

城市生态廊道工程的建设设计与生态连通性优化

乐锋华

江西聚格环境科技有限公司 江西赣江新区 330029

摘要: 城市生态廊道作为连接破碎化生态空间的重要纽带,其建设设计与生态连通性优化是缓解城市生态问题、提升人居环境质量的关键途径。本文以城市生态廊道工程为研究对象,系统探讨了生态廊道的规划设计原则、功能定位与技术方法,重点分析了影响生态连通性的核心要素,提出了基于景观生态学和生态网络理论的连通性优化策略。通过案例实证,验证了“结构-功能-过程”协同优化框架在提升廊道生态效能中的有效性,为城市生态修复与可持续发展提供理论参考与技术支撑。

关键词: 城市生态廊道;建设设计;生态连通性优化;景观生态学

引言

在全球范围内快速推进的城市化进程中,自然生态系统正面临着前所未有的挑战。随着城市用地不断扩张,原本连续的自然景观被切割成碎片化的斑块,导致生境孤岛化现象日益严重,生物多样性呈现持续下降趋势。作为应对这一生态危机的重要举措,城市生态廊道通过构建具有连续性的线性或网状生态空间结构,能够有效促进城市区域内物质循环、能量流动和物种迁移等生态过程。当前阶段,我国在城市生态廊道建设实践中仍存在诸多亟待解决的问题,包括功能定位过于单一、空间连通性不足、实际生态效益低下等核心矛盾。这些问题的解决亟需从规划设计理念创新与技术方法革新两个维度进行深入探索,以寻求更加科学合理的优化路径。

一、城市生态廊道的建设设计理论与方法

(一) 生态廊道的功能定位与分类体系

基于服务目标和主导功能的差异性,城市生态廊道可划分为四大基本类型:首先是生态防护型廊道,如沿河流设置的植被缓冲带、用于防风固沙的防护林带等;其次是生物迁徙型廊道,专门为野生动物设计的迁徙通道;再次是休闲游憩型廊道,典型代表包括城市绿道系统;最后是复合功能型廊道,这类廊道创新性地整合了生态保护、休闲游憩、文化展示等多重功能。针对不同类型的生态廊道,需要制定差异化的空间布局策略和植物群落配置方案,以确保其功能的有效发挥^[1]。

(二) 建设设计的基本原则体系

生态优先原则要求将自然生态系统的保护置于首位,最大限度减少人工干预对自然生态过程的干扰;系统性原则强调将单个廊道纳入城市整体生态网络规划,实现

与周边绿地系统、水系网络的有机衔接;地域性原则主张优先选用适应当地环境的乡土植物物种,构建符合区域气候特征和土壤条件的稳定植被群落;动态适应性原则则要求预留足够的生态弹性空间,以应对未来气候变化和城市空间扩展带来的不确定性影响。

(三) 关键设计要素的精细化控制

在宽度设计方面,需要根据目标保护物种的生态习性确定最小控制宽度,例如鸟类迁徙廊道通常需要保持100米以上的宽度,而昆虫廊道则至少需要10米的宽度保障;在纵向连续性方面,重点解决道路、建筑等人工设施造成的生态阻隔问题,可采用生态涵洞、高架绿桥等立体化连通技术;在植被配置方面,应当构建乔木层、灌木层和草本层相结合的复层植被结构,优先选择具有食源、蜜源功能的植物种类,以增强对传粉动物等生态功能群的吸引力。

二、生态连通性评价指标体系构建

(一) 连通性的科学内涵与影响因素

生态连通性作为景观生态学研究的核心概念之一,是指生态系统内部物质循环、能量流动和物种迁移等关键生态过程的顺畅程度及其空间连续性特征^[2]。这一概念不仅体现了生态系统结构与功能的完整性,更反映了生态系统维持自身稳定性和可持续性的能力。从系统论的角度来看,影响生态连通性的因素可以归纳为三个相互关联的维度:首先是空间结构要素,包括廊道的空间配置特征(如廊道长度、宽度、曲率等几何参数)、连通节点数量及其空间分布格局等;其次是景观阻力要素,主要涵盖人类活动造成的干扰因素(如道路阻隔效应、土壤污染程度、土地利用强度等),这些因素会显著改变景观基质的渗透性;最后是生态过程要素,涉及物种迁

移能力（包括扩散距离、运动模式等）、水文连通性（如地表径流路径、地下水补给关系）等自然过程特征，这些要素共同决定了生态流在景观中的实际运行效率。

（二）量化评价指标的科学体系

在结构连通性评价方面，需要建立多层次的指标体系：廊道密度指标（通过计算单位面积内生态廊道的总长度，反映廊道网络的空间分布密集程度）、节点连接度指标（采用图论方法量化分析廊道与重要生态节点之间的拓扑连接关系，包括连接数量和质量）、景观破碎度指数（基于FRAGSTATS等专业景观分析软件，通过计算斑块密度、边缘密度等参数来综合评估景观的破碎化程度）^[3]。功能连通性评价则需构建过程导向的指标体系：物种迁徙成功率（通过红外相机监测网络、GPS追踪技术等手段获取野生动物实际利用廊道的通过率数据，并结合物种扩散模型进行校正）、水文连通性指标（包括廊道内水流速度、水质净化效率、沉积物输移速率等关键水文参数，可通过水文模型和实地监测相结合的方式获取）、生态流强度指标（通过同位素示踪、能量收支平衡等方法，定量表征物质循环速率和能量传递效率的关键参数）。这些指标共同构成了一个系统、全面的生态连通性评价体系，为景观规划和管理提供科学依据。

三、生态连通性优化策略与技术方法体系研究

（一）基于生态网络理论的廊道空间布局优化方法

综合运用最小累积阻力模型（Minimum Cumulative Resistance Model, MCR）和电路理论（Circuit Theory）等景观生态学分析方法，系统识别城市生态系统中的关键“源斑块”（包括具有重要生态功能的自然保护区、城市大型绿地公园等）与生态“阻力面”（主要包括城市建设用地、高密度交通基础设施等）^[4]。通过构建多物种扩散模型，模拟不同生物群体的潜在迁移路径，科学确定生态廊道的最佳空间走向与拓扑结构。以上海崇明国际生态岛建设为例，研究团队运用MCR模型进行景观阻力分析，精准识别出连接东滩国际重要湿地与中部森林绿地的3条战略性生物迁徙通道，为区域生态安全格局构建提供了量化依据。

（二）多维度空间结构优化技术体系

（1）立体化连通技术解决方案：针对城市道路网络造成的生态阻隔效应，创新性地构建多层次立体连通设施。包括：高空生态天桥（如深圳福田红树林自然保护区专门设计的鸟类迁徙通道）、地下动物穿行涵洞网络系统（为中小型哺乳动物提供安全通行路径），以及结合地形设计的生态缓坡等复合式连通结构。

（2）生境异质性增强技术：通过精细化微地形改造工程（包括营造生态洼地、微坡地等地貌单元）与多树种

混交、灌草复合的植被配置模式，创造多样化的微生物境类型，显著提升廊道区域的物种丰富度和生态系统稳定性。

（3）水文过程连通优化技术：集成应用“海绵城市”建设技术体系（如透水性铺装材料、生物滞留设施、雨水花园等低影响开发技术），构建完整的雨水渗透-蓄滞-净化系统，有效维持湿地生态系统的水文循环过程和生态服务功能^[5]。

（三）智能化动态监测与适应性管理技术

构建“空-天-地”一体化的生态监测网络：利用高分辨率卫星遥感影像（如Sentinel系列）、无人机多光谱扫描技术实现廊道植被覆盖的周期性监测；通过部署物联网传感设备网络（包括土壤水分传感器、水质多参数监测仪等）实时采集关键生态参数；结合机器学习算法（如随机森林、神经网络模型）建立生态连通性预测模型，实现廊道健康状况的智能诊断和早期预警，为管理决策提供科学支持，形成“监测-评估-优化”的闭环调控机制。

四、案例实证：以成都环城生态廊道为例

（一）项目概况

成都环城生态廊道是国内规模最大的城市环状生态工程，全长100km，串联青龙湖、锦城湖、兴隆湖等12处大型生态公园，衔接锦江、沱江支流等5条主要水系，总规划面积133.11km²，定位为“复合功能型生态廊道”，承担生态防护、生物迁徙、休闲游憩三重核心功能。项目建设前存在三大核心问题：一是连通性断裂，廊道被绕城高速、成昆铁路等23处交通干线切割，形成18个生态“孤岛”，小型哺乳动物（如野兔、松鼠）迁徙受阻；二是植被结构单一，60%区段以人工草坪和单一乔木（如桉树）为主，“乔-灌-草”复层结构占比不足20%，生物多样性低（仅记录鸟类32种、昆虫58种）；三是水文连通性差，3条支流因硬化驳岸与廊道割裂，雨季积水严重，旱季水体干涸，水质多为V类（劣于地表水标准）。

（二）优化方案实施

1. 立体连通体系构建

针对交通阻隔问题，采用“生态天桥+地下涵洞+水系连通”三维解决方案：

生态天桥建设：在绕城高速5处关键节点（如锦城湖段、青龙湖段）建设生态天桥，单座桥长50-80m、宽25-30m，桥面种植本地乔木（香樟、桉楠）形成遮蔽林带，两侧设置1.5m高灌木绿篱（火棘、枸骨）引导动物通行，桥下预留3m宽生态涵洞供小型哺乳动物穿行；

铁路阻隔突破：在成昆铁路区段，采用“高架绿道+生态缓冲带”组合，高架绿道下方种植芦苇、菖蒲等湿生植物，形成宽50m的线性湿地，缓解列车噪音对生态的影响；

节点连接强化：在7处公园衔接点设置“生态驿站”，配备自动感应门（避免人为干扰）和红外相机，监测物种迁徙情况，同时作为廊道与公园的过渡空间。

2. 植被群落重构

遵循“地域性、功能性”原则，对35km单一植被区段进行改造：

复层结构构建：按“乔木（20–30株/1000m²）+灌木（50–80株/1000m²）+草本（覆盖度≥80%）”比例，在鸟类活动频繁区段种植食源植物（山楂、樱桃）和蜜源植物（紫薇、月季），在昆虫栖息地种植波斯菊、紫花苜蓿等蜜源草本，形成“上有乔木遮荫、中有灌木栖息、下有草本觅食”的生境；

乡土植物优先：淘汰外来入侵物种（如桉树、紫茉莉），选用四川乡土植物（如桢楠、银杏、杜鹃、鸢尾），占比达90%以上，降低养护成本的同时提升生态适应性；

微生境营造：在20km区段通过堆土造坡（坡度5–15°）、挖沟成溪（宽度1–3m），增加地形异质性，形成洼地、坡地、溪谷等微生境，为不同物种提供栖息地。

3. 水文连通性修复

采用“海绵城市+生态驳岸”技术，修复3条断头河与廊道的水文联系：

生态驳岸改造：将8km硬化驳岸替换为“多孔混凝土+水生植物”复合驳岸，多孔混凝土孔隙率达25%，种植芦苇、香蒲等水生植物，净化水体的同时为鱼类、两栖动物提供产卵场所；

雨水循环系统：在廊道内建设雨水花园（面积1.2万m²）、渗透塘（15处），采用透水铺装（覆盖步道30km），收集的雨水经植物过滤后汇入支流，补充地下水，雨季积水时间从48小时缩短至12小时；

水质净化工程：在支流入口设置人工湿地（面积5万m²），通过“沉水植物（狐尾藻）+浮水植物（睡莲）+微生物”组合，去除水体中COD、氨氮等污染物，水质从V类提升至Ⅲ类，达到地表水饮用源地标准。

（三）优化效果评价

1. 结构连通性提升

节点连接度：廊道与生态节点（公园、水系）的连接数量从优化前的12个增至28个，连接度指数从0.6提升至0.88；

廊道密度：单位面积廊道长度从0.8km/km²增至0.92km/km²，景观破碎度指数从2.3降至1.1（基于FRAGSTATS计算），生态“孤岛”数量减少至3个；

立体连通效率：生态天桥与涵洞的物种通过率达75%（红外相机监测显示，野兔、黄鼠狼等小型哺乳动物月均通过次数达12次）。

2. 功能连通性优化

生物多样性：优化后记录鸟类68种（较之前增长112.5%），其中包括国家二级保护动物（如红腹锦鸡、斑头雁）；昆虫种类增至132种，传粉昆虫（如蜜蜂、蝴蝶）数量增长200%；鱼类从5种增至12种，两栖动物（如青蛙、蟾蜍）活动范围扩大40%；

水文与生态流：支流水流速度稳定在0.2–0.5m/s，雨季防洪能力提升50%，水质净化效率达60%（COD去除率58%、氨氮去除率65%）；物质循环速率提升30%，植被固碳量从2.1t/hm²·a增至3.5t/hm²·a；

社会服务功能：年客流量从150万人次增至320万人次，带动周边文旅产业（如民宿、生态农业）增收2.8亿元，同时开展“生态课堂”“观鸟活动”等科普教育，市民生态保护意识提升45%（基于问卷调查）。

结语

城市生态廊道的建设设计与优化是一项复杂的系统工程，需要从多维度综合考虑生态、社会和经济因素的协调统一。通过对成都环城生态廊道案例的深入分析，可以清晰看到科学的设计理念和技术手段在提升生态连通性中的重要作用。未来，在城市化进程不断加快的背景下，生态廊道的规划应更加注重前瞻性与可持续性，结合智能化监测技术、动态管理策略以及公众参与机制，进一步完善其功能与效益。同时，应加强跨区域合作，推动生态网络的整体构建，为实现人与自然和谐共生的城市发展目标提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 张丽, 王晨旭, 徐建英, 等. 面向连通性提升的旱区城市生态网络优化情景——以巴彦淖尔市及其周边地区为例[J]. 生态学报, 2022, 42(21): 8675–8689. DOI: 10.5846/stxb202107201955.
- [2] 卢卓, 吴冰, 刘晓光, 等. 基于边介数的省域生态廊道构建方法优化[J]. 2021(2020–3): 700–708. DOI: 10.13198/j.issn.1001–6929.2019.05.04.
- [3] 荣月静, 严岩, 王辰星, 章文, 朱婕缘, 卢慧婷, 郑天晨. 基于生态系统服务供需的雄安新区生态网络构建与优化[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 10. DOI: 10.5846/stxb202001020016.
- [4] 卢卓, 吴冰, 刘晓光, 等. 基于边介数的省域生态廊道构建方法优化[J]. 环境科学研究, 2020, 33(3): 9. DOI: 10.13198/j.issn.1001–6929.2019.05.04.
- [5] 刘壮壮, 吴未, 刘文锋, 申立冰. 基于“源地–廊道”生态安全格局构建逻辑范式的建设用地减量化研究[J]. 生态学报, 2020, 40(22): 9. DOI: 10.5846/stxb201910302285.