

DOI: 10.20103/j.stxb.202412213135

陈墅香, 陈溢晨, 刘焱. 共生理论视角下多功能“人居-湿地”网络识别. 生态学报, 2025, 45(13): - .

Chen S X, Chen Y C, Liu G. Identification of multi-functional “human settlement-wetland” networks from the perspective of symbiosis theory. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

## 共生理论视角下多功能“人居-湿地”网络识别

陈墅香<sup>1</sup>, 陈溢晨<sup>2</sup>, 刘焱<sup>1,3,\*</sup>

1 澳门科技大学人文艺术学院, 澳门 999078

2 福建江夏学院工程学院, 福州 350108

3 华侨大学建筑学院, 厦门 361021

**摘要:** 湿地为人居环境提供多种功能, 主要包括创造多样化的生物栖息地, 降低区域雨洪风险, 并通过与周围文化设施的互动来提供文化服务, 满足人居环境“生活-生产-生态”需求。然而, 目前缺乏有效识别湿地网络中各廊道功能差异的方法, 盲目的湿地保护与利用都将破坏人居环境的宜居性和可持续性。基于共生理论, 以莆田主城木兰溪流域为例, 将生活防洪、文旅产业和生态保护 3 项基本人居环境需求整合到湿地廊道的发展框架中, 提出了多功能“人居-湿地”共生网络的识别方法。该方法涉及形态学空间格局分析 (MSPA)、景观连通性指数、最大熵模型 (MaxEnt)、最小累积阻力模型 (MCR) 和水文径流分析等, 同时, 将雨洪淹没风险、人文景观密度和生物多样性的空间分布转化为各功能性阻力因子, 提取潜在湿地廊道, 优化湿地网络结构。研究表明: (1) 土地利用类型对湿地形成的影响最为显著, 占比高达 86.9%, 其次是气候和地形因素的影响。(2) 在莆田主城流域识别出 32 块湿地生态源, 提取了 39 条潜在雨洪调节廊道、54 条人文滨水廊道和 40 条生态湿地廊道, 其中三种功能复合廊道占 56%, 两种功能复合廊道占 15%。(3) 在研究区域内构建了三级湿地网络结构, 其中一级湿地网络形成了“三纵三横”的空间格局。为城市湿地及滨水区域的多用途空间规划、设计和管理提供科学依据。

**关键词:** 湿地网络; 人居环境; 共生理论; 多功能廊道; 最小累积阻力模型

## Identification of multi-functional “human settlement-wetland” networks from the perspective of symbiosis theory

CHEN Shuxiang<sup>1</sup>, CHEN Yichen<sup>2</sup>, LIU Gong<sup>1,3,\*</sup>

1 Faculty of Humanities and Arts, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China

2 College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China

3 School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China

**Abstract:** Wetlands deliver multifunctional benefits to human settlements by supporting biodiversity habitats, flood regulation, and cultural services via cultural infrastructure synergy, addressing production-living-ecological (PLE) spatial demands. However, due to the lack of effective methods for identifying the functional differences of corridors in wetland networks, blind protection and utilization of wetlands may undermine the livability and sustainability of the habitat. Employing symbiotic system theory, this research focuses on Putian City's urban core within the Mulan River Basin and integrates three core human settlement needs—flood prevention, cultural tourism, and ecological conservation—into the development framework of wetland corridors. We propose a method for constructing a multifunctional “human settlement-wetland” symbiotic network. This approach includes morphological spatial pattern analysis (MSPA), landscape connectivity indices, integrating maximum entropy modeling (MaxEnt), minimum cumulative resistance (MCR) analysis, and

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51578250); 福建省自然科学基金项目 (2023J011110); 福建省社会科学基金项目 (FJ2021C114)

**收稿日期:** 2024-12-21; **网络出版日期:** 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zzhi@hqu.edu.cn

hydrological simulations. Additionally, the spatial distribution of flood inundation risks, cultural landscape density, and biodiversity are transformed into functional resistance factors to extract potential functional wetland corridors and optimize wetland network structures. The results indicate that: (1) Land use type dominates wetland formation (86.9% contribution rate), surpassing climatic and topographic drivers. (2) In the Putian urban area, 32 wetland ecological sources were identified, and 39 potential flood regulation corridors, 54 cultural waterfront corridors, and 40 ecological wetland corridors were extracted. Among these, corridors with three functional types accounted for 56%, and those with two functional types accounted for 15%. (3) A three-level wetland network structure was established in the study area, with the first-level wetland network forming a “three vertical and three horizontal” spatial pattern. This study establishes a scientific foundation for multifunctional spatial zoning and blue-green infrastructure optimization, design, and management of urban wetlands and waterfront areas.

**Key Words:** wetlands network; human settlements; symbiotic theory; multi-functional corridors; minimum cumulative resistance model

湿地是指具有显著生态功能的自然或人工的积水地带,根据《中华人民共和国湿地保护法》的定义,涵盖了常年或季节性积水的水域,以及低潮时水深不超过六米的海域<sup>[1]</sup>。湿地面积仅占陆地表面的 4%—9%,却提供了 40%的生态系统服务<sup>[2-3]</sup>。然而,在快速的城市化进程中,人居环境建设侵占湿地,填埋河流、湖泊,硬化城市下垫面<sup>[4]</sup>,导致洪涝灾害频发、湿地生态破碎和滨水空间恶化甚至消失<sup>[5]</sup>。据统计,1970 年至 2015 年全球近 35%的湿地消失<sup>[6]</sup>,其消失速度是森林的 3 倍<sup>[7]</sup>,而中国近 50 年湿地减少了 60%<sup>[8]</sup>。

为了解决人居环境建设与湿地生态保护的矛盾,学者们已开展了许多相关研究,集中于人水及城水共生关系<sup>[9-10]</sup>、湿地生态系统服务<sup>[11]</sup>、湿地生态网络修复<sup>[12]</sup>、蓝绿基础设施建设<sup>[13]</sup>和滨水空间提升<sup>[7]</sup>等方面。人水及城水共生研究关注城市发展与水资源之间的相互关系<sup>[9]</sup>,但在一定程度上忽视了湿地的生态效益;湿地生态系统服务研究侧重于定量评估湿地的生态功能,如淡水供给、气候调节和物种保护等<sup>[14]</sup>,难以直接指导湿地的保护与利用;湿地生态网络研究强调构建湿地生态安全格局<sup>[12,15]</sup>,忽略了湿地的文化和社会价值;蓝绿基础设施与滨水空间研究多关注局部区域的实践<sup>[7,13]</sup>,未能充分考虑人居环境系统的复杂性和全局性。综上所述,尽管这些研究在各自领域做出了贡献,但如何实现湿地保护利用和人居环境“生活-生产-生态”功能的和谐共生,探索湿地的多重效益和人居环境的多元需求协同,仍是亟待研究的重要议题。

湿地网络连通直接影响流域水循环、城市水环境和生物多样性等方面<sup>[16-17]</sup>。湿地网络的构建方法主要包括生态网络和水文径流分析等。生态网络方法基于景观生态学理论<sup>[18]</sup>,最早在 1976 年被提出,并于 1990 年代得到广泛应用<sup>[19]</sup>。该方法通过“生态源识别-阻力面构建-生态廊道提取-生态网络优化”的基本范式<sup>[20]</sup>,将分散的景观斑块通过生态廊道连接成空间网络<sup>[21]</sup>。现有研究已采用 MSPA、MCR、电流理论模型或图论法来识别湿地生态源和潜在湿地廊道<sup>[12,22]</sup>。除了生态网络方法,水文径流分析也是识别湿地网络的有效手段<sup>[23-24]</sup>。利用 GIS 的水文分析工具对数字高程模型(DEM)数据进行河网分析,可以模拟和评估径流河网的特征,从而优化湿地网络。近年来,部分学者开始尝试将功能性纳入湿地网络构建,研究视角逐渐从单一的湿地生态保护网络<sup>[12,25]</sup>扩展至湿地气候调节网络<sup>[22]</sup>、湿地观鸟休闲网络<sup>[26]</sup>、湿地文化景观网络<sup>[27]</sup>、湿地雨洪调蓄网络<sup>[28-29]</sup>等多个维度。然而,这些研究尚未充分考虑多功能湿地网络与人居需要之间的共生关系,缺乏“人居-湿地”共生网络的识别方法。

木兰溪综合治理已纳入中国“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要,为莆田主城流域河湖湿地及水岸发展带来新机遇。因此,本研究利用生态网络和水文径流分析方法,以莆田主城木兰流域为案例地,提出整合雨洪调节、文化服务和生态保护的“人居-湿地”共生网络识别框架。研究聚焦于以下三个核心问题:(1)如何从共生理论视角探讨人居环境与湿地生态系统之间复杂而动态的相互依存关系;(2)如何将湿地形成的影响因素与人居环境对湿地发展的驱动因素整合到湿地网络构建中;(3)如何通过多功能“人居-湿地”共生网络

推动城市湿地管理和滨水空间提升实践。本文的主要目标包括:(1)阐明“人居-湿地”共生的内涵、特征和驱动机制;(2)提出一个多功能“人居-湿地”共生网络识别框架;(3)将该方法框架应用于莆田主城流域,验证其可行性。研究旨在提高莆田主城流域湿地生态系统的连通性,为人居环境功能布局优化提供新思路,对城市湿地保护与利用具有重要意义。

## 1 理论框架

### 1.1 “人居-湿地”共生

“共生”源于 1879 年德国生物学家 Bary<sup>[30]</sup> 提出的一个生物学概念,描述不同生物体之间共同生存、协同进化或相互抑制的联系。1998 年中国学者袁纯清<sup>[31]</sup> 将“共生”概念引入经济学领域,此后该理论在国内逐渐扩展到社会学、城市规划和环境科学等多个领域<sup>[32-34]</sup>。“共生”被认为是一定共生环境下共生单元间按某种共生模式形成的关系<sup>[31,35]</sup>,用以探讨不同系统或主体之间的协同合作。“人居-湿地”共生理论源于功能湿地理念<sup>[36-37]</sup>,强调将雨洪管理、水源涵养、污水治理、中水回用以及生态景观等功能有机融合<sup>[15,38-39]</sup>,以实现湿地生态与人居环境的协同发展。尽管已有学者基于共生理论探讨了人水共生系统指标<sup>[9]</sup>、河流健康评价<sup>[40]</sup>、港城共生模式<sup>[34]</sup>以及水村聚落共生关系<sup>[41-42]</sup>等,但鲜有学者从“人居-湿地”共生视角系统阐述人居系统与湿地系统有效共生的内涵、本质特征及其内在驱动机制。该理论不仅关注水体与人类活动的相互作用,还考察湿地生态系统所提供的多重功能及其在人居环境中的生态、社会和经济效益。因此,采用这一理论框架能提供更全面的整体认知视角。

“人居-湿地”共生理论包括四个核心要素:共生单元、共生环境、共生界面和共生模式(图 1)。共生单元指人居系统与湿地系统,是构成共生关系的基本能量交换单位。共生环境则涵盖影响共生体的所有外部因

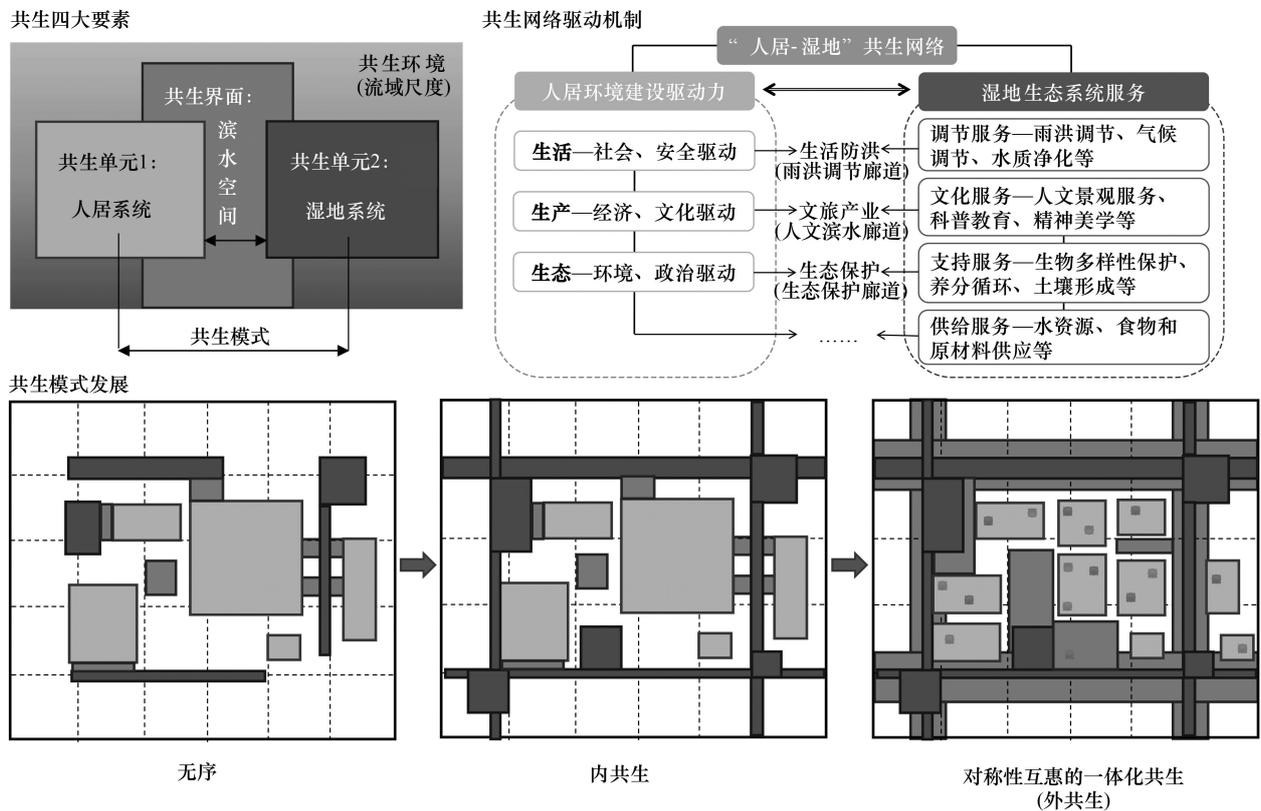


图 1 “人居-湿地”共生概念图

Fig.1 Conceptual diagram of “human settlement-wetland” symbiosis

素,主要指流域范围内的自然和人文环境,因为流域是水循环和水资源管理的基本单位<sup>[43]</sup>。共生界面是指在共生环境中,不同共生单元之间的通道,也是它们相互作用所需的媒介<sup>[44]</sup>,滨水空间即为这一界面。此外,共生模式是指共生单元间交互作用的方式,包括寄生、偏利共生、非对称性共生和对称性互惠共生等行为模式,以及点共生、间歇共生、连续共生和一体化共生等组织模式<sup>[31]</sup>。综上所述,“人居-湿地”共生旨在流域尺度上实现人居系统与湿地系统对称性互惠的一体化共生。

“人居-湿地”共生包括内共生与外共生两个层次(表 1、图 1)。内共生发生在湿地内部,外共生则在湿地与人居环境的共生系统之间形成。湿地单元之间的内共生是共生系统形成的必要条件,湿地网络的连通性是保障内共生的基础,通过湿地廊道连接湿地斑块;外共生则在湿地网络完善的基础上进一步扩展,形成湿地网络与人居环境之间更高层次的共生模式。湿地能够提升城市生态环境、减少洪涝风险和改善生活质量;与此同时,合理的人居环境规划与管理也能促进湿地的保护和恢复。传统的城市化进程往往过度强调工业化和经济增长,忽视了自然环境的承载力和生态系统服务功能。共生理论强调城市湿地与人居环境之间的动态平衡,并倡导对共生环境的主动改造。

表 1 内共生与外共生的内涵

Table 1 Connotations of endosymbiosis and exosymbiosis

| 共生层次<br>Symbiotic level | 共生单元<br>Symbiotic unit | 共生界面<br>Symbiotic interface | 共生环境<br>Symbiotic environment | 共生目标<br>Symbiotic objective | 共生关系<br>Symbiotic relationship |
|-------------------------|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 内共生<br>Endosymbiosis    | 湿地斑块                   | 湿地廊道                        | 生态基质                          | 湿地网络的连通                     | 湿地内部的植物、动物和微生物等之间的相互依存关系       |
| 外共生<br>Exosymbiosis     | 湿地系统、人居环境              | 滨水空间                        | 流域环境                          | 对称性互惠的一体化共生                 | 湿地与人居环境生活、生产和生态空间的相互依存关系       |

人居环境建设的“三生”(生活、生产、生态)驱动力与湿地生态系统的“四服务”(调节、文化、支持和供给服务)之间的共生联系,构成了“人居-湿地”共生网络的核心驱动机制(图 1)。湿地生态系统的供给服务是人居环境生活、生产和生态过程的基础,调节、文化和支持服务与这些需求形成相对应的紧密关联。人居环境对湿地发展的驱动因素复杂多样,但防洪、创造人文景观和保护生物多样性被视为最核心的因素<sup>[45]</sup>。首先,湿地通过“雨洪调节”功能为人人居环境生活提供安全保障,收集和净化雨水,减轻城市排水压力,同时充足的水量也能维持自身生态功能。其次,经济驱动的生产活动与湿地的文化服务相结合,通过“文旅产业”促进地方经济发展。湿地自然景观与人居文化资源融合,丰富的历史记忆和地域特色塑造文化认同感和归属感,实现自然与文化的共生发展。再者,湿地生态修复与人居环境的可持续发展紧密相连。健康的生态环境不仅维护湿地生态系统的稳定,保障生物多样性,还提升人居环境质量。因此,本文将生活防洪、文旅产业和生态保护作为湿地发展的关键驱动力,识别雨洪调节、人文滨水和生态湿地廊道对城市湿地管理和滨水空间开发具有引领性作用。

## 1.2 湿地网络连通

水文连通对湿地系统的维持极其重要<sup>[46-48]</sup>,湿地并非孤立的空间,而是复杂联动的生态系统。自 1980 年 Vannote 提出“河流连续体”概念以来<sup>[49]</sup>,水文连通性受到水文学、生态学和地理学等领域的关注。生态网络分析提供了一个湿地景观连通性框架<sup>[19,50]</sup>,将重要的湿地斑块作为关键节点,根据景观阻力成本生成连通关键节点的湿地廊道<sup>[43]</sup>,从而优化湿地网络。然而,相关研究仍存在不足:(1)景观阻力因素的确定及其权重赋值尚未达成共识<sup>[51-52]</sup>。一方面,景观阻力因素通常以土地利用类型、高程和坡度等为主,缺乏综合考虑景观、气候、地形和社会因素的影响;另一方面,各因素权重赋值通常采用专家打分结合层次分析<sup>[12]</sup>,主观性较强,难以保证景观阻力模拟的准确性。(2)部分研究已关注到生态源地选择中生态系统服务功能的重要性<sup>[51]</sup>,但忽略了湿地廊道与人居环境需求的匹配问题。单一功能的湿地廊道难以兼顾生活、生产和生态需求,无法发挥其复合效益<sup>[26]</sup>。(3)多数研究结果仅呈现无方向性的拓扑网络结构<sup>[12,22]</sup>,无法直接指导规划建

设。(4) 现有研究范围往往局限在行政区划层面(如省、市、区、县等)<sup>[25,53]</sup>,较少考虑流域环境对湿地水文连通性的影响。

为解决上述问题,本研究进行了多项创新探索。首先,采用 MaxEnt 模型确定基础阻力因素及其权重,避免了专家的主观偏差。该模型通过最大熵算法判断影响湿地分布的关键变量<sup>[54]</sup>,最初主要用于预测物种的潜在空间分布<sup>[55]</sup>,近年来逐渐扩展应用于各种空间适宜性研究<sup>[26,56]</sup>。其次,将防洪、文化和生态 3 项基本人居需求整合进湿地廊道识别框架,综合运用多种空间分析方法,解析湿地网络的多功能性及其复杂结构。第三,基于生态网络分析,结合水文径流分析,梳理现状水网结构,构建可实施的湿地网络。此外,通过流域和主城区划界定研究范围,保障湿地水文的完整性和系统性。总体而言,本研究提出了一个更综合、精准且易于操作的湿地廊道规划与湿地网络分析框架,为湿地生态网络的构建提供了新视角。

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 研究区概况

莆田是福建省的地级市,位于中国东南沿海。该区域人口密集、水域发达,具有河网密布、湖荡联海的水乡特色。莆田市地处亚热带季风区,年平均气温在 16—21℃ 之间,年平均降水量在 1000—2300mm 之间,其中 5—9 月雨量多、强度大,易受洪涝威胁。莆田主城区位于木兰溪流域中下游的南北洋平原,优越的地理条件不仅孕育了丰富的湿地资源,还形成了浓厚的人文底蕴,被评为国家历史文化名城。《莆田市国土空间总体规划》(2021—2035 年)提出以木兰溪水生态治理为基,推进蓝绿空间网络和特色开敞空间的建设,推动沿溪文旅产业发展,打造山水生态组团城市。为了实现这一目标,本研究以湿地网络作为空间组织手段,明确各湿地廊道功能,为规划建设提供科学参考。本研究结合木兰溪流域范围重新划定莆田主城流域研究区域,总面积为 698.55km<sup>2</sup>,其中湿地面积约 24.12 km<sup>2</sup>(图 2)。

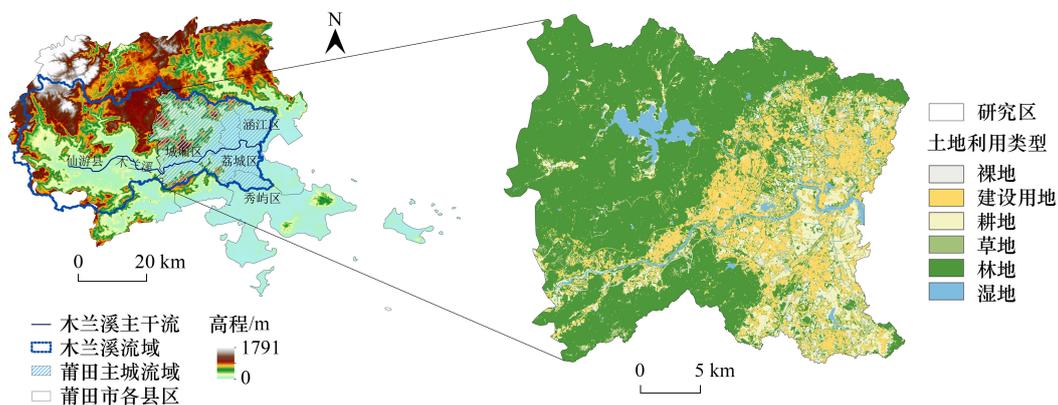


图 2 莆田主城流域区位图

Fig.2 Location of the main urban watershed in Putian

### 2.2 数据来源及处理

本研究所用数据包括 2021 年莆田主城流域的土地利用、数字高程模型、气温、降水、水系、路网、人口分布以及人文景观兴趣点(POI)等,具体来源详见表 2。主要数据处理方法如下:土地利用数据来自欧洲空间局(ESA)10m 高分辨率数据,经过重分类处理,划分为林地、草地、耕地、建成用地、湿地和裸地六类。数字高程模型采用地理空间数据云的 GDEM V3 数据。在 GIS 软件中对该数据进行填洼、流向和盆域分析,提取木兰溪流域,再叠加城厢区、荔城区、涵江区和秀屿区的行政边界,明确主城流域空间范围。此外,人文景观数据通过百度地图开放平台获取,涵盖公园、景区、寺庙、古迹和展览馆等兴趣点,并将其划分为休闲景观、历史文物和展览文化三类。所有地理空间数据均采用 WGS\_1984\_UTM\_Zone\_50N 坐标系统,并统一重采样为 10m 分辨率。

表 2 数据来源  
Table 2 Data sources

| 数据类型<br>Data type                                     | 来源<br>Source     | 分辨率<br>Resolution | 获取地址<br>Access uniform resource locator   |
|---|------------------|-------------------|---|
| 土地利用 Land use   | 欧洲空间局            | 10m               | <a href="https://worldcover2021.esa.int/">https://worldcover2021.esa.int/</a>   |
| 数字高程模型 Digital Elevation Model                        | 地理空间数据云          | 30m               | <a href="https://www.gscloud.cn/">https://www.gscloud.cn/</a>                   |
| 逐日降水数据 Daily precipitation data                       | 美国国家环境信息中心       | —                 | <a href="https://www.ncei.noaa.gov/">https://www.ncei.noaa.gov/</a>             |
| 逐月平均气温 Monthly average temperature                    | 国家青藏高原科学数据中心     | 1km               | <a href="https://data.tpdc.ac.cn/">https://data.tpdc.ac.cn/</a>                 |
| 逐月平均降水量 Monthly average precipitation                 |                  |                   |   |
| 逐月大气湿度 Monthly average atmospheric humidity           |                  |                   |   |
| 逐日土壤水分数据集 Daily soil moisture dataset                 |                  |                   |   |
| 行政边界矢量 Administrative boundary vector                 | 全国地理信息资源目录服务系统   | 1:100 万           | <a href="https://www.webmap.cn/">https://www.webmap.cn/</a>                     |
| 居民点 Settlements                                       |                  |                   |   |
| 主要水系 Major water systems                              |                  |                   |   |
| 主要道路 Major roads                                      |                  |                   |   |
| 高精度水网矢量数据<br>High-precision water network vector data | 开放街道地图           | —                 | <a href="https://www.openstreetmap.org/">https://www.openstreetmap.org/</a>     |
| 人口分布 Population distribution                          | 美国橡树岭国家实验室       | 90m               | <a href="https://landscan.ornl.gov">https://landscan.ornl.gov</a>               |
| 归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index        | 中国科学院资源与环境数据服务中心 | 10m               | <a href="http://www.resdc.cn/Default.aspx">http://www.resdc.cn/Default.aspx</a> |
| 人文景观兴趣点 Points of Interest for cultural landscapes    | 百度地图             | —                 | <a href="https://lbsyun.baidu.com/">https://lbsyun.baidu.com/</a>               |

## 2.3 方法概述

本研究提出了综合雨洪调节、文化服务和生态保护的多功能“人居-湿地”共生网络识别方法。研究过程分为四个步骤(图 3):第一步,湿地生态源识别。通过形态学空间格局分析(MSPA)和景观连通性指数识别重要湿地生态源。第二步,综合阻力面构建。利用最大熵模型(MaxEnt)分析影响湿地分布的环境因子及其权重,构建基础阻力面。随后,运用径流曲线数法(SCS-CN)分析雨洪淹没风险分布,核密度估计(KDE)分析文化景观的空间分布情况,香农多样性指数(SHDI)分析生物多样性景观格局,并将这些结果转化为功能性阻力因子,构建综合阻力面。第三步,潜在湿地廊道提取。利用最小累积阻力(MCR)模型提取各功能潜在湿地廊道;第四步,多功能湿地网络优化。通过 GIS 水文分析提取径流河网,并与潜在湿地廊道和现状水网进行叠加分析,识别和修复多功能、多层级的湿地网络。

### 2.3.1 湿地生态源识别

生态源识别是构建生态网络的基础<sup>[57]</sup>,MSPA 是识别生态源的有效方法之一。MSPA 基于数学形态的映射算法识别目标像素集与结构元素之间的空间拓扑关系<sup>[58]</sup>,并将目标元素集分为核心区、桥接区、边缘区、环道区、孔隙、支线和孤岛 7 种类型<sup>[12,59]</sup>。首先,在 GIS 软件中对土地利用数据重分类,将湿地赋值为 2,即前景,其它地类赋值为 1,即背景。然后,将该栅格图像导入 GuidosToolbox 软件,设置边缘宽度为 3 像元,即 30m,识别湿地景观类型。核心区作为前景像元中较大的湿地斑块,通常被视为生态源<sup>[12,22]</sup>。然而,过多的生态源将导致网络结构复杂,影响廊道功能识别。因此,需要进一步筛选出重要的核心区斑块。

景观连通性指数能够衡量区域内斑块的连通性水平<sup>[57]</sup>,常用于评估核心湿地斑块的重要程度。在 conefor 2.6 软件中,计算连通性指数(PC)和斑块重要性指数(dPC)。斑块 dPC 值越大表示其对景观连通性越重要<sup>[58,59]</sup>。计算公式如下:

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

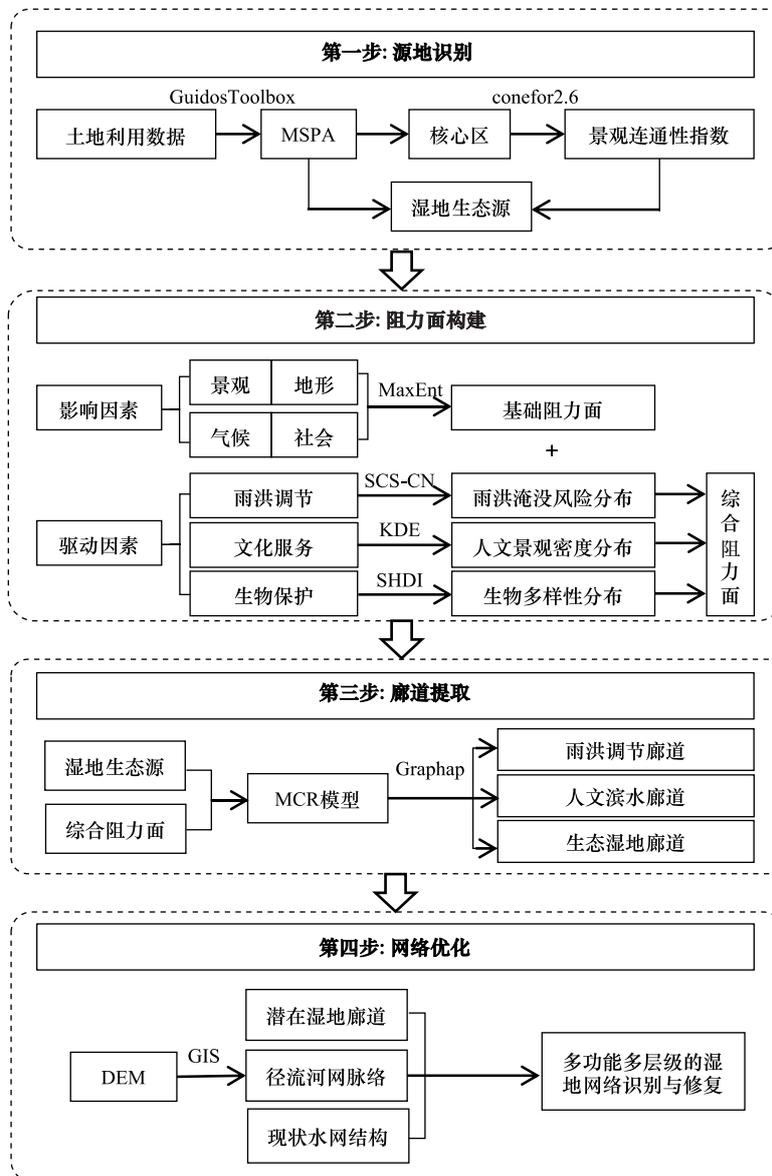


图3 “人居-湿地”共生网络研究流程

Fig.3 Research workflow of “human settlement-wetland” symbiosis network

MSPA:形态学空间格局分析 Morphological Spatial Pattern Analysis;MaxEnt:最大熵模型 Maximum Entropy Model;SCS-CN:径流曲线数法 Soil Conservation Service Curve Number Method;KDE:核密度估计 Kernel Density Estimation;SHDI:香农多样性指数 Shannon’s Diversity Index;MCR:最小累积阻力 Minimum Cumulative Resistance;DEM:数字高程模型 Digital Elevation Model;GIS:地理信息系统 Geographic Information System

$$dPC = \frac{(PC - PC_{remove})}{PC} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $n$ 为斑块的总数, $a_i, a_j$ 为斑块区域面积, $P_{ij}^*$ 为物种在斑块*i*和*j*之间扩散的最大概率, $A_L^2$ 为景观的总面积,以及 $PC_{remove}$ 为删除某斑块后的景观连接度指数。

最后,参考相关文献<sup>[12,57]</sup>以及研究区实际情况,选取面积>1 hm<sup>2</sup>且 dPC>0.05 的核心区,作为湿地生态源。

### 2.3.2 综合阻力面构建

阻力面的构建直接影响生态廊道的模拟结果<sup>[22]</sup>。本研究先基于湿地形成的影响因素构建基础阻力面,

再考虑湿地发展的驱动因素构建综合阻力面。

### (1) 基础阻力面构建

为全面地分析湿地形成的影响因素,收集了景观、气候、地形和社会共 4 方面的 12 个预测变量(表 3)。将湿地源的点数据和 12 个变量栅格数据导入 MaxEnt 软件,通过贡献率确定关键因子及其权重<sup>[54]</sup>。然后,在 GIS 软件中将所有数据归一化处理,并按权重进行地理空间数据求和,构建基础阻力面。不同以往研究的断点分级赋值法<sup>[60]</sup>,本研究以归一化进行数据的无量纲化处理,减少数据在处理过程中的损失。公式如下:

$$X_{\text{norm}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{正向因子}) \quad (3)$$

或

$$X_{\text{norm}} = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (\text{负向因子}) \quad (4)$$

式中,  $X$  为原始数据,  $X_{\min}$  和  $X_{\max}$  分别为数据集中的最小值和最大值,  $X_{\text{norm}}$  为归一化后的数据。

表 3 影响湿地分布的预测变量

Table 3 Predictor variables affecting wetland distribution

| 影响因素<br>Influencing factors | 预测变量<br>Predictive variables | 阻力面构建<br>Resistance surface construction        |
|-----------------------------|------------------------------|---|
| 景观 Landscape                | 土地利用类型                       | 按景观阻力进行赋值,即湿地=1,耕地和草地=2,林地=3,裸地=4,建设用地=5,再归一化处理 |
|                             | 与主要水系距离                      | 通过 GIS 的欧式距离处理后,再归一化处理                          |
|                             | 归一化植被指数                      | 归一化处理   |
| 气候 Climate                  | 降水                           | 逐月数据转化为年平均数据后,归一化处理                             |
|                             | 气温                           | 逐月数据转化为年平均数据后,归一化处理                             |
|                             | 大气湿度                         | 逐月数据转化为年平均数据后,归一化处理                             |
| 地形 Topography               | 高程                           | 归一化处理   |
|                             | 坡度                           | 归一化处理   |
|                             | 土壤湿度                         | 归一化处理   |
| 社会 Society                  | 人口分布                         | 归一化处理   |
|                             | 与主要道路距离                      | 通过 GIS 的欧式距离处理后,再归一化处理                          |
|                             | 与主要居民点的距离                    | 通过 GIS 的欧式距离处理后,再归一化处理                          |

### (2) 基于 SCS-CN 模型的雨洪淹没风险分析

SCS-CN 模型被广泛应用于雨洪淹没风险区的识别<sup>[29]</sup>,利用土地利用类型、降雨量、地形及土壤地质数据进行地表径流量模拟。公式如下:

$$Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + (1 - \lambda)S} \quad (5)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

式中,  $Q$  为地表径流量;  $P$  为降雨量;  $\lambda$  为初损率,取经验数值 20%;  $S$  为土壤最大滞水量;  $CN$  为地表径流系数,参照《城镇雨水系统规划设计暴雨径流计算标准》(DB11/T 969-2016)取值不同地类的径流系数。

首先,利用 ArcGIS 的水文分析模块将研究区划分为 26 个汇水区。在各汇水区范围内,按照各地类占比,采用加权平均的方法,计算综合径流系数。然后,利用 SCS-CN 模型计算各汇水区在 2021 年极端日降雨量(292.1mm)和平均日降雨量(33.5mm)的径流量和体积。最后,联合 GIS 软件的 3D 表面体积模块基于 DEM 数据获取各汇水区的高淹没风险区和一般淹没风险区的位置。

### (3) 基于 KDE 的人文景观密度分析

为分析研究区内人文景观 POI 的空间分布,采用 GIS 软件的核密度估计(KDE)分析,计算要素在邻域中

的密度,直观反映离散值在连续区域的分布情况<sup>[61,62]</sup>。核密度值越高,则该处的聚集程度越高。公式如下:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h^2} k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (7)$$

式中, $f(x)$ 为位于 $x$ 位置的核密度估计函数, $k()$ 为空间权重函数, $h$ 为衰减值,也称为带宽; $n$ 为样本量; $d_i$ 为当前点 $x$ 与样本观测点 $x_i$ 间的欧氏距离。

#### (4) 基于 SHDI 的生物多样性分析

在缺乏全面的生物多样性实地监测数据情况下,利用景观格局指数中香农多样性指数(SHDI)反映生物多样性空间格局分布成为重要手段<sup>[63-64]</sup>。SHDI 值越高,说明景观异质性越高,在一定程度上表示生物多样性越丰富<sup>[65]</sup>。利用 Fragstats 软件,将土地利用数据导入其中,设置 100m×100m 移动窗口计算全局 SHDI,获得生物多样性空间分布图。

计算公式如下:

$$\text{SHDI} = - \sum_{i=1}^m P_i \log_2 P_i \quad (8)$$

式中: $P_i$ 为土地利用类型 $i$ 占总景观的面积比, $m$ 为景观中存在的土地利用类型的数量。

基于上述研究,首先将雨洪淹没风险、人文景观密度和生物多样性的空间分布转化为各功能阻力面(表 4)。然后,综合阻力面是将基础阻力面与各功能阻力面按一定权重进行空间求和。原有景观、气候和地形等因素构建的基础阻力面是多功能湿地廊道识别的基础,其权重应略大于受环境变动和人类活动影响的各功能阻力面。因此,参考 Zhang 等<sup>[22]</sup>研究,将基础阻力面与各功能电阻面分别按 0.6 和 0.4 进行加权求和,构建各功能综合阻力面。

表 4 各功能阻力面构建

Table 4 Construction of resistance surfaces for various functions

| 各功能阻力面<br>Functional resistance surfaces | 空间数据<br>Spatial data | 阻力面构建<br>Resistance surface construction      |
|--|----------------------|---|
| 雨洪调节 Stormwater regulation               | 雨洪淹没风险分布             | 按景观阻力进行赋值,即高淹没风险区=1,一般淹没风险区=2,低淹没风险区=3,再归一化处理 |
| 文化服务 Cultural services                   | 人文景观密度分布             | 归一化处理   |
| 生态保护 Ecological conservation             | 生物多样性分布              | 归一化处理   |

### 2.3.3 功能湿地廊道提取

MCR 模型于 1992 年被提出后<sup>[66]</sup>,已成为模拟生态廊道的常用方法。该模型基于综合阻力面提取生态源之间的最小成本路径<sup>[59]</sup>。Graphab 是一款综合了 MCR 和图论的软件工具<sup>[67]</sup>,将核心湿地生态源和各综合阻力面栅格数据依次导入该软件,利用创建图谱工具,提取各功能湿地廊道。计算公式如下:

$$\text{MCR} = f_{\min} \sum_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (9)$$

式中,MCR 为从源 $j$ 到空间中网格单元的最小累积阻力值, $f$ 为最小累积阻力和生态过程的正相关系数, $D_{ij}$ 为从源 $j$ 到景观 $i$ 之间的空间距离, $R_i$ 为景观 $i$ 的阻力系数。

### 2.3.4 “人居-湿地”网络优化

生态网络构建的湿地网络仅提供潜在路径,无法直接指导工程实践。因此,结合径流河网脉络和现状水网结构优化湿地网络十分必要。首先,通过径流河网模拟确定水流方向,并进行河网分级。基于 DEM,利用 GIS 的水文分析工具提取径流河网,明晰主要湿地廊道的脉络结构<sup>[23,68]</sup>。使用 con 条件函数,分别提取流量大于 1500 和 500 的数据,作为一级河网和二级河网。然后,基于现状水网构建三级湿地网络,将湿地按空间形态划分为湿地斑块和湿地廊道,依据湿地规模和功能分为三级<sup>[38]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 现状湿地空间分布特征

研究区内湿地类型包括河流、湖泊、水库、沟渠和坑塘等,面积大小不一,分布分散。MSPA 结果显示(图 4),核心区面积最大,占湿地景观的 56.75%。边缘区次之(20.04%),30m 宽度有效排除易受干扰斑块,保障核心区稳定性。孤岛面积占比第三(10.68%),表明小斑块湿地较多,景观破碎。桥接面积占比比较少(3.08%),反映湿地连通性较低。因此,湿地形态结构有待调整,连通性需进一步提升。

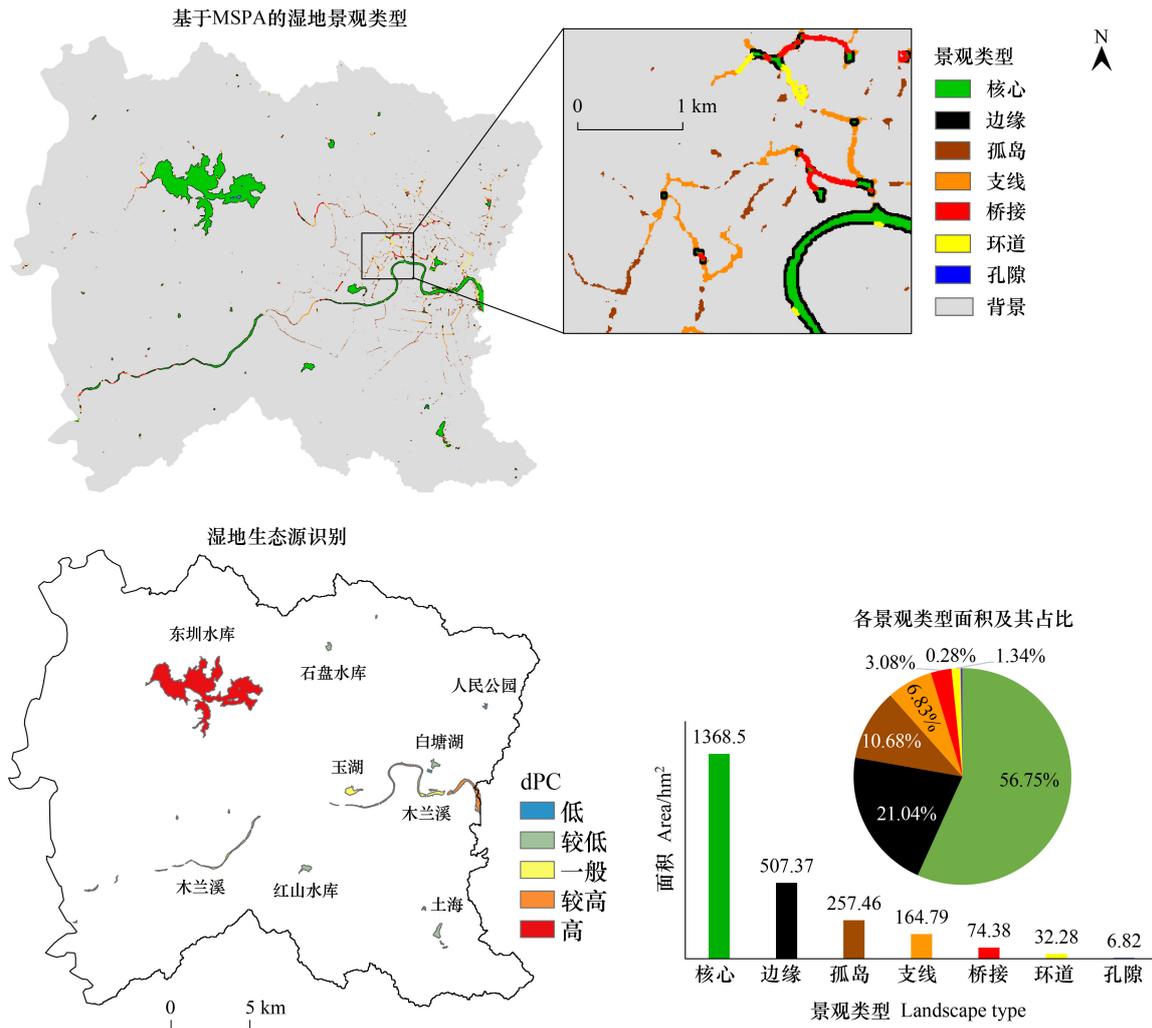


图 4 基于 MSPA 的湿地景观类型及生态源识别

Fig.4 Wetland landscape types and ecological source identification based on MSPA

MSPA: 形态学空间格局分析 Morphological Spatial Pattern Analysis 核心区指较大的生境斑块,是生态源基础;边缘区指核心区周围的像元,是生态缓冲和过渡带;孤岛指不与核心区相连的小斑块,易受外部干扰;支线指一端连接斑块的细长区域;桥接区指连接两个或多个核心区的狭窄区域,是生态网络中连接斑块的廊道;环道区指连接同一核心区的廊道,是内部物种迁徙的捷径;孔隙指被核心区或斑块包围的非湿地像元,是景观内部的空隙;dPC 指斑块重要性指数,数值越高,对景观连通性越重要

本研究选取了 32 块湿地作为生态源,这些湿地在面积、连通性和生态重要性方面存在显著差异(图 4)。东圳水库在各项指标上表现突出,面积大、连通性好、生态重要性高。木兰溪近入口海湿地具有较高的生态重要性,尤其在生物多样性保护方面发挥着关键作用。玉湖由木兰溪旧道开挖形成,虽然其面积和重要性指数

较为有限,但在区域雨洪调蓄和文化景观方面具有重要意义。其他湿地生态源如红山水库、土海湿地和白塘湖等,虽连通性和重要性较低,但对湿地网络的稳定性和韧性不可或缺。总体而言,各湿地生态源在维持景观连通性和支持多项功能方面发挥着重要作用。

### 3.2 基于多重环境因素的综合阻力面

#### 3.2.1 湿地形成的影响因素

通过 MaxEnt 模型计算 12 个预测变量对湿地形成的影响程度,排除了 NDVI、大气湿度、土壤湿度和与居民点的距离 4 个影响较小的变量,重新进行了迭代分析。从响应曲线来看(图 5),湿地形成的关键区域集中在以下范围:土地利用类型为 1—2(即湿地、草地和耕地)、与主要水系距离为 0—1000m、年平均降水量为 1050—1250mm、年平均气温为 20.5—22.5℃、高程为 0—200m、坡度为 0—30°、人口密度为 0—200 人/km<sup>2</sup>、与主要道路距离约 500m。其中,土地利用类型、与主要水系距离、降水、高程、坡度和人口密度为正向阻力因子,即这些环境变量的升高会增加湿地形成的阻力;而气温为负向阻力因子。与主要道路距离在 0—500m 内为负向阻力因子,超过 500m 则转为正向。从贡献率和重要性来看(表 5),景观因素中,土地利用类型对湿地分布的贡献率最大(86.9%),与主要水系距离的贡献率为 1.8%。气候因素中,降水和气温的贡献较高,分别为 4.2.%和 2.1%。地形因素中,高程和坡度的贡献率较均衡(1.8%—2.3%)。社会因素对湿地形成的影响最小,人口分布、与主要道路距离的贡献率和重要性均不足 1%。

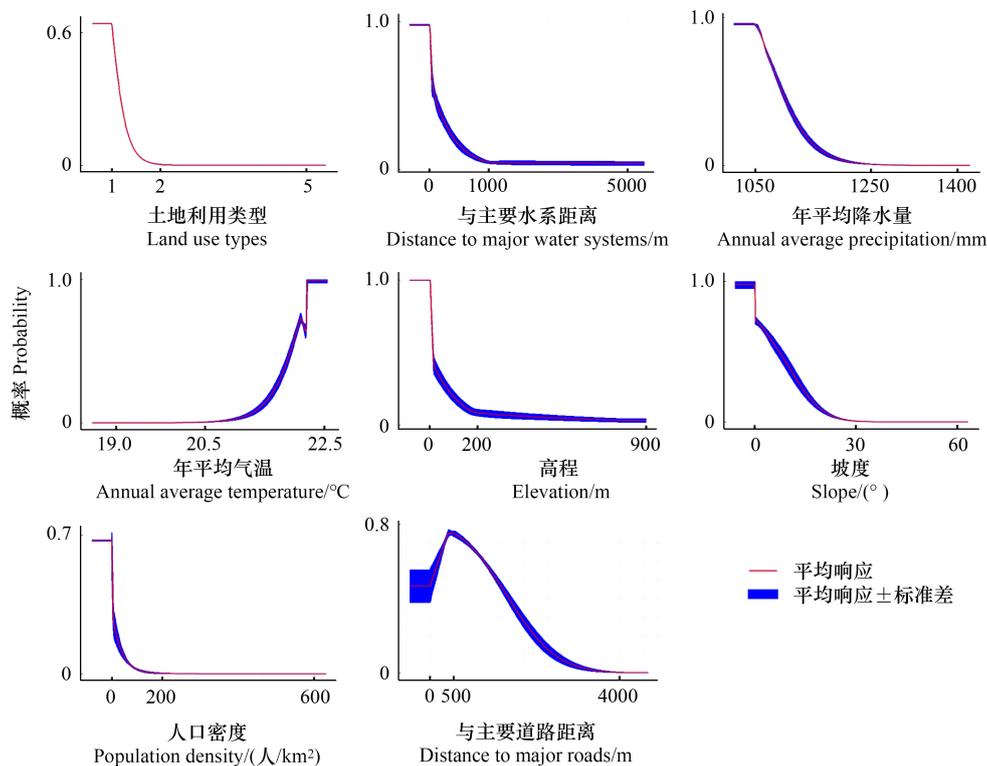


图 5 响应曲线

Fig.5 Response curves

通过 MaxEnt 模型迭代 10 次,输出的平均值作为结果,平均检验 AUC 为 0.989(接近 1),表明该模型计算结果可靠;响应曲线反映了湿地形成概率与 8 个影响因子环境变量之间的关系

#### 3.2.2 湿地发展的驱动因素

湿地发展的关键驱动因素包括防洪、创造人文景观和保护生物多样性<sup>[45]</sup>,因此分析雨洪淹没风险分布、人文景观密度分布和生物多样性分布对“人居-湿地”共生网络构建至关重要(图 6)。首先,淹没风险区主要

集中在各汇水区的低洼地带,一般风险区从高风险区域向外扩展,主要位于东圳水库及木兰溪下游的建设用地和耕地。林地因其较强的水分渗透能力,有效吸收和储存雨水,因此淹没风险相对较低。其次,人文景观的高密度区主要集中在城厢区和荔城区交汇的老城中心,形成文化密度最大的区域,涵江区也形成另一个文化密度较高的区域,它们都靠近木兰溪主干流。根据 POI 数据统计,研究区内有 58 处休闲景观、120 处历史文物和 100 处展览文化场所。尽管这些景观分布较为分散,但许多重要文化景观均位于湿地周边,如木兰陂世界灌溉工程遗址、广化寺、囊山寺、市图书馆和博物馆等。最后,生物多样性主要分布在景观格局变化丰富的区域,尤其是水陆交接地带。湿地与草地、耕地及建设用地等不同景观的交替变化为物种提供了丰富的栖息空间。整体来看,生物多样性高值区域主要集中在木兰溪下游的河网密布区。

表 5 影响因素的贡献率和重要性

Table 5 Contribution rates and importance of influencing factors

| 影响因素<br>Influencing factors | 影响因子<br>Impact factors | 贡献率/%<br>Percent contribution | 重要性/%<br>Permutation importance |
|-----------------------------|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 景观 Landscape                | 土地利用类型                 | 86.9                          | 94.5                            |
|                             | 与主要水系距离                | 1.8                           | 0.1                             |
| 气候 Climate                  | 降水                     | 4.2                           | 0.2                             |
|                             | 气温                     | 2.1                           | 2.3                             |
| 地形 Topography               | 高程                     | 2.3                           | 1.3                             |
|                             | 坡度                     | 1.8                           | 1.2                             |
| 社会 Society                  | 人口分布                   | 0.5                           | 0.3                             |
|                             | 与主要道路距离                | 0.3                           | 0.1                             |

贡献率越高,表示对模拟位点拟合结果的贡献越大;重要性越大,说明位点采集到的环境变量比例越大

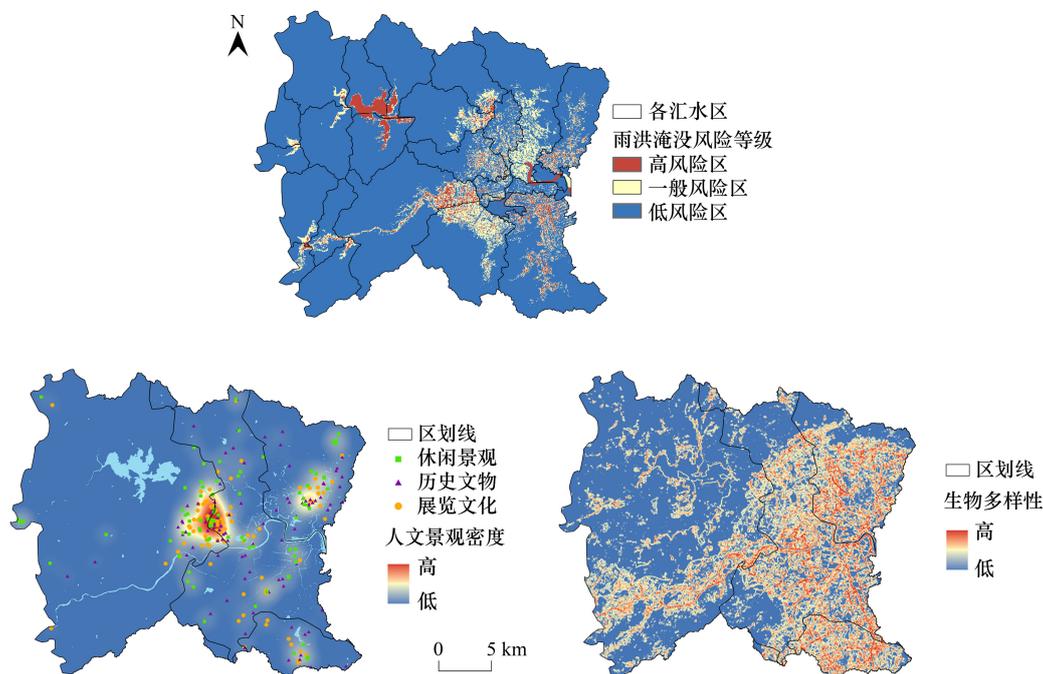


图 6 驱动因素的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of driving factors

### 3.2.3 各阻力面特征

根据不同驱动因素的特点,阻力面呈现出不同的分布特征(图 7)。基础阻力面的低值主要分布在湿地和

耕地区域。雨洪调节阻力面的低值集中在湿地及其周边区域,分布较为集中。文化服务阻力面的低值分布除湿地区域外,部分建成区也形成低值区。最后,生态保护功能阻力面的低值区分布较广,除湿地和耕地外,还沿水陆交接地带向外延展。

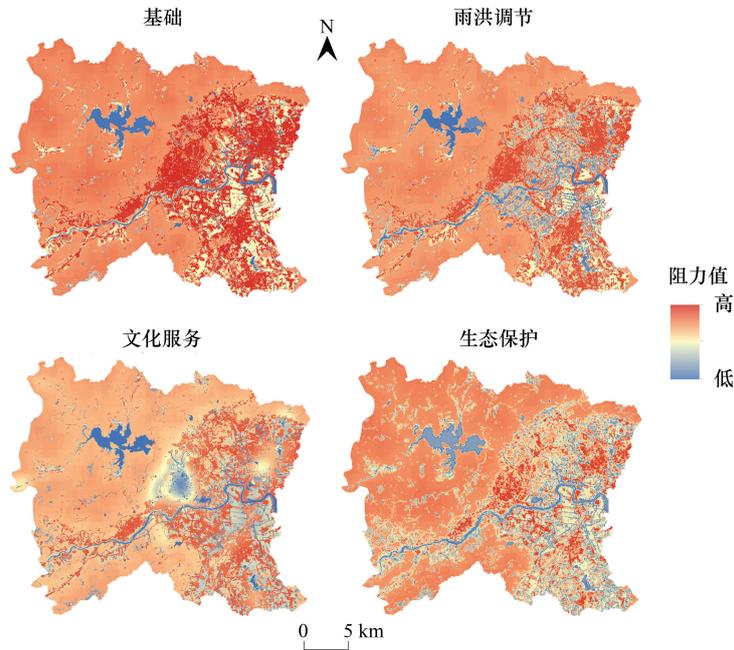


图 7 基础阻力面和综合阻力面

Fig.7 Basic resistance surface and integrated resistance surface

### 3.3 各功能潜在湿地廊道

基于湿地生态源和功能综合阻力面,利用 MCR 模型提取了各功能潜在湿地廊道(图 8)。从空间形态看,三种功能廊道走向大体一致,均形成由外围湿地斑块连接的外圈湿地网,并呈纵向汇集到木兰溪干流湿地,但具体路径各有不同。从数量和长度看,人文滨水廊道>生态湿地廊道>雨洪调节廊道。虽然雨洪调节和生态湿地廊道数量较少,但横向连通性较强。从复合功能看,三种功能复合廊道有 30 条,长度占比 56%,是湿

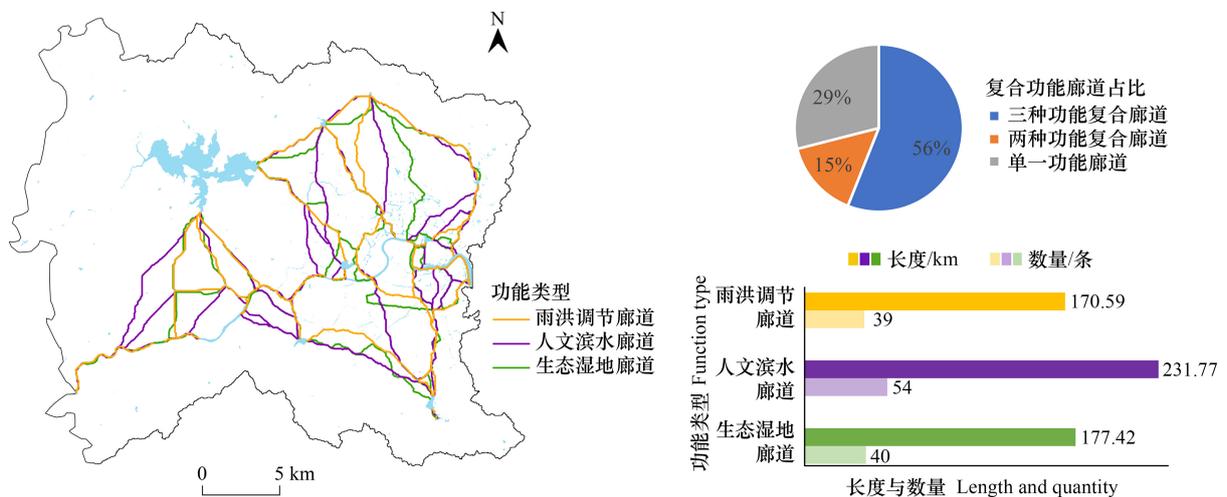


图 8 各功能湿地廊道分析图

Fig.8 Analysis of functional wetland corridors

地生态网络修复的优先区域;两种功能复合廊道 12 条,占比 15%;单一功能廊道 19 条,占比 29%。

### 3.4 “人居-湿地”共生网络

结合径流河网和现状湿地对潜在功能廊道进行修正(图 9)。对比分析显示,三者存在显著差异。潜在湿地廊道基于湿地生态源之间的生物迁移路径,横向联系丰富,形成外围联系网络。径流河网从山地水源发源,沿高程地势汇入干流河道,最终流向出海口,具有明显的方向性和等级性。现状水网则更加密集且无序,因此需要梳理和分析其结构,才能提出有效的湿地网络修复策略。

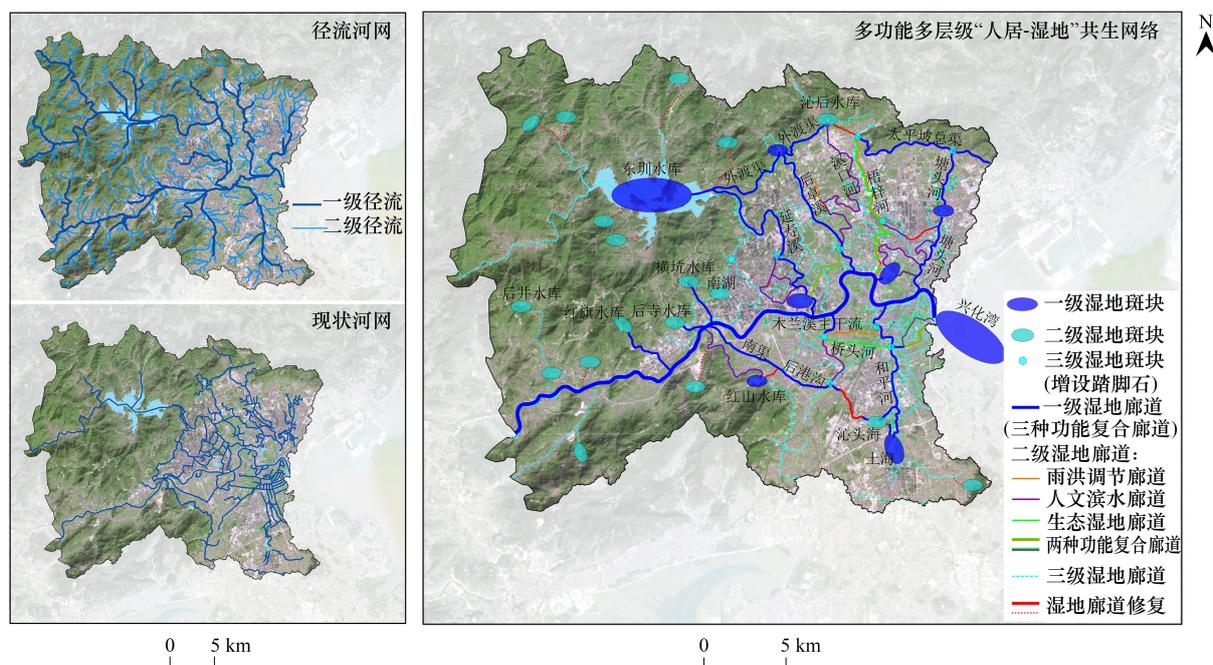


图 9 “人居-湿地”共生网络

Fig.9 “Human settlement-wetland” symbiotic network

“人居-湿地”共生网络由多功能、多层级的湿地斑块和湿地廊道构成,本研究区形成三级湿地网络结构。

(1) 湿地斑块的面积对生态系统的完整性和功能性具有重要影响(表 6)。根据福建省《重要湿地认定指标》(DB35/T1997—2021),一级湿地斑块( $\geq 8\text{hm}^2$ )<sup>[69]</sup>能够维持完整的生态系统,支持从水禽到微生物的多样性。研究区内共有 7 个一级湿地斑块,按面积依次为:东圳水库、玉湖、土海、白塘湖、红山水库、石盘水库和人民公园。此外,研究区外的兴化湾,位于木兰溪入海口,亦是一个重要的一级湿地斑块,有效保障了研究区生态网络的完整性。二级湿地斑块( $1-8\text{hm}^2$ )<sup>[38]</sup>虽然面积较小,但仍能提供一定的生态功能和栖息地,适合小型物种。研究区内共有 18 个二级湿地斑块,包括:红旗水库、后寺水库、后井水库、南湖、沁后水库和沁头海等。三级湿地斑块( $<1\text{hm}^2$ )生态功能有限,易受外部环境影响,包含除一、二级湿地斑块外的其他小型湿地斑块。研究区内可在河网交叉口处增设 10 个三级湿地斑块,作为湿地网络中的踏脚石。

(2) 湿地廊道的功能多样性在等级划分中起着关键作用(表 7)。一级湿地廊道由三种复合功能的湿地廊道构成,研究区内形成“三纵三横”的湿地水网结构。“三纵”包括延寿溪、后卓溪-和平河、塘头河;“三横”则是外渡渠-太平坡总渠、木兰溪干流、南渠-后港沟。为了保障一级湿地网络的连通性和稳定性,需重点修复沁后水库到太平坡总渠、红山水库到南渠、沁头海到后港沟这三段湿地廊道。二级湿地廊道由两种功能或单一功能的湿地廊道组成。其中,溪口河、洋埕河、护城河、东圳渠道等以打造人文滨水景观为主,梧梓河、桥头河等应重点关注雨洪调节和生物多样性保护。两种功能复合廊道主要是在人文滨水或雨洪调节的基础上结合生物多样性保护。修复重点在于梧梓河与塘头河的横向人文滨水廊道,以及一些局部湿地廊道断点。三

级湿地廊道则是除一、二级湿地廊道外的其他现有河道,这些河道宽度较小,廊道等级较低。

表 6 湿地斑块分级表

Table 6 Classification of wetland patches

| 等级<br>Grade                       | 划分标准<br>Classification criteria       | 生态功能<br>Ecological functions    | 数量<br>Quantity   | 空间分布特征<br>Spatial distribution characteristics |
|-----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------|--|
| 一级湿地斑块<br>Grade 1 wetland patches | 面积 $\geq 8\text{hm}^2$ 的湿地斑块          | 维持完整的生态系统,支持从水禽到微生物的多样性。        | 共 8 个(含研究区外的兴化湾) | 较均衡地分布在流域下游区域,保持了一定的空间间隔,具有独立性和稳定性。            |
| 二级湿地斑块<br>Grade 2 wetland patches | 面积为 $\geq 1$ 且 $< 8\text{hm}^2$ 的湿地斑块 | 提供一定的生态功能和栖息地,适合小型物种及其生态过程。     | 18 个             | 相对分散但又有所集中的分布格局,16 个分布在主城流域上游山区,2 个位于下游区域。     |
| 三级湿地斑块<br>Grade 3 wetland patches | 面积 $< 1\text{hm}^2$ 的湿地斑块             | 通常支持特定物种,生态功能有限,且容易受到外部环境变化的影响。 | 增设 10 个          | 除现状斑块外,可在河网交叉口处增设                              |

表 7 湿地廊道分级表

Table 7 Classification of wetland corridors

| 等级<br>Grade                         | 划分标准<br>Classification criteria | 廊道宽度<br>Corridor width | 数量<br>Quantity | 廊道特征<br>Corridor characteristics   | 网络修复<br>Network restoration              |
|-------------------------------------|---------------------------------|------------------------|----------------|--|--|
| 一级湿地廊道<br>Grade 1 wetland corridors | 主要由 3 种复合功能的湿地廊道组成。             | $\geq 30\text{m}$      | 10 条           | 研究区内形成“三纵三横”的空间湿地水网结构。其中,“三纵”包括延寿溪、后卓溪-和平河、塘头河;“三横”主要有外渡渠-太平坡总渠、木兰溪干流、南渠-后港沟等。 | 重点修复沁后水库到太平坡总渠、红山水库到南渠、沁头海到后港沟这 3 段湿地廊道。 |
| 二级湿地廊道<br>Grade 2 wetland corridors | 主要由 2 种功能或单一功能的湿地廊道组成。          | $\geq 15\text{m}$      | 15 条           | 溪口河、洋埕河、护城河、东圳渠道等以打造人文滨水景观为主,梧梓河、桥头河等应注重雨洪调节和生物多样性保护。                          | 修复重点在于梧梓河与塘头河的横向人文滨水廊道,以及一些局部湿地廊道断点。     |
| 三级湿地廊道<br>Grade 3 wetland corridors | 包括除一、二级湿地廊道外的其他现状河道。            | $\geq 3\text{m}$       | 增设 6 条         | 除一、二级湿地廊道外的其他现有河道。   | 增设 6 条廊道,将二级斑块与就近水系连接。                   |

湿地廊道宽度为 15—30m 有利于保护哺乳、爬行和两栖类动物<sup>[70-71]</sup>,而宽度小于 3m 的水面难以发挥有效的生态廊道功能<sup>[38]</sup>

## 4 讨论

### 4.1 “人居-湿地”共生网络的优势

本研究提出了基于“人居-湿地”共生理论的多功能湿地网络识别框架,具有显著优势。从景观生态学角度来看,该框架增强了生态连通性,强调人居环境与湿地的互动,促进生态通道设计,改善生物迁移和基因流动。同时,共生网络提升了生态服务功能,更全面满足城市居民的“三生”需求,强调湿地在调节水循环、支持生物多样性和提供文化价值等方面的作用。此外,通过多层次、多功能的设计,增强了湿地生态系统的结构复杂性和功能多样性,提高了其应对环境变化和人为干扰的适应性和恢复力。从数据驱动和政策支持角度来看,基于开放数据的识别方法能够在较大范围内快速识别和评估湿地网络,减少传统勘查的资源消耗;同时,“人居-湿地”共生理念与中国当前推行的“四水四定”“海绵城市”“城市双修”等政策高度契合,为政策实施提供了理论支撑和实践手段。

### 4.2 “人居-湿地”共生网络的环境因素分析

本研究探讨了多重环境因素对湿地网络建设的影响。通过 MaxEnt 模型分析,土地利用类型是影响湿地

分布的最显著因素<sup>[57,59]</sup>,现有湿地、草地和耕地景观是湿地网络修复和重构的基础。与绿地生态网络构建将 NDVI 作为重要因素不同<sup>[12,48]</sup>,NDVI 对湿地形成的正反向作用难以界定,NDVI 值较高的森林与较低的建成区都不易形成湿地。此外,气温和降水作为重要气候因素被纳入考量,其中降水的影响超过地形因素,仅次于土地利用类型,且降水少、气温高的地区更易形成湿地,这可能因为高降水区通常位于植被密集的山区,而高气温区则多为河网密布的平原地区。值得注意的是,与主要道路距离约 500m 时,湿地形成概率最大,且正负影响在此处转折。这一发现不同于以往研究主观认为距离主要道路越近阻力值就越大<sup>[27,59,72]</sup>。原因在于一些道路沿水系或环湖修建,如木兰大道、玉湖路、涵黄大道等滨水大道的开发。各功能阻力面的构建通过 SCS-CN 的雨洪淹没分析、人文景观核密度分析、浓香多样性指数分析,将人居环境需求和资源转化为空间分布数据参与综合阻力面构建。特别是浓香多样性指数能识别水陆交接地带,可作为改进湿地生态网络构建的重要指标<sup>[68]</sup>。从结果来看,潜在廊道的数量和长度依次为:人文滨水廊道>生态湿地廊道>雨洪调节廊道,这与多功能绿地生态网络的研究结果相符<sup>[72]</sup>,表明该方法和结论具有较强的可靠性和普适性。

### 4.3 “人居-湿地”网络的共生策略

为了实现更高层次的“人居-湿地”外共生,需要从土地利用结构优化的角度出发,结合湿地廊道的主导功能,科学规划滨水空间。遵循生态优先、合理利用和可持续发展的原则,借鉴国内外成功案例,实现湿地与城市发展的和谐共生(图 10)。

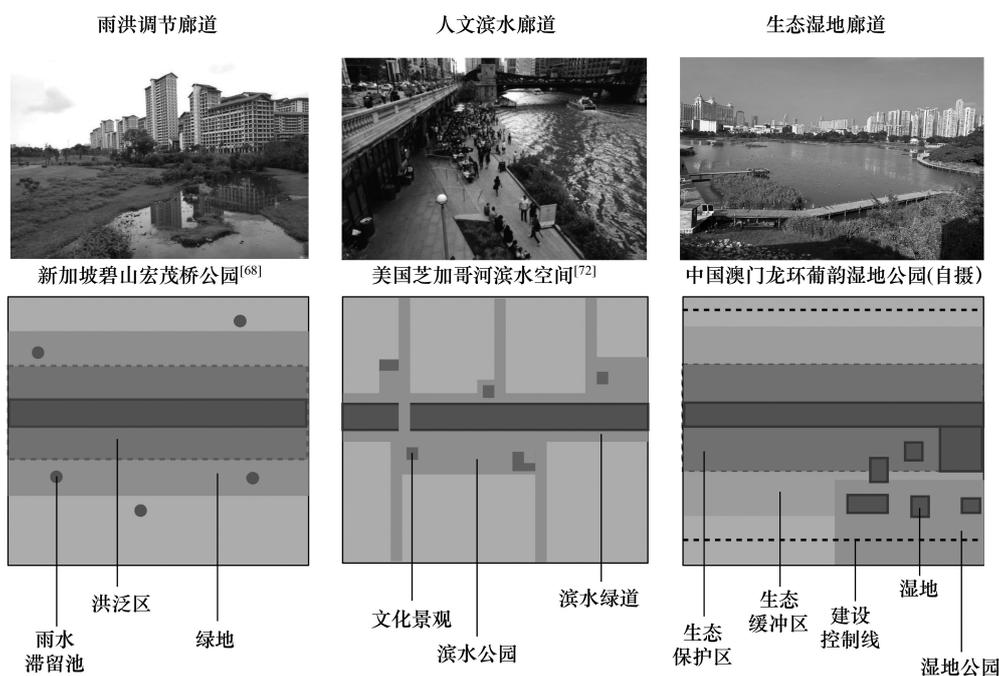


图 10 多功能湿地廊道策略

Fig.10 Strategies for multifunctional wetland corridors

(1) 在雨洪调节廊道,设置一定的洪泛区,还水以空间,实施雨水管理措施,增设雨水滞留池。如荷兰“还地于河”的治水理念<sup>[73]</sup>,新加坡加冷河的“水涨人退,水退人进”的空间互动<sup>[74]</sup>,都是将硬质堤坝或沟渠通过湿地生态恢复改为绿色河流廊道。同时,中国的海绵城市、美国的低影响开发(LID)、英国的可持续发展排水系统(SUDS)、澳大利亚的水敏感性城市设计(WSUD)、新加坡的“活力-美丽-干净”(ABC)全民共享水计划等,都是转变传统功能单一的排水方式,结合城市景观,创建生态可持续滨水空间的有效途径<sup>[75-76]</sup>。

(2) 在人文滨水廊道,设置滨水绿道,串联文化景观,沿线合理布置基础服务设施,并在重要文化资源点扩展公共开放空间(滨水公园、广场等)。如韩国的清溪川、美国的芝加哥河,建立连续的滨河步道系统,塑造

不同主题的线性公园,河流链接城市文化景观,以及举办节庆活动促进河流的综合利用<sup>[77-79]</sup>。同时,近年来国内也重视滨水文化景观的规划,如广东省“万里碧道”水岸规划、浙江省嘉兴市“九水连心”景观系统规划等,将水域治理的范围从传统的河道扩大到滨水区域以及更广阔的城市内部,打造以水为廊道的公园群落<sup>[80]</sup>。

(3)在生态湿地廊道,设置生态保护区、生态缓冲区和建设控制线等,以最小干预原则保护物种多样性。生态缓冲区是湿地核心保护区与人居环境的过渡带,既是湿地扩展的资源储备地<sup>[81]</sup>,又可进行适度的低影响利用,如湿地公园的建设。厦门五缘湾湿地公园、澳门龙环葡韵湿地公园等都是在城市中的湿地公园,既保护了湿地动植物,又满足了城市居民“亲生命性”的精神需求<sup>[82-83]</sup>。

在莆田主城流域,复合功能湿地廊道多于单一功能廊道,其建设需要综合考虑多方面需求,上述策略可以根据实际情况进行整合。木兰溪经历了“水患之河、安全之河、生态之河、发展之河”的历史演进<sup>[84]</sup>。防洪功能是木兰溪的首要任务,需要明确洪水防护等级和保护范围,建设智能化监测预警系统,合理设计滞洪区和排水系统。生态保护是木兰溪发展的基础,需划定不同的生态功能区,如保护区、缓冲区、景观区等;建设生态过滤带和湿地净化带,减少污染物流入木兰溪水网;实施岸线生态修复,提升水体的自净能力和生物多样性;适度开发湿地公园,开展生态湿地科普教育。文化建设是推动木兰溪发展的创新路径,应规划滨水文化空间(如滨水公园、绿道和展览馆等),挖掘湿地沿岸的历史文化遗址和传统村落(如木兰陂遗址、黄头古码头和八卦村等),促进生态文化旅游,打造木兰溪文创产品,举办水文化民俗活动,以木兰溪为文化名片,塑造地方品牌与形象。

#### 4.4 局限性和未来方向

本研究存在一定的局限性。“人居-湿地”共生网络的功能识别仅聚焦于雨洪调节、文化服务和生态保护3项基本功能,未能全面反映其多功能性。未来可扩展功能识别范围,考虑供水廊道、水质净化廊道和气候调节廊道等。此外,未来还可利用元胞自动机(CA)模型研究土地利用变化及其多情景模拟预测,从而探索人居环境与湿地空间的动态协调机制。

## 5 结论

本文基于共生理论,以莆田主城流域为研究区域,探讨“人居-湿地”共生关系,分析湿地形成与发展的环境因素,提取雨洪调节、人文滨水和生态湿地廊道,指导滨水空间规划。首先,本研究构建了“人居-湿地”共生理论框架,强调湿地生态与人类居住环境的双向共生关系。通过分析湿地的生态网络修复与土地利用结构优化,提出“内共生”与“外共生”的协同发展模式,以实现人居环境中生活、生产、生态的需要端与湿地生态系统服务的供给端之间的功能匹配。其次,研究揭示了湿地形成与发展的主要环境因素。湿地的形成受到景观、气候、地形等因素的综合作用,其中土地利用类型对湿地形成具有主导影响。湿地的发展还与防洪需求、人文景观开发及生物多样性保护密切相关。此外,在湿地功能廊道方面,人文滨水廊道在长度和数量上居多,生态湿地廊道和雨洪调节廊道次之。复合功能廊道展现出较强的优势,表明了湿地功能在空间布局上的高效复合。进一步地,研究揭示了莆田主城流域的三级湿地网络结构,其中一级湿地网络形成了“三纵三横”的空间格局,增强了湿地网络的连通性和生态服务能力。最后,本研究提出了滨水空间优化策略,包括雨洪调节廊道设置洪泛区与雨水滞留池,人文滨水廊道建设滨水绿道与开发文化景观,以及生态湿地廊道建立生态保护区、缓冲区和景观区等。本研究为湿地资源利用和人居环境优化提供了理论支持和实践路径。

#### 参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国湿地保护法. (2021-12-24) [2024-05-11]. [https://www.gov.cn/xinwen/2021-12/25/content\\_5664475.htm](https://www.gov.cn/xinwen/2021-12/25/content_5664475.htm).
- [2] Morganti M, Manica M, Bogliani G, Gustin M, Luoni F, Trotti P, Perin V, Brambilla M. Multi-species habitat models highlight the key importance of flooded reedbeds for inland wetland birds: implications for management and conservation. *Avian Research*, 2019, 10: 15.

- [ 3 ] Zedler J B, Kercher S. WETLAND RESOURCES: status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 2005, 30: 39-74.
- [ 4 ] Spieles D J. Wetland construction, restoration, and integration; a comparative review. *Land*, 2022, 11(4): 554.
- [ 5 ] Alikhani S, Nummi P, Ojala A. Urban wetlands; a review on ecological and cultural values. *Water*, 2021, 13(22): 3301.
- [ 6 ] Darrah S E, Shennan-Farpón Y, Loh J, Davidson N C, Finlayson C M, Gardner R C, Walpole M J. Improvements to the Wetland Extent Trends (WET) index as a tool for monitoring natural and human-made wetlands. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 294-298.
- [ 7 ] Den Hartog H. Engineering an ecological civilization along Shanghai's main waterfront and coastline; evaluating ongoing efforts to construct an urban eco-network. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 639739.
- [ 8 ] 邓伟. 关注湿地, 善待湿地. *知识就是力量*, 2019(2): 14-15.
- [ 9 ] Qin X, Zuo Q T, Wu Q S, Ma J X. Novel framework for exploring human-water symbiosis relationship: analysis, quantification, discrimination, and attribution. *Water*, 2024, 16(19): 2829.
- [ 10 ] 王世福, 邓昭华. “城水耦合”与规划设计方法. 广州: 华南理工大学出版社, 2021.
- [ 11 ] Xu X B, Chen M K, Yang G S, Jiang B, Zhang J. Wetland ecosystem services research; a critical review. *Global Ecology and Conservation*, 2020, 22: e01027.
- [ 12 ] Ma J, Yu Q, Wang H Y, Yang L Z, Wang R R, Fang M Z. Construction and optimization of wetland landscape ecological network in Dongying city, China. *Land*, 2022, 11(8): 1226.
- [ 13 ] Fang X N, Li J W, Ma Q. Integrating green infrastructure, ecosystem services and nature-based solutions for urban sustainability: a comprehensive literature review. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 98: 104843.
- [ 14 ] 张翼然, 周德民, 刘苗. 中国内陆湿地生态系统服务价值评估——以 71 个湿地案例点为数据源. *生态学报*, 2015, 35(13): 4279-4286.
- [ 15 ] Zhang X Y, Liu G, Zheng Z. Construction of an ecological security pattern based on functional wetland theory: a case study in a landscape city. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 955230.
- [ 16 ] Bertassello L E, Aubeneau A F, Botter G, Jawitz J W, Rao P C. Emergent dispersal networks in dynamic wetlandscapes. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14696.
- [ 17 ] Wu L, Zhang M, Xie X H, Lv J N, Zhou X, Shen N. Effect of wetland hydrological connectivity on runoff based on a basin comparison. *Journal of Hydrology*, 2023, 619: 129348.
- [ 18 ] Farina A. Principles and methods in landscape ecology: an agenda for the second millennium//Principles and Methods in Landscape Ecology. Cham: Springer International Publishing, 2022: 1-42.
- [ 19 ] Cui B S, Zhang Z M, Lei X X. Implementation of diversified ecological networks to strengthen wetland conservation. *CLEAN-Soil, Air, Water*, 2012, 40(10): 1015-1026.
- [ 20 ] Liu C L, Li W L, Xu J, Zhou H K, Li C H, Wang W Y. Global trends and characteristics of ecological security research in the early 21st century: a literature review and bibliometric analysis. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108734.
- [ 21 ] Biondi E, Casavecchia S, Pesaresi S, Zivkovic L. Natura 2000 and the pan-European ecological network: a new methodology for data integration. *Biodiversity and Conservation*, 2012, 21(7): 1741-1754.
- [ 22 ] Zhang Y, Tian N X, Chen A J, Qiu J X, He C G, Cao Y H. Identification of a wetland ecological network for urban heat island effect mitigation in Changchun, China. *Ecological Indicators*, 2023, 150: 110248.
- [ 23 ] Singh P, Gupta A, Singh M. Hydrological inferences from watershed analysis for water resource management using remote sensing and GIS techniques. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2014, 17(2): 111-121.
- [ 24 ] 黄慧明, 龙闹, 李晓晖, 吴婕. 国土空间规划背景下广州城市湿地生态修复策略研究. *规划师*, 2020, 36(17): 20-25.
- [ 25 ] 何建华, 潘越, 刘殿锋. 生态网络视角下武汉市湿地生态格局分析. *生态学报*, 2020, 40(11): 3590-3601.
- [ 26 ] Liang Q F, Zhai J, Li C. From separation to incorporation: Development of a unifying framework that integrated bird habitats with public recreation spaces within the wetland park system. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 430: 139647.
- [ 27 ] 黄雪飞, 吴次芳, 游和远, 肖武, 钟水清. 基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建. *农业工程学报*, 2019, 35(10): 243-251.
- [ 28 ] Kaur R, Gupta K. Blue-Green Infrastructure (BGI) network in urban areas for sustainable storm water management: a geospatial approach. *City and Environment Interactions*, 2022, 16: 100087.
- [ 29 ] 朱莹莹, 陈耀, 马玉红, 徐恩凯, 张淑梅, 张艺鸽, 田国行. 洪涝风险胁迫下登封市蓝绿基础设施网络构建研究. *中国农业大学学报*, 2023, 28(5): 175-188.
- [ 30 ] de Bary A. Die Erscheinung der Symbiose; Vortrag. Berlin; De Gruyter, 1879.
- [ 31 ] 袁纯清. 共生理论: 兼论小型经济. 北京: 经济科学出版社, 1998.
- [ 32 ] Jansen M, Hein C. Port city symbiosis: introduction to the special issue. *Maritime Economics & Logistics*, 2023, 25(2): 211-229.

- [33] Sun Y F, Wang N L. An evaluation framework for industrial ecology based on the symbiosis theory-Taking the  $\pi$ -shaped Curve Area in the Yellow River of China as an example. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110468.
- [34] Deng Z, Li Z F, Duan W. Research on the symbiosis of port and city based on symbiosis theory: empirical evidence from China's coastal port groups. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 2023, 16(1/2): 210.
- [35] Hua E, Han X, Bai Y W, Engel B A, Li X, Sun S K, Wang Y B. Synergy of water use in water-energy-food nexus from a symbiosis perspective: a case study in China. *Energy*, 2023, 283: 129164.
- [36] 郑志, 刘焯. 湿地与南方高校校园功能一体化探索——华侨大学厦门校区生态规划. *建筑学报*, 2010(10): 80-84.
- [37] 刘焯, 郑志. 在地行走——基于功能湿地理念的校园规划. *新建筑*, 2014(1): 36-39.
- [38] 郑志, 杜辰蛟, 尹正, 刘焯. 功能湿地建构下的海湾城市居住区规划研究——以厦门杏林湾流域居住区生态优化方案为例. *建筑学报*, 2020(8): 72-77.
- [39] 郑剑艺, 李炯, 刘焯, 费迎庆. 基于功能湿地填海模式的澳门内港滨水地区城市更新. *中国园林*, 2018, 34(7): 91-97.
- [40] Xiong P R, Zhu J W, He R, Li H C. Synergy assessment of river health values from a symbiotic perspective: a case study of the Yellow River Basin in China. *Water*, 2024, 16(1): 91.
- [41] 李嘉豪, 王世福, 陈慕婷, 何灏宇. “共生”视阈下线型水乡有机更新意图传导方法研究——以南沙“大稳-天益”水乡更新实践为例. *南方建筑*, 2023(9): 1-11.
- [42] 王永帅, 张中华. 人水共生理念下传统窑洞聚落景观观水智慧研究——以陕北地区为例. *中国园林*, 2024, 40(3): 82-88.
- [43] Meng B, Liu J L, Bao K, Sun B. Methodologies and management framework for restoration of wetland hydrologic connectivity: a synthesis. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2020, 16(4): 438-451.
- [44] 唐双, 王峰, 叶红, 卢新潮. 共生理论视角下的广州市乡村群发展策略. *规划师*, 2024, 40(4): 55-63.
- [45] Andrews C, Russo A. Exploring the driving factors that influence the design, function, and use of urban wetlands in the United Kingdom. *Wetlands*, 2022, 42(7): 93.
- [46] Chen K X, Cong P F, Qu L M, Liang S X, Sun Z C, Han J B. Identifying changes in the hydrological connectivity and their drivers in the Liaohe Delta wetland. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 242: 106733.
- [47] Mao X F, Cui L J. Reflecting the importance of wetland hydrologic connectedness: a network perspective. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1315-1326.
- [48] Qu Y, Zeng X Y, Luo C Y, Zhang H Q, Liu Y N, Wang J F. Constructing wetland ecological corridor system based on hydrological connectivity with the goal of improving regional biodiversity. *Journal of Environmental Management*, 2024, 368: 122074.
- [49] Vannote R L, Minshall G W, Cummins K W, Sedell J R, Cushing C E. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1980, 37(1): 130-137.
- [50] Wei C X, Wang X, Cai J Y, Liao Z M, Li C H, Liu Q. A new framework combining hydrological connectivity metrics and morphological spatial pattern analysis for the hydrological connectivity evaluation of wetlands. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 2023, 19(4): 1064-1078.
- [51] 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.
- [52] Zhou G J, Huan Y Z, Wang L Q, Lan Y, Liang T, Shi B L, Zhang Q. Linking ecosystem services and circuit theory to identify priority conservation and restoration areas from an ecological network perspective. *Science of the Total Environment*, 2023, 873: 162261.
- [53] 凌子燕, 蒋卫国, 李金崑, 凌玉荣, 彭凯锋, 邓雅文, 张泽. 桂林市典型喀斯特区湿地生态网络研究. *湿地科学*, 2022, 20(6): 739-746.
- [54] Rodríguez-Merino A, García-Murillo P, Fernández-Zamudio R. Combining multicriteria decision analysis and GIS to assess vulnerability within a protected area: an objective methodology for managing complex and fragile systems. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105738.
- [55] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [56] Pauli B P, Sun E R, Tinkle Z K, Forbey J, Demps K, Heath J. Human habitat selection: using tools from wildlife ecology to predict recreation in natural landscapes. *Natural Areas Journal*, 2019, 39(2): 142-149.
- [57] Wang F, Gao H, Liu J T, Fu T G, Qi F, Gao Y, Zhao L. Study on the characteristics of ecological network and critical areas of ecological restoration in Hebei-Tianjin coastal wetlands. *Wetlands*, 2024, 44(2): 24.
- [58] Luo J L, Fu H. Constructing an urban cooling network based on PLUS model: Implications for future urban planning. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110887.
- [59] Luo J L, Zhu L, Fu H. Construction of wetland ecological network based on MSPA-conefor-MCR: a case study of Haikou City. *Ecological Indicators*, 2024, 166: 112329.

- [60] Li F W, Zhao Y Y, Zhao Y. Construction and optimization of ecological network based on morphological spatial pattern analysis and minimum cumulative resistance models in Haihe River basin. *Ecohydrology*, 2024, 17(2): e2620.
- [61] Xu H, Zhu J, Wang Z. Exploring the Spatial Pattern of Urban Block Development Based on POI Analysis: A Case Study in Wuhan, China. *Sustainability*, 2019, 11(24): 6961.
- [62] Yu W H, Ai T H. The visualization and analysis of urban facility pois using network kernel density estimation constrained by multi-factors. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2014, 20(4): 902-926.
- [63] Kara B, Aşık Y. Assessing allergenicity of urban parks; a case study from Aydin, Turkey. *Aerobiologia*, 2022, 38(2): 247-262.
- [64] Stefunkova D, Hanusin J. Analysis of the Spatial and Temporal Distribution of Selected Landscape Diversity Indexes in Detailed Scale (example of Viticultural Landscape Svaty Jur)//Halada L, Baca A, Boltiziar M. *Landscape and Landscape Ecology*. Bratislava: Inst Landscape Ecology, Slovak Acad Sciences-Ile-Sas, 2016: 185-191
- [65] Ahmad Ganaie T, Sahana M, Hashia H. Assessing and monitoring the human influence on water quality in response to land transformation within Wular environs of Kashmir Valley. *GeoJournal*, 2018, 83(5): 1091-1113.
- [66] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1992, 23(1): 1-16.
- [67] Shi F N, Liu S L, An Y, Sun Y X, Zhao S, Liu Y X, Li M Q. Spatio-temporal dynamics of landscape connectivity and ecological network construction in long Yangxia basin at the upper Yellow River. *Land*, 2020, 9(8): 265.
- [68] Huang Y C, Zhang J B, Zhang P Y, Chen Z, Zhang X Y, Lu R, Li M F, Xing G R, Song Y P. Construction and optimization of ecological security pattern based on landscape ecological risk assessment in the affected area of the Lower Yellow River. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, 11: 1271352.
- [69] 福建省林业局. 重要湿地认定指标. (2021-08-17) [2025-01-19]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=CCA067C18A43B3D9E05397BE0A0AFC9A>.
- [70] 朱强, 俞孔坚, 李迪华. 景观规划中的生态廊道宽度. *生态学报*, 2005, 25(9): 2406-2412.
- [71] 刘盈斐, 石瑞花. 径流变化对河流廊道宽度影响研究//2022 中国水利学术大会论文集(第二分册). 北京: 中国水利学会, 2022: 217-222.
- [72] 周媛, 黎贝, 李朋瑶, 姚婧, 陈明坤, 唐密, 张莉, 陈娟. 基于“生态-气候适应性-游憩”多功能耦合的复合绿地生态网络格局优化. *生态学报*, 2024, 44(13): 5854-5866.
- [73] 王江波, 陈敏, 苟爱萍. 还地于河计划: 荷兰新治水理念的发展与启示. *中国农村水利水电*, 2020(10): 77-87.
- [74] 沙永杰, 纪雁. 新加坡 ABC 水计划——可持续的城市水资源管理策略. *国际城市规划*, 2021, 36(4): 154-158.
- [75] 杨波, 陈天, 李小艳, 李阳力, 李彦军, 刘昱, 张磊, 韩祯, 董瑜, 李宝军, 郭纪光. 2021 年滨水空间生态修复研究与规划建设热点回眸. *科技导报*, 2022, 40(1): 204-214.
- [76] Wang Z B, Qi F, Liu L Y, Chen M, Sun D Z, Nan J. How do urban rainfall-runoff pollution control technologies develop in China? A systematic review based on bibliometric analysis and literature summary. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 148045.
- [77] Lee J Y, Anderson C D. The restored cheonggyecheon and the quality of life in Seoul. *Journal of Urban Technology*, 2013, 20(4): 3-22.
- [78] Al-Kodmany K M. The Chicago Riverwalk: urban sustainability lessons. *Archnet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 2021, 15(3): 449-466.
- [79] 陈哲怡. 城市建成区内滨河地区活力复兴策略研究——以芝加哥河及新加坡河沿岸地区开发建设经验为例//面向高质量发展的空间治理——2021 中国城市规划年会论文集(02 城市更新). 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 10.
- [80] 唐慧超, 洪泉. 美国河流岸线修复的实践与启示——以哈德逊河可持续水岸线项目为例. *中国园林*, 2021, 37(5): 86-91.
- [81] Yu H R, Gu X C, Liu G H, Fan X, Zhao Q, Zhang Q. Construction of regional ecological security patterns based on multi-criteria decision making and circuit theory. *Remote Sensing*, 2022, 14(3): 527.
- [82] 郑志强, 郑鑫. 基于城市公园的疗愈景观研究——以厦门五缘湾湿地公园为例. *雕塑*, 2021(3): 88-89.
- [83] 李斯辰. 澳门寸土寸金仍有湿地空间. *森林与人类*, 2022, (Z1): 231-233.
- [84] 朱远, 陈建清. 生态治理现代化的关键要素与实践逻辑——以福建木兰溪流域治理为例. *东南学术*, 2020, (6): 17-23.