅针对不同分类区域探索了管控新机制,但对部分地区缺乏深入的探究与考察,今后应继续深入分析和探究,建立符合各区域具体的管理机制,保障机制实施的可操

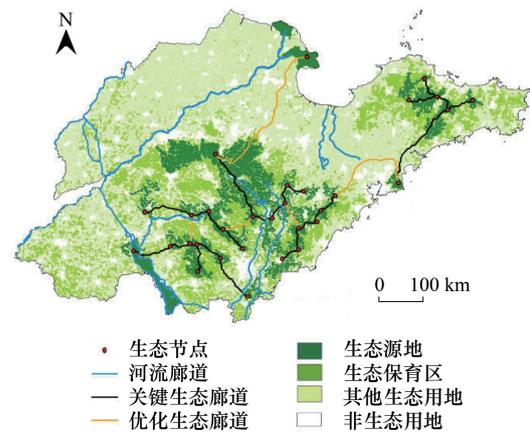


图6 生态源地与生态安全格局

Fig.6 Ecological source and ecological security pattern

作性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 程茂吉, 陶修华, 张彦. 生态空间的系统化构建和差异化管控研究. 规划师, 2020, 36(2): 48-53.
- [ 2 ] 傅伯杰. 我国生态系统研究的发展趋势与优先领域. 地理研究, 2010, 29(3): 383-396.
- [ 3 ] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 吴健生. 区域生态安全格局构建研究进展与展望. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [ 4 ] 赵毓芳, 祁帆, 邓红蒂. 生态空间用途管制的八大特征变化. 中国土地, 2019, (5): 12-15.
- [ 5 ] 俞孔坚, 王思思, 李迪华, 李春波. 北京市生态安全格局及城市增长前景. 生态学报, 2009, 29(3): 1189-1204.
- [ 6 ] McRae B H. Isolation by resistance. *Evolution*, 2006, 60(8): 1551-1561.
- [ 7 ] 朱敏, 谢跟踪, 邱彭华. 海口市生态用地变化与安全格局构建. 生态学报, 2018, 38(9): 3281-3290.
- [ 8 ] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨畅, 李贵才. 基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建. 地理研究, 2017, 36(3): 471-484.
- [ 9 ] 王玉莹, 沈春竹, 金晓斌, 鲍桂叶, 刘晶, 周寅康. 基于 MSPA 和 MCR 模型的江苏省生态网络构建与优化. 生态科学, 2019, 38(2): 138-145.
- [ 10 ] 杨姗姗, 邹长新, 沈渭寿, 沈润平, 徐德琳. 基于生态红线划分的生态安全格局构建——以江西省为例. 生态学杂志, 2016, 35(1): 250-258.
- [ 11 ] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 刘焱序. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建——以云南省玉溪市为例. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.
- [ 12 ] 韩宗伟, 焦胜, 胡亮, 杨宇民, 蔡青, 黎贝, 周敏. 廊道与源地协调的国土空间生态安全格局构建. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2244-2256.
- [ 13 ] 李潇然, 李阳兵, 王永艳, 邵景安. 三峡库区县域景观生态安全格局识别与功能分区——以奉节县为例. 生态学杂志, 2015, 34(07): 1959-1967.
- [ 14 ] 李国煜, 曹宇, 万伟华. 自然生态空间用途管制分区划定研究——以平潭岛为例. 中国土地科学, 2018, 32(12): 7-14.
- [ 15 ] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 王鑫, 张瑜, 张蕾. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1190-1200.
- [ 16 ] 李云, 张艳芳, 田茂, 尹礼唱, 王茹. 基于“重要性-敏感性-冲突性”的陕北生态保护重点区域辨识. 长江流域资源与环境, 2020, 29(03): 643-653.
- [ 17 ] 陈德权, 兰泽英, 李玮麒. 基于最小累积阻力模型的广东省陆域生态安全格局构建. 生态与农村环境学报, 2019, 35(7): 826-835.
- [ 18 ] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 周朕, 苏宁. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061.
- [ 19 ] 王晓玉, 陈甜倩, 冯喆, 吴克宁, 林倩. 基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建. 生态学报, 2020, 40(10): 3357-3384.
- [ 20 ] 丁宇, 张雷, 曾祥坤. 粤港澳大湾区生态功能网络构建及对策. 生态与农村环境学报, 2019, 35(5): 573-581.
- [ 21 ] 沈悦, 刘天科, 周璞. 自然生态空间用途管制理论分析及管制策略研究. 中国土地科学, 2017, 31(12): 17-24.
- [ 22 ] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [ 23 ] Hobbs R J, Saunders D A, Hussey B M T. Nature conservation: the role of corridors. *Ambio*, 1990, 19(2): 94-95.
- [ 24 ] 谢花林, 姚干, 何亚芬, 张道贝. 基于 GIS 的关键性生态空间辨识——以鄱阳湖生态经济区为例. 生态学报, 2018, 38(16): 5926-5937.
- [ 25 ] Teng M J, Wu C G, Zhou Z X, Lord E, Zheng Z M. Multipurpose greenway planning for changing cities: a framework integrating priorities and a least-cost path model. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(1): 1-14.
- [ 26 ] 江源通, 田野, 郑拴宁. 海岛型城市生态安全格局研究——以平潭岛为例. 生态学报, 2018, 38(3): 769-777.
- [ 27 ] 杨天荣, 匡文慧, 刘卫东, 刘爱琳, 潘涛. 基于生态安全格局的关中城市群生态空间结构优化布局. 地理研究, 2017, 36(3): 441-452.
- [ 28 ] 宋伟东. 基于生态功能重要性和敏感性的安徽省生态安全格局构建. 阜阳师范学院学报: 自然科学版, 2019, 36(3): 103-109.
- [ 29 ] Repetto R. Accounting for environmental assets. *Scientific American*, 1992, 266(6): 94-100.
- [ 30 ] 黄心怡, 赵小敏, 郭熙, 江叶枫, 赖夏华. 基于生态系统服务功能和生态敏感性的自然生态空间管制分区研究. 生态学报, 2020, 40(3): 1065-1076.