

DOI: 10.5846/stxb202012293306

章瑞,王凯平,张云路,李雄.基于空间演变多元分析的市域生态空间优化研究——以宁波市为例.生态学报,2022,42(1):127-137.

Zhang R, Wang K P, Zhang Y L, Li X. Urban ecological space optimization based on multivariate analysis of spatial evolution: a case study of Ningbo City. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1):127-137.

基于空间演变多元分析的市域生态空间优化研究 ——以宁波市为例

章 瑞,王凯平,张云路*,李 雄

北京林业大学园林学院,北京 100101

摘要:市域生态空间是城乡发展的绿色基底和生态基础,其协同联系“山水林田湖草”各生态系统,是动植物和自然生态多种过程的空间载体,同时也是人类进行社会经济活动的场所,与城乡经济社会发展息息相关,良好的市域生态空间体系,是实现市域层面生态系统稳定,协调城市发展和自然保护的重要载体,同时也是实现城市健康良性发展的重要保障。现有的市域生态空间规划重视不够,其静态的、定性为主的规划方法严重滞后,存在一系列不足与缺陷:1)重城区,轻市域;2)重主观定性,轻客观定量;3)重被动落实,轻主动响应;4)重静态蓝图,轻动态模拟。其空间规划成果远不能达到预期,无法应对城市化对市域生态环境和资源所带来的影响和威胁。以宁波市域空间为对象,以市域生态空间演变为出发点,从生态空间的安全格局、结构特征和用地类型转移 3 个方面,通过对 2000 年、2010 年和 2018 年 3 个时期的市域空间演变的定量化分析,揭示市域生态空间演变的特征与规律。并以此为基础探索新型市域生态空间重构的方法和内容,提出空间优化的策略:针对安全格局层面生态适宜性衰退、结构层面连通度下降、地类层面绿色空间减少的问题等,通过确定生态核心,构建绿色空间廊道,筛选关键节点,对其分别进行分级、保护,最终重新构建起良性的宁波市域生态空间体系,并针对优化结果进行评价与修正。从市域生态空间 3 种类型演变分析入手,以“演变-响应-重构”为逻辑指导市域生态空间规划,积极探索了应对城市化影响下市域生态空间优化的新方法,为市域山水林田湖草生命综合体的资源保护和科学利用提供了一定的理论。

关键词:市域;市域生态空间;空间演变;空间优化;生态格局

Urban ecological space optimization based on multivariate analysis of spatial evolution: a case study of Ningbo City

ZHANG Rui, WANG Kaiping, ZHANG Yunlu*, LI Xiong

School of landscape architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100101, China

Abstract: Urban ecological space is the green base and ecological foundation of urban and rural development, which is synergistically linked to the ecosystems of “landscape, water, forest, field, lake and grass”, and is the spatial carrier of various processes of flora and fauna and natural ecology, as well as the place for human socio-economic activities, and is closely related to urban and rural economic and social development. A good urban ecological space system is an important carrier to realize the stability of the ecosystem at the municipal level, to coordinate urban development and nature protection, and also an important guarantee to realize the healthy and benign development of the city. The existing municipal ecological spatial planning does not pay enough attention to its static, qualitative-oriented planning methods, which are seriously lagging behind, with a series of deficiencies and defects: 1) emphasis on urban areas rather than municipalities; 2) emphasis on subjective qualitative rather than objective quantitative; 3) emphasis on passive implementation rather than

基金项目:国家林草局重点项目(2019132703, 2020132109)

收稿日期:2020-12-29; 网络出版日期:2021-08-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangyunlu1986829@163.com

active response; 4) emphasis on static blueprints rather than dynamic simulations. Its spatial planning results are far from meeting expectations and cannot cope with the impacts and threats brought by urbanization on the ecological environment and resources of the urban area. This paper selects Ningbo urban space as the object, takes the evolution of urban ecological space as the starting point, and reveals the characteristics and laws of the evolution of urban ecological space from three aspects: security pattern, structural characteristics and land use type transfer of ecological space, through the quantitative analysis of the evolution of urban space in 2000, 2010 and 2018. Based on this, we explore the methods and contents of the new municipal ecological space reconstruction and propose strategies for spatial optimization: to address the problems of declining ecological suitability at the security pattern level, declining connectivity at the structural level, and decreasing green space at the land type level, etc., by identifying ecological cores, organizing green space corridors, screening key nodes, grading and protecting them respectively, and finally reconstructing a benign Ningbo municipal ecological Spatial system of Ningbo city is reconstructed, and the optimization results are evaluated and revised. This study starts from the analysis of the evolution of three types of urban ecological space, and uses the logic of “evolution-response-reconstruction” to guide the urban ecological space planning, and actively explores a new method for optimizing the urban ecological space under the influence of urbanization, which provides a certain theory for the protection and scientific utilization of resources in the urban landscape, forest, field, lake and grass life complex.

Key Words: urban area; urban ecological space; spatial evolution; spatial optimization; ecological pattern

十八大以来,党中央将“生态文明建设”提升至国家发展战略的新高度。“山水林田湖草生命共同体”作为新时代生态建设的核心思想为市域人居环境建设与发展指引了新的方向。市域生态空间是在市域尺度下,具有自然属性,以提供区域生态系统维护、生态产品供给等生态服务为主导功能且自身有一定自我调节、修复、维持和发展能力的国土空间^[1-2],其协同联系“山水林田湖草”各生态系统,是承载着人类、动植物和自然生态多种过程的空间载体,也是生态系统服务功能的策源地和枢纽区^[3]。其重要性主要体现在:1)市域生态空间涵盖“山水林田湖草”生命共同体全要素,在促进城乡空间与自然系统的物质交换等方面有着极其重要的意义^[4-5]。2)市域生态空间是城乡人居环境的绿色基底和生态保障,其统筹整合市域尺度下各类蓝绿生态空间,共同构成城乡人居环境的绿色基底和生态本底^[6-7]。3)市域生态空间具备丰富多元的服务供给能力。分别在生产服务、生态服务功能方面,为城乡居民供给绿色产品,为城市发展提供水源涵养、空气净化、城乡美化等生态服务,在改善城乡生态环境、提高城市生态承载力和维护城市生态安全等方面发挥重要作用^[8-9]。4)市域生态空间是城市绿色开放空间的补充和拓展。作为对城市绿色开放空间的补充和拓展,城市外围的市域生态空间逐渐承担起丰富市民生活、满足市民日益增长接近自然,享受自然,返璞归真的生活需求的任务^[10-11]。

当前市域生态空间规划主要存在“局限性、主观性、被动性、静态性”等问题^[12],难以解决城市快速发展所带来的生态问题。其主要缺陷为:1)重城区,轻市域。由于长期受到我国城乡管理体制分离的影响,当前大多绿地系统规划还是以传统局限的规划思维对市域生态空间进行规划,缺乏在市域尺度下对城乡生态空间统筹的整体规划^[13-14]。2)重主观定性,轻客观定量。在目前一些市域生态空间规划实践中,规划师仅凭自身的主观经验和审美,定性的运用缺乏科学分析的“点、线、面”简单粗犷、美学串联的规划方法^[15],既无法针对“高价值”和“高敏感度”的生态空间进行有效地保护,也无法构建起完整的、系统的市域绿色生态空间,无法有效发挥最大生态效益^[16-17]。3)重被动落实,轻主动响应。受制于各类上位规划,传统市域生态空间规划只能在已经构建完成的上位规划框架下进行^[18]。面对当下受快速城市化影响区域生态系统紊乱日益严重的形势,这种被动介入市域生态空间的规划方式,无法科学应对市域生态空间面临的复杂问题^[19-20]。4)重静态蓝图,轻动态模拟。当前市域生态空间规划仅仅被看作对于市域生态空间的静态数量和链接的追求,这种“静态蓝图”勾勒式市域生态空间规划忽视了“山水林田湖草”作为“系统”生态空间本质内涵和各生态系

统相互之间复杂的关联性,以致无法高效发挥风景治理作用和增强城市生态韧性^[21]。

相比较于静态的空间特征分析,空间演变研究主要集中在生态用地数量的变化和生态空间格局的变化^[22],现有研究成果主要聚焦于生态空间演变过程、结果及驱动因子的分析,对空间演变与空间优化之间的关联以及如何通过分析演变去指导优化鲜有研究。本次研究着眼于整个市域的尺度,以动态的视角和定量分析方法,以生态空间演变为切入点,从安全格局、空间结构、地类转移 3 个不同层面对市域空间发展进行定量分析总结,主动优化生态空间格局,指导构建完整的空间结构和连续的空间配置,实现生态系统的稳定和生态服务功能的持续高效供给。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

宁波地处中国华东地区、东南沿海。地貌大致分为山脉、丘陵、盆地和平原,总体地势西南高,东北低,市域总面积 9816 km²。市域范围内生态资源丰富,生态基底条件优良。近 20 年来由于宁波市快速城市化及众多工业项目落地,侵占自然资源时有发生,并对生态空间产生了一定的破坏,导致了当前宁波市域自然生态地块分布破碎和生态环境的恶化。如何基于空间演变的多元分析,来修复市域生态格局和引导市域生态空间的优化与完善,显得尤为重要。

1.2 数据来源与预处理

本研究主要采用 Landsat8 OLI_TIRS 卫星数字产品 2000、2010 和 2018 年的卫星影像(数据源自:地理空间数据云,分辨率 30 m×30 m)。首先,使用 ENVI 5.2 软件对遥感影像进行大气校正、波段融合等预处理;然后,基于 ENVI 5.2 监督分类中的最大似然法进行要素提取,与高精度谷歌照片进行对比,验证其精确度,将数据导入 ArcGIS 10.2 进行数据分析,完成基本图件的制作。用地类型包括:耕地、林地、草地、水域和建设用地,本次研究的生态空间类型包括林地、草地两部分。

1.3 研究方法

陈爽等人对南京市域生态空间数量增减和质量变化进行了研究,从经济发展阶段、宏观政策环境和城市扩展规律等方面分析变化的驱动力,并提出生态空间保护对策^[23];张丽等人对抚顺市不同时期的土地利用动态演变及驱动力进行研究^[24];肖笃宁等人对沈阳市域生态空间进行研究,揭示沈阳西郊近 30 年景观格局的演变规律^[25]。由此可见,从生态空间演变的角度来研究市域生态空间已成为一种主流且可行的方法,前人虽研究成果颇丰,但仅仅用来分析如何变化的以及变化的结果,而对于如何从变化中找到规律以制定空间优化的路径并不多见。本文以空间演变为切入点,从生态空间的安全格局、空间结构、地类转移 3 个不同的层面出发,通过确定生态核心、构建绿色空间廊道、筛选关键节点,建立基于生态演变响应的市域生态空间优化路径,提出相应的优化策略,并检验优化的结果。

在安全格局层面上通过生态适宜性分析,确定生态核心范围为高生态适宜性区域。运用主成分分析法,进行降维处理选取了 7 个影响单因子,并结合宁波生态空间特征对其进行层级划分(表 1)。首先运用 ArcGIS 10.2 将 12 个因子的分析结果转为栅格数据并提取属性表数值。其次归一化处理数据,避免各因子因单位不同而造成信息损失,最终选取累积贡献率大于 90% 的 7 个指标层因子作为评价因子。再将原始变量通过线性组合形成新变量,并根据协方差矩阵求解特征根、特征向量,协方差矩阵与原始变量的线性组合即为主成分,公式如下:

$$\begin{cases} Z_1 = a_{11} x_1 + a_{21} x_2 + \dots + a_{p1} x_p, \\ Z_2 = a_{12} x_1 + a_{22} x_2 + \dots + a_{p2} x_p, \\ \dots \\ Z_p = a_{1p} x_1 + a_{2p} x_2 + \dots + a_{pp} x_p. \end{cases}$$

式中, Z 为各主成分; a 为协方差矩阵各元素; x 为原始变量相应的值。

采用层次分析法对单因子进行权重的设置,将结果输入 Yaahp,构建“判断矩阵”,获取评价因子的权重(表 2)。通过生态适宜性等级、权重值、单因子个数得到综合生态适宜性评价。公式如下:

$$S = \sum_i^n W_i \times X_i$$

式中, S 为生态适宜性综合评价指数, W_i 为单因子生态适宜性等级值, X_i 为不同生态适宜性因子权重值, n 为评价因子的个数。

在空间结构层面上,将高适宜的区域确定为源地,同时建立生态阻力面。景观生态学认为生态流运行和扩展过程中是一个克服限制性因素的过程,各种限制性因素统称为生态阻力,而生态流在空间中的运行必须要克服这些生态阻力才能得以实现^[26]。选取用地类型、距道路距离、距居民点距离 3 个阻力因子(表 3)^[27],运用最小阻力(MCR)模型计算从源地到目的地运动过程中所需要耗费的代价,选取最小阻力路径构建绿色空间廊道,这一过程需要考虑生态源地、距离、生态阻力 3 个因子。公式如下:

$$R_{MC} = \int \min \sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i$$

式中, R_{MC} 为最小累计阻力值, \int 为一个未知的正函数, D_{ij} 为物种从源 j 到空间某一点所穿越的某景观基面 i 的空间距离, R_i 为景观 i 对某物种运动的阻力。

在用地类型层面上,通过 ArcGIS 10.2 土地利用转移矩阵计算出不同年份各用地类型之间的相互转移情况,选取出生态空间急剧减少的地域;以累积耗费距离图作为 DEM,利用 ArcGIS 10.2 水文分析模块,获取生态过程中阻力最大的“山脊线”^[28];绿色空间廊道与此“山脊线”进行相交,此交点为关键节点。

表 1 单因子评价标准与分值

Table 1 Single factor evaluation criteria and scores

单因子指标 Single factor index	分级标准 Grading standard	分值 Score	单因子指标 Single factor index	分级标准 Grading standard	分值 Score
高程 Elevation	553—958 m	1	用地类型 Type of land use	建设地	1
	358—553 m	2		耕地	2
	200—358 m	3		草地	3
	71—200 m	4		水域	4
	0—71 m	5		林地	5
坡度 Slope	27%—67%	1	道路 Way	0—200 m	1
	19%—27%	2		200—400 m	2
	12%—19%	3		400—600 m	3
	5%—12%	4		600—800 m	4
	0—5%	5		800—1000 m	5
坡向 Exposure	北向	1	水文 Hydrology	800—1000 m	1
	东北向、西北向	2		600—800 m	2
	东向、西向	3		400—600 m	3
	东南向、西南向	4		200—400 m	4
	平地	5		0—200 m	5
植被覆盖 Vegetational cover	0—1.764	1			
	1.764—4.274	2			
	4.274—6.627	3			
	6.627—8.470	4			
	8.470—10.0	5			

表 2 单因子评价指标权重

Table 2 Weight of single factor evaluation index

因子 Factor	高程 Elevation	坡度 Slope	坡向 Exposure	道路 Way	用地类型 Type of land use	林地覆盖 Forest coverage	水文 Hydrology	权重 Weight
高程 Elevation	1	1/3	1/2	1/4	1/9	1/7	1/5	0.04
坡度 Slope	3	1	3/2	3/4	3	3/7	3/5	0.17
坡向 Exposure	2	2/3	1	1/2	2/9	2/7	2/5	0.07
道路 way	4	4/3	2	1	4/9	4/7	4/5	0.12
用地类型 Type of land use	9	3	9/2	9/4	1	9/7	9/5	0.23
林地覆盖 Forest coverage	7	7/3	7/2	7/4	7/9	1	7/5	0.22
水文 Hydrology	5	5/3	5/2	5/4	5/9	5/7	1	0.15

表 3 生态阻力值及权重

Table 3 Ecological resistance value and weight

阻力因子 Resistance factor	阻力等级 Resistance level	阻力值 Resistance value	权重 Weight
土地利用类型 Land use type	草地	20	0.62
	林地	30	
	耕地	50	
	建设地	100	
	水域	10	
距离道路距离 Road distance	0—300 m	100	0.208
	300—600 m	80	
	600—1200 m	60	
距居民点距离 Distance from residential area	0—400 m	100	0.171
	400—800 m	80	
	800—1600 m	60	

2 结果与分析

2.1 基于用地类型的市域生态空间演变分析

通过对不同年份宁波市域生态空间地类变化的对比分析(表 4,表 5),可以清楚的看到 2000—2018 年,宁波市域内约有 500 km²耕地转换成了城市建设用地,尤其是在中心城区和北部沿海区,随着城市化进程的加速,建设用地面积迅速增长,造成了绿地面积的缩减和生态环境稳定性的下降;林地面积有所下降,但总体下降伏度不大;宁波市域内草地呈现出散点分布的状态,面积先下降后上升,增加了约 80 km²,新增草地主要位于北部沿海地带;水域面积减少了约 450 km²,主要转化成了建设用地和耕地,其原因是由于城市化加速促使建设用地面积增加和填湖造陆增加了耕地的面积(图 1)。

2.2 基于安全格局的市域生态空间演变分析

通过对不同年份宁波市域生态适宜性强弱分布情况的对比分析(图 2),发现在 2000—2018 年期间,市域生态安全格局出现了明显恶化,且趋势还在加剧。在四明山区、福泉山区和灵岩山区原先连片分布的生态适宜性良好的区域已支离破碎,生态功能弱化,生态价值萎缩,难以发挥大型生态地块的作用;中心城区的安全格局进一步退化,对外界的抗干扰力下降,生态环境趋于恶化。

2.3 基于空间结构的市域生态空间演变分析

通过对不同年宁波市域连通廊道总体分布特征、长度、空间位置的对比分析,发现宁波市域生态空间的连通度在不断弱化,从 2000 年的 0.3627 下降到了 2018 年的 0.1678,需要人为构建的连通廊道的数量急剧增加。

2000 年时,由于市域生态基底良好,仅需构建数量较少、长度较短的连通廊道,其集中分布在杭州湾沿岸和栲栳山附近,主要功能是连接杭州湾沿岸呈散点状分布的高适宜性生态地块和将杭州湾、栲栳山、四明山 3 个大型生态区域连通起来,在宁波市域范围内形成功能完善、相连成片、分布广泛的绿色空间体系;在 2010 年时,由于原有的高适宜性生态地块逐渐破碎,需新增数量较多、长度较短的连通廊道串联破碎地块,以增强彼此之间的联系;到 2018 年时,由于高适宜性生态地块破碎化加剧,为保持市域生态空间的连通性,需人为构建的连通廊道的数量和长度都极大的增加了,通过廊道对几大片区进行有限的连接,虽可维持区域之间微弱的联系,但生态效益已极大减弱了(图 3)。

表 4 2000—2010 年各用地类型面积/km²
Table 4 Area of each land type in 2000—2010

年份(2000—2010) Year	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	建设地 Constructively	林地 Forest	水域 Water area	总计 Total
草地 Grassland	101.1503935	2.556261271	0.533017011	5.831020396	0.051506602	110.1221988
耕地 Cultivated land	0.8619103430	3073.128739	530.7954866	21.77454815	51.52581186	3678.086496
建设地 Constructively	0.019881221	15.05821134	645.2423917	1.09064678	1.013711902	662.428429
林地 Forest	5.395966393	33.95416593	46.72005838	3978.897584	11.44058435	4076.408359
水域 Water area	0.124699879	5.965798767	22.56101753	1.179286029	313.7981495	343.6289517
总计 Total	107.5528514	3130.663176	1245.851971	4008.773085	377.8297642	8870.67084

表 5 2010—2018 年各用地类型面积/km²
Table 5 Area of each land type in 2010—2018

年份(2000—2010) Year	草地 Grassland	耕地 Cultivated land	建设地 Constructively	林地 Forest	水域 Water area	总计 Total
草地 Grassland	102.0909491	0.825900745	0.814351606	2.667981925	1.103916282	107.5030997
耕地 Cultivated land	0.960452272	2924.632797	163.0189391	25.98210666	17.53856878	3132.132864
建设地 Constructively	2.50330323	40.61697232	1165.950707	4.331509979	32.37984955	1245.782342
林地 Forest	3.037642982	26.5483354	27.35644302	3947.342049	4.073605118	4008.358075
水域 Water area	79.06669228	56.14212154	131.092477	1.94738913	527.3996072	795.6482872
总计 Total	187.6590399	3048.766127	1488.232917	3982.271036	582.495547	9289.424668

3 优化与建议

整体连通度最高的生态空间结构是最优的,生态空间优化的本质是利用景观生态学原理调整土地利用类型以增强生态系统整体性和优化生态安全格局,最终提升生态空间的连通度。本文采用“生态核心-绿色空间廊道-关键节点”的方式优化宁波市域生态空间,使其复杂度增加、稳定性增强,最终达到提升生态空间连通度的目的。

3.1 确定生态核心

生态核心指的是研究区内具有较高的生态价值、对促进生态过程具有重要意义的区域,是促进市域生态系统良性循环和健康发展的关键,生态空间优化的第一步是识别生态核心。本文通过生态适宜性的分析,将高适宜性的地块确定为生态核心,并依据地块的大小分为两级生态核心:地块较大为一级生态核心;地块较小等为二级生态核心,并提出相应的保护优化策略(图 4)。

一级生态核心:23 个一级生态核心主要分布在山区和滨海沿岸,是维持区域内生态平衡的重要物质基础,是城市所依赖的生态系统。大型生态核心在净化空气、固碳释氧、涵养水源等生态服务功能方面,辐射范围广,影响尺度大,在区域内起着全局控制作用,应予以严格的控制和保护。

二级生态核心:64 个二级生态核心在市域范围内呈碎片状分布,主要涵盖了山体、森林公园、湿地及滨海

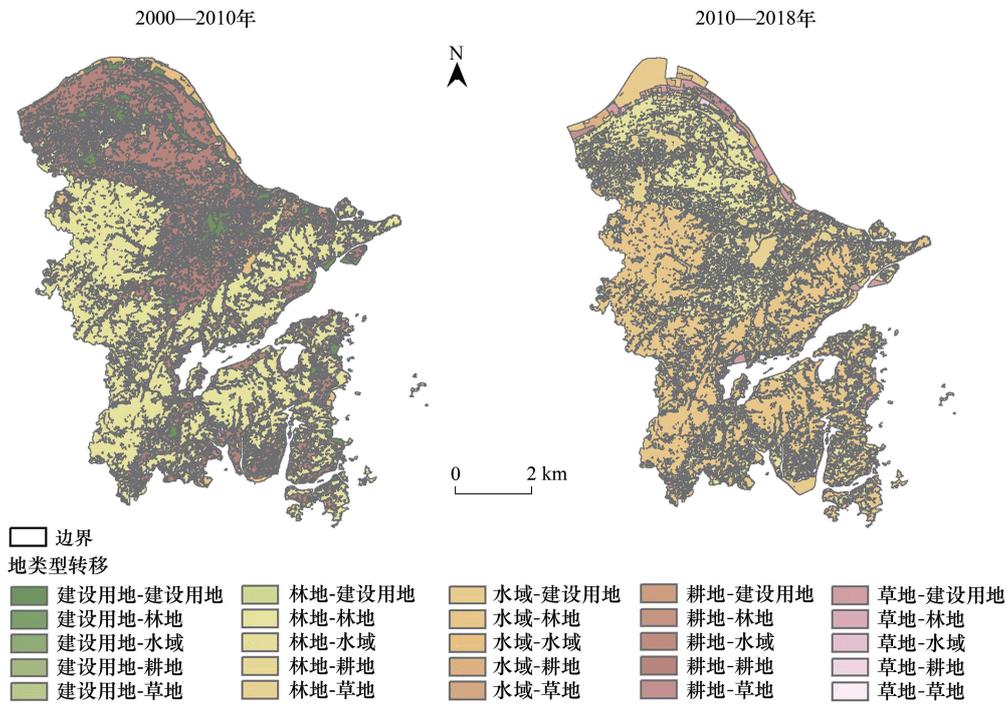


图1 不同年份用地类型转移图

Fig.1 Transfer chart of land use types in different years

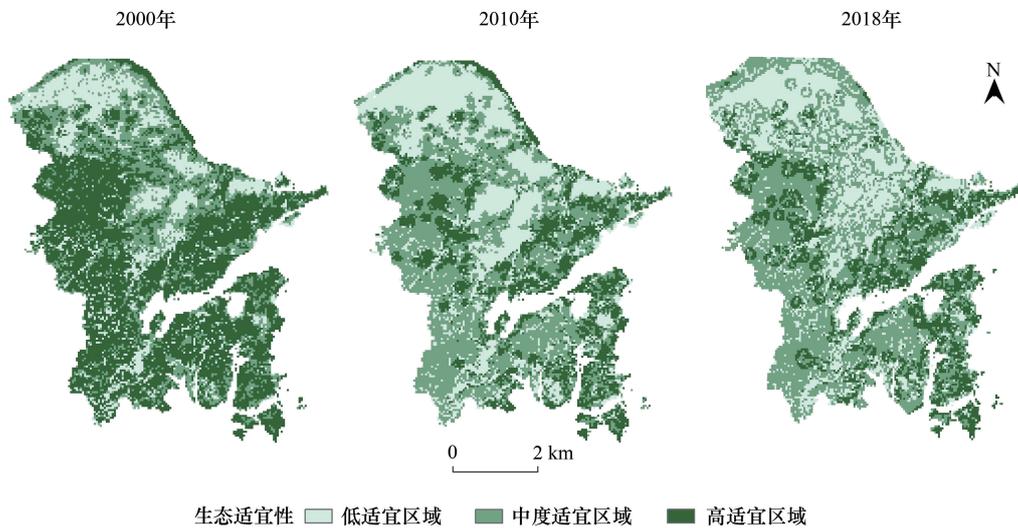


图2 不同年份宁波市域生态适宜性分析图

Fig.2 Analysis chart of Ecological suitability of Ningbo city in different years

沿岸,地块的范围较小,主要是对一级生态核心起补充作用,其生态调节能力有限,对外界的抗干扰能力较弱,在其范围内应施行严格的限制性开发并修复破损严重区域。

3.2 构建绿色空间廊道

绿色空间廊道是生态核心相互联系,进行物质和能量交流的直接通道,对增强生态核心的联系和改善市域生态空间意义重大^[29]。本文通过最小阻力模型,来识别绿色空间廊道,并依据连通作用的大小进行分类:连接两个一级生态核心的廊道为一级绿色空间廊道,其余的廊道为二级绿色空间廊道(图5)。

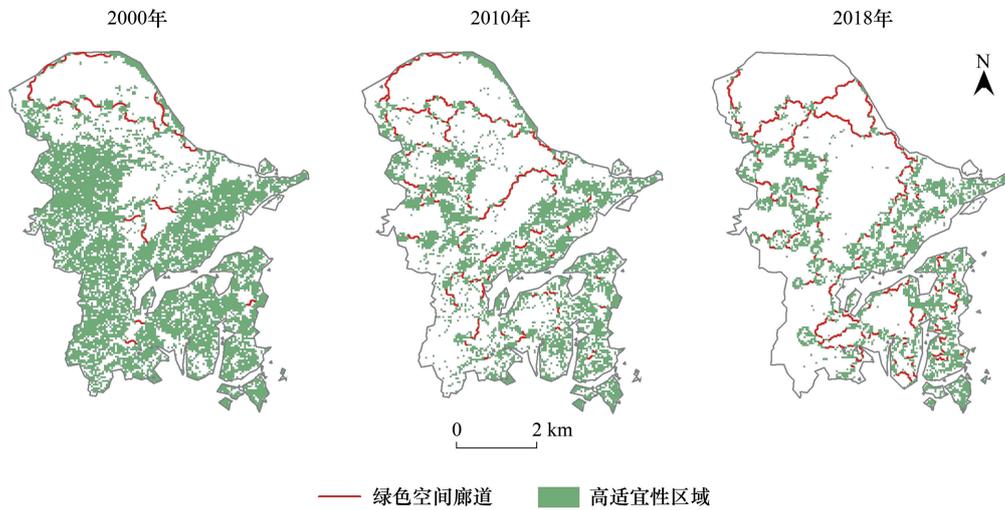


图3 不同年份宁波市域廊道分布图

Fig.3 Distribution of corridors in Ningbo City in different years

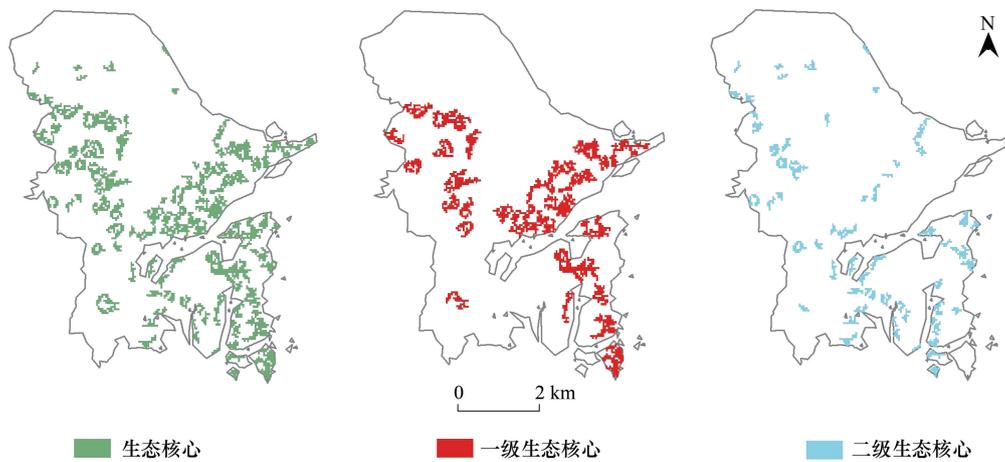


图4 2018年宁波市域生态核心分布图

Fig.4 Distribution of ecological core in Ningbo City in 2018

一级绿色空间廊道:24条一级绿色空间廊道主要串联起宁波市一级生态核心,并贯穿整个宁波市,对市域生态资源与要素流通,城市生态环境改善和市域连通度的提高具有重要意义。一级绿色空间廊道长度较长,两侧应保留一定宽度的生态防护绿地,并对破损区域进行生态修复,严禁将一级绿色空间廊道隔断或者划分为城市建设用地。

二级绿色空间廊道:49条二级绿色空间廊道主要分布在宁波市西部四明山区和东部滨海沿岸,廊道一般长度较短,主要作用是串联一定地域内的生态核心,使之相连成片,促进一定地域内物质、信息、能量的流通,是对一级廊道的补充,应重视二级生态廊道两侧景观的保护与规划建设。

3.3 筛选关键节点

关键节点是生态核心在相互联系过程中薄弱的环节^[30]。共识别出43个关键节点(图6),主要分布在四明山山区和东部山区,说明宁波城市化的快速推进对原有的生态环境造成了破坏,使连通性变得脆弱。在进行生态空间优化过程中,这些关键节点都需要进行重点建设和维护,应该配以大面积生态价值高的土地利用类型,禁止关键节点的农业耕作、渔业捕捞、旅游开发等生产和经营活动。

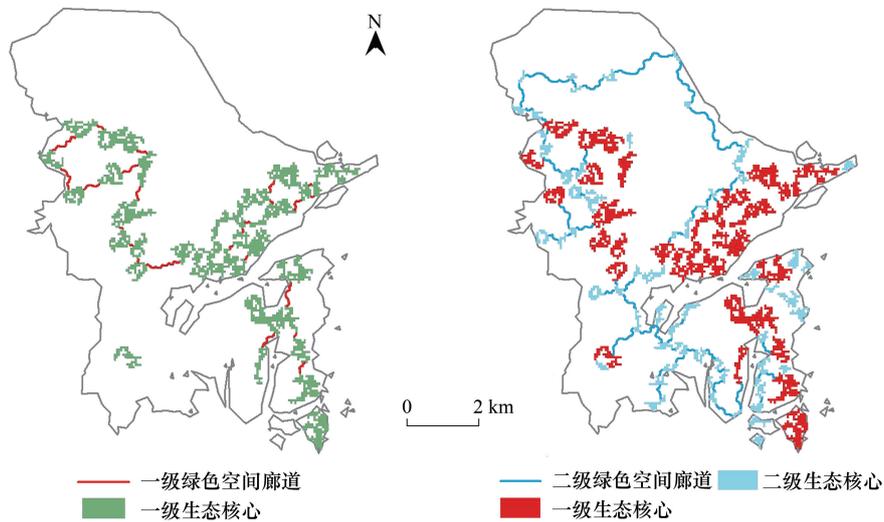


图5 2018年宁波市域多级绿色空间廊道分布图

Fig.5 Distribution of multi-level green space corridors in Ningbo City in 2018

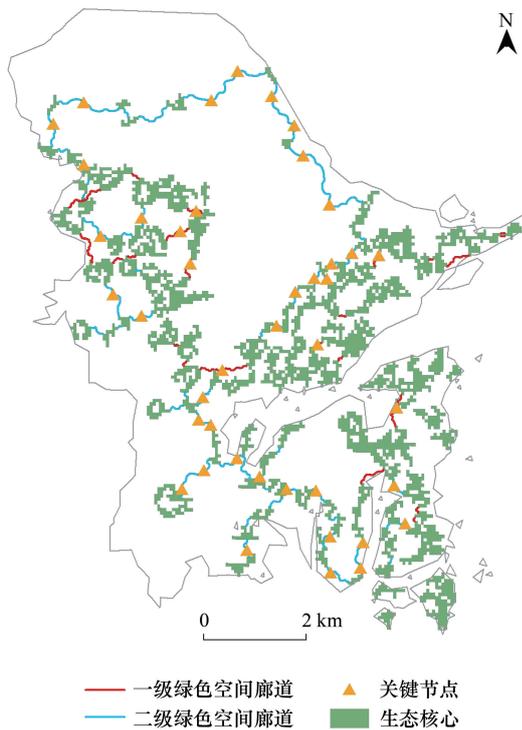


图6 2018年宁波市域关键节点分布图

Fig.6 Distribution of key nodes in Ningbo City in 2018



图7 2018年宁波市域生态空间结构图

Fig.7 Ecological spatial structure of Ningbo City in 2018

3.4 优化效果预测

通过核心-廊道-节点的优化模型(表6,图7)并结合近几年宁波生态空间变化演变趋势,对宁波市域生态空间优化效果进行预测。通过计算宁波市生态空间优化前后斑块面积、斑块密度、最大斑块指数、分离度指数(表7)^[31-32],发现优化前后宁波市域生态空间变化明显(图8)。

宁波市域生态空间面积由优化前 3383.83 km²增长到 6089.63 km²,共增长了 2705.75 km²。

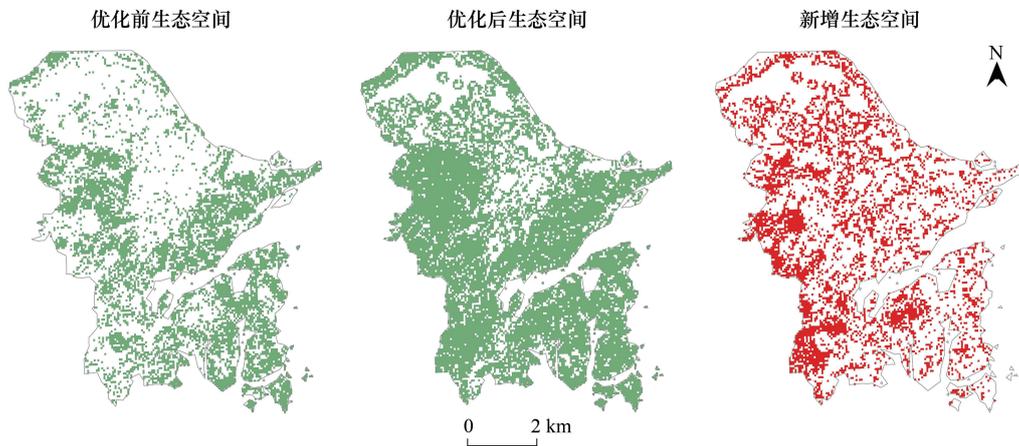


图8 宁波市域生态空间分布图

Fig.8 Ecological spatial distribution of Ningbo

生态空间面积增长主要是通过将大型生态地块周边的非生态用地转化为生态用地,其次是绿色空间廊道和关键节点的构建增加生态空间面积。最大斑块指数由原来的 33.7%增长至 85.6%,表明宁波市域生态空间连通度明显增强。生态地块间由于绿色空间廊道和关键节点的建设,将大部分生态地块连接起来,大大增强区域的生态连通度。综上所述,生态空间优化前后存在明显变化,调整后生态用地面积增长、生态地块的连接度显著提高、分离度和破碎度大大降低、整体连通性得到了明显改善,优化效果良好^[33-34]。

表6 一级绿色空间廊道分布

Table 6 Corridor distribution of grade I green space

序号 Numerical order	连接生态地块 Connected ecological block
1	四明山国家森林公园-青云瀑-天湖景区-亭下湖景区-周济潭景区-石井龙潭景区-宁海温泉公园-宁波天河生态风景区
2	杭州湾滨海湿地-栲栳山景区-雅戈尔达蓬山旅游度假区-天童森林公园
3	亭下湖风景区-周济潭景区-九龙潭景区-黄贤森林公园-福泉山风景区-天童森林公园-瑞岩寺森林公园
4	宁波天河生态风景区-野鹤湫旅游风景区-灵岩山风景区-森林公园、红岩风景区

表7 优化前后生态空间对比

Table 7 Comparison of ecological space before and after optimization

	斑块面积 Plaque area	斑块密度 Patch density	最大斑块指数 Largest patch index	分离度指数 Separation index
优化前 Before optimization	4320.8	0.854	33.7	6.534
优化后 Postoptimality	4496.4	0.276	85.6	1.873

4 讨论与结论

传统的市域生态空间规划对生态空间的演变过程 and 变化特征考虑不足,存在重静态蓝图,轻动态模拟等一系列问题,导致许多市域生态空间在实施规划后无法有效发挥最大的生态效益,其规划成果远不能达到规划愿景。当前,通过生态空间演变来研究市域生态空间已成为一种主流且可行的方式,但大多数研究仅限于分析演变的过程、结果以及驱动因子,没有深入研究演变的进程,探寻演变的规律,导致市域生态空间演变的分析结果与优化策略之间处于一种相互割裂的状态:生态空间演变分析的结果无法直接指导市域生态空间的优化,使演变分析的结果不具有实践的意义;而缺乏针对性和定量分析的空间优化策略往往无法达到预期的

效果,对生态环境产生负面的影响,甚至造成生态灾难。本文以宁波市市域生态空间为例,将生态空间演变作为研究出发点,分别从生态空间的安全格局、空间结构、用地类型变化 3 个不同的层面对宁波市域生态空间的演变进行定量分析,对结果进行优化。首先,笔者通过对 2000 年、2010 年、2018 年 3 个时期宁波市域生态适宜性分布、连通度强弱、地类转移的演变分析,得出在 2000 年到 2018 年期间,宁波市域生态空间的适宜性下降,生态功能弱化,绿色空间急剧减少,破碎度增加,连通功能减弱,生态趋于恶化。基于该分析结果,首先通过在安全格局层面上确定生态核心并进行分级保护,其次在空间结构层面上构建绿色空间廊道对生态核心进行连接,再次在地类转移层面上筛选关键点并重点保护,增强绿色空间廊道的连通度,最终重新构建起新的宁波市域生态空间体系并制定相应的优化策略。经优化后评价结果证明,经过优化后的宁波市域生态空间体系稳固并向良性、健康方向发展,可以发挥更好、更优的生态效益。由此可见,这种演变-响应-重构的方法,在宁波市域生态空间构建中效果显著,可以为未来的市域生态空间的构建和优化提供新思路和新指导方法。

本次研究的创新点在于:1) 笔者从空间演变的角度,通过生态空间的安全格局、空间特征、地类转移 3 个不同的层面对市域空间演变的特征和内涵进行了揭示;2) 提出了响应演变的优化策略,避免了以往研究中生态空间演变与生态空间优化相互割裂的状态;3) 通过定量分析,检验了市域生态空间的优化效果,为制定更为客观的优化路径提供支撑。

参考文献 (References):

- [1] 申佳可,王云才.景观生态网络规划:由空间结构优先转向生态系统服务提升的生态空间体系构建.风景园林,2020,27(10):37-42.
- [2] 殷嘉迪,董金玮,匡文慧,崔耀平,江东.20世纪90年代以来中国生态空间演化的时空格局和梯度效应.生态学报,2020,40(17):5904-5914.
- [3] 刘宇舒,王振宇,曲艺.生态系统服务测度下市域生态空间管控体系构建.中国园林,2019,35(8):77-82.
- [4] Geijzendorffer I R, Cohen-Shacham E, Cord A F, Cramer W, Guerra C, Martín-López B. Ecosystem services in global sustainability policies. *Environmental Science & Policy*, 2017, 74: 40-48.
- [5] 商振东.市域绿地系统规划研究[D].北京:北京林业大学,2006.
- [6] 张云路.基于绿色基础设施理论的平原村镇绿地系统规划研究[D].北京:北京林业大学,2013.
- [7] 彭建,吕丹娜,张甜,刘前媛,林坚.山水林田湖草生态保护修复的系统性认知.生态学报,2019,39(23):8755-8762.
- [8] 苏伟忠,马丽雅,陈爽,杨桂山.城市生态空间冲突分析与系统优化方法.自然资源学报,2020,35(3):601-613.
- [9] 林坚,陈诗弘,许超诣,王纯.空间规划的博弈分析.城市规划学刊,2015,(1):10-14.
- [10] 王云才,申佳可,彭震伟,象伟宁.适应城市增长的绿色基础设施生态系统服务优化.中国园林,2018,34(10):45-49.
- [11] 梁友嘉,刘丽珺.生态系统服务与景观格局集成研究综述.生态学报,2018,38(20):7159-7167.
- [12] 王军,钟莉娜.生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用.生态学报,2019,39(23):8702-8708.
- [13] 木皓可,张云路,马嘉,吴雪,李雄.从“其他绿地”到“区域绿地”:城市非建设用地的绿地规划转型与优化.中国园林,2019,35(9):42-47.
- [14] 殷柏慧.城乡一体化视野下的市域绿地系统规划.中国园林,2013,29(11):76-79.
- [15] 徐波,郭竹梅,贾俊.《城市绿地分类标准》修订中的基本思考.中国园林,2017,33(6):64-66.
- [16] 张云路,李雄.基于供给侧的城市绿地系统规划新思考.中国城市林业,2017,15(1):1-4.
- [17] 张云路,关海莉,李雄.从园林城市到生态园林城市的城市绿地系统规划响应.中国园林,2017,33(2):71-77.
- [18] Zhang L Q, Peng J, Liu Y X, Wu J S. Coupling ecosystem services supply and human ecological demand to identify landscape ecological security pattern: a case study in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Urban Ecosystems*, 2017, 20(3): 701-714.
- [19] 付战勇,马一丁,罗明,陆兆华.生态保护与修复理论和技术国外研究进展.生态学报,2019,39(23):9008-9021.
- [20] 刘颂,刘蕾.基于生态安全的区域生态空间弹性规划研究——以山东省滕州市为例.中国园林,2020,36(2):11-16.
- [21] 周海波,郭行方.国土空间规划体系下的绿地系统规划创新趋势.中国园林,2020,36(2):17-22.
- [22] 高吉喜,徐德琳,乔青,邹长新,王燕,田美荣,王玥.自然生态空间格局构建与规划理论研究.生态学报,2020,40(3):749-755.
- [23] 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.生态学报,2008,28(5):2270-2278.
- [24] 张丽,杨国范,刘吉平.1986—2012年抚顺市土地利用动态变化及热点分析.地理科学,2014,34(2):185-191.
- [25] 肖笃宁,赵羿,孙中伟,张国枢.沈阳西郊景观格局变化的研究.应用生态学报,1990,1(1):75-84.
- [26] 任慧君.区域生态安全格局评价与构建研究[D].北京:北京林业大学,2011.
- [27] 俞孔坚,乔青,李迪华,袁弘,王思思.基于景观安全格局分析的生态用地研究——以北京市东三乡为例.应用生态学报,2009,20(8):1932-1939.
- [28] 曾黎,杨庆媛,杨人豪,陈伊多.三峡库区生态屏障区景观格局优化——以重庆市江津区为例.生态学杂志,2017,36(5):1364-1373.
- [29] 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.
- [30] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [31] 陈利顶,傅伯杰,赵文武.“源”“汇”景观理论及其生态学意义.生态学报,2006,26(5):1444-1449.
- [32] Pascual-Hortal L, Saura S. Comparison and development of new graph-based landscape connectivity indices: towards the prioritization of habitat patches and corridors for conservation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(7): 959-967.
- [33] Vogt P, Riitters K H, Iwanowski M, Estreguil C, Kozak J, Soille P. Mapping landscape corridors. *Ecological Indicators*, 2007, 7(2): 481-488.
- [34] Saura S, Vogt P, Velázquez J, Hernando A, Tejera R. Key structural forest connectors can be identified by combining landscape spatial pattern and network analyses. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262(2): 150-160.