

不同等级道路对福州市生态空间 景观连接度的影响研究

颜子淳, 游宁龙, 王璐, 蓝承威

(福建农林大学风景园林与艺术学院, 福建 福州 350100)

[摘要] 道路空间的扩张导致城市生态空间的破碎化及其景观连接受阻. 科学分析不同等级道路对生态空间景观连接度的影响对指导生态修复工程选址和未来道路网络布设具有重要意义. 研究采用形态学空间格局分析(MSPA)和基于图论的景观连接度模型, 提取福州市主要生态空间, 并通过有无道路的情景定量分析了不同距离阈值下各等级道路对生态空间景观连接度的影响. 结果表明: (1) 在各等级道路干扰中, 高速公路对景观连接度的影响最为显著, 导致景观连接度指数 LCP、IIC 和 PC 值分别降低了 7.74%、6.53% 和 8.96%; (2) 道路的存在干扰了生态空间中各斑块的连接度重要性, 导致高景观连接度的斑块组合数量骤减, 低景观连接度的斑块组合数量剧增; (3) 各级道路的影响程度由大到小依次为高速公路、县道、省道和国道, 其中县道和高速公路分别在距离阈值极低和极高时成为主要影响因素; (4) 生态空间占比越大且越靠近城市核心区的区县, 其生态空间景观连接度越易受到道路的影响. 研究结果可为福州市生态空间格局的构建和优化提供科学依据.

[关键词] 道路等级, 形态学空间格局分析(MSPA), 景观连接度模型, 阈值, 生态空间格局

[中图分类号] X826 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2024)01-0048-09

Research on the Influence of Different Grade Roads on the Landscape Connectivity of Ecological Space in Fuzhou

Yan Zichun, You Ninglong, Wang Lu, Lan Chengwei

(College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: The expansion of road space leads to the fragmentation of urban ecological space and the obstruction of landscape connection. It is of great significance to scientifically analyze the impact of different grade roads on the landscape connectivity of ecological space to guide the site selection of ecological restoration projects and the layout of future road networks. In this paper, morphological spatial pattern analysis(MSPA) and landscape connectivity model based on graph theory are used to extract the main ecological spaces in Fuzhou, and the impact of different grade roads on the landscape connectivity of ecological space under different distance thresholds is quantitatively analyzed through the scenarios with and without roads. The results show that: (1) Among all grade roads interference, expressway has the most significant impact on landscape connectivity, resulting in a decrease of 7.74%, 6.53% and 8.96% in LCP, IIC and PC values respectively. (2) The existence of roads interferes with the importance of connectivity of patches in the ecological space, resulting in a sharp decrease in the number of patches with high landscape connectivity and a sharp increase in the number of patches with low landscape connectivity. (3) The influence degree of roads is expressway, county road, provincial road and national road from large to small, in which county road and expressway are the main influencing factors when the distance threshold is very low and very high respectively. (4) The landscape connectivity of ecological space of the districts and counties with larger proportion of ecological space and closer to the urban core area are more vulnerable to the impact of road. The results can provide scientific basis for the construction and optimization of the ecological spatial pattern in Fuzhou.

Key words: road grade, morphological spatial pattern analysis(MSPA), landscape connectivity model, threshold, ecological spatial pattern

收稿日期: 2022-11-30.

基金项目: 福建省中青年骨干教师教育科研项目(JAT210071).

通讯作者: 游宁龙, 博士, 副教授, 研究方向: 健康城市与人居环境. E-mail: 672777468@qq.com

城市经济的快速发展使得人类生活质量显著提高,但也造成了水环境污染、土地资源侵占、温室效应加剧及水土流失严重等诸多环境问题。生态空间是城市中具有自然属性、以提供生态服务或生态产品为主体的土地空间,对维持景观生态平衡和缓解城市生态承载压力有重要作用^[1]。加强生态空间之间的联系,有利于提升绿地空间结构与功能的丰富度,减少物种跨越栖息地的能量损耗,而具有极强隔离和分割效应的道路网络削弱了这种空间联系,从而阻碍城市生态中能量信息的传递和扩散,导致原本稳定的生态环境失衡^[2-3]。公路建设会极大地破坏原有生态样貌,影响物种栖息地之间的连通性,迫使物种原有的迁徙路线改变,尤其在高速公路等车流高峰地段,时常因其封闭性和危险性导致动物死伤^[4-5]。相关研究证实,道路建设已成为影响生态空间稳定的主要因素^[6],其对生态环境的侵蚀干扰严重影响了生态空间之间的连通性和物种迁徙效率,导致生态空间景观连接度降低。

城市景观格局的分析评价,重点在于如何识别研究区生态空间及确定景观空间与功能过程的相互关系。形态学空间格局分析(morphological spatial pattern analysis, MSPA)是一种根据形态结构特征将生态空间划分为不同功能分区的空间测度方法,功能分区包含核心区(core)、孤岛(islet)、边缘(edge)、穿孔(perforation)、环(loop)、连接桥(bridge)和分支(branch)7类分支。该方法能够从空间形态、结构和功能的角度出发,对影像数据进行定量分级,科学识别研究区内的生态空间^[7]。景观破碎化的加剧导致生态空间原有的结构和功能受损,阻碍了物种栖息地之间的景观连通性^[8-9]。而景观连接度作为衡量景观空间结构的重要评价方法,能够通过分析景观要素的分布特征,反映栖息地生态过程与功能关系的连续性,进而揭示生态空间的动态变化机制。维持较好的连接度水平对区域协调发展和生物多样性保护有着重要的影响^[10]。近年来,伴随着城市高速发展与自然生境丧失,国内学者开始关注连接度理论,并从生态学、生物行为学、数理量化等角度对其方法与理论进行探究^[11]。常见的景观连接度量化分析方法包括最邻近距离法^[12-13]、空间格局指数法^[14-15]、网络结构指数法^[16]和基于图论的景观连接度模型^[17-18]等。其中,基于图论的景观连接度分析能够衍生出适应不同景观尺度的度量形式,在分析生态空间结构的基础上,进一步量化“格局—过程”中功能连接度的相关指标,丰富了生物多样性与物种丰富度的评价形式^[19-21]。

现有研究多从城市生态廊道构建^[22-23]、森林病虫害防治^[24-25]和湿地景观保护^[26]等角度探讨影响生态空间景观连接度的因素,忽视了道路空间等重要基础设施在生态空间景观连接度分析中的重要性,尤其是不同等级道路对生态环境的具体影响机制缺乏深入剖析。因此,本研究采用形态学空间格局分析(MSPA)和基于图论的景观连接度模型对福州市主要生态空间进行提取和构建,通过有无道路的情景,针对生态空间及其主要斑块之间的景观连接度指数变化展开研究,揭示不同道路等级和空间尺度下道路对生态空间景观连接度的影响,以期为福州市生态空间格局的构建和优化提供科学的依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

福州市位于福建省东南部、闽江下游,是福建省经济政治中心,福州市全年气候温暖、雨量充沛,拥有丰富的山水资源,尤其是森林资源覆盖面积较广,闽江流域呈东西走向贯穿全境,四周高山环绕,山水风景体系健全。近年来,福州市道路发展迅速,截至2020年底,福州市城区路网密度已位列全省第一。随着旅游业的迅速发展和道路网络规模的不断扩大,城市景观破碎化现象日益显著,水环境污染、大气污染、生态系统平衡失调等一系列生态环境问题不断涌现。

1.2 数据来源及处理

本研究数据主要包含:福州市2018年3月11日Landsat 8 OLI_TIRS影像(来源:地理空间数据云);福州市路网数据(来源:国家基础地理信息中心),主要分为高速公路、国道、省道、县道4种类型;福州市2017年景观土地利用分类数据(来源:星云数据服务平台)。首先基于遥感影像处理平台Envi 5.3软件对遥感影像进行辐射定标、大气校正、波段融合裁剪等操作,进一步提高遥感影像的精确度,再采用监督分类方法,根据最大似然法结果划分景观类别,将福州市土地用地情况分为林地、耕地、裸地、水体及建设用地5大类,通过对比2017年福州市景观土地利用分类数据对影像精确度进行修正,最终获得栅格大小为30 m×30 m的土地利用数据,经过效验分类数据,Kappa系数达到0.86,总体精确度为97.39%。本文以主要道路数据为研究基础,未对平潭县及附属岛屿的路网进行研究。

1.3 研究方法

1.3.1 基于 MSPA 方法的生态空间格局分析

用 ArcMap 10.6 将从 Envi 5.3 软件中获得的土地利用分类数据进行重分类,设定林地、裸地和水体为前景,赋予 2 的新值,其他土地类型设定为背景,赋予 1 的新值,通过软件输出二值图像,导入 Guidos Toolbox 2.8 软件,边宽度默认设置为 1,经过运算得到 7 种互不重叠的可视化形态测量类别,其中核心区占比最大且具有重要的生态价值. 本研究提取面积 0.5 km² 以上核心区,筛选出 216 个斑块.

1.3.2 道路情景设置

道路建设作为典型的线性设施工程,对生态空间有显著的切割作用. 为了研究各等级道路对福州市生态空间景观连接度的影响,结合现有研究,依据国际上常用标准将福州市高速公路、国道、省道和县道的影响域分别设定为 1 000、600、400 和 200 m^[27]. 假设研究区原有的生态空间为无道路的情景,将路网影响域从景观生境中擦除作为有道路的情景. 通过比较 2 种不同情景下的景观连接度变化,分析道路对福州市生态空间的影响.

1.3.3 景观连接度评价指标的选取与计算

在城市景观格局中生态斑块是不可或缺的部分,斑块的形状、面积及空间分布特征不仅影响斑块间的相互作用力,也决定着物种迁徙的路径变化,基于图论的连接度评价指标,可以同时体现景观结构和功能连接度,对斑块结构与形态的变化具有较高敏感性,能准确反映人类活动对生态空间连接度干扰强弱程度. 本研究中连接度指标采用 Conefor 2.6 软件计算,连通概率设置为 0.5^[28-30].

(1)景观相合概率指数(landscape coincidence probability, LCP),指景观内随机两节点位于同一生境的概率. 景观内生境覆盖程度越高,LCP 越高,LCP 取值范围在 0~1 之间,计算方法如下:

$$LCP = \sum_{i=1}^{NC} \left(\frac{c_i}{A_L} \right)^2, \quad (1)$$

式中,NC 表示景观组分数, c_i 表示景观组分的面积之和, A_L 为研究区的总面积.

(2)整体连通性指数(integral index of connectivity, IIC),表示研究区景观生境斑块的连接情况,且随着连接性的提高而增加,计算方法如下:

$$IIC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{a_i \cdot a_j}{1 + nl_{ij}}}{A_L^2}, \quad (2)$$

式中, a_i 和 a_j 分别表示斑块 i 和斑块 j 的面积, n 表示斑块的总数, nl_{ij} 为斑块 i 和斑块 j 之间的连接数.

(3)可能连通性指数(probability of connectivity, PC),指整个景观范围内的各个斑块之间的可能扩散的概率,有效反应各个斑块对整体景观连通性的贡献值,计算方法如下:

$$PC = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i \cdot a_j \cdot p_{ij}^*}{A_L^2}, \quad (3)$$

式中, p_{ij}^* 表示斑块 i 和斑块 j 之间全部路径概率的乘积最大值.

(4)连接重要性指数 dI,以百分比形式表达景观内某一斑块对维持景观连通性的重要性,计算公式如下:

$$dI = 100 \times \frac{I - I_{\text{remove}}}{I}, \quad (4)$$

式中, I 表示景观连接度指数(如 IIC、PC 等), I_{remove} 表示某斑块从景观中移除后的指数值.

本文连接重要性指数用可能连通性指数 PC 的百分比形式 dPC 表示.

1.3.4 距离阈值选取

源地斑块间的连通性强弱由物种间的扩散和迁徙能力所决定,当迁徙距离超过物种最大可扩散范围时,斑块之间不连通. 连接度指数计算需要明确研究区的阈值范围,研究表明鸟类的平均搜索半径为 30~32 000 m,中小型哺乳动物的平均搜索半径为 50~1 000 m^[31-32],实验分析得出研究区景观连接度在距离阈值超过 2 000 m 后无明显变化,因此本研究选取 50、100、200、400、800、1 200、1 600 和 2 000 m 共 8 个阈

值,对福州市生态空间的景观连接度进行分析.

2 结果

2.1 生态空间景观连接度变化分析

无论是有道路情景还是无道路情景,随着距离阈值的不断增大,生态空间的景观连接度指数都在不断提升,LCP、PC 和 IIC 增长趋势随着距离阈值变化逐渐由快至慢(表 1).

表 1 不同距离阈值下 LCP、IIC、PC 的变化情况
 Table 1 Changes in LCP, IIC, and PC under different distance thresholds

距离阈值/m	LCP		IIC		PC	
	有道路	无道路	有道路	无道路	有道路	无道路
50	0.030	0.035	0.029	0.032	0.035	0.042
100	0.051	0.062	0.035	0.042	0.046	0.059
200	0.110	0.217	0.053	0.071	0.067	0.091
400	0.155	0.258	0.062	0.094	0.101	0.137
800	0.225	0.260	0.085	0.102	0.145	0.185
1 200	0.245	0.274	0.096	0.105	0.170	0.208
1 600	0.261	0.278	0.108	0.115	0.186	0.222
2 000	0.261	0.279	0.108	0.116	0.197	0.232
均值	0.167	0.208	0.072	0.085	0.118	0.147

在受到道路的干扰后,生态空间的景观连接度指数明显降低,其中 LCP 和 PC 的均值分别由 0.208 和 0.147 下降至 0.167 和 0.118,相较于无道路情景的连接度指数,分别减少了 19.71%和 19.73%,在距离阈值为 200 m 时 LCP 和 PC 受道路影响最大,分别降低了 49.31%和 26.37%. IIC 在 3 个指数中受影响最小,均值从 0.085 下降至 0.072,下降了 15.29%,在距离阈值为 400 m 时受道路影响显著,下降高达 34.04%. 受道路的干扰,不同距离阈值下的景观连接度指数都呈现下降的趋势,整体连通性大幅度降低.

此外,根据不同等级道路对景观连接度干扰情况(表 2)可以看出,高速公路对景观连接度干扰最为明显,相比无道路情景,景观连接度指数 LCP、IIC 和 PC 分别下降了 7.74%、6.53%和 8.96%. 国道、省道和县道对福州市生态空间景观连接度也产生一定影响,但干扰强度没有高速公路的影响大,这表明高等级道路对景观斑块间连通性产生较大的负面影响. 福州市近年来新修多条高速公路,在便利交通运输的同时,破坏了周边的生态环境,加剧了景观斑块的破碎化,生态空间的景观连通性功能受损严重.

表 2 不同道路等级下景观连接度指数变化率
 Table 2 The change rates of landscape connectivity indices under different road grades

道路等级	变化率/%		
	LCP	IIC	PC
高速	7.74	6.53	8.96
国道	3.08	3.86	3.31
省道	6.55	3.85	3.63
县道	1.98	3.21	3.91

2.2 道路空间对各重要程度斑块的影响分析

依据生态扩散渗透原理,斑块之间在不同距离阈值下的景观连通性会产生变化,为了更好分析在道路影响下生态空间各斑块的重要程度变化,将研究区分为有、无道路阻碍两种情景,依据国际标准带宽将重叠部分生态空间擦除. 为了比较不同距离阈值间斑块受路网影响程度,对每一个生态空间斑块的 dPC 值按照自然断点方法从高到低分为 5 类,分别为极高、高、中等、低、极低.

从分析结果(表 3)可知,原研究区斑块数量总数维持在 216 个,在受到不同等级道路影响后,斑块总面积减少 195.54 km². 尤其连接程度“极高”和“高”的斑块组合数量减少明显,两类型斑块数量之和维持在 18~36 个,但面积占比却很高,为 90.99%~93.50%,充当维持福州市生态系统稳定及物种多样性的主要载体,同时受道路影响也最严重. 大部分斑块集中在连接程度“中等”“低”“极低”3 个类别,占整个景观斑块数 80%以上,大多数面积较小且分布零散.

无道路干扰下,在 400~800 m 距离阈值区间,连接程度“极高”和“高”的斑块数量和面积达到峰值,

分别为 36 块和 5 597 km²;而连接程度“中等”“低”“极低”的斑块数量和面积分别为 180 块和 389.01 km²,远低于其他距离阈值区间的数值,表明在 400~800 m 距离阈值区间生态空间景观连接度状态最佳. 在道路因素介入下,各连接程度斑块的面积和数量受到较大的影响,生态空间受道路影响显著. 在距离阈值达到 800 m 时,连接程度“极高”和“高”水平的斑块数量最多达到 29 个,两者斑块总面积为 5 398.98 km²,对比无道路影响情况,斑块面积减少了 198.02 km²;连接程度“中等”“低”“极低”的斑块数量最低为 187 个,斑块面积总和为 391.5 km².

表 3 不同 dPC 值下生态斑块数量与斑块面积
Table 3 The number of ecological patches and patch area under different dPC values

道路 情景	距离阈 值/m	极高 dPC 值		高 dPC 值		中等 dPC 值		低 dPC 值		极低 dPC 值	
		斑块数量/个	面积/km ²	斑块数量/个	面积/km ²	斑块数量/个	面积/km ²	斑块数量/个	面积/km ²	斑块数量/个	面积/km ²
无道路 情景	50	9	4 572.59	15	929.02	62	241.52	63	165.50	67	77.38
	100	13	4 961.04	17	505.35	69	289.66	68	170.57	49	59.40
	200	13	4 961.04	20	537.59	75	307.21	66	132.13	42	48.05
	400	13	5 071.91	23	525.09	80	247.44	72	117.08	28	24.49
	800	12	5 011.77	21	566.29	83	311.62	81	80.98	19	15.35
	1 200	6	4 145.42	14	1 300.85	30	280.65	88	201.04	78	58.05
	1 600	6	4 145.42	13	1 296.12	34	308.66	90	183.70	73	52.11
	2 000	6	4 145.42	12	1 292.49	32	296.35	86	194.23	80	57.52
有道路 情景	50	6	4 025.09	19	1 316.57	44	180.00	69	191.30	78	77.51
	100	7	4 025.57	20	1 264.39	59	263.62	68	181.19	62	55.69
	200	10	4 481.23	18	832.56	68	265.81	66	154.45	54	56.42
	400	13	4 547.40	16	773.55	74	289.96	80	154.33	33	25.24
	800	10	4 481.23	19	917.74	75	265.65	87	108.18	25	17.66
	1 200	10	4 481.23	17	895.97	72	303.00	97	96.69	20	13.58
	1 600	6	4 025.09	13	1 243.73	26	250.86	88	216.27	83	54.52
	2 000	6	4 025.09	13	1 243.73	28	273.94	92	200.02	77	47.69

从道路介入前后平均斑块数量和面积来看(图 1),路网的存在导致生态空间内各斑块间景观连接度受损,连通性良好的斑块数量和面积骤减,而连通性较低的斑块数量和面积明显增多. 此外,无论有无道路影响,在 400~800 m 距离阈值区间连接程度“高”和“极高”的生态斑块面积和数量逐渐达到峰值且相对稳定. 在此距离阈值区间,福州市生态空间中各斑块相对集中,景观连通性较高且稳定,是研究道路空间对生态空间景观连接度影响的最佳区间范围.

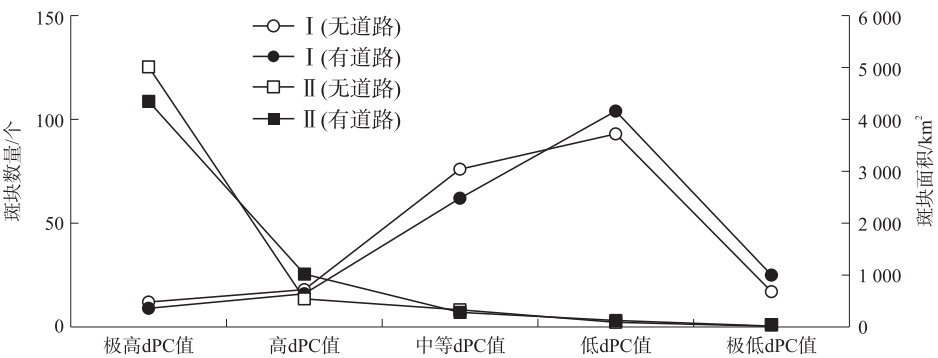


图 1 不同 dPC 值下平均斑块数量(I)和斑块面积(II)
Fig. 1 The average number of patches(I) and patch area(II) under different dPC values

2.3 不同等级道路对生态空间景观连接度的影响

本研究进一步采用单一的等级道路叠加到生态空间中,分析不同等级的道路对生态空间景观连接度的影响. 依据不同等级道路的各距离阈值平均景观连接度指数可知(图 2),不同等级道路对生态空间景观连接度的影响存在差异. 综合各距离阈值的平均指数,高速公路对生态空间景观连接度的平均影响最大,县道次之,省道与国道的平均影响最小.

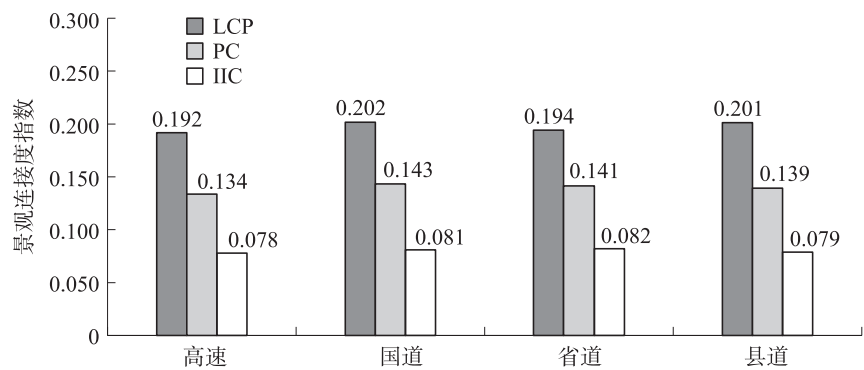


图 2 不同等级道路下各距离阈值平均景观连接度指数比较

Fig. 2 Comparison of average landscape connectivity indices for different distance thresholds under different grade roads

随着距离阈值的提升,景观连接度受影响程度也发生改变. 在距离阈值极低的情况下,等级道路对景观连接度的影响,县道大于高速公路,省道大于国道;当距离阈值极高时,高速公路对连接度的影响逐渐超过县道,省道与国道的影响最小(图 3). 福州市县道影响域较小(仅有 200 m 缓冲区),但涉及区域遍布各县市,在小距离阈值范围数量和面积远大于其他等级道路,因此对景观连接度影响最大;而随着扩散范围增加,高流量和宽路面的高速公路贯通整个市域,阻隔了物种原有的迁徙路径,导致生态空间景观连接度大幅度降低.

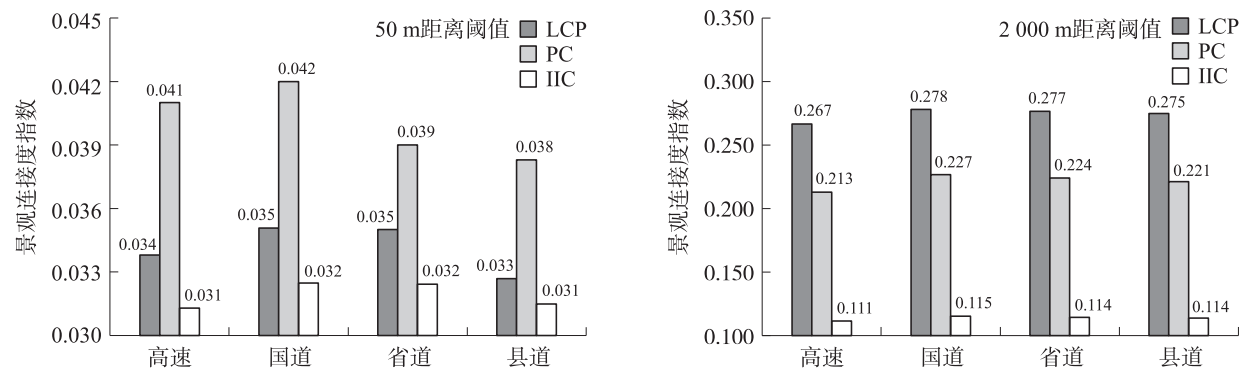


图 3 高、低距离阈值下各等级道路的景观连接度指数比较

Fig. 3 Comparison of landscape connectivity indices for different grade roads under high and low distance thresholds

2.4 各区县生态空间景观连接度受道路影响的差异分析

各区县生态空间面积变化存在明显差异. 其中永泰县、闽侯县和罗源县生态空间面积占比较大,分别为 66.18%、61.32%和 65.02%,在道路影响域的干扰下,永泰县和闽侯县减少的生态空间面积最多,分别达到 43.06 km² 和 43.59 km²,罗源县生态空间面积仅减少 21.05 km². 而福清市和长乐区生态空间面积占比较小,分别为 23.11%和 15.56%,在道路影响下其面积分别减少了 9.44 km² 和 11.68 km².

综合分析有无道路情景下各距离阈值间景观连接度平均变化,可知各区县受路网影响的强弱(表 4).

表 4 各区县景观连接度指数平均变化值排名

Table 4 Ranking of average changes in landscape connectivity indices of each district and county

区县	指数变化值			排名	区县	指数变化值			排名
	LCP	IIC	PC			LCP	IIC	PC	
永泰县	0.077	0.028	0.060	1	中心城区	0.014	0.013	0.020	5
闽清县	0.057	0.027	0.059	2	连江县	0.014	0.008	0.018	6
罗源县	0.047	0.022	0.042	3	福清市	0.009	0.004	0.009	7
闽侯县	0.038	0.021	0.028	4	长乐区	0.004	0.002	0.003	8

在道路干扰下,永泰县生态空间的 LCP、IIC 和 PC 相比无道路情况分别减少了 0.077、0.028 和 0.060,指数变化最大;而长乐区的 LCP、IIC 和 PC 分别减少了 0.004、0.002 和 0.003,受道路影响程度最小.道路对各区县生态空间景观连接度的影响从强到弱依次是永泰县、闽清县、罗源县、闽侯县、中心城区、连江县、福清市和长乐区.

为了进一步分析不同距离阈值下各区县受道路的影响情况,筛选影响程度较大的 4 个距离阈值 400、800、1 200 和 1 600 m,计算 LCP、IIC、PC 的变化,分析各区县受路网干扰的主要距离阈值范围.由图 4 可知,LCP、IIC、PC 3 个景观连接度指数都随着道路的介入逐渐下降,表明道路的存在造成区域连通性受到阻碍,而且这种干扰在不同区县产生的影响也不同.福清市、闽侯县、闽清县和永泰县在 400 m 距离阈值区间 3 类指数变化率最高,表明其在 400 m 范围受道路影响最大,超过 400 m 后道路对生态空间连接度的影响逐渐减少;连江县的 IIC 和 PC 在 800 m 距离阈值区间变化率达到最大,分别为 31.15% 和 28.53%,LCP 变化率从 400 m 距离阈值的 42.54% 持续降低至 1 600 m 距离阈值的 18.63%,说明连江县受道路影响的距离阈值在 800 m 左右;罗源县和长乐区受道路影响最大距离阈值达到 1 200 m;而中心城区连接度指数变化率呈现持续增长情况,LCP、IIC 和 PC 变化率分别从 400 m 距离阈值的 25.03%、24.63% 和 23.56% 增长至 1 600 m 距离阈值的 25.16%、26.09% 和 26.79%,中心城区生态空间面积小并且路网覆盖密集,其景观连接度指数变化虽不明显,但受道路影响范围却能持续扩散.

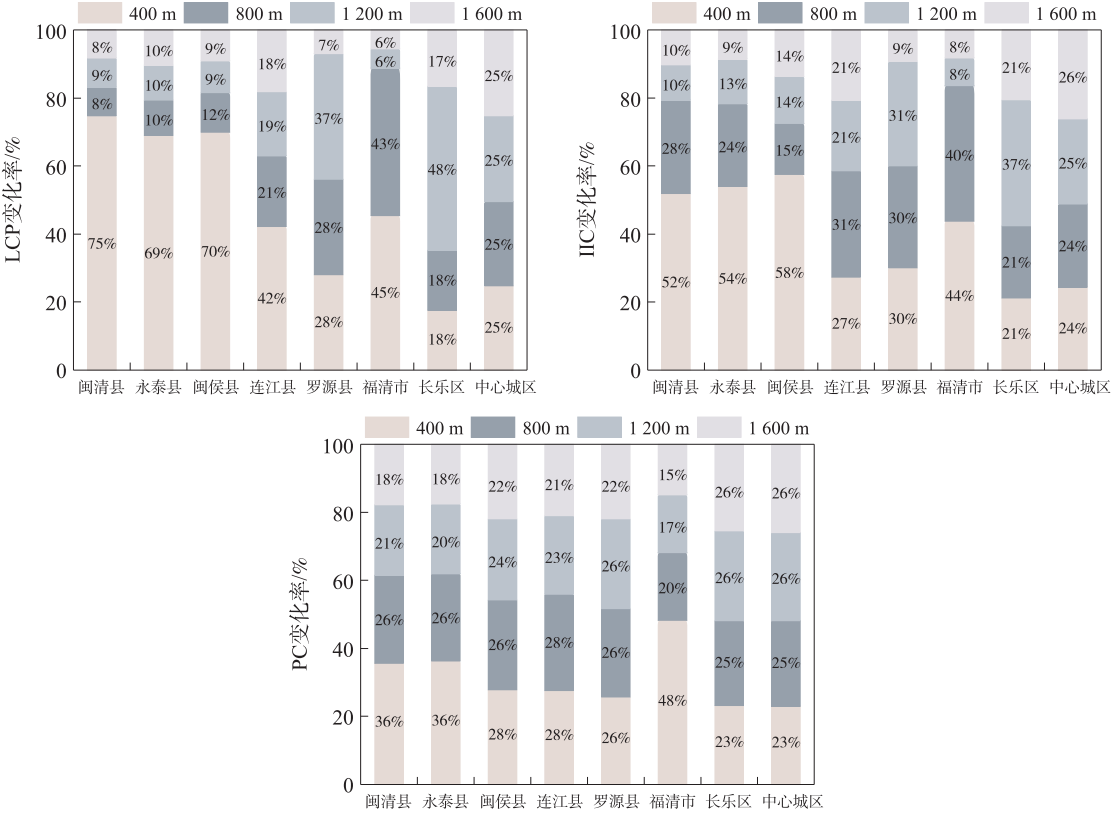


图 4 有无道路条件下的各区县 LCP、IIC、PC 变化率

Fig. 4 Change rates of LCP, IIC, and PC for each district and county with and without road condition

3 讨论

根据对福州市景观连接度的分析可知,道路空间对福州市景观连接度整体影响较大,连接度呈现明显的下降趋势,城市内部生态破碎化严重且分布不均匀,物种的运动扩散与交流受到严重的阻碍.福州市各等级道路中高速公路对生态环境影响最为显著.因此,在福州市高速公路的规划初期,应及时绕开重要的生态敏感地区,或者充分利用地貌特征缓解高等级道路对生态环境的消极作用.如避开鸟类居多且适合繁衍的湿地和森林地段,提供优质的栖息场所以确保鸟类数量稳定.福州市地貌以山地丘陵居多,可修建不同形式的道路来降低其对原有生态的影响,例如山脚处避免修建环山路,改用地下隧道的形式,减少道

路修建时与生态环境的直接接触,保证生物通道的连通性. 过于破碎化的生境造成福州市生态空间分布不均匀,除了管控道路建设工程的影响外,还可以通过改善森林结构,强化森林生态系统的整体功能. 严守耕地保护红线,重点保护福清市、长乐区、连江县、罗源县等耕地集中区,高效开展废弃土地复垦,适度开发宜耕后备土地资源. 在开展福州市生态修复工程和道路建设规划时可以围绕 400~800 m 区域范围进行生态环境评价,在此区间能很好找到所在地景观连接度相对薄弱的地区,并能有效分析其生态空间各斑块的连接度状况,进而建立绿色斑块之间一定数目、宽度的廊道空间以改善景观连接度. 此外,还应该重点关注靠近城市中心且生态环境优良的区县,加强对城市生态环境保护和道路红线边界的控制.

4 结论

(1)生态空间整体的景观连接度指数随着距离阈值增大而提升,但道路的干扰使各类景观连接度指数急速骤减,在各等级道路干扰中,高速公路对景观连接度影响最为显著,导致景观连接度指数 LCP、IIC 和 PC 值分别降低了 7.74%、6.53% 和 8.96%,生态空间之间的连通性明显降低.

(2)将各类栖息斑块按照 dPC 值划分为极高、高、中等、低、极低 5 种. 结果表明,重要程度“极高”和“高”的斑块数量少但面积占比大,而多数斑块都集中在“低”和“极低”区域,表明生态空间的破碎化程度较高. 在 400~800 m 距离阈值区间,福州市生态空间中各斑块相对集中,景观连通性较高且稳定,是研究等级道路对生态空间景观连接度影响的最佳区间范围.

(3)不同等级道路对景观连接度影响各不相同,综合各距离阈值的景观连接度平均指数,各级道路对生态空间连接度影响由大到小依次是高速公路、县道、省道和国道;当距离阈值极低时县道影响大于高速公路,而随着距离阈值的增加高速公路对景观连接度影响会逐渐超过县道的影响.

(4)道路对福州市各区县影响存在差异,福清市、闽侯县、闽清县和永泰县受道路影响最大距离阈值为 400 m,连江县为 800 m,罗源县和长乐区为 1 200 m,中心城区为 1 600 m.

在等级道路的影响下,研究区整体和各斑块间的景观连接度水平都呈现下降趋势,连接度好的斑块数量少且面积大,而连接度水平低的斑块数量众多且分布不均匀. 此外,各等级道路对景观连接度影响各不相同,随着距离阈值的改变,不同类型道路干扰的优先级也会发生变化,生态空间占比大的区域更容易受到影响.

[参考文献]

- [1] 徐华连,高伟龙,陈思,等. 基于 GIS 的苏南地区城市生态空间划定:以苏州市为例[J]. 生态学杂志,2020,39(2): 614-624.
- [2] COFFIN A W. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads[J]. Journal of transport geography, 2007,15(5): 396-406.
- [3] KARLSON M, MORTBERG U, BALFORS B. Road ecology in environmental impact assessment[J]. Environmental impact assessment review, 2014,48: 10-19.
- [4] KARLSON M, MORTBERG U. A spatial ecological assessment of fragmentation and disturbance effects of the Swedish road network[J]. Landscape and urban planning, 2015,134: 53-65.
- [5] 李月辉,胡远满,李秀珍,等. 道路生态研究进展[J]. 应用生态学报,2003,14(3): 447-452.
- [6] 李双成,许月卿,周巧富,等. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析[J]. 地理科学进展,2004,23(5): 78-85.
- [7] 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.
- [8] HALE J D, FAIRBRASS A J, MATTHEWS T J, et al. Habitat composition and connectivity predicts bat presence and activity at foraging sites in a large UK conurbation[J]. PLoS one, 2012,7(3): e33300.
- [9] NEEL M C. Patch connectivity and genetic diversity conservation in the federally endangered and narrowly endemic plant species *Astragalus albens* (Fabaceae)[J]. Biological conservation, 2008,141(4): 938-955.
- [10] 吴昌广,周志翔,王鹏程,等. 景观连接度的概念、度量及其应用[J]. 生态学报,2010,30(7): 1903-1910.
- [11] 陈春娣,贾振毅,吴胜军,等. 基于文献计量法的中国景观连接度应用研究进展[J]. 生态学报,2017,37(10): 3243-3255.

- [12] 龙祖坤,李绪茂,贺玲利. 湖南省红色旅游景点空间分异与可达性分析[J]. 湖南商学院学报,2017,24(2):70-76.
- [13] 黄雪飞,吴次芳,游和远,等. 基于 MCR 模型的水网平原区乡村景观生态廊道构建[J]. 农业工程学报,2019,35(10):243-251.
- [14] 陈晓辉,曾晓莹,赵超超,等. 基于遥感生态指数的道路网络生态效应分析:以福州市为例[J]. 生态学报,2021,41(12):4732-4745.
- [15] 黄木易,岳文泽,冯少茹,等. 基于 InVEST 模型的皖西大别山区生境质量时空演化及景观格局分析[J]. 生态学报,2020,40(9):2895-2906.
- [16] 吴仰婷,余婷婷,吴文婷,等. 基于网络分析的道路生态干扰:以怒江流域为例[J]. 科技创新与应用,2018(35):32-35.
- [17] 李雯雯,李丽,吴巩胜,等. 评估不同尺度下农牧地对滇金丝猴景观连接度的影响[J]. 生态学报,2016,36(24):8136-8144.
- [18] 沈润,史正涛,何光熊,等. 纳板河自然保护区景观连接度变化分析[J]. 林业资源管理,2021(1):103-110.
- [19] FREY-EHRENBOLD A, BONTADINA F, ARLETTAZ R, et al. Landscape connectivity, habitat structure and activity of bat guilds in farmland-dominated matrices[J]. Journal of applied ecology, 2013, 50(1):252-261.
- [20] SAURA S, ESTREGUIL C, MOUTON C, et al. Network analysis to assess landscape connectivity trends: application to European forests(1990-2000)[J]. Ecological indicators, 2011, 11(2):407-416.
- [21] ZETTERBERG A, MORTBERG U M, BALFORS B. Making graph theory operational for landscape ecological assessments, planning, and design[J]. Landscape and urban planning, 2010, 95(4):181-191.
- [22] LI Y Y, ZHANG Y Z, JIANG Z Y, et al. Integrating morphological spatial pattern analysis and the minimal cumulative resistance model to optimize urban ecological networks: a case study in Shenzhen City, China[J]. Ecological processes, 2021, 10(1):862-876.
- [23] 殷炳超. 气候变化下的闽南地区景观连接度评估与生态廊道构建[D]. 厦门:厦门大学,2019.
- [24] ERNST B W. Quantifying connectivity using graph based connectivity response curves in complex landscapes under simulated forest management scenarios[J]. Forest ecology and management, 2014, 321:94-104.
- [25] 朱彦鹏,迟德富,张星耀. 景观连接度在森林病虫害控制中的应用[J]. 世界林业研究,2009,22(3):52-57.
- [26] MCINTYRE N E, WRIGHT C K, SWAIN S, et al. Climate forcing of wetland landscape connectivity in the Great Plains[J]. Frontiers in ecology and the environment, 2014, 12(1):59-64.
- [27] 赵超超,唐润,翟瑞,等. 福建省道路网络对森林覆盖连接度的影响[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2021,35(5):27-32.
- [28] 杜志博,李洪远,孟伟庆. 天津滨海新区湿地景观连接度距离阈值研究[J]. 生态学报,2019,39(17):6534-6544.
- [29] 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.
- [30] 刘常富,周彬,何兴元,等. 沈阳城市森林景观连接度距离阈值选择[J]. 应用生态学报,2010,21(10):2508-2516.
- [31] FORMAN R T T, DEBLINGER R D. The ecological road-effect zone of a Massachusetts (USA) suburban highway[J]. Conservation biology, 2000, 14(1):36-46.
- [32] 刘世梁,尹艺洁,杨珏婕,等. 漫湾库区景观破碎化对区域生境质量的影响[J]. 生态学报,2017,37(2):619-627.

[责任编辑:丁 蓉]