

DOI: 10.5846/stxb201903310623

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):3375-3384.

Wang X Y, Chen T Q, Feng Z, Wu K N, Lin Q. Construction of ecological security pattern based on boundary analysis: a case study on Jiangsu Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(10): 3375-3384.

基于地类边界分析的江苏省生态安全格局构建

王晓玉¹, 陈甜倩¹, 冯喆^{1,2,3,*}, 吴克宁^{1,2}, 林倩⁴

1 中国地质大学(北京)土地科学技术学院,北京 100083

2 自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035

3 北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室,北京 100871

4 宁波市城乡规划设计研究中心,宁波 315042

摘要:生态安全格局是实现区域生态安全的基本保障和重要途径,能够有效缓解生态保护与经济之间的矛盾。以江苏省为研究区,通过生态服务重要性、生态环境敏感性的保护等级确定两级生态源地。选择具有生态优势的耕地、林地、水体两两分别进行边界分析,用于修正根据单一地类形成的阻力面,并与由人口空间分布所构建的阻力面结合,形成研究区综合阻力面。基于最小阻力模型识别生态廊道,开展生态空间布局优化,构建省域生态安全格局。结果表明:研究区一级源地面积 2089.28 km²,占研究区总面积的 2.00%,二级源地面积 7944.92 km²,占研究区总面积的 9.60%;生态廊道总长 2284.89 km,廊道相互连接,整体呈“井”字空间分布,廊道相接处又是生态源地分布聚集点,经过生态要素空间优化,从而构建“四带四区”的生态安全格局。利用地类边界分析构建阻力面,可为生态安全格局构建方法提供新思路,研究结果可为江苏省的区域生态保护提供科学依据。

关键词:生态安全格局;生态系统服务;边界分析;江苏

Construction of ecological security pattern based on boundary analysis: a case study on Jiangsu Province

WANG Xiaoyu¹, CHEN Tianqian¹, FENG Zhe^{1,2,3,*}, WU Kening^{1,2}, LIN Qian⁴

1 School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Land Consolidation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

3 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, Beijing 100871, China

4 Ningbo Urban-Rural Planning Research Center, Ningbo 315042, China

Abstract: The ecological security pattern is the basic guarantee and important way to achieve regional ecological security, which can effectively alleviate the contradiction between ecological protection and economic development. Taking Jiangsu Province as the research area, two levels of ecological sources were determined through the importance of ecological services, ecological environment sensitivity and protection level. The ecologically advantageous land-use types containing the cultivated land, forest land and water body were selected for boundary analysis respectively for correcting the resistance surface based on land-use types. The corrected resistance surface was combined with the resistance surface constructed by the spatial distribution of the population to form the comprehensive resistance surface. The ecological corridors were identified based on the minimum resistance model. Then, the provincial ecological security pattern was constructed and optimized. The results show that the primary source area of the study area is 2908.28 km², accounting for 2.00% of the total area, and the secondary source area is 7944.92 km², accounting for 9.60% of the total area. The total length of the ecological corridor is 2284.89 km. The areas where the corridors are interconnected, are the integration of the ecological elements. The overall distribution of the ecological security pattern is "four belts and four districts". This paper uses the boundary analysis of the land-use types to construct the resistance surface, which can provide new ideas for the ecological

基金项目:国家自然科学基金项目(41901261);国家重点研发计划(2018YFE0107000);北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室开放基金资助项目;中央高校基本科研业务费项目(2652017100)

收稿日期:2019-03-31; **网络出版日期:**2020-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhefeng@cugb.edu.cn

safety pattern construction method. The research results can provide a scientific basis for the regional ecological protection of Jiangsu Province.

Key Words: ecological security pattern; ecosystem service; boundary analysis; Jiangsu

实现人与自然和谐发展是建设生态文明和美丽中国的内在要求^[1]。在这一背景下,构建生态安全格局(Ecological Security Patterns, ESP)已经成为平衡生态保护和经济发展的重要手段^[2]。自20世纪90年代生态安全格局理论兴起以来,国内外学者进行了大量研究,形成了诸多优秀成果^[3-5],在理论框架构建、指标体系完善、技术方法实现^[5-7]等方面都取得了长足进展。

目前,国内外学者研究生态安全格局构建的基本模式之一是俞孔坚^[8]提出的构建生态安全格局的方法框架:首先确定物种扩散源的现有自然栖息地(源地);其次根据物种扩散的难度建立阻力面;最后根据阻力面判别安全格局。其中,现有源地确定方法主要采用景观连通性^[9]、生态系统服务^[10-11]、生态敏感性^[12]等指标。阻力面的设定方法包括地类赋值、基于人类活动或分布设定等模式^[13]。Peng等^[14]以深圳市为研究区,在现有研究模式上,对土地退化和空间异质性加以考察,提供了一个有效的量化框架来识别城市生态安全格局。Mao等^[15]在鄂尔多斯市进行了生态安全和土地利用适宜性的背景下优化这些地区的土地利用模式的实践,用以平衡人类的生计和半干旱地区的发展之间的矛盾。梁发超等^[16]以厦门市集美区作为闽南沿海典型案例区,筛选划分生态源地等级体系,借助构建的生态阻力测度模型剖析景观生态安全格局,提出景观生态安全网络空间重构策略。此外,在城市增长边界(Urban Growth Boundary, UGB)^[17-19]、生态网络(Ecological Network, EN)^[20]、绿色基础设施(Green Infrastructure, GI)^[21]和生态控制线研究(Ecological Control Line, ECL)^[22]中,也不同程度应用了生态安全格局的思想和方法。

阻力面的设置是生态安全格局构建的重要环节。现有研究表明,物种的流动受土地覆被影响较大^[23]。当物种在两土地利用类型之间流动时,如果不受物种迁徙或是外力影响,由于无法占据优势生态位,极少会在两种地类边界处出现^[24]。当前研究中采用较多的依据土地利用类型为迁移阻力赋值的方法难以真正模拟物种水平扩散的行为模式,需要对地类边界处进行更审慎的评估。同时,结合社会经济数据进行阻力面的构建可大大提高结果精度^[25],社会经济数据对物种流动与生态功能扩散的影响也逐步受到重视。

本研究以江苏省为研究区。该地区是中国人口最集中、经济最发达的地区之一,人口增加与经济发展造成区域生态系统服务功能降低、生态空间被挤占、生物多样性遭受持续威胁等问题,亟需以生态安全格局的构建来解决人与环境的协调发展问题。因此,本研究结合江苏省生态资源丰富的现状,通过生态服务重要性和生态环境敏感性确定两级生态源地,并从物种占据生态位的角度出发,设定两种地类边界处为高阻力值区域,进行江苏省生态安全格局的构建,以期对江苏省土地利用和生态保护提供借鉴和指导。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

江苏省(30°45'—35°20'N、116°18'—121°57'E)位于中国大陆东部沿海中心(图1),陆地边界线3383 km,总面积 $10.72 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。截至2017年末,全省常住人口8029.30万人。江苏省境内地势以平原为主,绝大部分地区在海拔50米以下,主要包括苏南平原、黄淮平原、江淮平原和东部滨海平原,低山丘陵集中在西南和北部地区,其中,平原面积占陆地国土空间的68.00%,低山丘陵面积占比为15.00%。境内河流水系发育,江河湖泊密布,拥有太湖、洪泽湖、高邮湖、长荡湖、溧湖等,水面面积占全省陆地面积的17.00%。江苏省位于亚热带向暖温带的过渡地带,淮河—灌溉总渠一线以南属亚热带湿润季风气候,以北属暖温带湿润季风气候,有丰富的水热资源,适合人类居住繁衍,同时具有南北生物资源的多样性和农业生产的适宜性。江苏省滩涂湿地集中,是国际候鸟栖息的重要落脚点,长江珍稀濒危水生动物众多,湖泊湿地分布广泛,社会经济发展所带来的生态成本极高,生态安全格局的构建十分必要。

1.2 数据来源与预处理

本研究所采用的数据主要包括土地利用数据,气象数据,MODIS 蒸散数据,MODIS 归一化植被指数产品(NDVI),MODIS 植被净初级生产力数据(NPP),数字高程模型(DEM),土壤数据,自然保护区空间分布等数据。其中土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);降水数据源自中国气象科学数据共享网,MODIS 数据集与高程数据来源于美国国家航空航天局地球科学数据和信息系统(ESDIS)项目管理的陆地过程分布式活动档案中心(<https://lpdaac.usgs.gov/>),土壤数据来自于中国土壤数据库(<http://vdb3.soil.csdb.cn/>),本研究的基本空间单元为 500 m 分辨率的栅格。

1.3 研究方法

1.3.1 技术路线

本研究技术路线如图 2 所示,主要通过源地提取、阻力面建立、识别生态廊道来构建生态安全格局。首先通过生境质量、固碳释氧、水源涵养等 3 个部分评价生态服务重要性,并以自然保护区进行修正,从坡度、高程、NDVI、地类 4 个方面评价生态敏感性,叠加生态服务重要性与生态敏感性评价结果,获得生态保护重要性分级空间格局,在分级图内选取特殊重要生境斑块作为生态源地。然后采用土地利用类型和边界分析方法建立阻力面,使用最小累积阻力模型识别生态廊道。对由生态源地和生态廊道所构成的生态网络进行优化布局,形成生态安全格局。

1.3.2 生态源地的识别

生态源地是指区域间物种扩散、生态功能流动与传递的源点^[26]。本研究通过叠加生态服务重要性和生态敏感性识别生态源地。

根据江苏省环境特征,从水源涵养、固碳释氧、生境质量 3 个方面进行生态系统服务综合性评价,并用自然保护区来修正评价结果。其中,固碳释氧由植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)表示;水源涵养、生境质量分别通过 InVEST 模型的 Water Yield 与 Habitat Quality 进行测算,采用自然断点法,对上述生态系统服务功能进行重要性分级划分为 5 级并赋值 1—5,值越大则生态系统服务等级越高。自然保护区修正则是通过对各自然保护区、湿地公园、风景名胜区等矢量化之后进行缓冲区分析,内部区域赋值 4,缓冲区部分赋值 3,其他区域赋值 1,形成自然保护区分级图。将分级后各生态系统服务等权叠加,为获得生态服务重要性评价结果,对其结果采用自然断点法进行重要性分级,分为五级:一般重要、较重要、中等重要、高度重要、极重要^[16]。

生态敏感性评价是评价一定区域发生生态问题的可能性和程度,并以此反映人类活动可能造成的生态后果。区域生态敏感性越高,生态系统的稳定性越差,较易发生生态环境问题^[27]。本研究选取归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、高程、坡度、土地利用类型等 4 类影响因子构建指标体系,对每个影响因子划分相对应高中低敏感的范围,基于层次分析法确定的指标权重,对上述 5 类因子敏感性赋值结果进行加权运算(表 1),形成生态敏感性评价图。

最后,将生态服务重要性评价图与生态敏感性评价图进行等权叠加处理,形成生态保护重要性空间格局,针对研究区具体情况,选择研究区重要性 4 级内的 3 个国家级自然保护区作为一级源地。由于小面积的生态用地辐射作用有限,根据生态源地识别的相关研究,选择 3 级与 4 级内面积前 20 的斑块作为二级生态源地。区分两级生态源地,以确保生态过程的完整性。

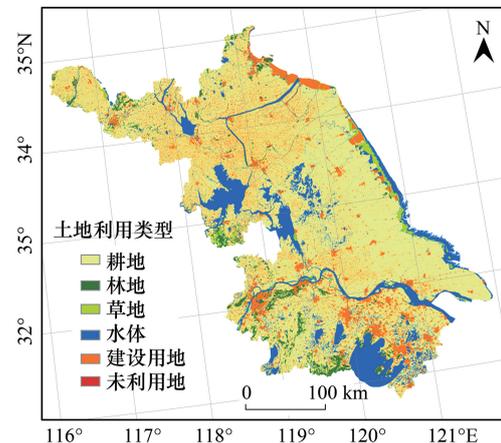


图 1 研究区

Fig.1 Location of Jiangsu Province

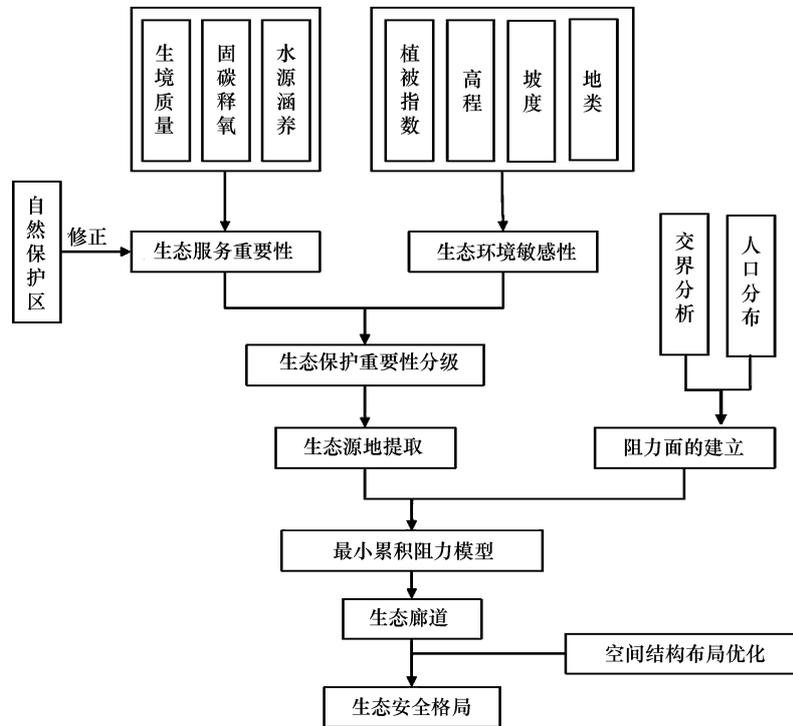


图 2 技术路线

Fig.2 Technical route

表 1 生态敏感性指标体系

Table 1 Eco-sensitivity index system

评价因子/单位 Evaluation factors	敏感性赋值 Sensitivity value					权重 Weight
	1	3	5	7	9	
土地利用类型 Land use type	建设用地	旱地、未利用地	水田、中低覆盖 草地	林地、高覆盖 草地	湿地、水体	0.32
植被指数 NDVI	0—0.25	0.25—0.50	0.50—0.65	0.65—0.80	>0.80	0.28
高程 Elevation/m	≤10	0—50	50—150	>150	—	0.20
坡度 Slope/(°)	≤3	3—5	5—10	10—15	>15	0.20

NDVI: normalized difference vegetation index

1.3.3 阻力面分析

物种及生态功能在对空间的控制和覆盖过程中所需要克服的阻力被称为生态阻力,生态阻力值越大,物种空间运动越困难,生态服务、生态功能在流动过程中损失的越多^[28]。当物种因为其自身习性或环境变化进行必要的空间运动时,会优先选择与原来栖息地相同或者相似的土地利用类型^[24]。而动植物感知敏锐,在大尺度的空间进行覆盖过程中,会趋利避害的选择在斑块内部进行空间运动,因此,实际上,物种迁徙过程中,两种斑块边界处的阻力值更大。本研究依据研究区主要土地利用类型,将耕地、林地、水体分别作 2 km 缓冲区,两两缓冲区相交部分作为斑块边界处,共有林地-水体、耕地-水体、耕地-林地 3 类斑块边界处,将各地类与 3 种斑块边界处共 8 种斑块类型赋予相对阻力系数值(表 2),得到基于土地利用类型的生态阻力面。

仅依靠土地利用类型进行阻力值的设置掩盖了同一地类内部的生态阻力差异。人口空间分布较为直接的表现人类活动强度,反映区域空间发展差异。本文以人口空间分布图作为构建阻力面的另一指标,与基于地类形成的阻力面进行分权叠加,从而形成研究区综合阻力面,更为细致和精确地表征区域生态阻力差异。

表 2 基于地类的阻力值设置

Table 2 Resistance surface based on land use types

地类 Land types	阻力值 Resistance value	地类边界 Boundaries of different land types	阻力值 Resistance value
林地 Forest land	1	林地-水体 Forest land-Water body	70
草地 Grassland	20	耕地-水体 Cultivated land-Water body	100
水体 Water body	30	林地-耕地 Forest land-Cultivated land	150
耕地 Cultivated land	50	建设用地及未利用地 Construction land and others	300

1.3.4 生态廊道提取和安全格局构建

生态廊道指连接生态源地的线状或带状生态景观^[29],体现了源地的连通性和可达性。选用最小累积阻力模型,基于 ArcGIS 10.2 的空间分析工具,利用创建的生态源地及生态阻力面,提取两级“源”点之间的低阻力通道作为生态廊道。

通过对生态源地的识别与生态廊道的提取,形成了研究区最基本的生态安全网络,以各级生态源地为基本控制源点,生态廊道的空间连接与分布为主要依据,进行研究区生态功能分区,并对各生态组分要素进行空间结构布局优化,形成研究区点-线-面的生态安全格局。

2 结果分析

2.1 生态源地识别

研究区生态系统服务产生区分布如图 3 所示,产水量自东南向西北大致呈递减趋势,这与我国的季风气候和江苏省东部沿海的地理区位密切相关。固碳释氧能力由植被净初级生产力 NPP 体现,除了河流湖泊湿

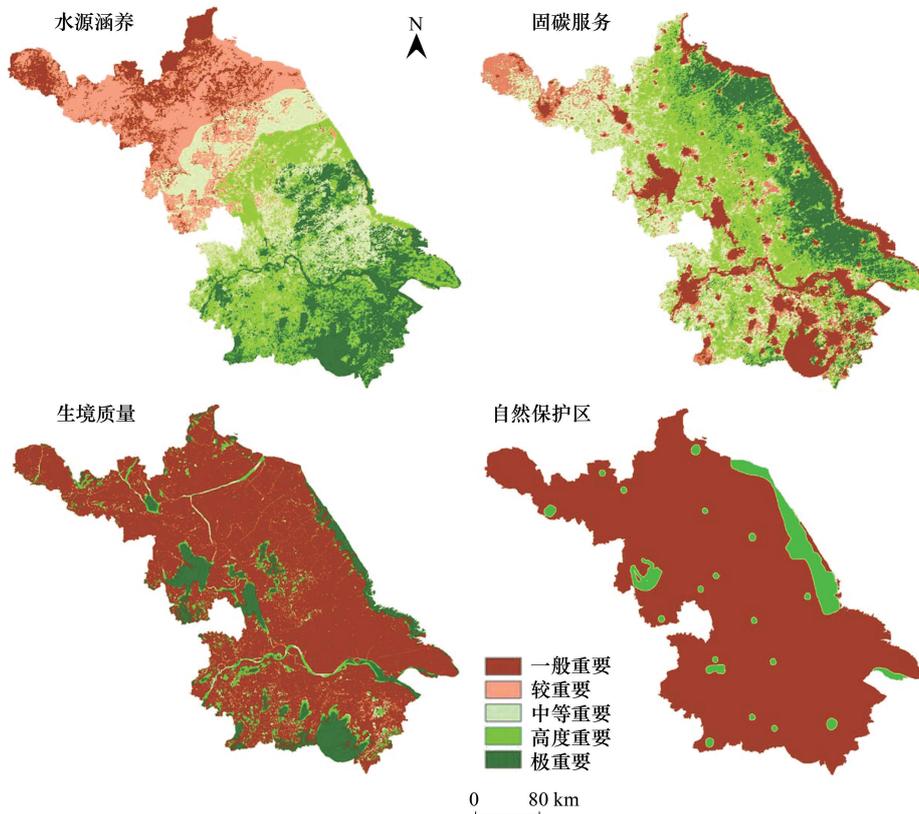


图 3 生态系统服务产生区空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services supply

地等水资源分布区域,整体从东向西递减。生境质量重要保护区域集中于河流、湖泊、湿地与部分丘陵地区,生境质量保护一般重要区域内面积最大,广泛分布在研究区。研究区内的自然保护区数量较多而且分布分散,其中沿海湿地与洪泽湖自然保护区面积最大。

基于江苏省水源涵养、固碳释氧、生境质量及重要自然保护区等的计算,将四种生态系统服务评价结果的栅格图层进行加权叠加,依据自然断点法将研究区划分为极重要区、高度重要区、中等重要区、较重要区及一般重要区^[16],得到江苏省生态服务重要性空间格局图(图4)。极重要区域面积 9429.75 km²,占全区总面积的 9.40%(表3),主要分布在石臼湖、固城湖、句容茅山、长荡湖、溇湖、太湖、邵伯湖、洪泽湖西等主要湖泊湿地,长江中下游、里下河腹部地区等重要河流沿岸及宜溧宁镇丘陵等风景名胜区的核心景区。主要体现为保障水资源安全与物种多样性。生态系统服务高度重要区域 13706.50 km²,占全区总面积的 13.66%,在研究区中南部分布广泛,集中于生态系统服务极重要区域边缘地带。

根据本文构建的生态环境敏感性评价方法和指标体系,借助 ArcGIS 软件,对南充市进行了生态敏感性单因子评价和综合评价,各指标生态敏感性空间格局如图5所示,NDVI 敏感性高值区域主要分布于研究区中北部,敏感性整体由北向南降低。不敏感和轻度敏感区域主要分布于城市与水体,极敏感区域土地利用类型多为林地与耕地。基于地类进行的敏感性分析等级地域差异明显,这与研究区多样的土地利用类型密切相关。基于坡度与高程的敏感性等级区域差异较小,高敏感区域主要分布于西部山地丘陵。

生态敏感性空间分布总体评价如图6所示。生态极敏感区域面积为 5861.95 km²,占研究区总面积的 5.56%(表3),多位于山脉丘陵及河流湖泊沿岸,前者地势起伏较大,后者水资源丰富且脆弱,土地利用类型多为林地,植被覆盖率高,人为开发或自然灾害对生态环境造成不可恢复的破坏。生态中度敏感区域面积最大为 50347.39 km²,占研究区总面积的 48.69%,散布于研究区各区域。

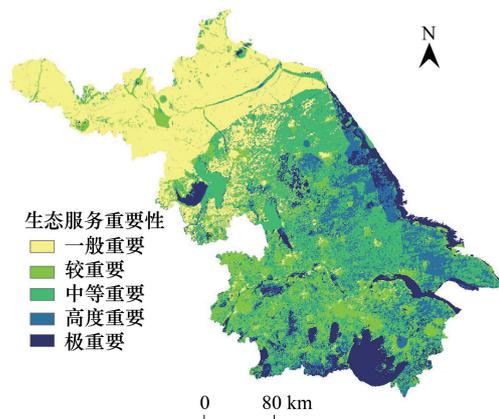


图4 生态服务重要性空间格局

Fig.4 Spatial patterns of ecosystem services' importance

表3 生态服务重要性、生态敏感性评价结果

Table 3 Evaluation results of ecological service importance 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 ² Area	%	评价等级 Level	面积/km ² Area	%
一般重要 Low important area	29820.50	29.73	不敏感 Sensitivity area	11271.40	10.90
较重要 Uore important area	14281.75	14.24	轻度敏感 Low sensitivity area	11458.59	11.19
中等重要 Moderate important area	33070.50	32.97	中度敏感 Moderate sensitivity area	50347.39	48.69
高度重要 High important area	13706.50	13.66	高度敏感 High sensitivity area	24458.86	23.66
极重要 Extreme important area	9429.75	9.40	极敏感 Extreme sensitivity area	5861.95	5.56

对江苏省生态服务重要性分析结果与生态敏感性分析结果分权叠加,识别生态源地。如图7所示,生态保护重要性4级区域面积 11522.75 km²,3级区域面积 17481.50 km²,分别占研究区面积的 11.50%、17.44%。江苏省生态保护重要性3级以上区域作为生态用地。在生态用地内识别源地,一级源地面积 2089.28 km²,占研究区总面积的 2.00%,二级源地面积 7944.92 km²,占研究区总面积的 9.60%。就区域分布特征而言,生态源地主要分布于研究区西部与沿海地区,与河流湖泊等的分布重合度较高。

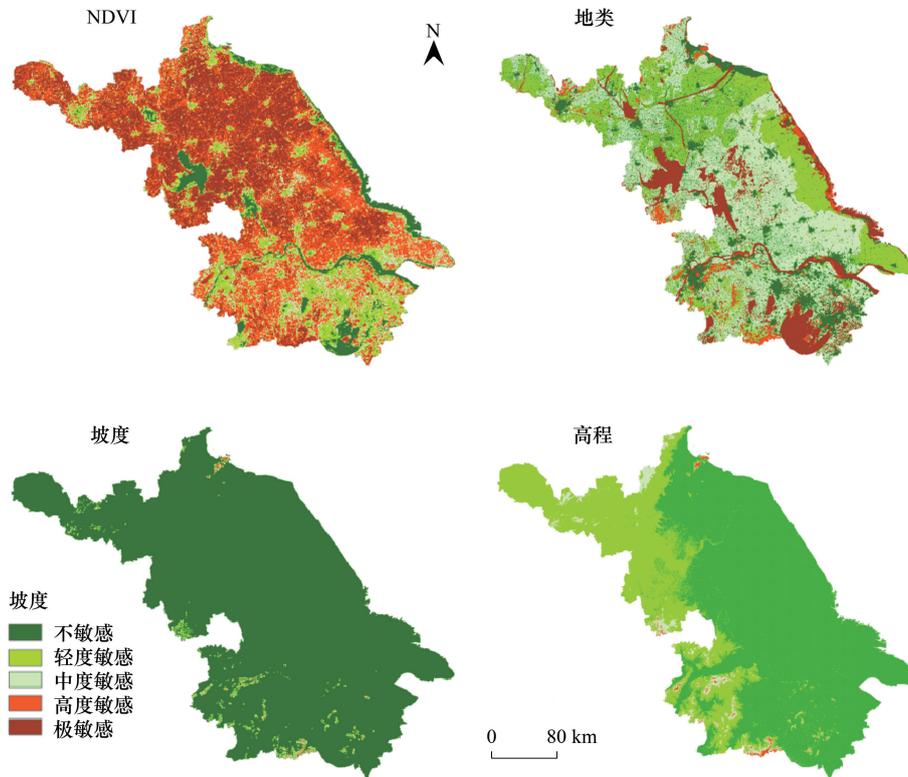


图 5 各指标生态敏感性空间格局

Fig.5 Spatial pattern of ecological sensitivity of indicators

2.2 最小累积阻力面的建立

研究区耕地类型的面积最大为 39633 km²,占研究区总面积的 47.49%,草地类型面积最小为 491 km²,占研究区总面积的 0.59%。林地-水体边界处面积 10964 km²,占研究区总面积的 13.14%,比林地与水体的面积大。由图 8 可知,江苏省西南部多为水体与林地的边界处,阻力值与林地、水体内部相比较,将边界处设置为其他阻力值有利于优化研究区阻力面的设置。西南地区阻力值整体较高;苏北地区耕地较多,河网密布,耕地与水体边界多位于研究区北部。苏南地区建设用地分布广泛,阻力值最高的区域多分布在苏南。基于人口空间分布所形成的生态阻力空间差异如图 8 所示,研究区内生态阻力空间差异明显,生态阻力空间分布较为破碎。大部分区域生态阻力较低,生态阻力中高值区域主要沿河流、道路分布,生态阻力高值区域主要位于城镇。两个阻力面进行叠加分析,如图 8 所示,研究区同一地类内部生态阻力值差异明显,高低阻力值区域相间分布。整体而言,苏北与苏南地区生态阻力值较高,苏北地区高阻力值区域较为分散,且高阻力值区域各个面积较小。苏南地区高阻力值区域分布较为集中,主要位于河流湖泊沿线。

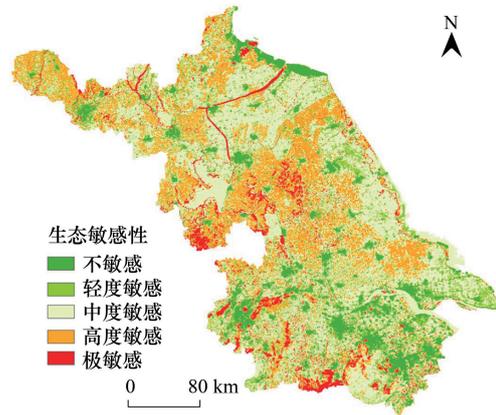


图 6 生态敏感性空间格局

Fig.6 Spatial pattern of ecological sensitivity

2.3 生态廊道识别与生态安全格局构建

生态廊道连接生态源地,是物种空间运动和生态功能流动的载体,是保证区域间生态流、物质流、能量流

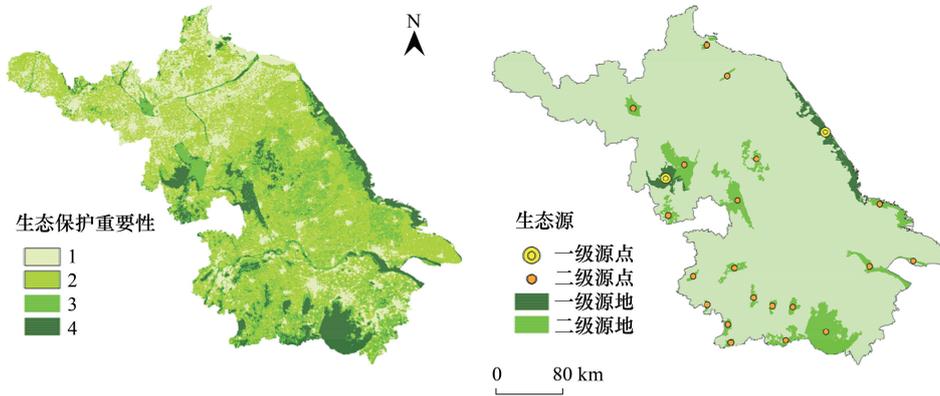


图 7 生态源地空间分布

Fig.7 Spatial distribution of ecological sources

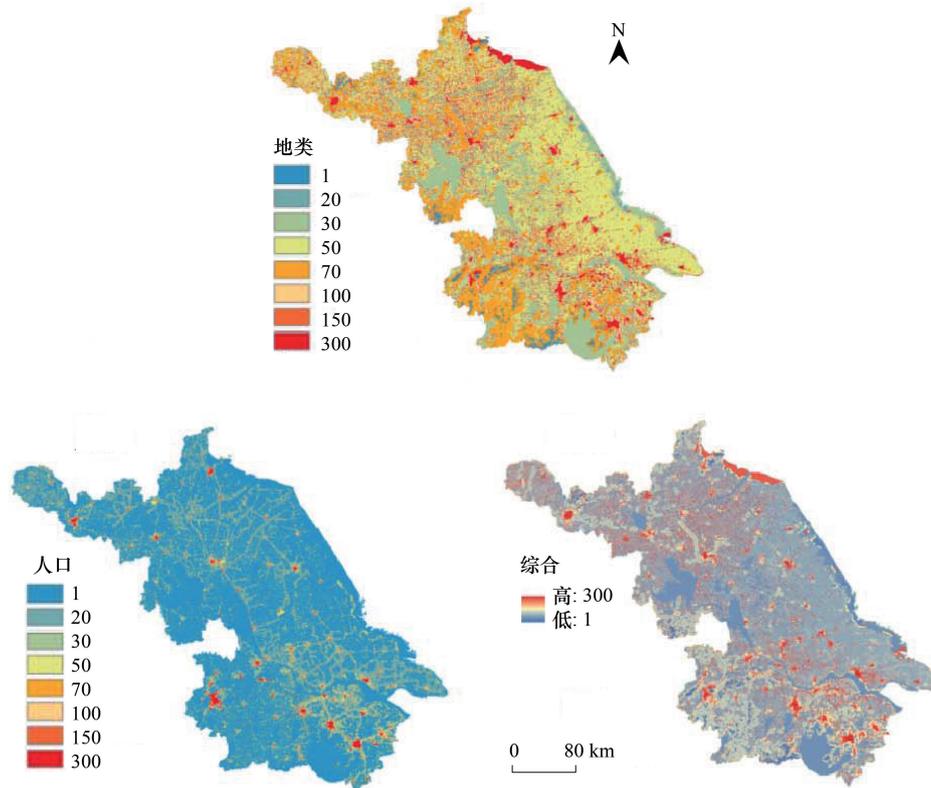


图 8 生态阻力值空间分异

Fig.8 Spatial differentiation of ecological resistance value

的关键生态用地。基于二级生态源地的识别与最小累积阻力面的建立,利用 ArcGIS 软件的距离分析工具,识别出两级源地之间的生态廊道。以水体、林地为主的生态源地,由多条基于最小阻力的廊道连接,构成了江苏省生态安全格局。总体而言,江苏省生态廊道总长 2284.89 km,分布较为集中,两源之间有多条生态廊道,有利于物种空间运动的多种选择以及空间上的能量流动。

整体来看,研究区的生态廊道呈现“两纵两横”的空间格局(图 9)。南北方向上,西部生态廊道主要沿着研究区边缘延伸,研究区西部地势起伏较大,土地利用类型以林地较多,且湖泊湿地分布广泛,生态源地及生态廊道的保护需加强重视。东部地区的生态廊道主要以一级源地沿海湿地为基础向南北延伸,北部自连云港

市的花果山与云台山开始,至东部沿海一级源地。东西方向上,中部的生态廊道连接了两个一级源地和周围的高邮湖、白马湖、红洪泽湖东部等二级源地。南部的生态廊道在太湖、长江口、沿海滩涂一线延伸。研究区西南部生态源地与廊道分布集中,江苏省在进行开发建设时,应保护与开发并举,控制城镇与居民点的无序扩张,有意识地进行生态源地与廊道的优化建设。

3 结论与讨论

本文以江苏省为研究区,通过生态服务重要性与生态敏感性确定研究区生态保护重要性分级空间格局,通过自然保护区的空间分布与面积分析,从而确定两级生态源地。通过基于边界分析所确定的最小累积阻力面,识别生态廊道,对由生态源点与生态廊道所构成的生态网络进行空间布局优化,从而形成江苏省生态安全格局。结果表明:江苏省一级生态源地面积 2089.28 km²,二级生态源地面积 7944.92 km²,分别占研究区总面积的 2.00%和 9.60%,主要分布于沿海湿地、洪泽湖、石臼湖、固城湖、长江口、等湖泊湿地与重要河流沿岸。生态廊道连接两级生态源地,总长度 2140.28km,总体呈“两纵两横”的井字分布,彼此相互连通。通过对生态要素进行空间布局优化,提出构建“四带四区”的生态安全格局,主要由两级生态源点、四个生态保育区、四条生态带组成。

江苏省纵横廊道相互连接,整体呈“井”字分布,廊道相接处又是生态源地分布聚集点,加强保护有利于生态功能的延续性与生态过程的连续性。因此,将生态廊带相接处划为四个生态保育区(图 10),分别为洪泽湖—白马湖生态保育区、盐城—大丰生态保育区、苏南丘陵生态保育区、长江下游生态保育区。洪泽湖—白马湖生态保育区以涵养水源、保持水质、维护生物多样性为主;盐城—大丰生态保育区主要侧重于保护野生珍贵动物,防止沿海湿地退化消失;苏南丘陵生态保育区应重点注意植被覆盖率,防止建设用地过度侵蚀林地;长江下游生态保育区加强水质污染的防治及长江生物的保护。生态保育区内要严格保护生态用地,控制建设用地。四带与四区的生态建设相互协调,彼此促进,构建生态安全格局,加快形成江苏省生态安全体系。

本文关于生态阻力值设定基于土地利用类型,并基于物种迁移特征,为生态优势地类的两两边界处赋予更高的阻力值,是对生态安全格局构建方法的新尝试。目前,对于边界处的具体赋值研究并不充分,仍需进一步探索,边界处的阈值宽度设为 2 km,忽略了各地类中物种的差异性以及各类物种迁徙习惯的不同,仍有待于在后续的工作中深入探讨。

致谢:中国地质大学(北京)谢苗苗副教授帮助写作,特此致谢。

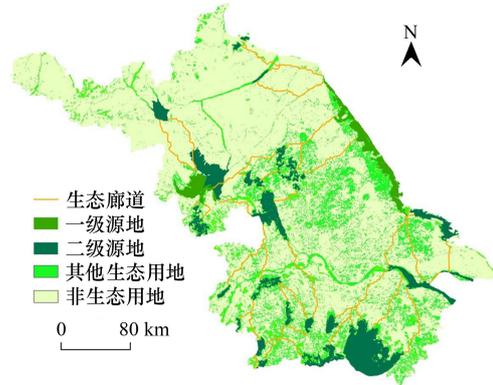


图 9 生态安全格局

Fig.9 Ecological security patterns

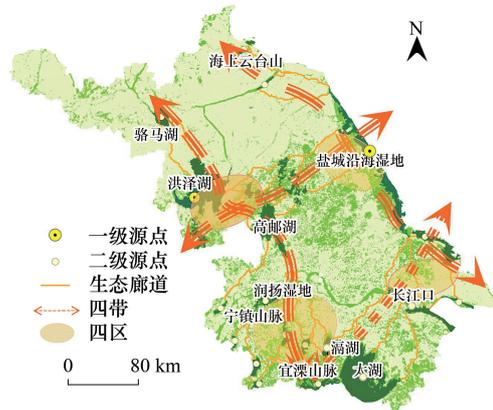


图 10 江苏省生态空间优化布局方案

Fig.10 Optimizing layout of eco-spatial structure in Jiangsu Province

参考文献 (References):

- [1] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72(11): 1923-1932.
- [2] Peng J, Yang Y, Liu Y X, Hu Y N, Du Y Y, Meersmans J, Qiu S J. Linking ecosystem services and circuit theory to identify ecological security patterns. *Science of the Total Environment*, 2018, 644: 781-790.
- [3] 马克明, 傅伯杰, 黎晓亚, 关文彬. 区域生态安全格局: 概念与理论基础. 生态学报, 2004, 24(4): 761-768.
- [4] 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.
- [5] 谢花林. 土地利用生态安全格局研究进展. 生态学报, 2008, 28(12): 6305-6311.
- [6] 高长波, 陈新庚, 韦朝海, 彭晓春. 区域生态安全: 概念及评价理论基础. 生态环境, 2006, 15(1): 169-174.
- [7] 刘红, 王慧, 刘康. 我国生态安全评价方法研究述评. 环境保护, 2005, (8): 34-37.
- [8] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(1): 8-15.
- [9] 吴健生, 李萍, 张玉清. 基于生态足迹的城市地域可持续发展能力评价——以深圳为例. 资源科学, 2008, 30(6): 850-856.
- [10] 吴健生, 岳新欣, 秦维. 基于生态系统服务价值重构的生态安全格局构建——以重庆两江新区为例. 地理研究, 2017, 36(3): 429-440.
- [11] 彭保发, 郑俞, 刘宇. 耦合生态服务的区域生态安全格局研究框架. 地理科学, 2018, 38(3): 361-367.
- [12] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 杨旸, 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.
- [13] 刘洋, 蒙吉军, 朱利凯. 区域生态安全格局研究进展. 生态学报, 2010, 30(24): 6980-6989.
- [14] Peng J, Pan Y J, Liu Y X, Zhao H J, Wang Y L. Linking ecological degradation risk to identify ecological security patterns in a rapidly urbanizing landscape. *Habitat International*, 2018, 71: 110-124.
- [15] Mao X Y, Meng J J, Xiang Y Y. Cellular automata-based model for developing land use ecological security patterns in semi-arid areas: a case study of Ordos, Inner Mongolia, China. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(1): 269-279.
- [16] 梁发超, 刘浩然, 刘诗苑, 起晓星, 刘黎明. 闽南沿海景观生态安全网络空间重构策略——以厦门市集美区为例. 经济地理, 2018, 38(9): 231-239.
- [17] Jun M J. The effects of Portland's urban growth boundary on urban development patterns and commuting. *Urban Studies*, 2004, 41(7): 1333-1348.
- [18] Gennaio M P, Hersperger A M, Bürgi M. Containing urban sprawl-Evaluating effectiveness of urban growth boundaries set by the Swiss Land Use Plan. *Land Use Policy*, 2009, 26(2): 224-232.
- [19] Tayyebi A, Pijanowski B C, Tayyebi A H. An urban growth boundary model using neural networks, GIS and radial parameterization: an application to Tehran, Iran. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(1/2): 35-44.
- [20] Redman C L, Grove J M, Kuby L H. Integrating social science into the long-term ecological research (LTER) network: social dimensions of ecological change and ecological dimensions of social change. *Ecosystems*, 2004, 7(2): 161-171.
- [21] Tzoulas K, Korpela K, Venn S, Yli-Pelkonen V, Kazmierczak A, Niemela J, James P. Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: a literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 81(3): 167-178.
- [22] Hong W Y, Yang C Y, Chen L X, Zhang F F, Shen S Q, Guo R Z. Ecological control line: a decade of exploration and an innovative path of ecological land management for megacities in China. *Journal of Environmental Management*, 2017, 191: 116-125.
- [23] Pérez-Vega A, Mas J F, Ligmann-Zielinska A. Comparing two approaches to land use/cover change modeling and their implications for the assessment of biodiversity loss in a deciduous tropical forest. *Environmental Modelling & Software*, 2012, 29(1): 11-23.
- [24] Guisan A, Thuiller W. Predicting species distribution: offering more than simple habitat models. *Ecology Letters*, 2005, 8(9): 993-1009.
- [25] 黎晓亚, 马克明, 傅伯杰, 牛树奎. 区域生态安全格局: 设计原则与方法. 生态学报, 2004, 24(5): 1055-1062.
- [26] 欧定华, 夏建国, 张莉, 赵智. 区域生态安全格局规划研究进展及规划技术流程探讨. 生态环境学报, 2015, 24(1): 163-173.
- [27] 李辉. 基于 3S 技术的“后三峡时代”万州区生态敏感性评价研究. 资源开发与市场, 2018, 34(2): 160-165.
- [28] 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.
- [29] Nidumolu U B, van Keulen H, Lubbers M, Mapfumo A. Combining interactive multiple goal linear programming with an inter-stakeholder communication matrix to generate land use options. *Environmental Modelling & Software*, 2007, 22(1): 73-83.