

◆海洋科学◆

海岸带城市蓝绿空间碳汇基础设施网络分析——以广西北部湾为例^{*}李 萱¹, 龚苑红¹, 覃盟琳^{2,3**}, 朱梓铭²

(1. 广西大学林学院, 广西南宁 530004; 2. 广西大学土木建筑工程学院, 广西南宁 530004; 3. 广西大学土木建筑工程学院人居环境设计研究中心, 广西南宁 530004)

摘要:为探讨蓝绿基础设施(Blue-Green Infrastructure, BGI)碳汇服务功能有益于指引城市碳中和目标建设, 本研究以广西北部湾海岸带城市为例, 运用形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)法、连通性分析法以及电路理论, 构建蓝绿基础设施碳汇网络, 讨论对应的固碳增汇对策。结果表明: 2020年研究区蓝绿空间碳汇总量为735 524.09 tC·a⁻¹, 其中绿色空间碳汇总量为588 680.06 tC·a⁻¹, 蓝色空间碳汇总量为146 844.03 tC·a⁻¹, 单位面积碳汇量“蓝”高于“绿”; 共提取63个碳汇源地斑块, 20个核心源地斑块, 绿色空间核心源地总面积为6 814.31 km², 蓝色空间为899.05 km², 核心源地主要分布在东西两侧及南部沿海地带; 共提取出24条生态廊道, 绿廊共长122.21 km, 蓝廊为52.75 km, 呈环状分布, 中南部地区分布较密, 连通性强。本研究结果可为“碳达峰与碳中和”(简称“双碳”)背景下海岸带城市的保护与可持续发展提供建设思路。

关键词:海岸带城市; 蓝绿空间; 碳汇基础设施; 广西北部湾; 形态学空间格局分析; 电路理论

中图分类号: TU986 文献标识码: A 文章编号: 1005-9164(2024)02-0213-11

DOI: 10.13656/j.cnki.gxkx.20240619.002

过度与不当的城市建设引发系列生态环境问题^[1], 在海岸带这一具有陆海双重空间的区域, 开发利用与生态保护的冲突愈发明显。海岸带是海陆交界的特殊地理单元, 也是陆海统筹综合管理实施的关键地带^[2]。在“加快建设海洋强国”的时代背景下, 海岸带的开发利用对实现陆海统筹有重要现实意义^[3]。

海岸带城市是处于海岸带地区的沿海城市, 包括海洋、海岸线及陆域3类空间^[4], 地理区位独特, 拥有着“蓝绿”两种空间, 资源优势显著。在海岸带城市语境下, “蓝绿空间”可定义为城市中各类水域、绿地、湿地等开敞空间所构成的空间系统^[5], 以及滨海海岸带与浅海水域, 包括国土空间中所有植被覆盖的人工及自

收稿日期: 2022-09-22

修回日期: 2022-11-16

* 国家自然科学基金项目(52268008, 51768001)资助。

【第一作者简介】

李 萱(1995—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事景观规划设计研究。

【**通信作者简介】

覃盟琳(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事低碳规划设计研究, E-mail: XDrenju@163.com。

【引用本文】

李萱, 龚苑红, 覃盟琳, 等. 海岸带城市蓝绿空间碳汇基础设施网络分析——以广西北部湾为例[J]. 广西科学, 2024, 31(2): 213-223.

LI X, GONG Y H, QIN M L, et al. Analysis of Carbon Sink Infrastructure Network for Blue-Green Space in Coastal Zone Cities: Take Beibu Gulf of Guangxi as an Example [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 213-223.

然开放的“绿色空间”和所有自然及人工水体构成的“蓝色空间”^[6,7]。尤其在“碳达峰与碳中和”(简称“双碳”)背景下,蓝绿空间的碳储量核算与碳汇潜力研究被提上日程,隋玉正等^[8]运用 InVEST 模型研究了胶州湾海岸带蓝碳储量时空变化特征,于洋等^[9]分析了城市绿地不同碳汇量估算系统的技术方法及应用。随着人们对城市良好生态环境诉求的不断提高,蓝绿空间中的基础设施服务与保障功能日益凸显,然而蓝绿基础设施(Blue-Green Infrastructure, BGI)建设未能及时与城市发展需求相匹配^[10],导致其生态服务功能大打折扣。目前相关研究多集中于蓝绿基础设施网络与格局变化分析,融合增汇视角对其关注较为缺乏,如何在碳中和愿景下科学构建稳定的蓝绿基础设施碳汇网络是本研究尝试解决的问题。

蓝绿空间的有序规划与“双碳”建设目标的相互融合,形成了碳汇基础设施这一新兴研究方向。覃盟琳等^[11]提出了碳汇用地的概念,土地利用方式的差异会对生态系统碳汇量产生重要影响,这为碳汇基础设施的选择提供了理论基础。碳汇基础设施可以定义为多重空间尺度下具有碳汇能力的 BGI。宏观层面上碳汇基础设施是指相互联系的可持续产生碳汇效益的生态网络系统,涵盖了国土空间下各种自然和半自然的蓝绿空间;微观层面上包括绿道、生态用地、城市水体等蓝绿空间和相关构筑系统(绿色屋顶、绿墙、生物滞留池、滨海植被等)组成的自然或半自然基础设施^[12],它们通过提供碳汇生态系统服务来提升生态系统的碳汇潜能和人类福祉,能填补传统绿色基础设施在碳汇服务功能上的空白。BGI 具有多功能性^[13],在海岸带城市发掘 BGI 碳汇效益,有助于优化 BGI 布局,提升城市气候韧性。张炜等^[14]利用多种

类型生态系统服务评估方法研究了武汉市 BGI 调节和支持服务价值;殷炳超等^[15]利用最小费用路径法结合网络闭合度评价构建了闽三角地区陆海一体化的生态网络;何侃等^[16]利用形态学空间格局分析(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)法、景观连通性评价和重力模型构建了基于空间优先级的福州市中心城区绿色基础设施网络,为碳汇生态网络架构提供了很好的思路。

2022年3月国务院关于《北部湾城市群建设“十四五”实施方案》的批复表明了国家对发展北部湾的决心。广西北部湾海岸带作为连接北部湾城市群三大主体城市都市圈的过渡带,对北部湾城市群发展有着极其重要的意义。本研究拟以广西北部湾海岸带城市为研究区,利用 MSPA 法、连通性分析法和电路理论,核算蓝绿空间碳汇量,提取源地,构建网络,最终得出蓝绿空间碳汇基础设施网络图,探讨“双碳”背景下蓝绿网络构建流程与蓝绿空间增汇策略,为国土空间海岸带规划提供思路。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

广西北部湾海岸带城市包含北海、钦州、防城港^[17]3个城市,是面向东盟开放的重要窗口以及西部陆海新通道的门户枢纽。地处北纬 20°53′—22°42′,东经 107°28′—109°52′,总面积 20 990.6 km²,是中国红树林的重要分布区,具有很高的碳储量^[18]和不可忽视的碳汇潜力^[19]。南亚热带海洋性季风气候明显,地势大体北高南低(图 1),雨水充沛,日照充足。地形以山地、丘陵和台地为主,植被类型丰富,具有良好的自然本底条件。

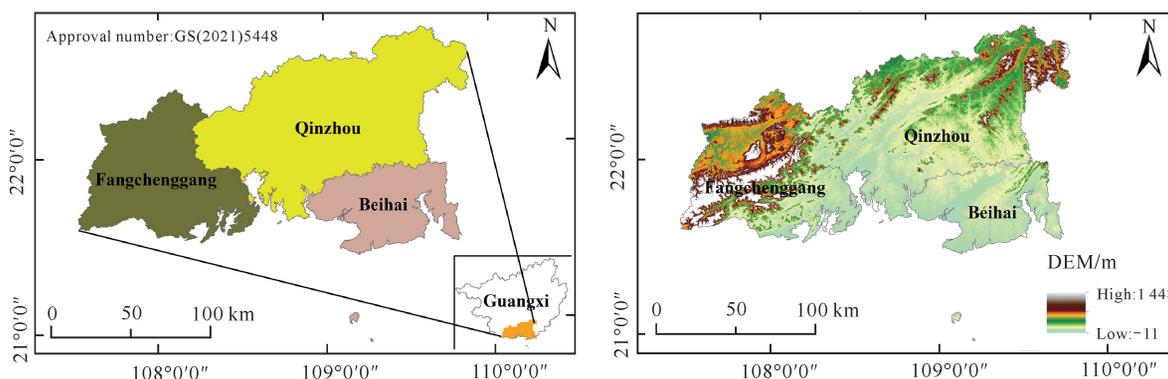


图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

本研究涉及的广西北部湾海岸带城市 2020 年土

地利用数据来源于全球地理信息公共产品平台 (<http://www.globallandcover.com/>),空间分辨率为

30 m, 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM) 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>), 具体的城镇用地、农村居民点数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。根据中国海岸带土地利用遥感分类系统^[20] 和研究需求, 结合研究区实际情况, 将数据导入 ArcGIS 10.8 软件进行覆被类型重分类, 得到栅格大小为 30 m × 30 m 的土地利用类型图, 并分为耕地、林地、草地、湿地、陆地水域、建设用地、裸地、浅海水域 8 类(图 2)。

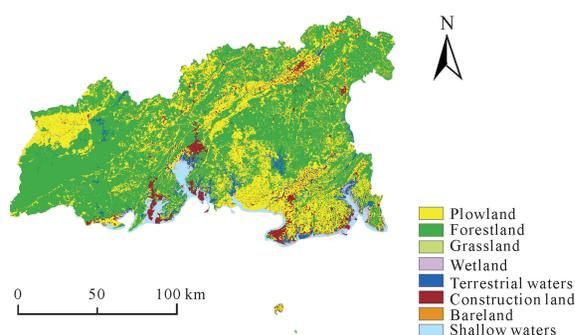


图 2 土地利用类型

Fig. 2 Land use type

1.3 方法

1.3.1 海岸带城市蓝绿空间碳汇核算

碳汇空间是具有碳汇能力的生态空间, 陆海碳汇空间主要包括森林碳汇空间、草地碳汇空间、湿地碳汇空间和海洋碳汇空间等。耕地空间无明显碳汇作用^[21], 在本研究中不进行核算。广西北部湾海岸带城市的碳汇空间为陆域的林地和草地等“绿色空间”, 以及湿地、红树林、陆地水域和浅海水域等“蓝色空间”, 其中红树林属于湿地碳汇空间, 故本文不作单独研究。关于林地、草地、水域等常见碳汇类型的研究较多, 对于碳汇的测算通常采用碳汇系数法^[22], 碳汇系数的计算公式如下:

$$a_i = c_i \times d, \quad (1)$$

式中, a_i 为第 i 种用地类型的碳汇系数 ($\text{tC} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), c_i 为第 i 种用地类型的碳吸收系数/固碳系数 ($\text{tCO}_2 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), d 为碳和二氧化碳的转换系数, 其值为二氧化碳分子量与碳分子量的比值 (44/12)。结合前人研究与广西北部湾海岸带城市群实际情况对碳汇系数进行调整。

根据表 1 对蓝绿碳汇空间的分类, 将草地、林地、湿地、陆地水域、浅海水域作为陆海碳汇的主要来源, 计算公式为

$$C_s = \sum S_i = \sum_{i=1}^n D_i \times a_i, \quad (2)$$

式中, C_s 表示总碳汇量 ($\text{tC} \cdot \text{a}^{-1}$), S_i 为第 i 种用地类型具有的碳汇量, D_i 为第 i 种用地类型的面积 (km^2)。

表 1 蓝绿碳汇空间分类与碳汇系数

Table 1 Blue-green carbon sink space classification and carbon sink coefficient

空间类型 Space type	用地类型 Land use type	碳汇系数/ ($\text{tC} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) Carbon sink coefficient/ ($\text{tC} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	来源文献 References
Green space	Forestland	47.82	[23]
	Grassland	6.83	[23]
Blue space	Wetland	235.62	[24]
	Terrestrial waters	51.37	[23]
	Shallow waters	119.04	[25]

1.3.2 蓝绿碳汇源地提取与评价方法

1.3.2.1 基于 MSPA 法的蓝绿空间格局分类

MSPA 法基于数学形态学原理将二值栅格图像识别并分割为 7 个互斥景观类型, 即核心、孤岛、穿孔、桥接、环道、边缘和支线^[16]。该方法可利用少量数据精准分辨出景观类型与结构, 从像元层面识别景观生态斑块, 被广泛应用于生态网络研究^[26,27]。首先, 基于研究区的土地利用现状图, 以提取“蓝色”的陆地水域、湿地、浅海水域及“绿色”的林地、草地等碳汇能力较强的自然要素“重分类”为前景, 耕地、建设用地、裸地“重分类”为背景, 并保存为 TIF 格式, 分别作出“绿色”和“蓝色”空间格局分类图。然后, 利用 Guidos Toolbox 3.0 软件, 采用八邻域规则, 边缘宽度设置为 2, 对数据进行 MSPA, 得到上述 7 个景观类型并对结果进行统计。

1.3.2.2 景观连通性评价与核心区选取

景观连通性是指景观促进或阻碍生态流的程度^[28], 斑块面积是维持生态多功能的重要载体。BGI 核心区的选择考虑斑块面积和连通性两方面, 结合研究区的 BGI 规模, 对面积较大的核心区斑块运用 Conefor 2.6 软件进行整体连通性指数 [IIC , 公式 (1)]、可能连通性指数 [PC , 公式 (2)]、斑块重要性指数 [dI , 公式 (3)] 的定量评价, 数值越大表示景观连通性越高, 从而选取研究区内的碳汇源地。碳汇源地是生态功能较好的核心区斑块, 是 BGI 网络的能量来源以及能量流动与物种扩散的节点。根据研究区尺度大小和斑块分布情况, 将连通距离阈值设置为 2 500 m, 连通概率为 0.5, 并根据评价结果对核心区

进行分级处理。

$$d_{IIC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{b_i \cdot b_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2}, \quad (3)$$

$$d_{PC} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_i \cdot b_j \cdot p_{ij}^*}{A_L^2}, \quad (4)$$

$$dI(\%) = \frac{I - I_r}{I} \times 100, \quad (5)$$

式中: n 表示景观斑块总数; b_i 和 b_j 分别代表斑块 i 和 j 的面积; nl_{ij} 是斑块 i 和 j 之间的连接数量; A_L 是景观总面积; p_{ij}^* 是斑块 i 和 j 之间扩散的最大概率; I 为某个景观连接度指数值(如 IIC 、 PC 等); I_r 是移除该景观要素后的指数值。

1.3.3 碳汇基础设施网络构建方法

蓝绿空间碳汇基础设施网络构建包括景观阻力面的建立和生态廊道的提取(图3)。景观阻力面的构建,反映了物种从源到目标运动过程中受到不同景观特征阻力的程度,即阻力越小,生态流越易进行;阻力越大,生态流越不易进行^[29]。本研究参考前人研究成果^[30,31],选用 MSPA 景观类型、土地利用类型、高程和坡度作为阻力面,结合相关研究^[16,31]和专家意见确定各阻力面值,并根据不同碳汇空间碳元素流通的差异,采用层次分析法计算各阻力面权重系数(表2)。利用 ArcGIS 10.8 软件对各阻力因子加权求和,基于最小累计阻力模型构建研究区生态综合阻力面。

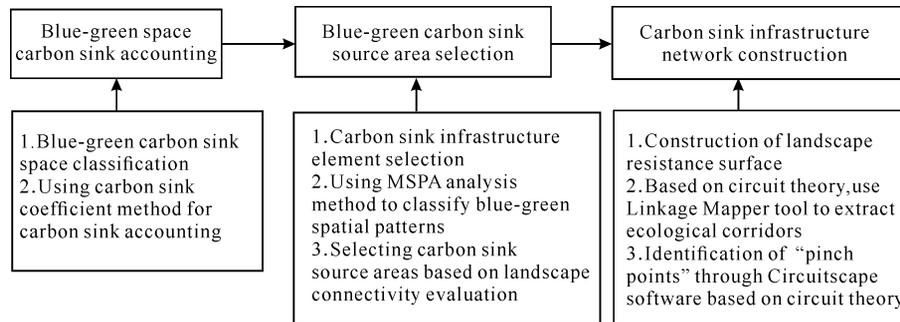


图3 蓝绿空间碳汇基础设施网络构建流程

Fig. 3 Blue-green space carbon sink infrastructure network construction process

表2 阻力面赋值及权重

Table 2 Resistance surface assignment and weight

阻力因子 Resistance factor	类型 Type	阻力值 Resistance value	权重 Weight
MSPA landscape type	Core	5	0.52
	Bridge	10	
	Loop	20	
	Branch	30	
	Islet	50	
	Edge	60	
	Perforation	70	
	Background	100	
Land use type	Forestland	1	0.26
	Grassland	20	
	Plowland	30	
	Bare land	50	

续表

Continued table

阻力因子 Resistance factor	类型 Type	阻力值 Resistance value	权重 Weight
Elevation	Terrestrial waters, wetland, shallow waters	70	0.10
	Construction land	100	
	<100 m	1	
Slope	[100, 246) m	20	0.12
	[246, 428) m	60	
	[428, 689] m	80	
	>689 m	100	
	<3°	1	
	[3°, 8°)	20	
[8°, 15°)	60		
[15°, 24°]	80		
>24°	100		

生态廊道的构建对景观格局连通性具有重要作用,它是生态源地间最容易联系的低阻力生态通道^[32]。电路理论利用电子在电路中随机游走的特性来模拟物种个体或种群在景观中的迁移扩散过程^[33],其中,视物种个体为电子,将景观阻力面看作电阻面,将生境质量较好的生态斑块作为节点。在栅格数据中,电流密度被定义为通过单个像元的电流大小^[34],源地间的电流强度可以反映生态斑块和廊道的相对重要性,电流密度较高的区域是廊道中的“夹点”地区,景观“夹点”对维持整个网络的连接性极其重要,需要重点保护。本研究基于电路理论,通过Circuitscape 4.0软件及Linkage Mapper 3.0工具提取研究区蓝绿空间核心源地之间的生态廊道,并识别碳汇基础设施网络中的“夹点”地带。具体步骤如下:

①在ArcGIS 10.8软件平台上,利用Linkage Mapper 3.0工具结合研究区生态源地及阻力面进行最小成本路径(Least-Cost Paths, LCP)模拟,从而提取生态廊道。LCP是物种迁移的最优路径^[35],其成本加权距离与路径长度的比值可以反映生态源地之间的连通性^[36],比值越大表明该路径移动的相对阻力越大,连通性越低。

②在此基础上,基于Circuitscape 4.0软件,利用

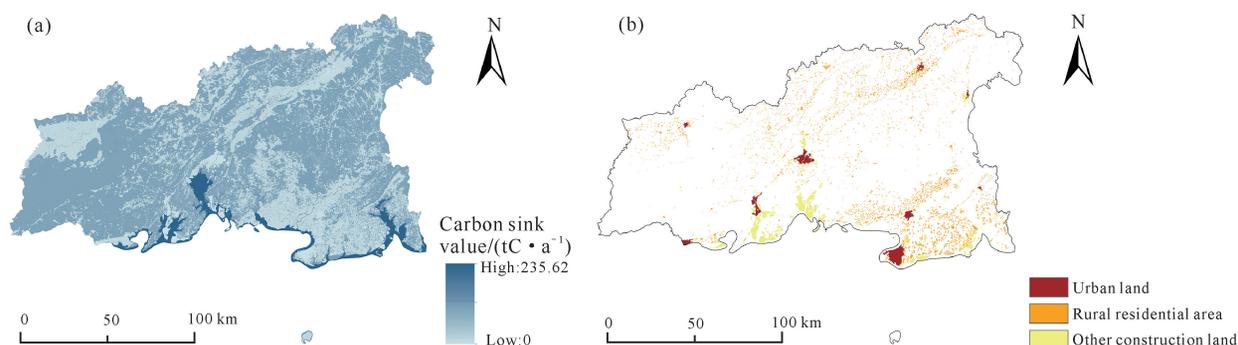


图4 碳汇量核算结果(a)及要素示意图(b)

Fig. 4 Carbon sink accounting results (a) and schematic diagram of elements (b)

表3 蓝绿空间碳汇量

Table 3 Blue-green space carbon sinks

空间类型 Space type	用地类型 Land use type	面积/km ² Area/km ²	碳汇量/(tC·a ⁻¹) Carbon sinks/ (tC·a ⁻¹)
Green space	Forestland	12 304.59	588 405.49
	Grassland	40.20	274.57
	Total	12 344.79	588 680.06
Blue space	Terrestrial waters	602.17	30 933.47
	Wetland	162.06	38 184.58
	Shallow waters	652.94	77 725.98
	Total	1 417.17	146 844.03
Blue-green space	Total	13 761.96	735 524.09

Pinchpoint Mapper工具多对一模式对“夹点”区域进行识别,所有电流(物种)必须通过的节点即为“夹点”。

2 结果与分析

2.1 蓝绿空间碳汇量

由图4与表3可知,2020年研究区蓝绿空间碳汇总量为735 524.09 tC·a⁻¹,其中,“绿色空间”碳汇总量为588 680.06 tC·a⁻¹,林地碳汇能力远远高于草地;“蓝色空间”碳汇总量为146 844.03 tC·a⁻¹,浅海水域碳汇量最高。“蓝色空间”的单位面积碳汇值比“绿色空间”的值要高,单位面积碳汇高值区域主要集中在沿海地带,说明“蓝碳”碳汇潜力巨大。在长时间尺度内,海岸带蓝碳的固碳潜力和碳汇规模具有无限性^[37]。“绿色空间”内单位面积高值区分布于各大山区,低值区分布于城镇建设用地、农村居民点用地及其边缘地带,该区域人类活动剧烈、频繁,具有高碳汇效应的植被等易受干扰,难以维持。从空间布局上来看,均匀、较大的碳汇斑块分布于东西两侧,多集中在防城港与钦州,而北海由于“绿色空间”面积较小且破碎度高,碳汇效益主要依靠沿海带状碳汇斑块。

2.2 蓝绿空间碳汇源地提取与分析

2.2.1 基于MSPA法的蓝绿基础设施格局分析

如图5与表4所示,研究区域内蓝绿空间核心区总面积为10 776.71 km²,占前景总面积的78.31%,景观类型主要以林地和水域为主。从空间分布上来看,完整的斑块主要聚集于西侧,包括十万大山国家森林公园和八寨沟旅游风景区,自然资源丰富,是海岸带城市群内的重要生态保护区;其余较大核心区斑块分布于东部、北部以及沿海地段,能够作为有效储存能源和生物所必需营养物质的碳汇生境,而北海中

部缺乏较大的生境斑块,空间连通性较差,不利于生境中物种迁移与扩散;边缘区的面积仅次于核心区,占前景总面积比例为9.87%,可较大程度降低外界因素对核心区的干扰,有助于维持区域内物种丰富度,并产生良好的边缘效应;桥接区、环道和支线作为具有连接作用的景观类型,占前景总面积比例分别为3.91%、1.53%、2.87%,说明研究区内存在较多的潜在结构性廊道,有利于核心斑块之间的物质与能量交流;穿孔占前景总面积比例为2.92%,表明核心区内部受人为或自然侵害较严重,具有一定的空间破碎度;孤岛作为彼此孤立且连通性较低的小型自然斑块占比最小,空间分布分散但大多处于桥接区的包围中,可发挥核心之间的小型生态踏脚石作用。

整体而言,研究区内 BGI 斑块主要集中于东西两侧,总体空间分布失衡,南北向分布零散,使得南北

连通性较东西差。防城港 BGI 质量明显最佳,钦州次之,北海现状 BGI 斑块最为缺乏。

2.2.2 景观连通性评价与核心区提取结果分析

BGI 碳汇源地是碳汇基础设施网络构建的核心部分,在景观水平上,生境斑块面积越大,区域物种多样性越丰富,生态系统越稳定。绿色空间选取面积大于 15 km^2 的核心区共计 36 个,蓝色空间选取面积大于 1 km^2 的核心区共计 27 个,根据评价结果使用手动分级法,将 d_{PC} 值排序前 10 的斑块作为 BGI 的重要核心源地,即一级网络中心(表 5)。以此为基准生态框架,进而建立各源地之间的必要空间联系,提取潜在 BGI 网络。将其余斑块作为二级网络中心,建立维持区域整体生态格局的支撑体系,以此保障碳汇基础设施的覆盖度和完整性。

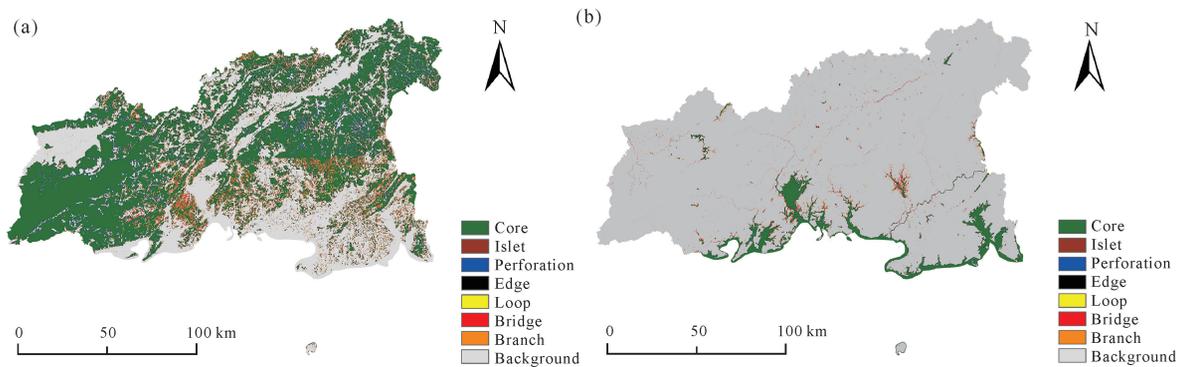


图 5 绿色空间 MSPA 景观类型(a)和蓝色空间 MSPA 景观类型(b)

Fig. 5 Green space MSPA landscape types (a) and blue space MSPA landscape types (b)

表 4 蓝绿空间 MSPA 景观类型面积统计

Table 4 Statistics of blue-green space MSPA landscape type area

MSPA 景观类型 MSPA landscape type	面积/ km^2 Area/ km^2	占前景总面积的比例/% Percentage of prospect area/%	占研究区 面积的比例/% Percentage of the study area/%
Core	10 776.71	78.31	51.32
Islet	81.69	0.59	0.39
Perforation	402.34	2.92	1.92
Bridge	538.81	3.91	2.56
Loop	210.12	1.53	1.00
Edge	1 357.78	9.87	6.46
Branch	394.51	2.87	1.88

表 5 蓝绿空间核心源地连通性指数排序

Table 5 Core sources connectivity index ranking of blue-green space

序号 No.	绿色空间 Green space		蓝色空间 Blue space	
	Patch number	d_{PC}	Patch number	d_{PC}
1	34	74.80	25	56.50
2	25	21.23	17	34.66
3	18	13.16	23	28.81
4	15	11.71	22	3.74
5	14	7.82	16	1.27
6	13	7.55	14	1.18
7	16	4.99	18	0.58
8	31	3.56	19	0.56
9	23	1.79	24	0.41
10	6	1.73	13	0.28

由景观连通性指数法遴选出斑块连接度最高的蓝绿空间核心源地主要分布在研究区东西两侧。绿色空间核心源地总面积为 6 814.31 km²,最大斑块面积为 3 669.91 km²,最小斑块面积为 61.69 km²;蓝色空间核心源地总面积为 899.05 km²,最大斑块面积为 460.12 km²,最小斑块面积为 1.43 km²。由图 6 可看出,研究区西部的大面积网络中心、东部点状斑块组团以及南部狭长沿海地段斑块的重要值远高于其他区域,为物种提供了良好的栖息源地,但它们的边缘和穿孔区域易受人类活动影响,需要生态资源整合发展。由于研究区内生态源地分布不均,不同源地之间的 d_{PC} 值差异较大,因此,需要增加生态廊道连接,加强生态源地间的相互联系,降低景观破碎化和增加景观连通性。

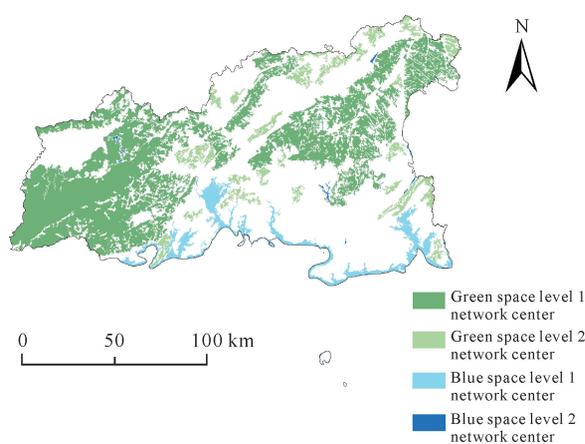


图 6 各等级 BGI 网络中心的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of BGI network center at various levels

2.3 碳汇基础设施网络构建结果

由图 7(a)可知,蓝绿空间核心源地之间共生成

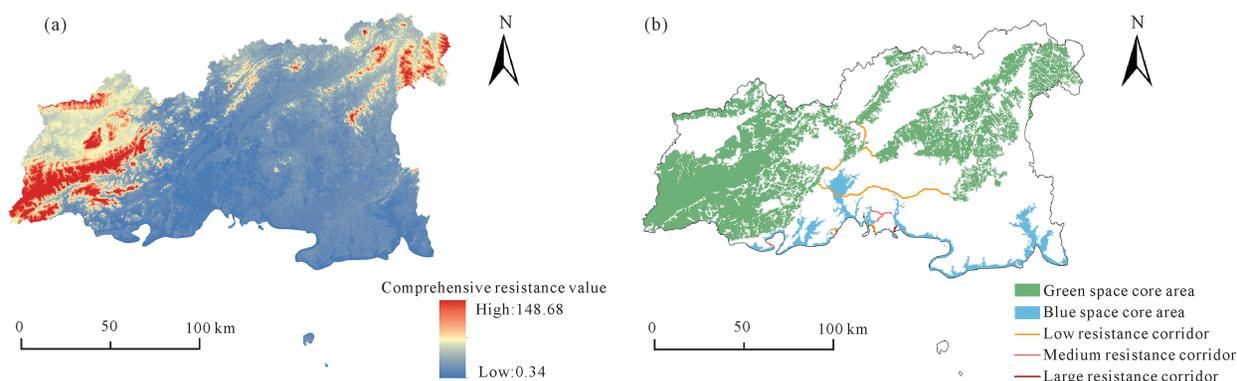


图 7 综合阻力面(a)和不同阻力等级廊道分布图(b)

Fig. 7 Comprehensive resistance surface (a) and distribution of corridors with different resistance levels (b)

24 条最小成本路径,其中,绿色空间与蓝色空间各识别出 12 条。绿色空间最小成本路径共长 122.21 km,平均长度为 10.18 km,最长路径长度为 86.17 km,最短为 0.3 km,长度小于 10 km 的路径占总路径的 75%;蓝色空间最小成本路径共长 52.75 km,平均长度为 4.4 km,最长路径长度为 12.89 km,最短为 0.3 km,长度小于 4 km 的路径占总路径的 66.67%,由此可见,研究区内蓝绿空间最小成本路径整体破碎度较高。由图 7(b)可知,研究区最优廊道的空间分布差异明显:中南部斑块间廊道分布较为集中,网络联系强;北海由于生态源地缺乏,廊道连接盲区范围过大;廊道的走势为环状分布,将核心源地连接成不同组团。

根据前人研究,将各廊道成本加权距离与路径长度的比值按自然断点法分为阻力较小、阻力中等、阻力较大 3 个等级^[38]。绿色空间内最大比值是 19.36,最小比值是 2.04,其中较大阻力廊道有 2 条,分布于距离相对较远且阻力值高的源地间;中等阻力廊道 3 条,分布于钦州界内距离近且密集的耕地斑块间;较小阻力廊道 7 条,分布于距离城市建设用地不远且斑块破碎度较高的生态源地间。蓝色空间内最大比值是 4.29,最小比值是 1.49,其中较大阻力廊道有 3 条,分布于受人类活动影响较大的斑块间;中等阻力廊道 5 条,主要分布于林地与耕地交错的地势平坦地带;较小阻力廊道 4 条,分布于距离较近且与陆地水域联系紧密的临海地带。

在多对一模式中,每次仅选择1个节点接地,其他节点输入1 A 电流,然后进行迭代运算,生成电流累积图。如图 8(a)所示,绿色空间最高电流累积值为 0.25 A,蓝色空间则为 0.21 A。根据自然断点法将电流累积值分类,绿色空间取电流值 0.05—0.25 A 的区域为夹点,蓝色空间则取电流值 0.09—0.21 A 的区域为夹点,可以看出研究区核心源地间普遍存在夹点,发挥着维持整体连通性的重要作用。蓝绿空间内的夹点主要分布在防城港南部港湾地带、钦州西部和南部以及北海西北部,现状用地以林地和水域为

主。夹点区域对应的 MSPA 要素类型大多为核心,其次为桥接和分支等。

结合以上分析,研究区蓝绿空间碳汇基础设施网络包括碳汇源地与生态廊道两个部分。根据 MSPA 法识别出蓝绿空间碳汇源地,通过景观连通性评价将碳汇源地分为两个等级,再基于电路理论提取生态廊道,将较小阻力廊道作为重要廊道,其余廊道为一般廊道,从而实现蓝绿空间“一张图”,构建出广西北部湾海岸带城市群蓝绿空间碳汇基础设施网络[图 8(b)]。

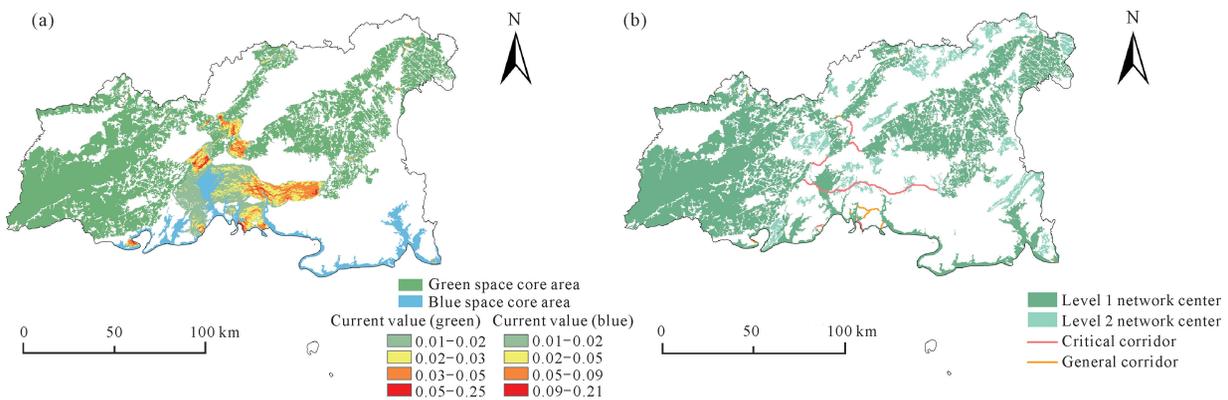


图 8 多对一模式模拟结果(a)和研究区蓝绿空间碳汇基础设施网络构建(b)

Fig. 8 Simulation result of all-to-one mode (a) and construction of blue-green space carbon sink infrastructure network in the study area (b)

3 讨论

广西北部湾海岸带城市有较坚实的生境质量基础,其蓝绿空间碳汇潜力巨大。本研究旨在构建稳定的 BGI 碳汇空间结构,整合现有蓝绿资源,让自然做功,保持生态底色,引导城市低碳良性发展,助力“双碳”目标实现。碳汇基础设施网络是防止生境破碎化以及提升 BGI 碳汇服务价值的蓝绿网络系统,对增加城市生态韧性、实现“蓝”“绿”生态效应耦合有着重要意义。广西北部湾海岸带城市碳汇基础设施要重视碳汇源地和生态廊道的建设。

①蓝绿空间分区保护,碳汇源地分级管控。广西北部湾海岸带 3 个城市蓝绿空间分布不均衡,应采取差异化管理策略^[39],结合碳汇潜力以及区域生态环境结构特征对蓝绿空间格局进行分区保护与优化。一级碳汇核心源地包括各类自然保护区、沿海生态防护区、重要河湖湿地、风景名胜区分等,应依托城市群重要山体构筑生态屏障,将其打造为生态绿心进行重点保护^[40],近海地区可采取净化红树林、修正防护林、人工修复近海水质等措施,保证浅海水域以及所影响

的近海生态系统的足量碳汇功能;二级源地因地制宜进行弹性维护,可以通过增植林带和置换农林用地,以此提升碳汇量与维护碳汇空间稳定。

②蓝绿廊道形成“天然绿环”,实行分级建设与保护。重要绿色廊道应着重考虑修复植被群落、强化绿道建设,加强生态系统稳定性;而蓝色廊道应加强对水域水质的净化与监管,通过人类正向活动调节蓝色空间碳汇效益。其余廊道先修复再建设,以此增加局部破碎景观连通性,促进蓝绿融合。

③根据不同策略保护“夹点”,建设“节点”。“夹点”作为重要碳汇生境节点,需要针对不同类型重点保护。绿色“夹点”可通过退耕还林、建设碳汇示范林等措施进行生态保护与保育,蓝色“夹点”应基于流域尺度进行养护,建立河流缓冲带与流域资源监测工作站等科学引导水域“近自然化”。部分区域存在基质阻力过大、连接廊道过长等问题,可建设踏脚石节点增强碳汇网络稳定性。

本研究选用的 MSPA 法对景观研究尺度以及边缘宽度设置较为敏感^[31]。边缘宽度的变化对分析结果的影响更大^[41],但不会改变网络格局。经过不同

边缘宽度下的 MSPA 识别结果对比分析发现,边缘宽度设置为 2,景观类型识别更为合理。在廊道提取过程中,电路理论将物种扩散运动看作电子随机游走,通过累积电流值进行量化反映,能有效识别最优路径与对景观连接性有重要影响的“夹点”地区,且“夹点”的位置不受廊道宽度影响^[34]。由于不同物种对廊道宽度敏感度不同^[42],本研究未指定廊道宽度,后续研究应考虑物种扩散行为、植被构成情况等多方面因素,从而对廊道宽度提出划定方法和依据。

4 结论

本研究以广西北部湾海岸带城市为研究区,通过核算其蓝绿空间碳汇量,提取碳汇基础设施要素,再运用 MSPA 法、连通性分析法以及电路理论,构建碳汇基础设施网络。研究结论如下:

① 2020 年研究区蓝绿空间碳汇总量为 735 524.09 tC · a⁻¹,其中,“绿色空间”为 588 680.06 tC · a⁻¹,林地碳汇能力远高于草地;“蓝色空间”为 146 844.03 tC · a⁻¹,浅海水域碳汇量最高。单位面积碳汇量“蓝”高于“绿”。

② 共提取 63 个碳汇源地斑块,20 个核心源地斑块,绿色空间核心源地总面积为 6 814.31 km²,蓝色空间则为 899.05 km²,核心源地主要分布在东西两侧及南部沿海地带。总体空间分布失衡,南北向连通性较差。

③ 共提取出 24 条生态廊道,绿廊共长 122.21 km,蓝廊则为 52.75 km,呈环状分布,将核心源地连接成不同组团,中南部地区分布较密,连通性强。夹点主要分布在防城港南部港湾地带、钦州西部和南部以及北海西北部,现状用地以林地和水域为主,需要重点保护。

参考文献

- [1] 刘文良,李伟,郝连成.钦州市城市扩张的生态响应[J].广西科学,2020,27(6):667-675.
- [2] 陈梦缘,袁秀,王德,等.面向多目标的海岸带生态空间规划路径及案例[J].城乡规划,2021(4):46-53.
- [3] 林小如,吕一平,洪世键,等.海岸带陆海耦合协调度测评及其优化策略研究:以厦门市海岸带为例[J].城市规划,2022,46(3):54-62.
- [4] 易斌,盛鸣.深圳市深汕特别合作区海岸带海陆统筹管制探索[J].规划师,2020,36(18):29-33.
- [5] 黄铎,易芳蓉,汪思哲,等.国土空间规划中蓝绿空间模式与指标体系研究[J].城市规划,2022,46(1):18-31.
- [6] 许浩,金婷,刘伟,苏锡常都市圈蓝绿空间规模与格局演变特征[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):219-226.
- [7] 王世福,刘联璧.从廊道到全域:绿色城市设计引领下的城乡蓝绿空间网络构建[J].风景园林,2021,28(8):45-50.
- [8] 隋玉正,陈小璇,李淑娟,等.海岸带蓝碳时空演变及其服务价值评估:以胶州湾为例[J].资源科学,2019,41(11):2119-2130.
- [9] 于洋,王昕歌.面向生态系统服务功能的城市绿地碳汇量估算研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2021,53(1):95-102.
- [10] XIAO Y, WANG Z, LI Z G, et al. An assessment of urban park access in Shanghai: implications for the social equity in urban China [J]. Landscape and Urban Planning, 2017, 157(1): 383-393.
- [11] 覃盟琳,赵静,黎航,等.城市边缘区碳源碳汇用地空间扩张模式研究[J].广西大学学报(自然科学版),2014,39(4):941-947.
- [12] 蒋理,刘颂,刘超,等.蓝绿基础设施对城市气候韧性构建的作用:基于共引文献网络的文献计量分析[J].景观设计学(中英文),2021,9(6):8-23.
- [13] LIAO K H, DENG S, TAN P Y. Blue-green infrastructure: new frontier for sustainable urban stormwater management [M]//TAN P Y, JIM C Y. Greening Cities: Forms and Functions. [S. l.]: Springer Nature, 2017: 203-226.
- [14] 张炜,刘晓明.武汉市蓝绿基础设施调节和支持服务价值评估研究[J].中国园林,2019,35(10):51-56.
- [15] 殷炳超,何书言,李艺,等.基于陆海统筹的海岸带城市群生态网络构建方法及应用研究[J].生态学报,2018,38(12):4373-4382.
- [16] 何侃,林涛,吴建芳,等.基于空间优先级的福州市中心城区绿色基础设施网络构建[J].应用生态学报,2021,32(4):1424-1432.
- [17] 毛蒋兴,覃晶,陈春炳,等.广西北部湾海岸带开发利用与生态格局构建[J].规划师,2019,35(7):33-40.
- [18] 徐慧鹏,刘涛,张建兵.红树林碳埋藏过程对海平面上升、气候变化和人类活动的响应[J].广西科学,2020,27(1):84-90.
- [19] 戴子熠,廖丽蓉,梁嘉慧,等.1988—2018年广西北海红树林蓝碳储量变化分析[J].海洋环境科学,2022,41(1):8-15,23.
- [20] 侯西勇,邸向红,侯婉,等.中国海岸带土地利用遥感制图及精度评价[J].地球信息科学学报,2018,20(10):1478-1488.
- [21] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981~2000年中国陆地植

- 被碳汇的估算[J]. 中国科学(D辑:地球科学), 2007(6):804-812.
- [22] 陈可欣,陶韦华,方晓丽,等. 国土空间规划中碳中和评估及规划应用路径研究[J]. 规划师, 2022, 38(5): 134-141.
- [23] 张赫,彭千芮,王睿,等. 中国县域碳汇时空格局及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(24): 8988-8998.
- [24] 康文星,赵仲辉,田大伦,等. 广州市红树林和滩涂湿地生态系统与大气二氧化碳交换[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2605-2610.
- [25] 段晓男,王效科,逯非,等. 中国湿地生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 463-469.
- [26] 陈竹安,况达,危小建,等. 基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1199-1207.
- [27] 张守法,李翹,赵凯茜. 基于生态网络构建的贵阳市绿地景观格局优化研究[J]. 中国园林, 2022, 38(5): 68-73.
- [28] 陈静,左翔,彭建松,等. 基于 MSPA 与景观连通性分析的城市生态网络构建:以保山市隆阳区为例[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 118-123, 141.
- [29] 李怡欣,李菁,陈辉,等. 基于 MSPA 和 MCR 模型的贵阳市 2008—2017 年景观连通性评价与时空特征[J]. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1240-1248.
- [30] 徐伟振,黄思颖,耿建伟,等. 基于 MCR 和重力模型下的厦门市生态空间网络构建[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 264-272.
- [31] 黄河,余坤勇,高雅玲,等. 基于 MSPA 的福州绿色基础设施网络构建[J]. 中国园林, 2019, 35(11): 70-75.
- [32] 周浪,李明慧,周启刚,等. 基于电路理论的特大山地城市生态安全格局构建:以重庆市都市区为例[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 319-325, 334.
- [33] FAN F F, LIU Y X, CHEN J X, et al. Scenario-based ecological security patterns to indicate landscape sustainability: a case study on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Landscape Ecology, 2021, 36(9): 2175-2188.
- [34] MCRAE B H, DICKSON B G, KEITT T H, et al. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation [J]. Ecology, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [35] 宋利利,秦明周. 整合电路理论的生态廊道及其重要性识别[J]. 应用生态学报, 2016, 27(10): 3344-3352.
- [36] 李涛,巩雅博,戈健宅,等. 基于电路理论的城市景观生态安全格局构建:以湖南省衡阳市为例[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2555-2564.
- [37] 邢庆会,于彩芬,廖国祥,等. 浅析我国海岸带蓝碳应对气候变化的发展研究[J]. 海洋环境科学, 2022, 41(1): 1-7.
- [38] 潘竟虎,王云. 基于 CVOR 和电路理论的讨赖河流域生态安全评价及生态格局优化[J]. 生态学报, 2021, 41(7): 2582-2595.
- [39] 叶林,邢忠,颜文涛. 城市边缘区绿色空间精明规划研究:核心议题、概念框架和策略探讨[J]. 城市规划学刊, 2017(1): 30-38.
- [40] 覃盟琳,黎小元,袁倩文,等. 北部湾城市群(广西)低碳空间结构评价与优化策略[J]. 规划师, 2019, 35(13): 82-86.
- [41] 于亚平,尹海伟,孔繁花,等. 南京市绿色基础设施网络格局与连通性分析的尺度效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2119-2127.
- [42] 黄河,平潇菡,高雅玲,等. 基于 MSPA 与电路理论的城市绿色基础设施网络构建与优化研究:以福州市为例[C]//孟兆祯,陈重. 中国风景园林学会 2020 年会论文集(上册). 北京:中国建筑工业出版社, 2021: 660-667.

Analysis of Carbon Sink Infrastructure Network for Blue-Green Space in Coastal Zone Cities: Take Beibu Gulf of Guangxi as an Example

LI Xuan¹, GONG Yuanhong¹, QIN Menglin^{2,3**}, ZHU Ziming²

(1. College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 3. Habitat Design Research Center, College of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning,

Guangxi, 530004, China)

Abstract: Exploring the function of carbon sink services for Blue-Green Infrastructure (BGI) is beneficial to guide the construction of urban carbon neutrality targets. Taking cities in the coastal zone of Guangxi Beibu Gulf as examples, by using Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA), connectivity analysis and circuit theory, a BGI carbon sink network is constructed, and the corresponding carbon sequestration countermeasures are discussed. The results show that the total amount of carbon sinks in the blue-green space of the study area in 2020 was $735\,524.09\text{ tC} \cdot \text{a}^{-1}$, of which the total amount of carbon sinks in the green space was $588\,680.06\text{ tC} \cdot \text{a}^{-1}$, and the total amount of carbon sinks in the blue space was $146\,844.03\text{ tC} \cdot \text{a}^{-1}$. The carbon sink per unit area is higher in “blue” than in “green”. A total of 63 ecological source patches and 20 core source patches were extracted. The total area of the green space core source was $6\,814.31\text{ km}^2$, and the blue space was 899.05 km^2 . The core source was mainly distributed in the east and west sides and the southern coastal area. A total of 24 ecological corridors were extracted, with a total length of 122.21 km for the green corridor and 52.75 km for the blue corridor, which were circularly distributed. The central and southern regions were densely distributed and had a strong connectivity. The results of this study provide construction ideas for the protection and sustainable development of coastal cities under the background of “carbon peak and carbon neutrality” (referred to as “double carbon”).

Key words: coastal zone cities; blue-green space; carbon sink infrastructure; Guangxi Beibu Gulf; Morphological Spatial Pattern Analysis (MSPA); circuit theory

责任编辑: 陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>