

莆田城区生态空间网络构建与优化策略研究

Construction and Optimization of Ecological Space Network in Putian Urban Area

王吉伟¹ 章婷婷¹ 陆哲明² 朱建宁^{1*}
WANG Jiwei¹ ZHANG Tingting¹ LU Zheming² ZHU Jianning^{1*}

(1. 北京林业大学园林学院, 北京 100083; 2. 浙江农林大学风景园林与建筑学院, 杭州 311300)
(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing, China, 100083; 2. School of Landscape Architecture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Hangzhou, Zhejiang, China, 311300)

文章编号: 1000-0283(2023)01-0078-09
DOI: 10. 12193/j. laing. 2023. 01. 0078. 010
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2022-03-29
修回日期: 2022-10-19

摘 要

生态空间管控是中国国土空间管控的核心内容。以莆田城区为研究对象, 借助ArcGIS空间分析技术, 基于生态系统综合服务价值、水土流失—水源涵养敏感性评估定量识别重要生态源地, 依据地物类型构建生态阻力面, 应用最小阻力模型识别潜在生态廊道, 构建研究区生态空间网络; 基于土壤、地貌、土地利用类型三类关键因素认知区域景观特征类型及单元特征, 并以认知结果为原型与基础, 提出生态空间结构及本体类型、组合等方面的优化策略。结果表明:(1) 研究区生态重要性分级中极重要和重要区域面积为907 km², 占40.53%, 识别出10个一级生态源地和5个二级生态源地;(2) 构建出呈“C”形的一级生态廊道和网状二级廊道;(3) 识别出10种景观特征类型, 并总结关键景观特征单元的要素及空间组合特征;(4) 从生态空间结构优化、生态斑块建设及生态廊道建设等方面提出针对性策略。以期基于生态系统服务价值—生态敏感性—景观特征认知框架来进行的生态空间网络构建及优化的方法能有助于提升区域生态空间质量, 强化地域特色景观。

关键词

生态系统服务价值; 生态敏感性; 景观特征评估; 生态空间网络; 最小累积阻力模型

Abstract

Ecological spatial management is the core content of national spatial management. Taking Putian urban area as an example, with the help of GIS spatial analysis technology, ecological sources were identified from ecosystem comprehensive service value and the assessment of soil erosion-water conservation sensitivity. On the basis of the types of ground objects, the ecological resistance surface was modified and using the minimum cumulative resistance model, potential ecological corridors were identified. The ecological sources with corridors constituted a regional ecological network. Based on soil, geomorphology, and land use type, we qualitatively identified the regional landscape character types and units and took the cognitive results as prototypes and foundations to propose optimization strategies for ecological space structure and elements type and combinations. The research results show that: (1) The area of extremely important and important ecological importance was 907 km², accounting for 40.53%, and 10 primary ecological sources and 5 secondary ecological sources were identified; (2) C-shaped primary ecological corridor and reticulated secondary corridor were constructed; (3) Ten landscape characteristic types were identified, and the key landscape elements and spatial combination characteristics were summarized; (4) Specific strategies are proposed from the aspects of ecological spatial structure optimization, ecological patch construction and ecological corridor construction. The method of constructing and optimizing the ecological space network based on the evaluation of ecosystem service value, ecological sensitivity, and landscape characteristics assessment not only helps to enhance regional ecological security but also can strengthen regional characteristics.

Keywords

ecosystem services value; ecological sensitivity; landscape characteristics assessment; ecological space network; minimum cumulative resistance (MCR) model

王吉伟

1991年生/男/湖北十堰人/在读博士研究生/研究方向为风景园林规划设计与理论

章婷婷

1991年生/女/安徽芜湖人/博士/研究方向为风景园林规划设计与理论、风景园林历史与理论

朱建宁

1962年生/男/山东陵县人/博士/教授, 博士生导师/北京北林地平线景观规划设计院首席设计师/研究方向为风景园林规划设计与理论

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: blzjn0413@bjfu.edu.cn

城乡建设用地无序蔓延使得农业、生态用地萎缩,同时早期政府、投资者等推动区域规划建设时多以经济为导向,对自然资源的生态与美学价值忽视或认知不足^[1-2],导致出现生态空间网络破碎、生态服务功能降低、景观典型性下降等问题。生态网络是统筹协调城镇、农业及其他空间的纽带,是对自然资源环境进行有效利用、统筹整合的关键^[3],逐渐成为治理景观破碎化的惯用政策^[4]。生态网络构建方法日趋成熟,“识别源地—构建阻力面—提取廊道”的研究框架成为基本模式^[5],但生态源地的获取以及阻力面的构建方法则多种多样,目前生态源地多直接选择风景名胜、自然保护区、大型城市绿地斑块等,具有一定的主观性和片面性,且其边界划定常缺乏科学依据、功能单一;或依据生态功能重要性评价、生态敏感性评价及形态学空间格局分析法(Morphological Spatial Pattern Analysis, MSPA)等来获取生态源地^[6-8]。生态系统服务价值评估是研究景观要素的价值量化及其空间分布规律,是一种土地资源价值的综合全面的评估,以明确各类生态系统服务功能类型与重要区域,筛选出重要价值的关键斑块予以保护。生态系统服务价值评估是识别源地的有效方法,可为生态系统科学管理与生态保护建设提供直接依据,比如确定各类用地发展趋势及利用方式^[9-12]。而生态敏感性评价实质是对现状自然环境潜在生态问题的明确辨识,并将其落实到具体空间上的过程^[13],筛选出受到干扰后不易恢复的高敏感区予以保护,以确保生态系统内部稳定性。本研究从价值识别保护与风险识别管控两个角度,相对全面地划定生态源地。区域生态廊道提取基于最小累计阻力模型获取,而其关键在于阻力面的构建,阻力面作为生态网络构建中的另一核心,

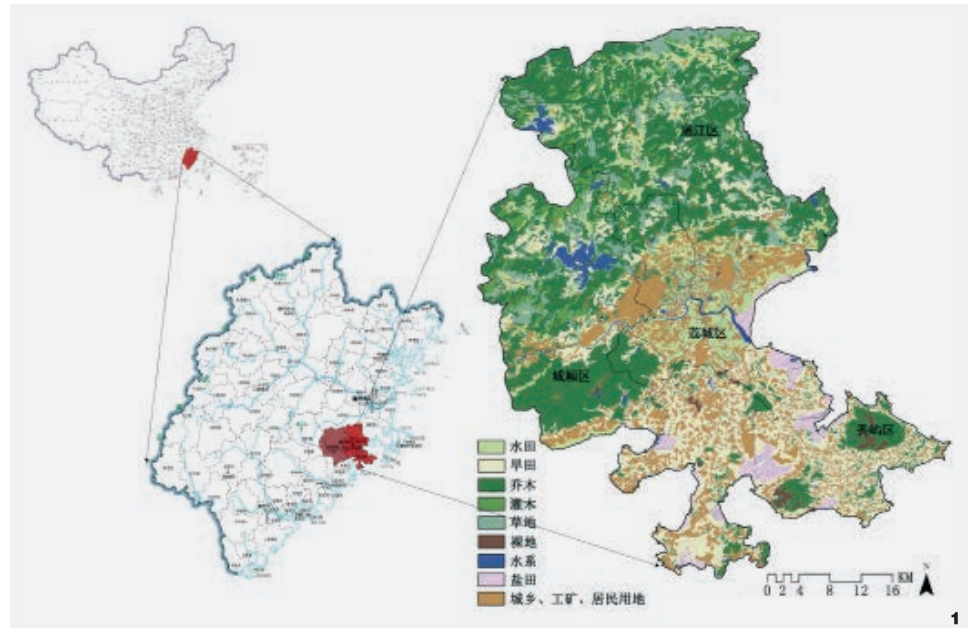


图1 莆田城区地理位置 (中国地图审图号: GS(2020)4630号,自然资源部监制;福建省地图审图号: 闽S(2022)127号,福建省自然资源厅监制)
Fig. 1 Location of Putian Urban Area

一般通过对地物类型赋值得到,有学者考虑到同一地物类型内质量差异、人为干扰强度对生态阻力系数的影响差异等,通过地形、夜间灯光数据等进行修正^[14]。

聚焦到生态空间用地的结构与本体改善提升实践中,考虑到其承载的生态、历史、文化、艺术等地域性、多样性的综合价值^[15],则必须在增强生态系统服务能力、降低生态敏感性的基础上,综合考虑景观特征的多样性及其承载的多样价值。《英格兰和苏格兰风景特征评估导则》中定义“景观特征是一种使一个景观与另一个景观不同的景观元素可识别的模式”,呈现人与自然的本质联系。景观特征评估具有本质的客观性,记录景观特征,而非价值或质量,强调景观的差异与多样性,重点在于绘制景观特征类型与单元地图。基本要素包括地质、土壤、地貌、水文、气候、地物覆盖等自然要素;土地利用、居民点、时间深度、土地权属等文化/社会要

素;色彩、文理、图案、构成以及记忆、联想、偏好、触感、气味、声音等感知与审美要素,而且景观特征认知可以在任何尺度上进行^[16],故通过对地域景观特征的认知研究,可从要素类型、组合等方面指导生态斑块、廊道的建设与本土特征保护强化。

综上,本研究提出基于生态系统服务价值—生态敏感性评估提取生态源地,基于最小累计阻力模型识别生态廊道,综合构建生态空间网络;基于自然与文化因子的区域景观特征评估来提升优化生态空间结构与本体。

1 研究区概况

研究区选取莆田市城厢区、涵江区、荔城区、秀屿区4区陆地部分(图1),地处北纬24° 59′—25° 46′,东经118° 27′—119° 56′之间,东南濒临台湾海峡,东北毗邻福州福清市与永泰县,西南连接泉州泉港区,西侧衔接莆田仙游县。气候类型属亚热带海洋性

季风气候，降水、风、温度等时空差异大；地貌类型丰富，包含中低山、丘陵、平原、滩涂等；水资源丰富但人均不足且空间分布不均；水土流失面积与比例均高于全省平均水平，是全省水土流失重点区域；植被分区为闽东南戴云山东湿润暖亚热带雨林小区，植被类型丰富，包含天然林、人工林、经济林、荒草坡、海岸植被等。

2 研究方法

2.1 数据来源

本研究所用数据包括莆田城区土地利用类型、高程、归一化植被指数、土壤类型、

植被类型、降雨侵蚀等基础数据（表1），以及《莆田市城市总体规划（2008-2030年）》《莆田市志》《莆田市土地利用总体规划（2006-2020年）》《福建省地方志》等文本资料。

2.2 生态系统服务价值评估方法

本研究综合讨论生态系统的供给、调节、支持、文化4类11种服务价值，当量因子法进行价值评估具有相对简单且全面的优势^[19]，本研究采取谢高地的单位面积生态服务价值基础当量表来进行相对价值计算，即利用不同景观要素及其各生态服务价值在全

国范围内的年均价值量来代入计算并制图，无需计算当地一个标准当量因子的生态系统服务价值量。莆田城区景观要素类型以谢高地在《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》中的生态系统分类为基础^[19]，采用《土地利用分类系统》中城乡、工矿、居民用地类型来覆盖城乡居民点及县镇以外的工矿交通等用地，最终将之分为农田、森林、草地、荒漠、水域、城乡工矿居民用地6大类。此研究区内乔木林以亚热带针叶林为主，故采取针叶林的价值当量计算乔木林服务价值；城镇、工矿、居民用地的生态服务价值设为0参与评估；盐田各项服务价值按城镇（工矿/居民用地）：荒漠：冰川积雪=3：4：3的比例计算^[19]（表2），在ArcGIS平台计算得出各类要素生态系统服务价值分布图。

2.3 生态敏感性评价方法

研究《中国生态功能区划方案》《福建省生态功能区划》，以及莆田市志、福建省自然地图集等资料后发现，莆田城区的主导生态系统服务功能为生态调节功能中的水源涵养和水土保持两类。生态敏感性评价具有复杂

表1 基础数据来源
Tab. 1 Source of foundation data

数据名称 Data name	数据精度 Data accuracy	数据来源 Data source
土地利用类型	空间分辨率30 m×30 m，精确度达90%以上	中国科学院水利部水土保持研究所
高程	空间分辨率30 m×30 m	地理空间数据云
归一化植被指数	空间分辨率500 m×500 m，时间分辨率30天	地理空间数据云
土壤类型	1:1 600 000	福建省自然地图集
植被类型	1:1 600 000	福建省自然地图集
降雨侵蚀	—	参考文献[17]

表2 莆田城区单位面积景观要素生态服务价值当量^[19-20]
Tab. 2 Equivalent of ecological service value of landscape elements per unit of Putian Urban Area

要素分类 Elements classification		供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services			支持服务 Supporting services			文化服务 Cultural services	
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
农田	水田	1.360	0.090	-2.630	1.110	0.570	0.170	2.720	0.010	0.190	0.210	0.090
	旱田	0.850	0.400	0.020	0.670	0.360	0.100	0.270	1.030	0.120	0.130	0.060
森林	乔木	0.220	0.520	0.270	1.700	5.070	1.490	3.340	2.060	0.160	1.880	0.820
	灌木	0.190	0.430	0.220	1.410	4.230	1.280	3.350	1.720	0.130	1.570	0.690
草地	草地	0.100	0.140	0.080	0.510	1.340	0.440	0.980	0.620	0.050	0.560	0.250
荒漠	裸地	0	0	0	0.020	0	0.100	0.030	0.020	0	0.020	0.010
水域	水系	0.800	0.230	8.290	0.770	2.290	5.550	102.200	0.930	0.070	2.550	1.890
	盐田	0.004	0.120	0.656	0.100	0.200	0.170	2.223	0.050	0.004	0.051	0.047
城乡/工矿/居民用地		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

性与综合性，若针对单一类型分别进行敏感性评价，会使某单一因子重复使用继而导致权重过大，故本研究选择生态敏感性综合评价方法，评价因子选取覆盖上述两类敏感类型的主导因子，包含坡度、植被覆盖度、降雨侵蚀力、土壤类型、景观要素类型、距水域距离6个因子^[17,21-22]，评价指标体系如表3，在ArcGIS平台将6因子设置为等权重叠加得到生态敏感性图层。

2.4 宏观生态空间结构构建方法

利用ArcGIS软件平台空间分析模块，在生态源地识别时，将生态敏感性图层、生态系统服务价值图层等权重叠加，结果依据自然间断点分级法划分为极重要、重要、较重要、不重要4个等级，取极重要与重要区域且面积大于1 km²作为生态源地；阻力面反映物种以及生态功能在空间内迁徙、流动的难易程度，主要受景观要素类型的影响，将景观要素类型的耗费阻力系数拟定在1 ~ 100之间，即城乡、工矿、居民用地100，荒漠80，水域60，农田40，草地20，林地1，依此构建阻力面^[23]；采用最小累计阻力模型提取最小耗费路径廊道，构建研究区生态空间结构。

2.5 景观特征认知方法

如前介绍景观特征认知基本要素包括自然要素、文化/社会要素、感知与审美要素，具体选择要素类型、指标及精度等与研究尺度、目的等密切相关。本研究莆田市区尺度的景观特征认知重在搜集风景基准数据，识别风景资源类型、单元，对之进行全覆盖的关键特征描述，以作为风景未来变化的参考标准、框架，并不包括景观特征质量、价值评价等；在城市尺度上，选择土壤类型、地形地貌、土地利用类型三类要素作为特征认知要素，将土壤划为盐渍水稻土、潴育水稻土、渗育水稻土—赤红土、石质土—风沙土、红壤—黄壤、滨海盐土6类，地形地貌分为平原、岗丘、丘陵、山地4类，土地利用类型划为水田、旱田、乔木林地、灌木林地、草地、盐田、裸地、水系、城乡工矿居民用地9类。数据来源如2.1所示，在ArcGIS平台中进行矢量化，选择200 m×200 m的格网精度叠加，得出景观特征类型与单元草图；通过实地调研与网络图片比照，对特征类型/单元边界进行手动调整、合并并明确；对各景观特征类型的关键特征予以描述，同时针对典型空间单元进行要素形态、空间构成特征研究，理解其内涵与演变逻辑。

3 结果与分析

3.1 重要生态源地识别与关键生态廊道提取

3.1.1 重要生态源地识别

通过自然间断点分级法将生态系统服务价值分为极低价值、低价值、一般价值、高价值、极高价值5级，生态敏感性分为不敏感区域、轻度敏感区域、中度敏感区域、高度敏感区域和极敏感区域5级。生态系统服务价值分级中，极高价值区主要分布在西侧与北侧的山地区域，以水系、亚热带针叶林、南亚热带雨林为主，且密集度和连接度高，另有少量零散且以林地为主的块状极高价值区和以水系为主体的线型极高价值区分别分布于东南半岛丘陵和兴化平原。生态敏感性分级中，极敏感和高度敏感区域主要分布在山地区及少数丘陵地区；山地区敏感性高主要原因是地处水库核心保护区，且地形坡度大，土壤以土质松弛的红壤、黄壤为主，降雨侵蚀大（图2）。

将生态敏感性图层、生态服务价值图层等权重叠加得到生态重要性分级（图3-a）。从面积占比来看，极重要和重要区域面积约为907 km²，占40.53%，从空间分布来看，主要分布在西北戴云山余脉的中低山区，包括壶公山、凤凰山、九华山、囊山等，少部分

表3 莆田城区生态敏感性评价指标体系
Tab. 3 Ecological sensitivity evaluation index system of Putian Urban Area

生态敏感性因子 Ecological sensitivity factor	一般敏感（1） Generally sensitivity	轻度敏感（3） Mildly sensitive	中度敏感（5） Moderately sensitive	高度敏感（7） Highly sensitive	极敏感（9） Extremely sensitive
坡度/°	≤2	(2, 6]	(6, 15]	(15, 25]	> 25
植被覆盖度/%	≤20	(20, 40]	(40, 60]	(60, 80]	> 80
降雨侵蚀力	≤200	(200, 220]	(220, 240]	(240, 260]	>260
土壤类型	水稻土、滨海盐土	山地草甸土	赤红土	黄壤、红壤、石质土	风沙土
景观要素类型	城乡、工矿、居民用地、盐田	荒漠	农田、草地	水域	林地
距水域距离/m	> 500	(350, 500]	(200, 350]	(100, 200]	≤100

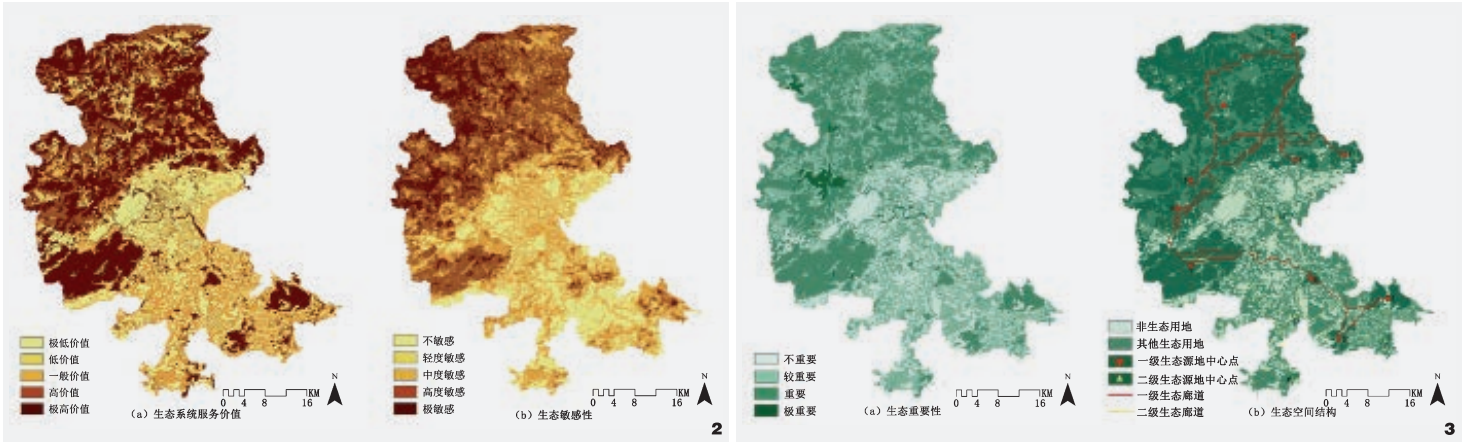


图2 莆田城区生态系统服务价值和生态敏感性分级图
Fig. 2 The grading maps of ecosystem service value and ecological sensitivity of Putian Urban Area

图3 莆田城区生态重要性分级图和生态空间结构
Fig. 3 The grading maps of ecological importance and ecological spatial structure of Putian Urban Area

分散于东南半岛上五侯山、大矸山、鹭峰山、虎角岭、蚩前山等低丘以及平原区的河流集聚区，景观要素类型以乔木林、灌木林、水为主。选取生态重要性等级为极重要与重要级并且面积大于5 km²的区域作为莆田城4区一级生态源地，面积1 ~ 5 km²的区域作为二级生态源地^[24-25]。

3.1.2 关键生态廊道提取

提取一级生态源地的几何中心点，从每一个几何中心点出发，以剩余的N-1 (N生态源地几何中心点数) 个中心点为目标集群，依据景观要素类型制作阻力面，基于最小累积阻力模型提取最小耗费路径为一级生态廊道；提取二级生态源地到各生态源地间的最小耗费路径为二级生态廊道，识别出生态源地与潜在生态廊道共同构建的生态空间结构 (图3-b)，结果显示，一级生态廊道呈“C”形，主分布在植被覆盖度较好的山区，二级廊道主要分布在平原水网区域 (要素多为自然溪流如石塘溪，引水渠如东圳干渠等) 和丘陵区的农田区域 (要素多为小林团、林带、农田)，

二者共同构成相对完善的生态空间结构。且二级廊道生态质量、要素类型、连接度、宽度等受到的威胁更强，提出小斑块连片化，廊道自然化、网络化、拓宽化的建设目标。

3.2 景观特征认知结果

3.2.1 景观特征的形成演变过程

研究区地貌演变主要集中在新兴化平原区域，大致经过三个阶段：(1) 40 000 ~ 15 000 aBP的前平原阶段，海面比今低100 m左右，为河流堆积环境；山地部分为常绿栎建群的针阔混交林。(2) 15 000 ~ 1 400 aBP的海湾阶段，地壳下降，海面上升，汪洋茫茫；山溪携带陆源碎屑物质和海潮携带的泥沙相互作用逐渐沉积，在山海相接的边缘区逐渐有泥炭发育；植被在沼泽地以禾本科、莎草科和蒿属等为主，山地区为常绿栎建群的常绿阔叶林，林下有大量蕨类植物生长。(3) 1 400 aBP后的沼泽—平原阶段，海水退变为沼泽，但常被海淹，处处斥卤，“惟蒲生焉”“莆未溼海时，海潮直至南山之下，波光山色互相动荡”。相应的东南半岛也经历陆

地 (山地丘陵) 一破碎半岛、岛屿—逐渐扩大的完整半岛三阶段，最终形成如今山水结构：西北山体围合，三溪蜿蜒，中部平原水网纵横，半岛缓丘迭起，水系匮乏，东南海湾簇拥，岸线曲折，形成以河串联高山—丘陵—平原—海湾过渡结构 (图4)^[26-28]。

山地区以红壤和黄壤为主，这是生物富集过程和花岗岩等的富铝化过程长期作用的结果，土层深厚，肥力高，生产潜力大，但酸性较强，土性较粘。平原区域是以滨海沉积物为母质的盐渍水稻土，盐分含量高，经季节性淹水—耕作—排干这种水稻种植方式脱盐发育形成。平原外围冲积区为以冲洪积物、红壤为母质的潜育水稻土。半岛区以渗育水稻土、石质土、风沙土为主，均为花岗岩、浅变质的火山岩等风化形成，渗育水稻土在丘坡中下部较缓区，靠人工引水灌溉和天然降水补水，受季节性侧渗水或下渗水作用而成白色粘土层和沙层的渗育层，养分淋失；石质土、风沙土在丘坡顶部，风化严重，土层浅薄，含岩石碎屑砂粒多。山区和丘陵顶部为自然土壤，平原区和丘陵区底部为人工土壤^[29]。

上述自然山水、土壤背景下，平原淡水交汇沼泽之地成为围垦造田的地理基础，筑堤以挡海水回溯，筑陂围堰以引流来冲刷和灌溉土地，并从山原衔接处逐渐向海边发展扩张出城乡聚落。唐时环绕山麓修建南北洋海堤及永丰塘、诸泉塘、国清塘等；北宋时设县，修建拦溪水利工程诸如木兰陂、延寿陂等，以向海争地并满足向海延伸的洋田、埭田对淡水冲咸灌溉的需求。随着时间推移，水田及配套陂塘、沟渠、涵闸等水利基础设施、村镇亦逐渐向海边延伸，并修建码头、防护林带、海水养殖场等，自西向东形成山—城—村+田—海的文化景观序列^[30-31]（图5）。

3.2.2 景观特征类型与单元划定

通过2.5所述方法，莆田城区被划分为10个景观特征类型、20个景观特征单元，识别出典型景观特征单元I、VII、IX的空间结构图示（图6），归纳总结各景观特征单元典型特征（表4）。

3.3 生态空间网络完善及本体优化策略

3.3.1 生态空间结构优化

从莆田的形成演变历程可知，其关键景观特征在于自西向东、以河流串联的高山—丘陵—平原—海湾的自然景观序列和山/丘陵—城—村+田—海的文化景观序列。上述基于生态敏感性和生态系统服务价值构建的潜在生态源地与廊道在景观序列特征表现上不够明显，于是基于既有河网及碎而密集的绿地予以完善，优化出“一片—八核—三湾—三轴—多廊”的生态结构（图7）。“一片”是环兴化平原西北山区，考虑到片区内集中连片分布1~7一级生态源地，整体占比很高，且其余空间生态价值等级为较重要，

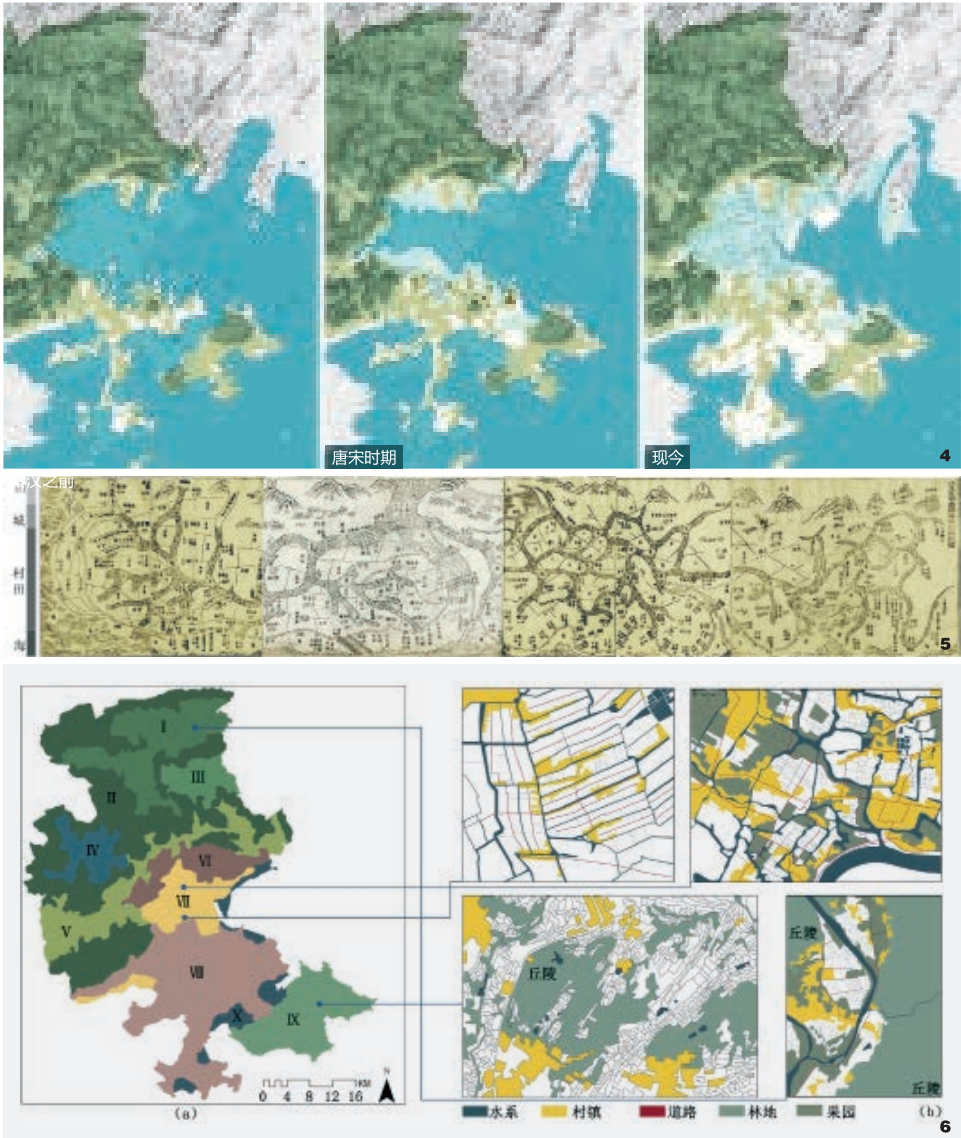


图4 莆田海岸线变化
Fig. 4 Putian coastline changes

图5 “山—城—村+田—海”景观序列^[31]
Fig. 5 Landscape sequence of "mountain-city-village+ farmland -sea"^[31]

图6 区域尺度景观特征单元分区及典型单元空间结构图示
Fig. 6 Regional-scale landscape characteristics units and Spatial illustration of typical units

故将其视作整体为完整的生态空间统一管护；“八核”中的七核是基于8~10三个一级生态源地和11~14四个二级生态源地而设置，分布于东南半岛上的低缓山丘区域。考虑到南北洋片区水网曲折密集、林地斑块数量小而集中，且是平原水网与村田水利设施典型区，

故新增建设生态空间第八核；“三湾”对应莆田东南兴化湾、平海湾与湄洲湾，构建“三湾”生态带以分别强化淤泥、基岩和砂质海岸类型的潮上、潮间、潮下带差异化海滨特征；“三轴”是以莆田木兰溪、延寿溪、萩芦溪三条关键大流量、宽阔河流为基础构建

表4 景观特征单元要素特征
Tab. 4 Element feature of landscape characteristics units

编号 Num.	景观特征 landscape characteristics			
	地形地貌 Landform	水文条件 Hydrologic condition	土壤类型 Soil type	土地用地类型 land-use type
I	山间岗丘：四围低山环绕，中部较大面积低起伏地形及岗丘	萩芦溪中上游及湘溪、东泉溪等支流汇聚；河道坡降比大，水量丰富；I-III类水，主要污染物为氨氮、总磷，以农业、养殖污染为主	黄壤—红壤：黄壤海拔在红壤之上	平缓地形和岗丘底部为邻水村落、旱/水田、果园；岗丘中上部为针叶林、常绿阔叶林地，群落结构为简单的乔灌草三层
II	山地：地势陡峭	重要水源涵养地	以黄壤—红壤为主	山顶或山脚相对平缓处有少量零散村落旱田分布，其余均为针叶林、常绿阔叶林、灌草覆盖，群落结构简单
III	山间丘陵	有小流量的东山溪、深溪等；以灌溉为主的小型水库两个	红壤	同I
IV	山间岗丘	以大型东圳水库为核心的院里溪、延寿溪等，水量丰富；I-III类水	红壤	同I
V	山前岗丘	木兰溪、延寿溪、萩芦溪等诸水于此区出山入平原，坡降比大，水量丰富	以潴育水稻土为主	河谷或平缓处分布少许农田和村庄、果园；自然林为中、幼龄马尾松疏林
VI	平原 (H=5~100 m)	诸多硬化水系	潴育、盐渍水稻土	城镇建设用地
VII	平原 (H=0~5 m)	木兰溪、延寿溪、塘头河等，下游多淡水交汇；河网密集曲折，流动性、水质较差	盐渍水稻土	水网有规整式和自由式；与水网平行或者垂直的带状或团状布局的村庄、水田、果园，尺度、方向相对统一；诸多陂塘、沟渠、涵闸等水利设施；原生红树林秋茄、蒲草等被破坏
VIII	平原岗丘：地形较破碎，多岩石裸露，人工开采痕迹重	水源匮乏，基无自然河流，只人工渠系东圳干渠	以渗育水稻土、赤红土为主	在低缓处大量散乱分布村庄、旱田，方向、尺度、高差多变，种耐旱作物，田间为带状、片状木麻黄防护林；丘陵顶有自然林草
IX	平原丘陵：同VIII	水源匮乏，仅有石塘溪，人工渠系东圳干渠	以风沙土、石质土为主	同VIII
X	平原 (H=0~5 m)	海潮淹没	滨海盐土：含盐分高，排水不良，性软腻	以海水晒盐场为主；植被为红树林秋茄；大量围海造陆，占用滩涂

山—海连通骨架；“多廊”是基于最小累计阻力获取的潜在生态廊道，“新增廊”是基于联系高山—丘陵—平原—海湾的诸多自然河流新建廊道，划定适宜保护范围。

3.3.2 生态斑块建设——重点保护生态源地，强化垫脚石建设

具体而言，一级生态源地1~7分布在I-IV景观特征单元内，生态源地连接度高，以自然林地、水体等自然要素为主，优化的关键点在于：一是严格保护既有自然要素的空间格局与量；二是将坡度大、滨

水、破碎的农田转为林团或果园，种植龙眼（*Dimocarpus longan*）、枇杷（*Eriobotrya japonica*）、桃（*Prunus persica*）、杨梅（*Morella rubra*）、柑橘（*Citrus reticulata*）等，在下层种植稍耐阴的草本植物以固土保湿，同时修建梯田，减少河流、降雨对土地的侵蚀；三是将养殖废弃物加工配制有机肥，降低化肥的使用量，增加农田排水沟的近自然化程度，以疏导、净化残留化肥、农药污染，同时增加乡村生活养殖污水净化、垃圾处理的基础设施建设。在自然林地补植方面，乔木选择壳斗科栎属（*Quercus*）、石栎属（*Lithocarpus*）及

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）、马尾松（*Pinus massoniana*）、台湾松（*Pinus taiwanensis*）、柳杉（*Cryptomeria japonica* var. *sinensis*）等，灌木选择五列木科杨桐属（*Eurya*）、金缕梅科榿木属（*Loropetalum*）、蔷薇科（*Rosaceae*）等，如黄瑞木（*Adinandra millettii*）、水东哥（*Saurauia tristyla*）、桃金娘（*Rhodomyrtus tomentosa*）、榿木（*Loropetalum chinense*）、石斑木（*Rhaphiolepis indica*）等，草本选择如春兰（*Cymbidium goeringii*）、芒箕（*Gleichenia linearis*）、中华里白（*Diplopterogium chinense*）、狗脊（*Woodwardia japonica*）、黑莎草（*Gahnia tristis*）等。一级生态源地8~10和二级

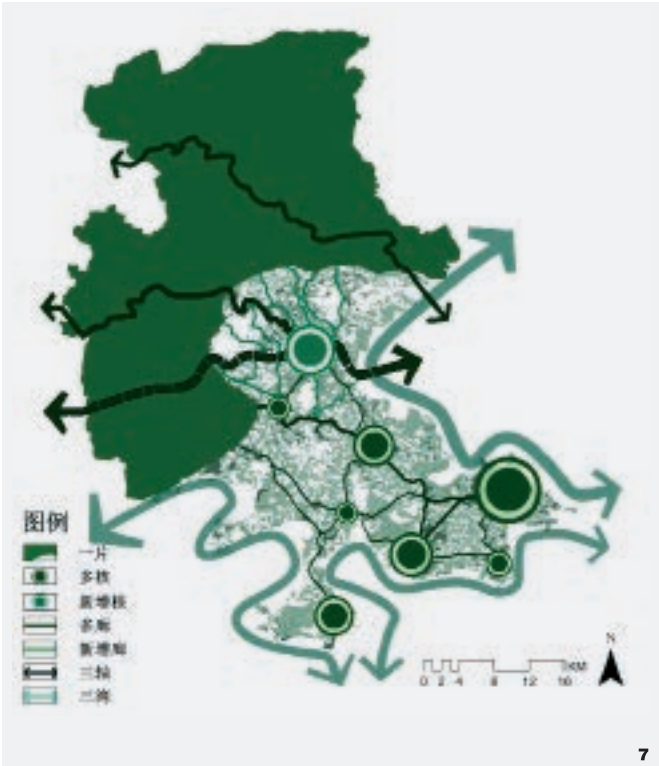


图7 莆田城区生态空间结构优化
Fig. 7 Optimization of ecological space structure in Putian Urban Area



图9 北洋片区核心区低层级廊道网络示意图
Fig. 9 Diagram of the low-level corridor network in the core area of Beiyang district

图8 木兰溪(木兰陂段)感潮段优化策略
Fig. 8 Optimization strategy of the tidal section of Mulan Creek (Mulan reservoir section)

生态源地11~14分布在Ⅷ和Ⅸ景观特征单元内,优化关键在于:关闭各采石场,迁移或生态化墓地,退耕高坡度高海拔的旱田,保护、补植耐旱、耐瘠薄、抗风、抗盐的乔灌木植被,如黑松(*Pinus thunbergii*)、台湾相思(*Acacia confusa*)、芒箕等。二级生态源地15分布在Ⅴ和Ⅶ景观特征区内,以木兰溪及周边滩涂为核心的地块,优化关键在于:空间上将硬质驳岸局部恢复成自然式驳岸或隐藏为隐形防洪堤,使之与河流外圈的公园绿地、水系等构建弹性、有活力的近自然空间,尤其是在木兰溪木兰陂附近及其下游属于感潮段淡水交汇区域,需依据水平与垂直方向土壤含盐量、水位变化种植不同耐盐碱、耐水湿的植被类型,并且局部恢复滩涂,或以

工程措施改善水盐环境以对比突出感潮段淡水交汇的景观风貌(图8)。

针对人工环境为主的平原丘陵区域的林地、水体斑块予以重点保护以建设垫脚石,在特征单元Ⅶ、Ⅹ内,适当增加果园面积或扩大水体面积,恢复滨海区域的红树科秋茄树属(*Kandelia*)、禾本科(*Poaceae*)、莎草科(*Cyperaceae*)和蒿属(*Artemisia*)等;在特征单元Ⅷ、Ⅸ内,腾退部分迎风农田、村庄,将其转换为生态用地,补植木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)、黑松、台湾相思、芒箕等,强化迎风坡半干旱荒原景观,以改善微气候环境,增加剩余农田土壤湿度、有机质含量,减弱风力,降低盐碱度,控制荒漠化程度。

3.3.3 生态廊道建设——加密低层级廊道网,设置生态廊道缓冲区

在景观特征单元Ⅴ和Ⅶ中,建设关键在于疏通水网以增加水循环能力(梧梓河、塘头河、和平河、延寿溪及大量农田水道、陂塘等),滨水林网的配套以净化化肥农药,农田村庄防护林网的增建以抵御海风侵袭,乔木以喜湿喜肥的荔枝(*Litchi chinensis*)、龙眼、枇杷、橄榄(*Canarium subulatum*)、柑橘等果树为主(图9);在景观特征单元Ⅷ和Ⅸ中,低层级廊道建设关键在于人工水渠的林网配套,村庄农田防护林网的建设,以耐旱耐贫瘠的木麻黄为主。根据场地适宜情况,设置10~1000 m的生态廊道缓冲区,严禁各类建设对生态廊道的破坏。

4 结论与讨论

定量的生态系统服务价值评估和生态敏感性评价构建宏观生态空间结构、景观特征评估引导生态网络完善和生态空间本体建设是本研究重点探讨的两个问题。文章基于综合性生态服务价值评估和水土流失—水源涵养综合敏感性评价识别出一级生态源地10个，二级生态源地5个；依据景观要素类型构建阻力面，利用最小阻力模型识别“C”形的一级生态廊道和网状二级廊道，构建莆田城区生态空间结构。选取地形地貌、土壤类型、土地利用类型因素研究莆田城区景观形成演变过程，划定10个景观特征类型单元并总结其关键特征，然后据此在宏观生态结构上提出增核、增廊、增湾策略予以补充优化，并提出适宜各景观特征单元的生态源地、廊道优化策略。基于综合性生态系统服务价值识别保护和敏感性风险管控角度出发识别生态源地，具有更强的理论基础与客观性、直观性，现有自然保护区全部落入生态源地范围内，亦说明源地识别的适用性与准确性；在增加生态空间生态服务价值、降低生态敏感性的同时基于景观特征予以优化的方法，不仅在量上和空间分布上回应生态需求，同时也在有效保护、尊重、延续和强化本土特征，这对后续的生态空间研究具有一定借鉴参考价值。

本研究在生态系统服务价值评估时重在分析各要素生态服务价值相对高低，不具体计算生态服务价值量，所以采取谢高地的单位面积生态服务价值基础当量表来进行价值计算，暂未考虑景观要素的地域性差异、质量差异等；此次生态空间网络优化策略仍然是定性的，未就生态网络的宽度、密度、多样性等定量讨论，需要在后续研究时深入探讨。

注：图1中国地图引自标准地图服务网站<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/browse.html?picId=%224o28b0625501ad13015501ad2bfc0468%22>；图1福建省地图引自福建省标准地图服务网站<http://bzdt.fjmap.net/widget/standardmap/result/result.html?resultid=461&yearver=%E5%BD%93%E5%89%8D%E7%89%88%E6%9C%AC>；图5引自参考文献[31]；图8由北京北林地平线景观规划设计院提供；其余均为作者自绘。

参考文献

[1] 饶传坤, 韩卫敏. 我国城市蔓延研究进展与思考[J]. 城市规划学刊, 2011(05): 55-62.

[2] 鲍梓婷, 周剑云, 肖毅强. 景观作为可持续城市设计的媒介和途径[J]. 中国园林, 2017, 33(02): 17-21.

[3] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 1-11.

[4] IGNATIEVA M, STEWART G H, MEURK C. Planning and Design of Ecological Networks in Urban Areas[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2011, 7(1): 17-25.

[5] 彭建, 郭小楠, 胡熠娜, 等. 基于地质灾害敏感性的山地生态安全格局构建: 以云南省玉溪市为例[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 627-635.

[6] 张远景, 俞滨洋. 城市生态网络空间评价及其格局优化[J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6969-6984.

[7] 王越, 林菁. 基于MSPA的城市绿地生态网络规划思路的转变与规划方法探究[J]. 中国园林, 2017, 33(05): 68-73.

[8] 曲艺, 陆明. 生态网络规划研究进展与发展趋势[J]. 城市发展研究, 2016, 23(08): 29-36.

[9] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.

[10] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 安徽省生态功能区划研究[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 254-260.

[11] 王治江, 李培军, 万志成, 等. 辽宁省生态系统服务重要性评价[J]. 生态学杂志, 2007, 26(10): 1606-1610.

[12] ZHANG L Q, PENG J, LIU Y X, et al. Coupling Ecosystem Services Supply and Human Ecological Demand to Identify Landscape Ecological Security Pattern: A Case Study in Beijing-Tianjin-Hebei Region, China[J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(3): 701-714.

[13] 潘峰, 田长序, 邵峰, 等. 新疆克拉玛依市生态敏感性研究[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1497-1507.

[14] 陈昕, 彭建, 刘焱序, 等. 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[J]. 地理研究, 2017, 36(03): 471-484.

[15] 王向荣. 整体观的人居环境[J]. 风景园林, 2020(2): 4-5.

[16] 凯瑞斯·司万维克, 高枫. 英国景观特征评估[J]. 世界建筑, 2006(07): 23-27.

[17] 周伏建, 黄炎和. 福建省降雨侵蚀力指标R值[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 13-18.

[18] 王小莉, 高振斌, 苏婧, 等. 区域生态系统服务价值评估方法比较与案例分析[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2): 212-220.

[19] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 7815-7828.

[20] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 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[J]. 自然资源学报, 2015, 30(08): 1243-1254.

[21] 环境保护部, 中国科学院. 全国生态功能区划(修编版)[EB/OL]. [2015-11-23]. https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201511/t20151126_317777.htm

[22] 尹海伟, 徐建刚, 陈昌勇, 等. 基于GIS的吴江东地区生态敏感性分析[J]. 地理科学, 2006(01): 64-69.

[23] 刘宇舒, 赵天宇. 景观生态视角下镇域生态服务评价与网络构建[J]. 中国园林, 2015, 31(10): 71-75.

[24] 王丽霞, 邹长新, 王燕, 等. 基于GIS识别生态保护红线边界的方法——以北京市昌平区为例[J]. 生态学报, 2017, 37(18): 6176-6185.

[25] 谭华清, 张金亭, 周希胜. 基于最小累计阻力模型的南京市生态安全格局构建[J]. 水土保持通报, 2020, 40(03): 282-288.

[26] 王绍鸿, 曾从盛, 吴学忠, 等. 福建兴化平原的形成与古地理环境[J]. 地理学报, 1991(03): 336-346.

[27] 林汀水. 从地学观点看莆田平原的围垦[J]. 中国社会经济史研究, 1983(01): 49-58.

[28] 卢美松. 福建省历史地图集[M]. 福州: 福建省地图出版社, 2004.

[29] 莆田市地方志编纂委员会. 莆田市志[M]. 北京: 方志出版社, 1994.

[30] 彭文宇. 古代莆田沿海围垦述略[J]. 福建地理, 1994(01): 64-68.

[31] (清)廖必琦, 林夔. 兴化府莆田县志卷二[M]. (清)汪大经, 王恒, 修. 民国十五年(1926)补刊本, 美国加利福尼亚大学伯克利分校藏.