

# 基于 MCR 模型的宁波市生态安全网络构建

于梦林<sup>1</sup>, 刘平辉<sup>1,2</sup>, 朱传民<sup>1,2</sup>

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘要:** [目的] 通过识别浙江省宁波市重要生态源地及潜在生态廊道, 构建生态安全网络, 为合理引导城市发展及建立生态保护重点区提供参考。[方法] 以生态系统服务价值聚类 and 异常值分析法提取宁波市生态源地斑块, 以最小累积阻力模型(MCR)计算多源生态阻力面, 结合重力模型识别潜在生态廊道重要性, 建立宁波市生态片区, 形成生态安全网络。[结果] ①2020 年宁波市生态系统服务价值为 0~14 929.95 元/m<sup>2</sup>, 高值聚类区占宁波市总面积的 23.28%。②宁波市生态阻力值为 1~3.775, 阻力值较高地区分布于宁波市中心城区及慈溪市, 较低值分布于奉化区、宁海县与象山县。③通过重力模型共识别 36 条普通廊道、5 条一般重要廊道和 4 条重要廊道, 产生 40 个潜在生态节点, 构建宁波市 7 大生态片区, 形成“L”型生态安全网络格局。[结论] 生态安全是引导城市合理发展的重要保障, 应通过保护地区生态用地完整性, 开发和维护潜在生态廊道来促进人与自然和谐共生。

**关键词:** MCR 模型; 生态安全网络; 生态系统服务价值; 生态廊道; 宁波市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)01-0217-08

中图分类号: X321

**文献参数:** 于梦林, 刘平辉, 朱传民. 基于 MCR 模型的宁波市生态安全网络构建[J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 217-224. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20211126.003; Yu Menglin, Liu Pinghui, Zhu Chuanmin. Construction of ecological security network based on minimum cumulative resistance model at Ningbo City [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(1): 217-224.

## Construction of Ecological Security Network Based on Minimum Cumulative Resistance Model at Ningbo City

Yu Menglin<sup>1</sup>, Liu Pinghui<sup>1,2</sup>, Zhu Chuanmin<sup>1,2</sup>

(1. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

2. Jiangxi Key Laboratory of Digital Land and Land, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

**Abstract:** [Objective] An ecological safety network at Ningbo City, Zhejiang Province was constructed by identifying important ecological sources and potential ecological corridors in order to provide a reference for rationally guiding urban development and establishing key ecological protection areas. [Methods] The ecological source patches at Ningbo City were extracted by ecosystem service value clustering and the outlier analysis method. The multi-source ecological resistance surface was calculated by the minimum cumulative resistance (MCR). The gravity model was used to identify the importance of potential ecological corridors to establish ecological areas at Ningbo City, which formed an ecological safety network. [Results] ① In 2020, the ecosystem service value for Ningbo City was between 0 and 14 929.95 yuan/m<sup>2</sup>, and the high-value clustering area accounted for 23.28% of the total area of Ningbo City. ② The ecological resistance values were between 1 and 3.775. The areas with higher resistance values were located in downtown Ningbo and Cixi City, and the lower values were located at Fenghua District, Ninghai County, and Xiangshan County. ③ Thirty-six common corridors, five generally important corridors, and four important corridors were identified through the gravity model, and 40 potential ecological nodes were generated. Seven ecological areas at Ningbo City were constructed to form an L-shaped ecological safety network pattern. [Conclusion] Ecological security is an important guarantee for guiding the rational development of cities. It promotes the harmonious coexistence

收稿日期: 2021-09-30

修回日期: 2021-10-20

资助项目: 江西省高校人文社会科学研究项目(JC19101); 江西省文化艺术科学规划项目(YG2017354); 抚州市社会科学规划项目(19SK18)

第一作者: 于梦林(1994—), 男(汉族), 安徽省亳州市人, 硕士研究生, 研究方向为土地生态与规划。Email: 2351570120@qq.com。

通信作者: 刘平辉(1969—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 博士, 主要从事土地规划研究。Email: phliu@ecut.edu.cn。

of human and nature by protecting the integrity of regional ecological land, and by developing and maintaining potential ecological corridors.

**Keywords:** MCR model, ecological safety network, ecosystem service value, ecological corridor, Ningbo City

随着社会经济的快速发展,城市扩张加剧,建设用地逐渐蔓延深入生态区腹地造成景观生态格局破碎程度加剧<sup>[1-2]</sup>。生态用地不仅是生产与生活的自然资源供给来源,更是提供水源涵养、气候调节、生物多样性保护等重要生态功能的来源<sup>[3-4]</sup>。根据 2021 年发布的中国国土第三次调查结果显示,全国共有林地  $2.84 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,湿地  $2.35 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,水域(河流水面、湖泊水面、水库水面)  $2.06 \times 10^5 \text{ km}^2$  各占全国土地面积的 29.60%, 2.44% 和 2.15%, 作为重要的生态资源,林地、湿地和水域总量巨大但人均资源却十分稀缺,因此对地区发展过程中生态环境所受胁迫进行分析有助于建立生态安全格局,维持地方经济及生态长久稳定。

国内外关于生态安全的研究方向主要聚焦于如下方面:①土地、海洋、大气、森林等<sup>[5-8]</sup>不同类型生态环境安全评价。②经济发展、人口因素、政府政策等<sup>[9-11]</sup>外部因素与生态安全的耦合关联性研究。③根据不同区域及研究目的对生态环境模型<sup>[12-13]</sup>所做优化及改进研究。

目前,对于生态安全研究的主流思路是选取与生态环境相关的多因素进行加权赋值计算评价地区生态环境优劣,但缺少可靠的生态安全过程内在形成机制。最小累积阻力(MCR)模型下的区域生态安全网络格局构建是依据与地区生态密切相关的生态源、生态阻力因素,进行最小累积阻力分析,得出生态阻力面及潜在生态廊道,属于由“源一面”<sup>[14-15]</sup>构成的全过程生态评价模型。在生态阻力面及潜在生态廊道支撑下,对区域生态源地进行片区规划,确定保护重点,打造生态廊道文化,以提升生态评价模型的实用性。

生态安全是地区社会经济稳定发展的重要支柱,尤其对于中国东部经济强势区,生态保护更应受到关注,目前对于生态保护研究区域多集中于中西部生态脆弱与敏感区,但对于东部相对发达城市环境下的生态安全研究较少,本文主要以浙江省宁波市作为研究区域,探究发达城市的生态保护阻力及生态安全网络格局构建环境。

## 1 研究区概况

宁波市地处浙江省东北部,长江三角洲南翼,东经  $120^\circ 55' - 122^\circ 16'$ ,北纬  $28^\circ 51' - 30^\circ 33'$ ,东西向最大长度 74 km,南北向最大宽度 32.3 km。据宁波市人民政府信息公布全市辖 6 区(鄞州区、海曙区、江北区、北仑区、镇海区、奉化区)两县级市(余姚市、慈溪市)两县

(宁海县、象山县),陆地辖区总面积  $9\ 816 \text{ km}^2$ ,海域辖区  $8\ 355.8 \text{ km}^2$ 。全市海拔高度为  $0 \sim 976 \text{ m}$ ,西南高而东北低,根据《宁波市林业发展“十四五”规划》显示,截止 2019 年宁波市共有森林面积  $4\ 433.33 \text{ km}^2$ ,森林覆盖率达到 47.9%,湿地总面积  $2\ 313.33 \text{ km}^2$ ,同时拥有大片水系、滩涂、生态资源丰富,具有维持地区可长期持续发展重大优势,但目前宁波市全市人口达到  $9.40 \times 10^6$ ,人均生态资源相对匮乏。

宁波市作为中国副省级城市、计划单列市,人口城镇化与土地城镇化相比于中西部地区都具有明显优势性,尤其是拥有重要的海域港口资源使宁波市经济发展战略地位更加突出。在快速发展的背景下城乡建设用地面积不断扩大,生态用地逐渐遭到侵蚀,尤其是位于城市周边的优质耕地更容易因城市扩张而被占用,不仅威胁到地方生态环境安全而且造成粮食安全问题,使得宁波市发展一直处于高负荷状态,生态位保护受限,因此加强对宁波市生态安全研究对缓解城市生态压力具有一定意义。由于宁波市的海域部分无功能性生态用地且人类活动强度低,因此本文对于宁波市生态安全研究仅限于全域陆地部分,面积共计  $9\ 816 \text{ km}^2$ ,并包含宁波市属  $277 \text{ km}^2$  的 611 个大小岛屿。

## 2 研究方法

### 2.1 最小累积阻力模型(MCR)

MCR 模型是用以描述不同地区间的地类产生联系的难易程度,根据 MCR 模型概念起源<sup>[16-17]</sup>,模型通过使用生态源与阻力面结合方法,计算区域范围内的生态安全环境情况,其模型计算公式如下:

$$\text{MCR} = f \min \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (1)$$

式中:MCR 为不同地区地类之间的最小累积阻力值; $f$  为阻力函数; $D_{ij}$  为第  $j$  个斑块到第  $i$  个斑块的距离; $R_i$  为第  $i$  个斑块的自身扩展的阻力系数; $\min$  是取  $j$  至  $i$  阻力值中最小值。

### 2.2 生态源地选取

宁波市土地利用/覆被数据由 2020 年遥感影像图解译而来,数据来源于地理空间数据云(www.gscloud.cn)行编号为 117/40,118/39,119/40 的 3 景影像图,影像时点分别为 2020 年 8 月 9 日,2020 年 8 月 22 日和 2020 年 7 月 22 日的植被生长期,云量均低于 10%。通过辐射定标、大气校正、地理配准、镶

嵌与裁剪后,根据地物光谱特征采用决策树方式并辅以专家知识库方法进行遥感解译,将研究区范围内地类划分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 类,解译精度达 85% 以上,并与地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>)提供的 2020 年 100 m 分辨率土地利用覆被数据进行对照,确定宁波市陆域范围内土地利用/覆被信息。

生态源地是指地区内具有相对较高生态功能或生态脆弱性较强需要进行严格保护的林地、湿地等生态功能区。生态源地的选择方式多样化,目的主要是提取生态功能性强,生态价值高的区域。例如,张慧等<sup>[18]</sup>通过土地生态安全评价结果综合分析后识别土地生态源地;于婧等<sup>[19]</sup>利用景观生态风险评价模型选取张家界市域内生态风险指数较高的区域作为生态源地。根据宁波市土地利用/覆被信息判断,市域内不同土地类型间相互渗入情况少,景观复杂程度较小,在 Fragstats 4.1 进行景观层面斑块数量及斑块

密度计算,结果显示宁波市陆域 9 816 km<sup>2</sup> 范围内斑块数仅为 55 810,斑块密度达到 5.827 5,说明宁波市土地利用类型较为完整,破碎度小,不同地类间相互渗入程度小,同地类集聚性较强,因此考虑使用生态系统服务价值作为生态源点选取依据。

生态系统服务价值(ESV)是指区域内不同地类在生态方面所能提供的价值,具体包括气体调节、气候调节、水源涵养、壤形成与保护、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料、娱乐文化 9 项生态功能,依据谢高地等<sup>[20-21]</sup>提出的中国不同生态系统所能提供的价值,采用网格化尺度规模划分评价单元计算宁波市生态系统服务价值。由于选取不同尺度网格会造成较大的结果差异,根据宁波市景观生态破碎度,采取 1.5 km×1.5 km 尺度网格计算单元网格内生态系统服务价值,使用的不同类型土地的价值系数当量表依据谢高地等提出的中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表进行修正(表 1)。

表 1 宁波市生态系统服务价值当量系数

元/(hm<sup>2</sup>·a<sup>-1</sup>)

生态功能	不同类型土地生态系统服务价值当量系数				
	耕地	林地	草地	水体	湿地
食物生产	2 096.36	209.64	628.91	209.64	628.91
原材料生产	209.64	5 450.55	104.82	20.96	146.75
气体调节	1 948.18	7 337.28	1 677.09	0.00	3 773.46
气候调节	1 865.76	5 660.19	1 886.73	964.33	35 847.84
水文调节	1 257.82	6 708.37	1 677.09	42 723.92	32 493.66
废物处理	3 438.04	2 746.24	2 746.24	38 111.91	38 111.91
保持土壤	3 060.69	8 175.82	4 087.91	20.96	3 584.78
维持生物多样性	1 488.42	6 834.15	2 285.04	5 219.95	5 240.91
提供美学景观	20.96	2 683.35	83.85	9 098.22	11 634.83

根据宁波市土地利用特点选择生态系统服务价值高值聚类区作为生态源地选取的依据,通过 ArcGIS 中聚类及异常值分析(Anselin Local Moran's *I*)功能提取生态系统服务价值高值聚类区,作为生态源地,此类地区不仅具有较强的生态系统服务价值,且形成生态功能区聚合效应能够最大限度提供生态服务是地区生物多样性、水土流失防控重点区域。

### 2.3 生态阻力面体系构建

生态阻力面是生态安全网络中重要因素,根据相关文献<sup>[22-24]</sup>表明,生态阻力面是指对于生态外延阻力大小,当某种地类向外扩张时会受到自然因素或人为因素干扰而对其形成阻力,当外延所受阻力越大时则外延可能性越小且当阻力足够大时甚至会导致生态用地的收缩,相比于建设用地而言农用地向外扩展所受阻力远大于建设用地,主要是由于建设用地占用农用地的难度远小于建设用地复垦难度。

生态阻力主要受自然因素及人为因素影响,自然因素包括河流、坡度、土壤侵蚀等因素而人为因素包括建设用地密度、居民点分布、道路分布等因素。根据宁波市生态用地分布特点为西南含有大片林地坡度较高,而东部地势平坦是宁波市主要城区。因此在构建宁波市生态阻力面时主要选取的因素包括高程、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、土壤侵蚀性、距水体距离、距居民点距离、距道路距离、年均蒸散量,生态阻力面 9 类,利用最小成本距离计算各生态阻力因子的阻力值,并通过赋权集成计算宁波市生态阻力面,得到阻力因子及权值(表 2)。

高程(DEM)数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),高程为生态阻力面构成的自然阻力因子,当高程值越大时生态用地由低处向上越不容易扩展,对于生态的阻力越大。

坡度由高程计算而来,坡度用于描述地表陡缓程

度,坡度越陡峭发生水土流失的可能性越大,生态用地扩展聚合的难度越大,反之坡度越小,水土保持能力越强生态地类越容易聚集,则生态阻力越小。土地利用

类型数据来源于 2020 年宁波市遥感数据解译结果,土地利用类型中越接近农用地的区域生态用地越容易扩展,越接近建设用地的区域生态用地延伸屏障越明显。

表 2 宁波市生态阻力因子分级

阻力因子	不同生态级别阻力值				权重
	1 级	2 级	3 级	4 级	
高程(DEM)/m	<200	200~400	400~600	>600	0.15
坡度(slope)/(°)	<7	7~15	15~25	>25	0.15
土地利用类型	林地	水域/湿地	耕地/草地	建设用地	0.20
植被覆盖度	>65%	50%~65%	35%~50%	<35%	0.15
土壤侵蚀性/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	<2 500	2 500~5 000	5 000~10 000	>10 000	0.05
距水体距离/m	<100	100~500	500~1 000	>1 000	0.10
距居民点距离/m	>1 500	1 000~1 500	500~1 000	<500	0.05
距道路距离/m	>2 000	1 000~2 000	500~1 000	<500	0.10
年均蒸散量/mm	<650	650~750	750~850	>850	0.05

植被覆盖度数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 100 m 分辨率 NDVI 数据,该网站提供 2020 年 1—6 月 NDVI 月最大值,计算 2020 年前半年的月均 NDVI 值。植被覆盖度直接反映了地区绿化程度,当植被覆盖度越高时植被的集聚效应越明显,生态环境越好。

土壤侵蚀性数据来源于来源于地理国情监测云(<http://www.dsac.cn/>)。土壤可侵蚀性表示土壤对于侵蚀性的耐受程度,由于植被生长与土壤肥力关联性大,因此土壤侵蚀性越大导致植被生长受阻越大。

距水体距离数据来源于高程(DEM)在 ArcGIS 中进行水文分析,采用填洼、流向、流量等功能结合多环缓冲区对距水体距离进行分类。水域是植被生长中重要的水资源,越靠近水体则植被更容易生长,生态阻力越小。

距居民点距离数据来源于 OSM 数据集(<http://www.openstreetmap.org/>),通过多环缓冲区功能划分距离居民点距离级别,越靠近居民点则人类活动强度越大对植被生长越不利,生态阻力越大。

距道路距离数据来源于 OSM 数据集,通过线密度及多环缓冲区进行分级,道路作为线性的自然隔离带对生态区有割裂效果,越靠近道路生态区越难以聚合,生态扩展阻力越大。年均蒸散量数据来源于国家青藏高原科学数据中心 2017 年数据。年均蒸散量描述了土壤植被水分蒸发情况,当土壤年均蒸散量越大则土壤的水土保持能量越弱,植被生存环境越恶劣,生态阻力越大。

## 2.4 重力模型

生态廊道是不同地区生态源斑块间可能存在的生态连接路线,当不同源斑块间生态阻力值越大时则斑块间产生联系的可能性越小,反之当不同源斑块间

生态阻力值较小时,斑块间植被易通过风、水等自然因素形成物质流使生态源逐渐合并扩张。通过重力模型计算不同源斑块间的相互引力,引力值越大则斑块间形成联系的可能性越大,产生的生态廊道重要性越高。重力模型计算公式如下:

$$G_{ij} = \frac{N_i \cdot N_j}{D_{ij}^2} = \frac{\left(\frac{1}{P_i} \times \ln S_i\right) \left(\frac{1}{P_j} \times \ln S_j\right)}{\left(\frac{L_{ij}}{L_{\max}}\right)^2} \quad (2)$$

$$= \frac{L_{\max}^2 \cdot \ln S_i \cdot \ln S_j}{L_{ij}^2 \cdot P_i \cdot P_j}$$

式中: $G_{ij}$ 为斑块*i*和*j*之间相互引力; $N_i$ 和 $N_j$ 为斑块*i*和*j*的权重; $D_{ij}$ 为斑块*i*和*j*之间阻力值的标准值; $P_i$ 和 $P_j$ 为斑块*i*和*j*的阻力值; $S_i$ 和 $S_j$ 为斑块*i*和*j*的面积; $L_{ij}$ 为斑块*i*和*j*之间的累积阻力值; $L_{\max}$ 为所有廊道阻力值中的最大值。

## 3 结果与分析

### 3.1 宁波市生态源地构建

根据宁波市 2020 年遥感影像图进行土地利用/覆被信息解译提取,共分为 6 大类,其中草地比例 5.60%,耕地比例 28.30%,建设用地比例 20.85%,林地比例 35.61%,湿地比例 0.46%,水体比例 9.18%,主要的生态区分布在慈溪市与余姚市北部湿地片区,余姚市南部、奉化区、宁海县、象山县等区域内大片山林区,而建设用地主要分布在海曙区、江北区及鄞州区的中心城区内,市域整体呈现西南方生态用地聚集而东北方建设用地用地集聚的格局。

为提取宁波市主要生态源地,依据宁波市生态系统服务价值当量表,计算在 1.5 km×1.5 km 尺度规模上宁波市生态系统服务价值分布情况,结果如图 1

所示。由图 1 可见,宁波市 2020 年生态系统服务价值在 1.5 km 尺度规模网格下,宁波市生态系统服务价值具有显著的区域差异性,位于余姚市与慈溪市北部的大片海域及湿地生态价值较高,而位于奉化区、宁海县与象山县的大部分林地生态系统服务价值同样达到 3 815.17~6 969.14 元/m<sup>2</sup> 的高值,而位于中心城区的海曙区及鄞州区生态系统服务价值为 0~2 750.66元/m<sup>2</sup>,仅在建成区内部的公园及道路两侧具有分散性绿化,单位面积内生态系统服务价值相对其他区域较低。

以宁波市生态系统服务价值作为提取生态源地依据,在 ArcGIS 中使用聚类分析和异常值分析(Anselin Local Moran's I)功能对生态系统服务价值进行局部空间自相关分析,将生态用地的高价值聚合区作为生态源地的选取依据,在分类结果中选取高一高(HH)聚类作为生态源斑块,去除其中面积较小且分布较为集中的斑块最终得到宁波市 10 块生态源地(斑块)并以生态源地地理中心作为生态源点,生态源地面积共计 2 230.66 km<sup>2</sup>,占宁波市总面积的 23.28%,地类包含林地、湿地、少量耕地(图 2)。

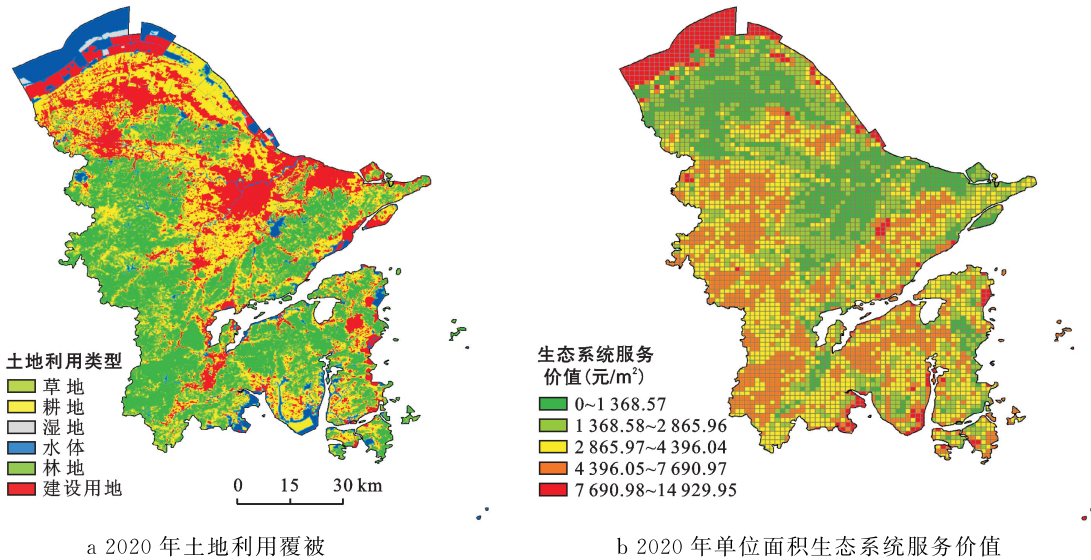


图 1 宁波市 2020 年土地利用/覆被及生态系统服务价值

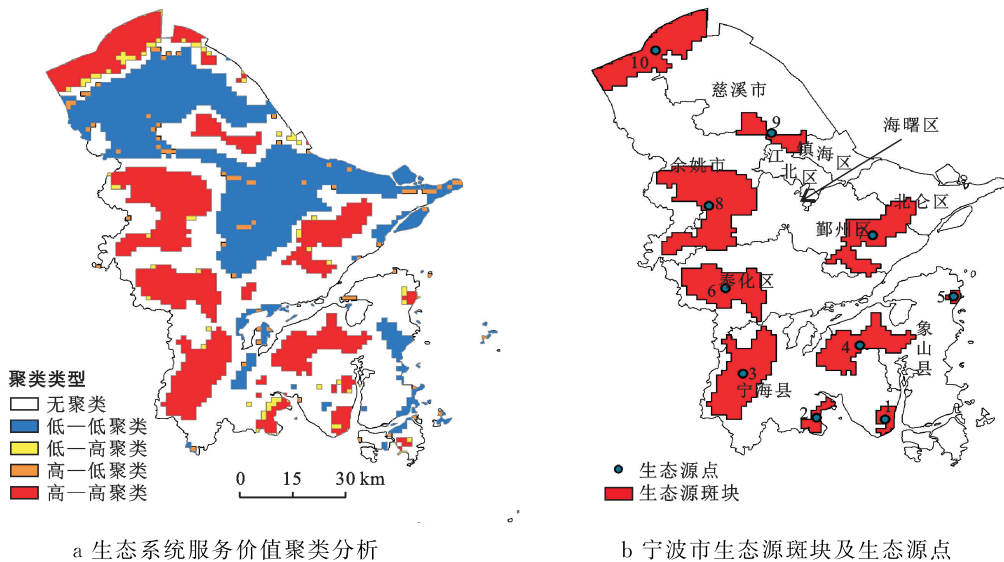


图 2 宁波市 2020 年生态系统服务价值聚类分析及生态源点选取

### 3.2 宁波市生态安全网络构建

3.2.1 宁波市生态阻力面结果 以高程、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、土壤侵蚀性、距水体距离、距居民点距离、距道路距离、年均蒸散量 9 个因子计算

宁波市生态阻力值并根据表 2 对各阻力因子进行相应赋权后集成计算总阻力值。宁波市 2020 年生态阻力面结果如图 3 所示,整体生态阻力值介于 1~3.775 之间,阻力高值集中于鄞州区、海曙区等中心城区及

余姚市、慈溪市近中心城区处,阻力低值集中于余姚市、奉化区、宁海县、象山县的成片山林区。

生态源地间产生相互联系的通道为生态廊道,由于生态源地间阻隔方式及阻力大小不同因此对所产生的生态廊道在方向及距离上有较为明显区别。以宁波市 10 块生态源斑块作为生态源地,以 2020 年生态阻力因子集成作为生态阻力面,使用成本路径法计算每一个生态源点到其他生态源点间的累积耗费成本路径并作为生态源地间潜在的生态廊道。由计算结果可得宁波市共 90 条潜在生态廊道,但由于每两个生态源点间产生的生态廊道重复一次。因此,去除重复廊道后共有 45 条不同廊道(如图 4 所示)。廊道

路径主要经过奉化区、宁海县、象山县、江北区等地。

生态源地间潜在的生态廊道在方向与长度上存在显著差异性,且由于生态源地间产生联系时所受阻力不同,因此源地间产生联系的难易程度也不同,当生态源地之间的相互吸引能力越强时则两个斑块之间产生联系及聚合的可能性越大,廊道越重要性,反之生态源地之间越不可能产生联系,生态廊道的价值及重要性就越低。根据公式(2)的重力模型,对生态源地间产生的 45 条生态廊道进行引力计算,并将廊道按引力值划分 3 级重要廊道:普通廊道(0~500)、一般重要廊道(500~1 000)、重要廊道(1 000~2 000),详细结果如表 3 所示。

表 3 宁波市潜在生态廊道重要性识别

项目	各生态源斑块生态廊道重要性										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
生态源斑块生态廊道重要性	1	—	185.77	220.18	818.54	122.77	133.46	65.58	76.27	39.25	15.10
	2	—	—	979.16	884.59	98.65	260.49	103.94	124.35	57.56	20.51
	3	—	—	—	1 056.74	145.20	1 818.40	357.18	495.52	173.34	53.42
	4	—	—	—	—	623.70	520.73	206.18	241.00	111.17	38.20
	5	—	—	—	—	—	95.37	51.14	59.35	32.09	13.05
	6	—	—	—	—	—	—	497.59	1 801.07	350.91	79.91
	7	—	—	—	—	—	—	—	324.69	250.85	45.36
	8	—	—	—	—	—	—	—	—	1 131.43	158.49
	9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	161.15
	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

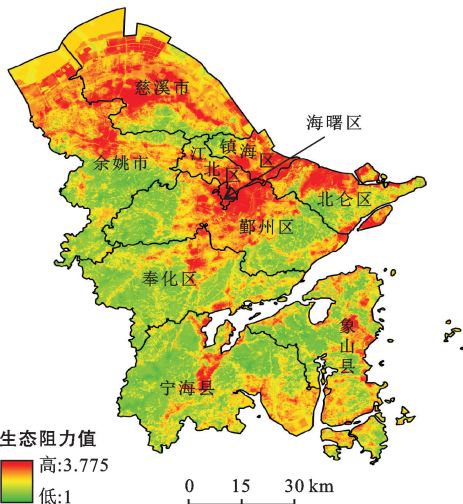


图 3 宁波市 2020 年生态阻力面

根据宁波市潜在生态廊道重要性结果显示,重要廊道共 4 条,总长度 133.35 km,处于 9,8,6,3,4 号生态源地间,一般重要廊道共 5 条,总长度 180.73 km,处于 1,2,3,4,5,6 号生态源地间,普通廊道共 36 条,总长度 3 241.94 km,经过所有生态源地。其中引力值最大的廊道位于 3 号与 6 号生态源地间,由于 3 号与 6 号生态源地间相隔距离近,且斑块间多为生态

林,生态阻隔小因此产生物质流、物流的可能性更大,引力值最小的廊道位于 5 号与 10 号生态源地间,5 号生态源地位于象山县,10 号源地位于慈溪市与余姚市北部湿地与海域组成的生态区,两个生态源点间直线距离达到 122.47 km,且象山县北侧临海,生态源地间无法通过最短的直线产生交流,需经过宁海县、奉化区、余姚市才能产生连接,生态屏障造成的生态阻力极大,因此 5 号与 10 号生态源地间产生的潜在生态廊道的可能性与重要性都较低,而 8,6,3,4 号生态斑块间距离相隔短、且生态源地间天然存在大片生态地,人类活动强度低更容易形成生态聚集性地区。

3.2.2 宁波市生态安全网络布局 以生态源斑块作为生态源地,以潜在生态廊道作为生态扩展依据,将生态源地进行规划,得到宁波市 7 大规划生态片区,分别为北部杭州湾湿地生态片区、西北部四明山国家森林公园生态片区、西南部奉化区生态片区、南部宁海县生态片区、东南部象山县生态片区、东部东钱湖生态片区及东北部九龙湖生态片区,形成宁波市生态安全网络格局,总面积共计 5 330.46 km<sup>2</sup> 相比生态源斑块可扩展生态面积达到 3 099.80 km<sup>2</sup>(图 5)。

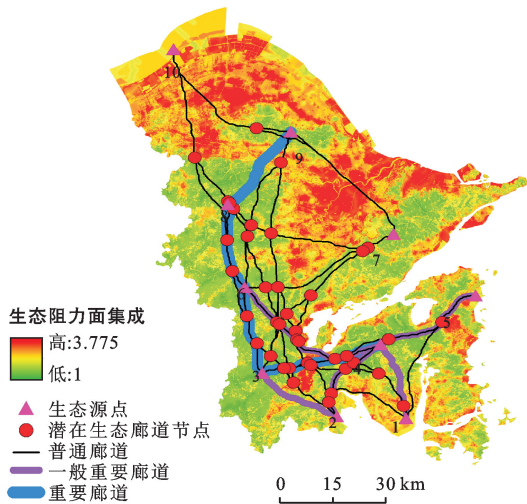
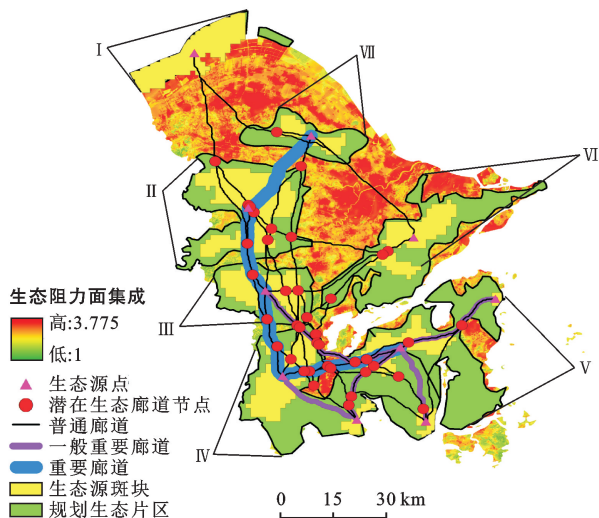


图 4 宁波市潜在生态廊道分布



注: I 为杭州湾湿地生态片区; II 为四明山国家森林公园生态片区; III 为奉化区生态片区; IV 为宁海县生态片区; V 为象山县生态片区; VI 为东钱湖生态片区; VII 为九龙湖生态片区。

图 5 宁波市潜在生态廊道分布及生态安全网络布局

由宁波市普通廊道、一般重要廊道、重要廊道及潜在生态节点共同构成宁波市生态安全网络(图 5),生态安全网络呈现“L”型走向,廊道密集处位于奉化区大堰镇、宁海县力洋镇与前童古镇,形成生态安全网络重心,生态网络重心不仅具有连接南北生态区作用且具有向东部东钱湖生态片区推进连接趋势,是重要的生态安全网络中转站。

生态片区中仅北部杭州湾湿地生态片区面积相比生态源斑块减少,因随着宁波市杭州湾新区的大力发展,慈溪市与余姚市建设用地面积增加迅速,建设用地重心逐渐北移对生态扩展形成阻力,几乎无法与宁波市南部生态区形成联系,甚至湿地生态面积会由于建设用地的过度扩张而减少。而对于宁波市镇海区内九龙湖生态片区,因其三面围绕城镇建设用地,

仅在西面与四明山国家森林公园生态片区具有联系,生态外延困难,一旦遭到破坏凭借自身修复较难。因此,须加大对其生态功能性的保障,避免造成由于建设用地过度侵占而导致生态破坏。对于宁波市 277 km<sup>2</sup> 的 611 个岛屿,由于其四周环海,其生态安全性取决于自身生态健康状况和人类对其开发利用情况,无法与宁波市内陆部分连接,因此岛屿生态安全同样是宁波市生态安全网络中不可或缺一环。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

本文通过宁波市 2020 年生态系统服务价值聚类结果,提取宁波市生态源斑块 10 个,选取高程、坡度、土地利用类型、植被覆盖度、土壤侵蚀性、距水体距离、距居民点距离、距道路距离、年均蒸散量作为生态阻力因子,通过成本距离加权构建生态阻力面,并依据成本路径法计算生态源地间潜在生态廊道,结合生态源斑块分布,规划 7 大生态片区,形成宁波市“L”型生态安全网络。

(1) 宁波市生态系统服务价值介于 0~14 929.95 元/m<sup>2</sup> 间,高值区位于杭州湾新区湿地生态区及西南山地区,低值区位于鄞州区、海曙区等中心城区。宁波市生态源地面积共计 2 230.66 km<sup>2</sup>,面积较大但分布呈现区域集中性,整体离散性。

(2) 宁波市生态阻力值介于 1~3.775 之间,阻力高值区对生态扩展形成强阻力造成生态区形成阻隔,阻力低值区内地类破碎度小且人类活动干扰低,因此生态区的聚合性与功能性强。

(3) 由成本路径所得宁波市普通廊道 36 条、一般重要廊道 5 条和重要廊道 4 条并产生 40 个潜在生态节点,廊道引力值介于 13.05~1 818.40,依据潜在生态廊道及生态源地分布,规划 7 大生态片区,构建宁波市“L”型生态安全网络格局。生态片区中需重点保护的为宁波杭州湾湿地生态片区与九龙湖生态片区,两者与其他生态片区联系性小,抗干扰能力弱,稳定性相对较差,生态廊道节点重心集中于奉化区大堰镇、宁海县力洋镇与前童古镇,生态网络线多分布于奉化区、宁海县、象山县,均处于宁波市周边县区,而中心城区内生态阻力高,几乎不存在生态可扩展路线。

### 4.2 讨论

宁波市生态片区与建设用地片区整体呈现对立局面,生态优势区阻力因子影响较小,建设用地片区内生态阻力较强。宁波市作为浙江省副省级城市,长三角经济带南翼重心,经济发展速度快,人口城镇化与土地城镇化率都相当高,因此兼顾生态保护与经济

发展成为地区面对的难题。以宁波市内主要生态源地作为依据,潜在生态廊道作为连接进行生态片区规划能够较好的构建宁波市生态保护网络格局,保持生态片区的完整性与功能性增加生态片区之间的物质流与生物流联系,增强其生态抗干扰能力。尤其是通过 MCR 模型构建的生态安全网络中重要潜在廊道是生态片区产生联系的通道,应着重保护,肆意切断生态片区间廊道联系易造成生态片区生命力下降。根据宁波市重要潜在生态廊道与重要生态节点分布来看,宁海县、奉化区、象山县成为廊道保护的首位,肩负宁波市生态保护重任。

生态保护是长久之计,以牺牲生态环境换取的经济发展势必造成更大的损失,因此建立持久稳定的生态安全网络对维持地方经济发展具有极其重要意义。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱佩娟,张美芳,贺清云,等.基于格网分析的长沙城市空间破碎化分异机理[J].经济地理,2020,40(6):116-125.
- [2] 杨星晨,雷少刚,徐军,等.道路对草原景观破碎化的影响研究[J].干旱区资源与环境,2021,35(11):149-156.
- [3] 王正伟,王宏卫,杨胜天,等.基于生态系统服务功能的新疆绿洲生态安全格局识别及优化策略:以拜城县为例[J].生态学报,2022,42(1):91-104.
- [4] 王浩,马星,杜勇.基于生态系统服务重要性和生态敏感性的广东省生态安全格局构建[J].生态学报,2021,41(5):1705-1715.
- [5] 吴景全,吴铭婉,臧传富.西北诸河流域土地利用变化及土地生态安全评估[J].干旱区地理,2021,44(5):1471-1482.
- [6] 刘彦军,孟兆娟.海洋生态安全指数的构建研究[J].生态经济,2021,37(10):185-193.
- [7] 唐建荣,李晓静.大气生态安全障碍因子诊断及其共治研究:基于物流碳排压力[J].统计与信息论坛,2016,31(9):49-55.
- [8] 冯彦,汤旭,包庆丰.基于 GWR 模型的长江三角洲森林生态安全驱动因素研究[J/OL].生态经济:1-18[2021-10-29].http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.F.20211003.1204.004.html.
- [9] 高天鹏,薛伟,何月庆,等.甘南高原黄河上游生态功能区生态安全与经济发展思考[J].生态经济,2021,37(10):194-199.
- [10] 姜晓艳,吴相利.人口城镇化—基本公共服务—生态环境协调发展研究:以辽宁省为例[J].资源开发与市场,2021,37(10):1180-1185.
- [11] 尹岩,郗凤明,王娇月,等.生态系统价值在政策制度设计中的应用:以福州市为例[J/OL].应用生态学报:1-11[2021-10-29].https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202111.006.
- [12] Kong Fanzhen, Cui Wanglai, Xi Henghui. Spatial-temporal variation, decoupling effects and prediction of marine fishery based on modified ecological footprint model: Case study of 11 coastal provinces in China [J]. Ecological Indicators, 2021,132:108271.
- [13] Liu Zhenhai, Chen Bin, Wang Shaoqiang, et al. The impacts of vegetation on the soil surface freezing-thawing processes at permafrost southern edge simulated by an improved process-based ecosystem model [J]. Ecological Modelling, 2021,456:109663.
- [14] 赵晓峰,王金林,王珊珊,等.基于 MCR 模型的卡拉麦里地区生态安全格局变化研究[J].干旱区地理,2021,44(5):1396-1406.
- [15] 景艳宾,孙旭,刘军,等.基于 MCR 模型的内蒙鄂托克旗生态廊道构建[J].水土保持通报,2021,41(2):170-177.
- [16] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning [J]. Landscape and Urban Planning, 1992,23(1):1-16.
- [17] 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.
- [18] 张慧,邱凯玉,王宇瑶,等.农业主产区土地生态安全格局构建:以克东县为例[J].水土保持研究,2021,28(6):274-282.
- [19] 于婧,汤昇,陈艳红,等.山水资源型城市景观生态风险评价及生态安全格局构建:以张家界市为例[J/OL].生态学报,2022(4):1-10[2021-10-29].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.q.20210901.0913.002.html.
- [20] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [21] 谢高地,曹淑艳,鲁春霞,等.中国的生态服务消费与生态债务研究[J].自然资源学报,2010,25(1):43-51.
- [22] 李明慧,周启刚,孟浩斌,等.基于最小累积阻力模型的三峡库区重庆段生态安全格局构建[J].长江流域资源与环境,2021,30(8):1916-1926.
- [23] 刘一丁,何政伟,陈俊华,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的生态网络构建方法研究:以南充市为例[J].西南农业学报,2021,34(2):354-363.
- [24] 高梦雯,胡业翠,李向,等.基于生态系统服务重要性和环境敏感性的喀斯特山区生态安全格局构建:以广西河池为例[J].生态学报,2021,41(7):2596-2608.