

DOI: 10.5846/stxb201808301854

张豆, 渠丽萍, 张桀滢. 基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化——以长三角地区为例. 生态学报, 2019, 39(20): - .
Zhang D, Qu L P, Zhang J H. Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: a case study of Yangtze River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化 ——以长三角地区为例

张 豆, 渠丽萍*, 张桀滢

中国地质大学公共管理学院, 武汉 430074

摘要:生态安全格局构建是保障区域生态安全与提升人类福祉的基本途径之一。以长三角地区为案例区,通过生境质量评估、生态系统服务重要性评价和景观连通性分析识别区域生态源地,在利用生态系统服务价值化方法辨别高生态需求区的基础上,运用最小累积阻力模型提取源地与高需求地之间的生态廊道,以构建并优化区域生态安全格局。研究表明:长三角地区生态源地总面积 64911km²,占全区的 32.51%,主要分布于皖南和浙中;区域中高与较高生态需求斑块总面积占全区 46.60%,主要位于上海市和江苏省;区域生态廊道总长度 11188.85km,源间廊道主要分布于长江沿岸和区域南部,需求廊道主要位于区域东中北部。研究首次将生态需求评价纳入生态廊道建设框架,为生态安全格局构建提供新思路,结果可为生态空间保护规划提供参考。

关键词:生态安全格局;生态供需;生态廊道;MSPA;长三角地区

Ecological security pattern construction method based on the perspective of ecological supply and demand: a case study of Yangtze River Delta

ZHANG Dou, QU Liping*, ZHANG Jiehao

School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Over the past half-century, with a dramatic increase of global population and rapid urbanization, the structure and function of global ecosystems have been strongly disturbed by human activities and have undergone unprecedented changes. More and more ecological and environmental problems, such as soil erosion, biodiversity loss, water pollution, etc., are a serious threat to national and regional ecological security. As one of the most dynamic regions of economic development in China, the Yangtze River Delta is confronted with ecosystem function deterioration and environmental degradation while the economy is growing rapidly. It is urgent to construct regional ecological security pattern to ensure sustainable development of the land space. Most previous studies on ecological security pattern mainly focused on biodiversity protection, ecosystem service maintenance, and landscape integrity. However, the relationship between ecological space and ecosystem service demand space is less considered, and so does the coupling of human socio-economic system and natural ecosystem. The research methods focused more on the exploration of source identification and resistance surface construction, and less on the construction of ecological corridor. Therefore, this study aims to scientifically link the ecological sources and urban demand space on the basis of identifying the regional ecological sources and high ecological demand areas through the analysis of regional ecological supply and demand, so as to expand the service scope and function of ecological space. In this study, ecological sources are identified from three aspects: habitat quality, importance of

基金项目:国土资源部土地利用重点实验室开放基金项目(KLLU201704)

收稿日期:2018-08-30; 网络出版日期:2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lp_qu@163.com

ecosystem services, and landscape connectivity. In terms of landscape connectivity, the method combining morphological spatial pattern analysis (MSPA) with possible connectivity (PC) index is used to identify areas with high connectivity at pixel scale. Thereafter, based on the spatial grid data of population and GDP, we identified the spatial pattern of regional ecological demand on a micro scale by using the ecosystem service value assessment method. Finally, based on the minimum cumulative resistance (MCR) model, we extracted ecological corridors among ecological sources and between sources and regions with high ecological demand, so as to construct and optimize the regional ecological security pattern. The results show: (1) the total ecological source area of the Yangtze River Delta region is 64911km², accounting for 32.51% of the total area, mainly distributed in southern Anhui Province and central Zhejiang Province; (2) the total area of high ecological demand patches in the region is 93038km², accounting for 46.60% of the total area, mainly located in Shanghai and Jiangsu Provinces; (3) the total length of regional ecological corridor is 11188.85km². The corridors among sources are mainly distributed along the Yangtze River and in the south of the region, and the demand corridors are mainly located in the east, middle and north of the region. To conclude, we incorporate ecological demand assessment into the framework of ecological corridor construction, providing a new idea for the construction of ecological security pattern. The results can provide decision-making reference for the ecological spatial protection planning and the optimization of land space development pattern in the Yangtze River Delta under the premise of jointly maintaining ecological security.

Key Words: Ecological security pattern; Ecological supply and demand; Ecological corridor; MSPA; Yangtze River Delta

半个世纪以来,随着全球人口急剧增加和快速城市化,生态系统的结构与功能受到人类活动强烈干扰,经历了前所未有的巨大变化^[1]。越来越多的生态环境问题,如水土流失、生物多样性丧失、水污染等频发,严重威胁国家和区域生态安全以及社会-生态系统的可持续发展^[2]。生态系统为人类提供一系列服务,对于人类福祉与健康、生活与生存具有重要意义^[3-4]。如何降低土地利用对生态系统的影响,保障区域生态安全,成为学术界重点关注的问题^[5-7]。

生态安全格局被认为是实现区域生态安全的基本保障和重要途径,并被确定为国土空间开发保护的三大战略格局之一^[8]。生态安全格局概念最早源于俞孔坚^[9]提出的景观生态安全格局,随后马克明等^[10]在此基础上提出区域生态安全格局,并描述其为一种能够保护生物多样性、维持生态系统完整性、有效控制和改善生态环境问题的区域性空间格局。经过 20 多年的发展,生态安全格局构建方法逐渐形成了“源地识别-阻力面构建-廊道提取-判定安全格局”的基本范式^[11-12]。其中,生态源地识别主要可以分为三种模式:(1)直接以林地或自然保护区等作为源地^[13], (2)基于多种生态过程或生态功能分析选取生态自然供给高的地区作为源地^[14], (3)构建生态敏感性、生态功能重要性和景观连通性等多角度的综合指标体系进行评价^[15-16];生态阻力面构建方面,形成了依据景观类型赋值的主流方式,近年来也逐渐有研究采用夜间灯光数据对阻力面进行修正^[11],亦有研究利用生态敏感性进行赋值^[17];生态廊道提取方面,基于最小累积阻力(Minimum Cumulative Resistance, MCR)模型提取源地间生态廊道的方法得到了广泛应用^[18-19]。

纵观当前生态安全格局研究,其内容集中在生物多样性保护、生态系统服务维持及景观完整性保持等问题上,对生态空间与生态系统服务需求空间之间的联系及其在区域生态安全中的作用考量较少,未能耦合人类社会经济系统和自然生态系统;其方法集中在对源地识别和阻力面构建的探索,对生态廊道建设探讨较少。生态系统服务需求作为社会-生态系统的终端^[20],是实现生态安全的重要环节^[21]。而生态廊道不仅自身具有生态服务功能,也是联系生态空间和城镇发展空间的重要纽带^[22],搭建两者之间的廊道对于实现区域生态安全以及社会-生态系统可持续发展具有重要意义。基于此,本文旨在通过区域生态供需分析,在识别出区域生态源地与高生态需求区的基础上,有机链接生态源区和城镇需求空间,以拓展生态空间的服务范围和功能。

长三角地区作为中国经济发展最具活力的地区之一,在实现经济快速增长的同时,面临着生态系统功能退化、环境恶化等突出矛盾,客观上亟需构建区域生态安全格局,以保障国土空间的可持续发展。本文从生境

质量、生态系统服务重要性和景观连通性 3 个层面识别生态源地,基于人口和经济空间网格数据,利用生态系统服务价值评估法识别区域生态需求空间格局,最后基于 MCR 模型提取生态源地之间、源地与较高生态需求区之间的生态廊道,从而构建并优化区域生态安全格局,以期为长三角地区在共守生态安全前提下优化国土空间开发格局提供决策参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文中长三角地区是指 2016 年 5 月国务院批准的《长江三角洲城市群发展规划》中划入的长三角城市群,包括上海、南京、杭州、合肥等 26 个市(图 1)。长江三角洲位于亚热带季风气候区,年降水一般在 800—1600 毫米,夏季高温多雨。地貌以太湖平原为主体,海拔多在 10 米以下,西南和南部间有低丘分布。全区土地面积 21.17 万 km²,占全国土地总面积的 2.21%。1990 年至今,由于城市化的快速发展,长三角地区的生态空间逐渐被蚕食,加之自然生态资源管理不善,区域湿地破坏严重,生态环境问题日益突显。

1.2 数据来源

本文基础数据包括土地利用现状、夜间灯光指数、年降水量、土壤类型、植被类型、行政界线、NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、NPP (Net Primary Productivity)、DEM (Digital Elevation Model)、GDP (Gross Domestic Product)、人口、多年平均蒸散发、河流湖泊、道路和自然保护区名录等,数据信息与来源详见表 1,长三角地区土地利用现状如图 1 所示。

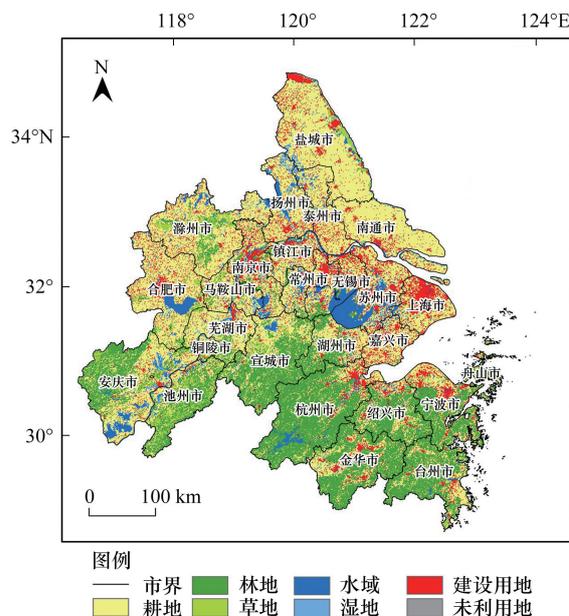


图 1 长三角地区 2015 年土地利用现状图

Fig.1 The land use map of Yangtze River Delta in 2015

表 1 数据信息与来源

Table 1 Data information and sources

数据名称 Data name	空间分辨率 Spatial resolution	时间范围 Time range	数据来源 Data sources
土地利用现状	1km * 1km	2015	中国科学院资源环境科学数据中心 (http://www.resdc.cn)
夜间灯光指数	1km * 1km	2013	
土壤类型	1km * 1km	1995	
植被类型	1km * 1km	1980	
年降水量	1km * 1km	2015	
行政界线	市域/省域	2015	
NDVI	1km * 1km	2015	
NPP	1km * 1km	2010	
DEM	90m	2000	
GDP	1km * 1km	2015	
人口	1km * 1km	2015	
多年平均蒸散发	1km * 1km	1961—2000	国家生态系统观测研究网络科技资源服务系统 (http://www.cnern.org.cn/)
河流湖泊	1:100 万	2015	国家基础地理信息系统 (http://nfgis.nsd.gov.cn)
道路	1:100 万	2015	
自然保护区	国家级、省级	2015	中国自然保护区标本资源共享平台 (http://www.papc.cn/)

2 研究方法

2.1 生境质量评估

生境质量是指基于生存资源可获得性,生态系统提供适合于个体和种群持续生存条件的能力^[23]。InVEST (Integrate Valuation of Ecosystem Service and Tradeoffs Tool)模型的生境质量模块是评估生境质量常用的方法之一^[24]。本文提取耕地、草地、林地、水域和湿地作为生境,其他为非生境。在威胁源的选择上,以往通常选取城镇、农村居民点、工矿用地等作为威胁源,考虑到人类活动强度对生境的影响,在参考模型使用说明和相关研究^[25-26]的基础上,最终选取公路、铁路、港口、航道、人类活动强度 5 个因素作为威胁源,其中人类活动强度用夜间灯光指数来反映,参数设置见表 2。

表 2 生境质量评估参数

Table 2 Habitat quality assessment parameters

威胁源 Threat source	权重 Weight	敏感度 Sensitivity					最大影响距离/km Maximum impact distance
		耕地 Farmland	草地 Grassland	林地 Forestland	水域 Water body	湿地 Wetland	
人类活动强度	1	0.75	0.5	0.75	0.8	0.8	10
铁路	0.8	0.8	0.3	0.65	0.65	0.7	3
公路	1	0.5	0.2	0.55	0.55	0.6	5
港口	1	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8	10
航道	0.8	0.5	0.7	0.7	0.7	0.75	3

2.2 生态系统服务重要性评价

生态系统服务重要性评价是在分析区域主要生态系统及生态过程的基础上,确定出对区域生态系统与生态环境保护较为重要的区域分布^[27]。本文主要选取了对研究区生态环境较为关键的水源涵养、土壤保持和生物多样性保护 3 个方面进行评价,并采用德尔菲法对 3 项生态系统服务功能的权重进行打分,最终确定因子权重分别为 0.3、0.3、0.4,通过加权叠加综合评价生态系统服务重要性。水源涵养重要性采用水量平衡方程,以总降水量与森林蒸散量及其他消耗的差作为水源涵养量,公式如下:

$$TQ = \sum_{i=1}^j (P_i - R_i - ET_i) \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中: TQ 为总水源涵养量(m^3), P_i 为降雨量(mm), R_i 为地表径流量(mm), ET_i 为蒸散发(mm), A_i 为第 i 类生态系统面积(km^2), i 为研究区第 i 类生态系统类型, j 为研究区生态系统类型数。

土壤保持重要性采用修正土壤流失方程(RUSLE),潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差即为生态系统的土壤保持量^[28],公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times L \times S \times (1 - C) \quad (2)$$

式中: A_c 为土壤保持量($t/hm^2 a$), 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($MJ mm/hm^2 h a$), K 为土壤可蚀性因子($t h/MJ mm$), L, S 为地形因子, C 为植被覆盖因子。

生物多样性保护功能借鉴俞孔坚的生物保护的景观安全格局法^[9],选取长三角地区 30 个国家和省级自然保护区作为物种保护的源,通过对坡度、NPP 和夜间灯光指数等阻力因子归一化处理构建综合阻力面,并根据离源距离与累积阻力值关系曲线识别门槛值,以此划分缓冲区作为不同重要性等级的分界线,累积阻力值越小,生物多样性保护重要性越高。

2.3 景观连通性分析

在生态安全格局中进行景观连通性评价时,大多研究直接采用可能连通性指数(Possible connectivity index, PC)^[29]单独提取斑块进行连通重要性分析(见公式 3 和 4),该方法在一定程度上切断了斑块之间的连通性,且在较大尺度的景观研究中容易丢失小型斑块,导致结果精度不佳^[30]。不同于单独提取斑块分析景观

格局的传统方法,形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)是一种基于数学形态运算,从像元层面上辨识出具有连通重要性的七大景观类型的方法^[31]。其识别的景观类型不因空间尺度过大而受影响,实用性已得到相关验证^[32]。其中,核心区为较大的生境斑块,可作为生态源地选取的依据;桥接区具有生态廊道的特征,有利于物种迁徙与景观连通^[30]。因此,本文将 MSPA 与 PC 指数相结合的方法引入生态源地评估框架中,从像元层面识别连通性高的区域。

选取生境质量评估中的生境作为前景,其他作为背景,基于 Guidos 软件进行 MSPA 分析,提取其核心区;再利用 Conefor 2.6 软件和 Conefor Inputs for ArcGIS 10.x 插件,计算核心区可能连通性指数 PC 和斑块连通重要性值 dPC 。最后,按 dPC 从高到低排序,将斑块划分为高、较高、一般、较低和低 5 个重要性等级,并将非核心区也划为最低等级,最终得到全域景观连通重要性格局。

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \times a_j \times p_{ij}^*}{A_L^2} \quad (3)$$

式中: A_L 为景观总面积; a_i 为斑块 i 面积; a_j 为斑块 j 面积; p_{ij}^* 为斑块 i 和 j 之间全部路径连通性中的最大值; n 为生态斑块总数。

$$dPC = 100 \times \frac{PC - PC_{i-\text{remove}}}{PC} \quad (4)$$

式中: dPC 为斑块连通重要性值; PC 为景观可能连通性指数; $PC_{i-\text{remove}}$ 为除掉斑块 i 后景观的可能连通性指数。 dPC 值越高,表示该斑块在景观连通中的作用越大。

2.4 生态需求评价

本文采用 Villamagna^[33]等人的观点,即生态系统服务需求是指人类社会希望获得的生态系统服务总量,选取生态稀缺度和生态经济协调度两项指标综合表征生态需求程度。生态稀缺度用人均生态系统服务价值(Ecosystem services value, ESV)来表示,用来度量生态系统服务价值相对人口的稀缺程度^[34],人均 ESV 越低,生态需求程度越高。生态经济协调度(eco-economic harmony, EHH)用单位面积 ESV 与 GDP 的比值来衡量,表征年度经济发展与生态环境之间的协调关系^[35]。其中,人口和 GDP 均采用 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 空间网格数据。

生态系统服务价值评估参考 2015 年谢高地等^[36]改进的生态系统服务价值化方法,假定建设用地提供的生态系统服务价值可忽略不计。为了体现同一生态系统类型生态功能价值当量因子的内部异质性,利用 NPP 调节因子(修正食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、维持生物多样性和提供美学景观等服务功能)、降水调节因子(修正水资源供给和水文调节服务功能)、土壤保持调节因子(修正土壤保持服务功能)分别对 6 大类生态系统的 12 项生态系统服务价值当量因子进行微观尺度(栅格单元)修正,修正系数计算公式如下:

$$P_i = B_i/\bar{B}, R_i = W_i/\bar{W}, S_i = E_i/\bar{E} \quad (5)$$

式中: P_i 为 NPP 调节因子, B_i 指栅格 i 所在地级市的 NPP (t/km^2), \bar{B} 表示全国范围单位面积平均 NPP (t/km^2); R_i 为降水调节因子, W_i 指栅格 i 的年降水量(mm/km^2), \bar{W} 表示全国范围单位面积平均年降水量(mm/km^2); S_i 为土壤保持调节因子, E_i 为栅格 i 的土壤保持量($\text{t}/\text{km}^2 \text{ a}$), \bar{E} 表示全国单位面积平均土壤保持量($\text{t}/\text{km}^2 \text{ a}$)。

2.5 基于供需视角的生态安全格局构建

生态源地是生物移动和扩散的源点,是生态系统服务流动和传递的源头。在生境质量、生态系统服务重要性和景观连通性评价的基础上,依据德尔菲法(Delphi)确定 3 项指标权重,提取综合重要性高与较高级别的斑块作为生态源地。生态阻力面构建参考俞孔坚^[37]等人关于阻力系数的设计,按照景观类型进行赋值:有林地 1,灌木林 5,疏林地 10,草地 20,园地 50,耕地 100,水域 200,未利用地 300,建设用地 500。在此基础上,利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据对生态阻力面进行修正,公式如下:

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R \quad (6)$$

式中: R_i 为修正后的栅格 i 阻力值; NL_i 为栅格 i 夜间灯光指数; NL_a 为栅格 i 所在景观类型 a 的平均夜间灯光指数, R 为栅格 i 所在景观类型的阻力值。

生态廊道是区域内能量和物质流动的载体,是保持生态过程、生态功能在区域内连通的关键生态组分。生态廊道采用 MCR 模型进行提取,该模型通过计算生态服务从源至目的地所受到的累积阻力,以此找到耗费最小的成本路径,可以反映生态服务流动和传递的潜在可能性及趋势。基于生态供需视角,利用 ArcGIS10.3 分区几何统计工具分别提取源地斑块和需求斑块的质心(CENTROID)。以每个生态源地斑块质心为源,以剩下的 $n-1$ 个生态源地为目标,生成最小累积成本路径,作为源地与源地之间的生态廊道;再以所有源地斑块的质心集合为源,以高、较高生态需求斑块质心为目标,生成最小耗费成本路径,作为源地与需求地之间的生态廊道,以此搭建生态空间与城镇需求空间的联系纽带,从而构成区域完整的生态廊道。

3 结果与分析

3.1 生态供给空间格局

水源涵养服务重要区主要位于南部的丘陵山地以及长江、太湖等水域(图 2a);土壤保持服务重要区主要分布在浙西的杭州和皖南的池州等地(图 2b);生物多样性保护服务重要区则广泛分布于各市重要的保护区周围(图 2c)。按 0.35、0.25 和 0.4 的权重综合叠加得到生态系统服务重要性空间分布结果(图 3b),其空间分布趋势与土壤保持重要性相似,高生态系统服务重要性地区主要位于浙西、皖南等地。生境质量高的地区主要位于长三角南部、西部山地丘陵以及太湖、巢湖等地(图 3a)。这些地区多被森林植被覆盖,自然环境良好,加之受城市土地扩张、建设等人类活动的干扰较小,因此生境质量高。景观连通性空间格局特征表现为南北高中间低,高连通性区主要位于市长三角南部和中部,包括芜湖、湖州等地(图 3c)。高连通性区域占研究区总面积比例高达 38.36%,表明区域景观连通性整体水平较高。这些地区生态斑块集中连片,斑块之间连通性高,有利于生物栖息和迁移。

按照 0.25、0.5 和 0.25 的权重比例,将生境质量、生态服务重要性和景观连通性三个图层叠加,并划分 5 个重要性等级,得到生态供给空间格局(图 3d)。高生态供给区主要位于长三角南部与西南角,占全区总面积的 14.70%;较高供给区主要位于高供给区的周围以及太湖、巢湖、南漪湖等地,占全区面积的 17.81%。这些区域间有丘陵分布,森林覆盖率高,水源涵养、土壤保持等生态服务功能良好,且地势相对较高,海拔 200—300m,受人类活动影响较小,栖息地的生态环境质量高。

3.2 生态需求空间格局

长三角地区生态系统服务价值总量为 27479.60 亿元,单位面积 ESV 最高值 1.59 亿元/ km^2 ,最低值为 0 亿元/ km^2 (图 4a)。ESV 高值区主要分布在长江、太湖、高邮湖、巢湖、大官湖和石臼湖等水域湖泊及其周围湿地,较高值区主要分布在南部和东南部的山地丘陵,低值区主要分布于建设用地及周围的农田和裸地。按行政区进行统计,ESV 总量排名前五的依次是杭州市、安庆市、苏州市、宣城市和池州市,ESV 总量分别为 3418.07、2939.50、2739.27、1768.83 和 1532.93 亿元;排名倒数前五的依次是舟山市、铜陵市、嘉兴市、南通市和上海市,ESV 总量分别为 61.59、169.44、203.27、293.45 和 353.84 亿元。

从人均 ESV 指标来看,长三角地区人均 ESV 取值范围为 0—229.54 万元/人,不同地区为每人提供的生态系统服务有较大差异(图 4b)。按分位数法进行空间分级显示,人均 ESV 高值和较高值区主要分布在杭州西南部、宣城南部和池州东南部,以及长江、太湖等水域湖泊,低值区主要分布在城镇、农村居民点等建设用地,较低值区则以耕地、裸地为主。从生态经济协调度(EHH)指标来看,长三角地区 ESV/GDP 取值范围为 0—40.15 万元,其整体空间分布趋势与人均 ESV 相似(图 4c)。EHH 高值区主要分布于安庆西部、杭州西南、宣城和池州南部等地,低值区依旧以建设用地为主,较低值区则分布在低值区周围,以耕地类型为主。

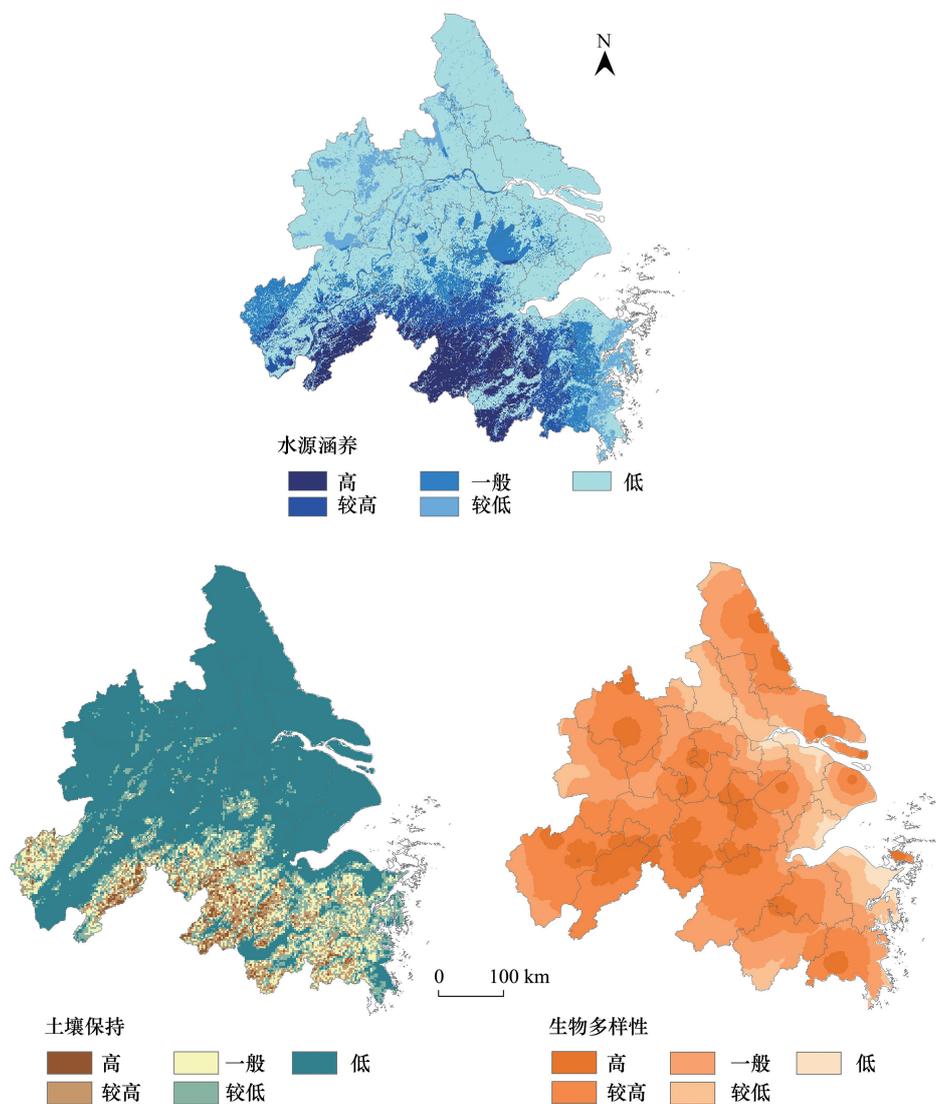


图 2 单一生态系统服务重要性

Fig.2 The importance of a single ecosystem service

将人均 ESV 和 EHH 指标值标准化为 0—1 后等权重叠加,按照分位数法划分为 5 个等级得到生态需求空间格局(图 4d)。高、较高生态需求区总面积为 65296km²,占全域面积的 32.7%,主要分布在长三角中部和东部,以建设用地和耕地类型为主,从行政区划来看,高和较高需求斑块主要位于上海、嘉兴、苏州、无锡、常州、镇江、南京、扬州、泰州和南通等市。而低、较低生态需求区主要位于长三角西南部和南部,以水域和林地类型为主,主要集中在杭州、池州、宣城、安庆、台州等市。

3.3 长三角地区生态安全格局

如图 5 所示,长三角地区生态源地总面积 64911km²,占全区总面积的 32.51%,集中分布在长三角南部,分别是皖南山地丘陵、皖西大别山、浙西山地丘陵、浙中丘陵盆地、浙东丘陵山地以及太湖、巢湖等地,此外长三角北部的盐城、西北部的滁州亦有零星分布源地斑块。从行政区来看,源地主要分布在安庆、池州、宣城、湖州、杭州、金华、绍兴、台州等市;从土地利用类型来看,源地以林地、水域、湿地土地覆盖类型为主,以耕地和草地次之。

提取高、较高需求斑块作为生态需求区,将斑块按面积降序排列,计算累加面积比例,将累加面积占比 75% 对应的斑块面积值作为剔除零星斑块的阈值,最终确定了 17 个生态需求地斑块及中心点。如图 5 所示,

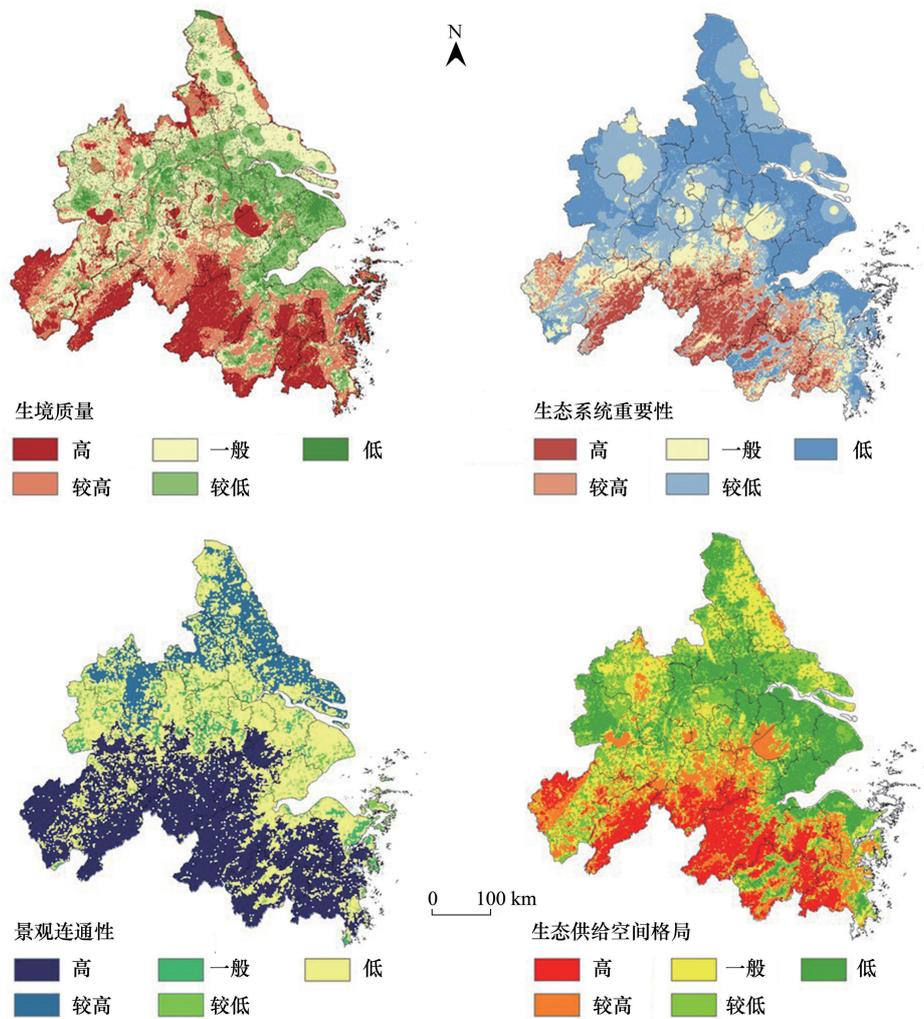


图3 生态供给空间格局

Fig.3 Spatial pattern of ecological supply

长三角地区生态廊道共 32 条,总长度为 11188.85km,覆盖范围广且连通所有生态源地,为各源地及各地区之间的生态服务流动提供重要通道。其中,源地间生态廊道共 15 条(图 5-源间廊道),总长度 7123.38km,形成了南北和东西两大主要廊道轴线,同时向中部呈树状连通至苏州、无锡等地;源地与生态需求地间廊道共 17 条(图 5-需求廊道),总长度 4065.47km,呈短树枝状分布,主要分布在上海、嘉兴、苏州、常州、南京、合肥、盐城等地。需求廊道将高需求地与生态源地以及源间廊道进行了有效连通,从而搭建了自然生态空间与城镇需求空间的联系纽带,以此拓展生态源区服务的空间范围。在城市发展过程中,应避免对生态廊道空间的侵占,加强对两类廊道的保护和生态建设,以改善廊道自身生态现状及提升其生态服务功能。源间廊道作为物种迁徙和能量传递的通道,应加以限制性政策进行重点保护。需求廊道作为城镇空间和生态空间联系的通道,应实施生态绿化建设,从而缓解社会经济发展对生态系统需求的压力。

3.4 生态安全格局优化

基于长三角地区源地、生态廊道的空间分布情况以及各地区生态需求状况,从生态保护视角而非城镇建设视角出发,本文提出“一带、一轴、五区、五组团”为核心的生态安全格局优化模式(图 6)。

“一带”指长江生态廊道带,由皖南安庆向东北方向延伸至苏北盐城的沿江生态廊道带。“一轴”指皖南-浙东丘陵山地生态廊道轴,由皖西大别山向浙东丘陵延伸的东西向重要生态廊道轴线。

“五区”指东部城镇发展区、南部生态保护区、西部水源涵养区、北部生态农业区、中部生态建设区。东部

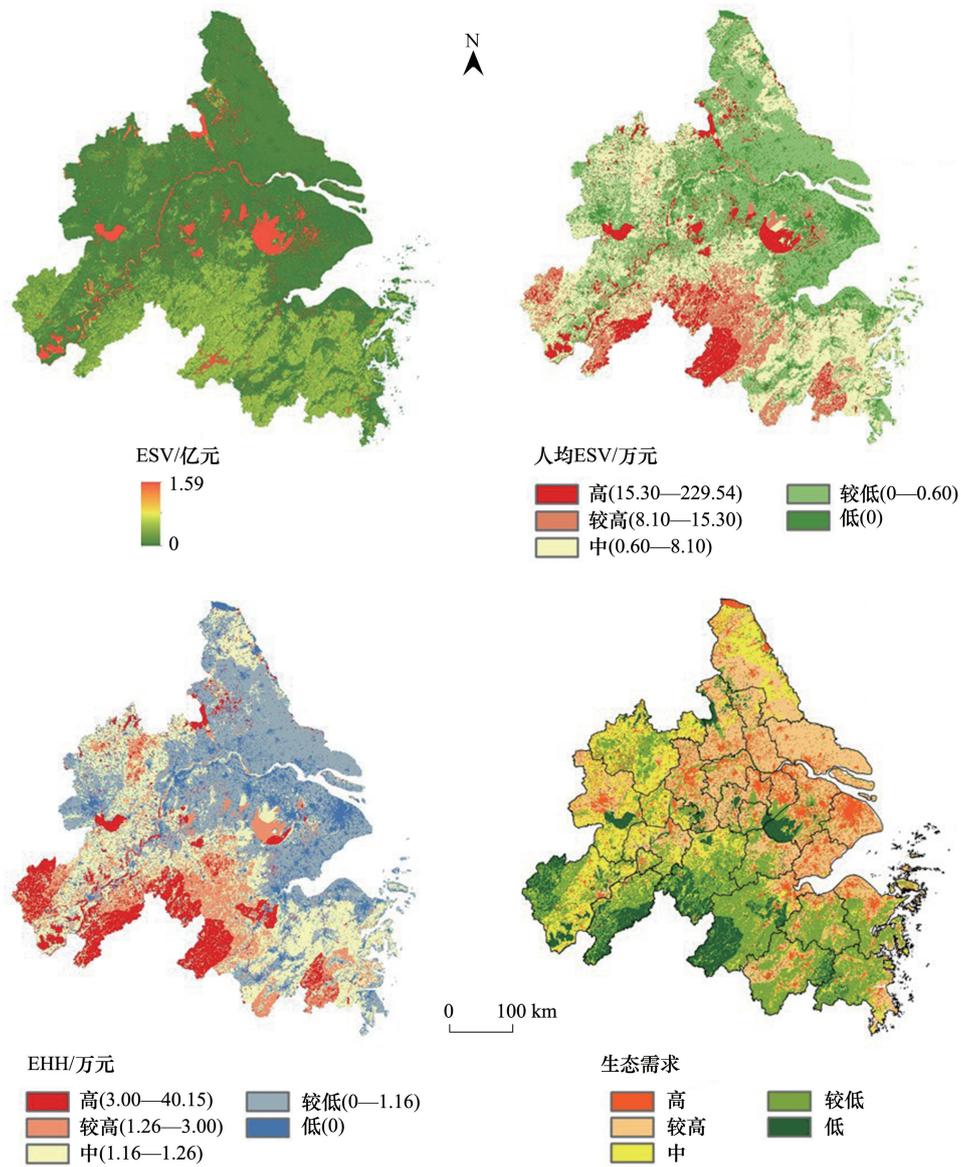


图4 长三角地区生态需求空间格局

Fig.4 Spatial pattern of ecological demand in Yangtze River Delta

以区域中心城市上海为核心,依托现有的产业集群,可重点打造城镇发展组团,依靠大都市的辐射带动作用推动苏州、嘉兴、无锡等周边城市协调发展,同时适度扩大生态空间;南部以杭州、宣城为主,山地、丘陵和盆地地形纵横交替,拥有丰富的林地生态资源,是源地的核心分布区域,宜重点进行生态保护;西部以皖西大别山和长江为核心,是长三角地区长江起始段,为区域提供水源涵养、水资源供给等生态系统服务,应保护好其水源不受污染;北部以耕地为主,宜发展生态农业,为区域提供基本的粮食保障;中部以南京、常州和镇江为主体,这些地区生态资源较为匮乏,生态需求程度高,应重点进行生态恢复和生态建设,严格控制城镇建设占用生态空间。

“五组团”是指分别与“五区”对应的5大生态廊道组团,东部、中部和北部组团以需求廊道为主,应重点进行生态、绿化廊道建设,南部、西部组团以源间廊道为主,应重点进行生态廊道保护。

此外,生态楔是链接生态源地、廊道,并能将生态系统服务导入生态需求区的自然生态要素。本文将桥接区作为生态楔,以此对生态安全格局进行优化。生态楔由零星分布的小山丘林地、湖泊水域、农田等组成,具

有较高的景观连通性,主要分布于城镇空间周围,且连接至生态源地及其他生态要素,亦是控制城镇无限扩张的缓冲带。其中,生态楔中水田面积达到总面积的 77.99%,旱地占 11.11%,水域占 5.43%,林地占 4.32%,草地占 0.59%,湿地占 0.56%。耕地作为生态楔的主要组成部分,应严格保护并加强其缓冲功能来控制城镇边界的无限增长。

5 讨论

以往研究在构建生态安全格局构时,通常只关注了生态供给高的地方及生态源地的保护,那些生态供给较差但需求高的地方反而很少被提及。从生态需求评价结果中可以看出,在高、较高需求斑块主要分布的城市中,盐城、泰州、南通等地区并非区域中经济发展水平较高、城市化水平较高的地区,表明生态系统服务稀缺问题并不是单一地由快速的经济发展所导致,由于本身生态资源基底较差,加上区域现存人口与生态资源不匹配,经济中低等发达地区同样也存在严重的生态系统服



图 5 长三角地区生态安全格局

Fig.5 Ecological security pattern in Yangtze River Delta

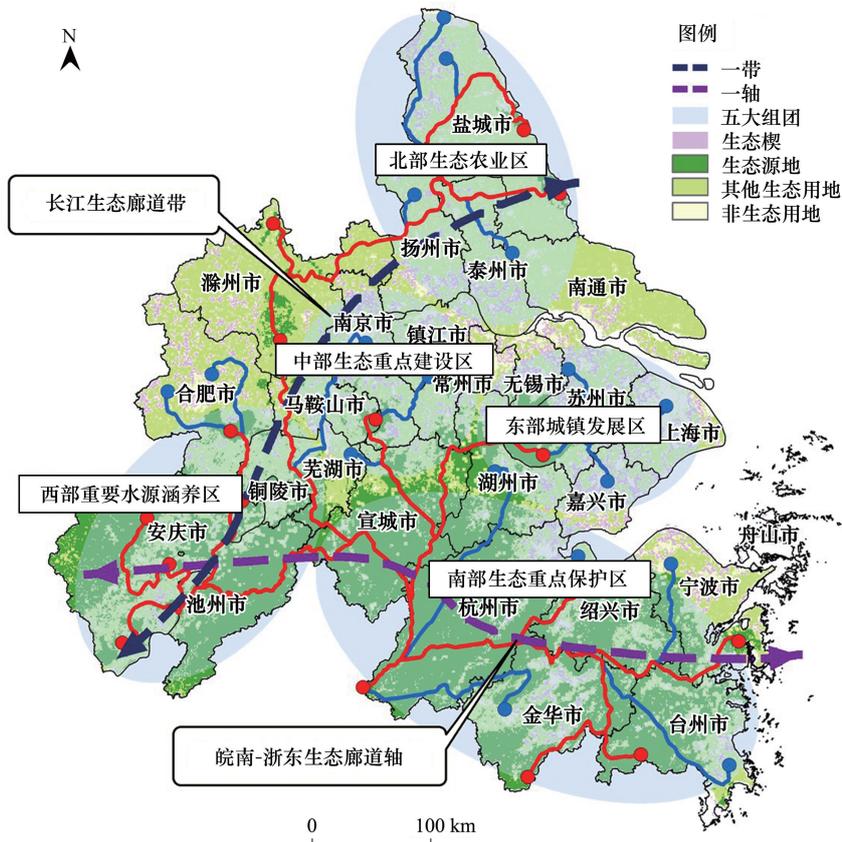


图 6 长三角地区生态安全格局优化

Fig.6 Ecological security pattern optimization in Yangtze River Delta

务稀缺问题。在区域规划中,这些地区的生态安全问题很容易被忽视。因此,这些地区在城市化发展过程及相关规划中也应重点关注,一方面要注重当地仅存的生态空间的保护,另一方面还要关注其生态与社会经济系统之间的协调关系,及时改善当前生态与人口、经济发展之间的冲突现状,缓解其生态稀缺问题,逐渐引导其向生态-社会可持续发展的方向转变。

《长江三角洲城市群发展规划》(以下简称《规划》)中划定限制开发区面积 10.2 万平方公里,占区域总面积的 48%,分布于苏北、皖南、浙西等地区。本文进一步将生态供给高、较高和一般的地区划为区域生态管控区,面积占比为 55.34%,主要分布于江苏的盐城、南通,皖南以及浙江西北部,与限制开发区高度重合;《规划》提出建设长江生态廊道,依托江淮丘陵、大别山、四明山—雁荡山等共筑绿色生态屏障。本文构建的生态安全格局,将皖西大别山、天目山、雁荡山的大片林地划为生态源地,且形成了连通长江沿岸城市的长江生态廊道,与规划布局相协调;同时,包括上海崇明东滩、浙江天目山等 30 个国家级和省级自然保护区基本都位于生态源地范围内(图 7),由此表明本文生态安全格局构建方法较为科学合理。

此外,以往生态安全格局研究直接采用连通性指数进行景观连通性评价,该方法存在以下局限性:一方面,以斑块水平的重要性来衡量区域景观连通性高低,忽略了斑块与斑块之间的连通性;另一方面,由于软件运行时间会随着节点和链接数量的增加而迅速延长,尤其是 PC 指标。因此软件并不支持大尺度的景观研究,并指出计算 PC 及其相关指标时应将节点数量限制在 2000 以内^[29]。这意味着该方法不适用于较大尺度的景观研究,或需要舍弃部分斑块来完成计算,问题就在于如何取舍景观斑块才能保证结果的准确性。MSPA 方法可以从像元层面识别连通性较高的生境斑块,本文引入了 MSPA 和 dPC 指标相结合的景观连通性评价方法。以本研究区为例,长三角地区生境斑块总数为 26983,远超过软件限制值,而通过 MSPA 提取核心区后的生境斑块总数为 1284,可以满足计算要求。该方法的优势在于通过像元和斑块两种尺度层面的评价和筛选,不仅能提高连通性指数计算的效率,保证结果的准确性,而且使大区域尺度的景观连通性评价成为可能。

对于更大尺度的景观研究,则可在 MSPA 处理的基础上再以斑块面积等指标对斑块进行多次筛选,以满足指标计算对节点和链接的数量要求。

6 结论

本文以长三角地区为研究对象,评估了区域生境质量、生态系统服务重要性及景观连通性 3 个方面以识别生态源地,并基于生态系统服务价值化方法辨识生态需求程度高的地区,利用 MCR 模型提取两类生态廊道,以此来构建区域生态安全格局,在此基础上辨识出“一带一轴五大分区”的生态安全优化格局。研究表明:长三角地区生态源地总面积 64911km²,占全区的 32.51%,主要分布在皖南、浙中及太湖、巢湖等地区;高、较高生态需求区总面积为 93038km²,占全域面积的 46.60%,主要位于上海、嘉兴、苏州、无锡等地;生态廊道总长度 11188.85km,源间廊道长度为 7123.38km,主要分布在长江沿岸和区域南部,需求廊道长度为 4065.47km,主要位于区域东中北部。

本文通过构建源地与需求区之间的生态廊道,改变了以往只考虑区域生态的自然供给而忽视人类对其需

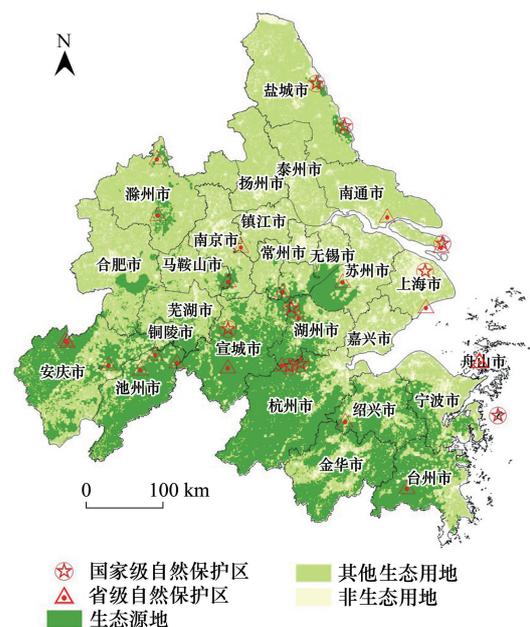


图 7 长三角地区自然保护区空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of nature reserves in Yangtze River Delta

求的情况,为生态安全格局构建提供了新的思路和参考。同时,基于 MSPA 分析与 dPC 指数结合的景观连通性评价方法,打破了以往只能单独提取生态斑块进行连通性评价的局限性和低效性,可从整体上判定出区域景观连通性高的地区。需要说明的是,研究未定量估算出所有生态系统服务供给量以及人类对各类生态系统服务需求总量,具体应该表现为生态用地规模、位置等,而仅以重要性和需求程度反映生态供需的空间分异规律,在生态系统服务的量化上稍显不足。因此,如何科学、合理地测算出不同生态系统服务供给与需求量,分析区域生态供需平衡状况,在此基础上构建区域生态安全格局及指导相关规划,仍亟待进一步深入研究。

参考文献 (References):

- [1] 侯鹏,王桥,申文明,翟俊,刘慧明,杨旻. 生态系统综合评估研究进展:内涵、框架与挑战. 地理研究, 2015, 34(10): 1809-1823.
- [2] Wood S L R, Jones S K, Johnson J A, Brauman K A, Chaplin-Kramer R, Fremier A, Girvetz E, Gordon L J, Kappel C V, Mandle L, Mulligan M, O'Farrell P, Smith W K, Willemen L, Zhang W, DeClerck F A. Distilling the role of ecosystem services in the Sustainable Development Goals. *Ecosystem services*, 2018, 29(A): 70-82.
- [3] Geijzendorffer I R, Cohen-Shacham E, Cord A F, Cramer W, Guerra C, Martin-Lopez B. Ecosystem services in global sustainability policies. *Environmental Science and Policy*, 2017, 74: 40-48.
- [4] Costanza R, de Groot R, Sutton P, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions*, 2014, 26: 152-158.
- [5] 金贵,邓祥征,张倩,王占岐,李兆华. 武汉城市圈国土空间综合功能分区. 地理研究, 2017, 36(03): 541-552.
- [6] 苏泳娴,张虹鸥,陈修治,黄光庆,叶玉瑶,吴旗韬,黄宁生,匡耀求. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案. 生态学报, 2013, 33(05): 1524-1534.
- [7] 蒙吉军,朱利凯,杨倩,毛熙彦. 鄂尔多斯市土地利用生态安全格局构建. 生态学报, 2012, 32(21): 6755-6766.
- [8] 樊杰. 我国国土空间开发保护格局优化配置理论创新与“十三五”规划的应对策略. 中国科学院院刊, 2016, 31(01): 1-12.
- [9] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局. 生态学报, 1999, 19(01): 10-17.
- [10] 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(04): 761-768.
- [11] 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(03): 471-484.
- [12] Lin Q, Mao J, Wu J, Li W, Yang J. Ecological Security Pattern Analysis Based on InVEST and Least-Cost Path Model: A Case Study of Dongguan Water Village. *Sustainability*, 2016, 8(2): 172.
- [13] Teng M, Wu C, Zhou Z, Lord E, Zheng Z. 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.
- [14] 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. 资源科学, 2011, 33(01): 112-119.
- [15] 丛佃敏,赵书河,于涛,陈诚,王小标. 综合生态安全格局构建与城市扩张模拟的城市增长边界划定——以天水市规划区(2015—2030年)为例. 自然资源学报, 2018, 33(01): 14-26.
- [16] 彭建,李慧蕾,刘焱序,胡熠娜,杨旸. 雄安新区生态安全格局识别与优化策略. 地理学报, 2018, 73(4): 701-710.
- [17] 杜悦悦,胡熠娜,杨旸,彭建. 基于生态重要性和敏感性的西南山地生态安全格局构建——以云南省大理白族自治州为例. 生态学报, 2017, 37(24): 8241-8253.
- [18] Su Y, Chen X, Liao J, Zhang H, Wang C, Ye Y, Wang Y. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed land expansions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 19: 35-46.
- [19] 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(07): 1052-1061.
- [20] Wolff S, Schulp C J E, Verburg P H. Mapping ecosystem services demand: A review of current research and future perspectives. *Ecological Indicators*, 2015, 55: 159-171.
- [21] 黄智洵,王飞飞,曹文志. 耦合生态系统服务供求关系的生态安全格局动态分析——以闽三角城市群为例. 生态学报, 2018, 38(12): 4327-4340.
- [22] 李宗尧,杨桂山,董雅文. 经济快速发展地区生态安全格局的构建——以安徽沿江地区为例. 自然资源学报, 2007, 22(01): 106-113.
- [23] Hall L S, Krausman P R, Morrison M L. The habitat concept and a plea for standard terminology. *Wildlife Society Bulletin*, 1997, 25(1): 173-182.

- [24] 吴健生, 张理卿, 彭建, 冯喆, 刘洪萌, 赫胜彬. 深圳市景观生态安全格局源地综合识别. 生态学报, 2013, 33(13): 4125-4133.
- [25] 戴云哲, 李江凤, 杨建新. 长沙都市区生境质量对城市扩张的时空响应. 地理科学进展, 2018, 37(10): 1340-1351.
- [26] 吴健生, 毛家颖, 林倩, 李嘉诚. 基于生境质量的城市增长边界研究——以长三角地区为例. 地理科学, 2017, 37(01): 28-36.
- [27] 李月臣, 刘春霞, 闵婕, 王才军, 张虹, 汪洋. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价. 生态学报, 2013, 33(01): 168-178.
- [28] 蒋春丽, 张丽娟, 张宏文, 姜春艳, 于洋, 潘涛. 基于 RUSLE 模型的黑龙江省 2000—2010 年土壤保持量评价. 中国生态农业学报, 2015, 23(05): 642-649.
- [29] Saura S, Pascual-Hortal L. A new habitat availability index to integrate connectivity in landscape conservation planning. *Landscape and Urban Planning*, 2007, 83(2-3): 91-103.
- [30] 曹翊坤, 付梅臣, 谢苗苗, 高云, 姚思瑶. 基于 LSMM 与 MSPA 的深圳市绿色景观连通性研究. 生态学报, 2015, 35(02): 526-536.
- [31] Soille P, Vogt P. Morphological segmentation of binary patterns. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 456-459.
- [32] Sun J, Southworth J. Indicating structural connectivity in Amazonian rainforests from 1986 to 2010 using morphological image processing analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(14): 5187-5200.
- [33] Villamagna A M, Mogollon B, Angermeier P L. A multi-indicator framework for mapping cultural ecosystem services: The case of freshwater recreational fishing. *Ecological Indicators*, 2014, 45: 255-265.
- [34] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(09): 1740-1746.
- [35] 李真, 潘竟虎, 胡艳兴. 甘肃省生态资产价值和生态-经济协调度时空变化格局. 自然资源学报, 2017, 32(01): 64-75.
- [36] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进. 自然资源学报, 2015, 30(08): 1243-1254.
- [37] 邓金杰, 陈柳新, 杨成韞, 徐志博. 高度城市化地区生态廊道重要性评价探索——以深圳为例. 地理研究, 2017, 36(03): 573-582.