DOI: 10.20103/j.stxb.202404110800
曾小箕,黄英鹏,谢花林,李嘉诚.2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张对生境质量的影响.生态学报,2024,44(23):10807-10816.
Zeng X J, Huang Y P, Xie H L, Li J C.The impacts of road expansion on natural habitat quality in Poyang Lake area from 2000 to 2020.Acta Ecologica Sinica,2024,44(23):10807-10816.

2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张对生境质量的影响

曾小箕[1,2],黄英鹏[1,2],谢花林[1,2,*],李嘉诚[1,2]
1 江西财经大学应用经济学院,南昌　330013
2 江西财经大学生态文明研究院,南昌　330013

摘要:过去几十年,鄱阳湖区经历了快速地道路扩张过程,给生态环境带来了严重威胁。道路扩张导致湿地景观破碎化、栖息地连接度和生境质量下降,对鄱阳湖的湿地保护和可持续发展构成了严峻挑战。定量评估道路扩张对景观格局和生境质量的影响对道路规划和生态保护具有重要意义。以鄱阳湖区为例,基于道路数据和土地利用/覆盖变化数据, 采用有效粒度尺寸(Effective Mesh Size, m_{eff})对鄱阳湖区 2000—2020 年的景观破碎化程度进行时空变化分析,结合 InVEST 模型分析道路扩张对生境质量的影响。结果表明:(1)鄱阳湖区近 20 年道路扩张过程不断加快,道路里程由 5152.69km 增加到 9213.18km,增长了 4060.49km,约 0.79 倍,铁路和高速公路扩张过程尤为明显,分别增加了 1482.25km 和 952.95km。道路扩张导致区域生境破碎化程度加剧,m_{eff}由 2000 年的 3754.32km^{2}减少至 2020 年的 2026.49km^2,减少比例高达 46.02%;(2)2000—2020 年,道路扩张过程占用的自然生境面积由 84.16km^{2}增加至 111.92km^2,增加了 27.76km^2,占全区自然生境总面积的 0.06%,且以占用自然生境中的林地为主。(3)道路扩张导致区域生境质量加速下降,2000—2020 年道路扩张过程导致区域生境质量从 0.74 下降到 0.71,下降了 4.6%。生境质量同时受到道路扩张过程的直接影响和间接影响。2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张过程对生境质量总的影响为 9.63%,其中直接影响为 2.65%,间接影响为 6.98%。铁路、高速和国道对生境质量的间接影响大于直接影响,省道对生境质量的直接影响大于间接影响。在鄱阳湖区需要控制道路扩张,同时要关注道路扩张过程对自然生境造成的直接和间接综合影响,从而采取有效措施保证鄱阳湖区道路建设与自然栖息地和生物多样性保护协调进行,促进区域的可持续发展。

关键词:道路扩张;自然生境;破碎化;鄱阳湖区; InVEST 模型

The impacts of road expansion on natural habitat quality in Poyang Lake area from 2000 to 2020

ZENG Xiaoji[1,2], HUANG Yingpeng[1,2], XIE Hualin[1,2,*], LI Jiacheng[1,2]
1 *School of Applied Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang* 330013, *China*
2 *Institute of Ecological Civilization, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang* 330013, *China*

Abstract: In recent decades, the Poyang Lake area has experienced a rapid road expansion, which has brought serious threats to the local ecology and environment. Road expansion leads to wetland landscape fragmentation, habitat connectivity and habitat quality decline, which poses a serious challenge to wetland protection and sustainable development of Poyang Lake. Quantitatively assessing the impact of road expansion on landscape patterns and habitat quality is crucial for road planning and ecological protection. Taking the Poyang Lake area as an example, this study uses road data and land use/cover change data to analyze the spatiotemporal changes in landscape fragmentation from 2000 to 2020 using the effective mesh size (m_{eff}). The InVEST model is employed to analyze the impacts of road expansion on habitat quality. The results

基金项目:国家自然科学基金地区项目(42061040);江西省教育厅科技项目(GJJ190289);江西省高校人文社会科学研究项目(JC19211)
收稿日期:2024-04-11;　　**采用日期**:2024-09-05
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xiehl_2000@163.com

indicate that: (1) Over the past 20 years, the process of road expansion in the Poyang Lake area has accelerated, with road mileage increasing from 5152.69 km to 9213.18 km, an increase of 4060.49 km, approximately 0.79 times, among different kinds of roads, railways and highways had obvious increase of mileage, with an increase of 1482.25 km and 952.95 km respectively. Road expansion has intensified regional habitat fragmentation, with m_{eff} decreasing from 3754.32 km^2 in 2000 to 2026.49 km^2 in 2020, a reduction of 46.02%; (2) From 2000 to 2020, the area of natural habitats occupied by road expansion increased from 84.16 km^2 to 111.92 km^2, an increase of 27.76 km^2, accounting for 0.06% of the total natural habitat area, with forest land being the primary type of occupied natural habitat; (3) Road expansion has led to an accelerated decline in regional habitat quality, with habitat quality dropping from 0.74 to 0.71 from 2000 to 2020, a decrease of 4.6%. Habitat quality is affected by both direct and indirect impacts of road expansion. The total impact on habitat quality caused by road expansion in Poyang Lake area from 2000 to 2020 was 9.63%, of which the direct impact of road expansion was 2.65% and the indirect impact of road expansion was 6.98%. Railways, highways, and national roads have a greater indirect impact on habitat quality than direct impact, while provincial roads have a greater direct impact than indirect impact. Therefore, it is necessary to control road expansion in the Poyang Lake area, focus on the direct occupation and indirect impact of the road expansion process on natural habitats, and take effective measures to coordinate road construction with the protection of natural habitats and biodiversity to promote regional sustainable development.

Key Words: road expansion; natural habitat; fragmentation; Poyang Lake area; InVEST model

鄱阳湖是国际重要湿地,也是亚洲最大的候鸟越冬栖息地。鄱阳湖区是我国重要的生态功能保护区,具有调洪蓄水、调节气候、提供栖息地等多种重要的生态功能[1]。然而,由于气候变化和人类活动等因素,鄱阳湖区的生态系统也面临着严峻地挑战,如城市扩张、道路建设和气温升高等导致湿地明显退化[2—3]。其中,道路建设作为人类活动的重要组成部分,对鄱阳湖湿地产生了深远影响。一方面,道路建设促进了区域的社会经济水平的提高[4—5],另一方面,道路建设导致区域景观破碎化、自然生境连通性下降和生物多样性减少等问题[6—8]。因此科学准确地评估道路扩张对鄱阳湖区景观格局和生境质量的影响,对于保护湿地、维持区域生物多样性和可持续发展具有重要意义。

从生态学的角度来看,道路扩张是指将动植物栖息地转换为“路基和路域”,形成经济廊道,从而引起城市化蔓延的过程[9—10]。生境质量是指森林、草地和湿地等各种生态系统为物种与种群提供适合于持续发展与生存条件的能力,它也是维持区域生物多样性和实现可持续发展的重要基础[11—12]。道路扩张会对自然生境产生直接或间接的影响,其影响尺度可以从种群一直到景观尺度[13—15]。一方面,道路扩张会通过直接占用栖息地,导致自然生境的丧失和破碎化[16—18]。另一方面,道路扩张过程还会通过加剧人类活动、环境污染和生物多样性减少来间接导致生境质量下降[19—20]。目前,已有学者在鄱阳湖流域开展了道路扩张、生境质量和景观格局变化等方面的工作[21—23]。在交通道路方面,郭泉恩[24]等分析了鄱阳湖生态区 1998—2020 年交通可达性格局演变特征,发现区域内可达性改善明显,城市间可达性差距缩小。朱寅健[25]发现环鄱阳湖区域交通网络通达性和旅游经济系统之间关联耦合程度较高。陆晴等[26]分析瑞兴于地区道路网络对景观格局及景观生态风险的影响,发现瑞兴于地区道路密度等级整体提高,道路网络对建设用地的景观指数影响较大。如赖智勇[23]等对赣江流域 1980—2030 年生境质量时空格局演变特征进行分析并预测,呈现林地减少、建设用地增加和生境质量下降的趋势。尚俊[27]分析了鄱阳湖区 1995—2015 年生境质量时空演变特征,发现水域、林地、草地生境质量受到的干扰逐渐增强。已有成果为认识道路扩张对自然生境的影响提供了良好的研究基础,但是关于鄱阳湖区道路扩张导致的破碎化程度及其对生境质量的影响仍不清楚。揭示鄱阳湖区道路扩张对景观破碎化和生境质量的影响,是探明道路建设对该地区湿地影响的关键。

本研究目的是揭示鄱阳湖区道路扩张过程及其对生境质量的综合影响。结合历史道路数据和有效粒度尺寸(Effective Mesh Size, m_{eff})指标,评估了道路扩张导致的景观破碎化程度。基于 InVEST 模型的生境质量

模块计算了道路扩张过程对生境质量的直接和间接影响。旨在探究以下科学问题:(1)鄱阳湖区近 20 年道路扩张过程导致景观破碎化程度;(2)道路扩张对生境质量造成的影响。该研究可以为鄱阳湖湿地保护和可持续发展提供科学依据和管理建议。

1　研究区和数据

1.1　研究区

研究区为鄱阳湖区(东经 114°29′—117°25′,北纬 28°30′—30°06′),位于长江中游地段、江西省北部,也是长江流域重要的组成部分之一(图 1)。以我国最大淡水湖鄱阳湖为中心,鄱阳湖区的范围包括南昌、九江、景德镇、上饶、鹰潭和抚州等市的 42 个县区[28],总面积约为 $6.99\times10^4 km^2$,以湖泊湿地和丘陵平原为主,属于亚热带季风气候。鄱阳湖区是我国南方重要的生态屏障,在洪水调蓄、气候调节和生物多样性保护等方面, 其生态地位和经济功能极为重要。近年来在“中部地区崛起”等国家战略的带领下,鄱阳湖区经济发展迅速,人口激增,道路扩张迅速。截止 2020 年,鄱阳湖区内分布了铁路、高速、国道、省道等交通线路,高速公路通车里程达到了约 1500km,已经形成了沪昆、济广、福银、昌九、昌樟等为主体的鄱阳湖区高速路网;铁路主要有京九线、浙赣线、皖赣线、昌福高铁线、赣深高铁线和安九高铁线等。随着经济的发展和城市化进程加剧,道路网络规模不断扩张,区域景观破碎化现象也日益显著,从而导致生境破碎化、生物多样性下降、生态系统稳定性失调等一系列生态环境问题。

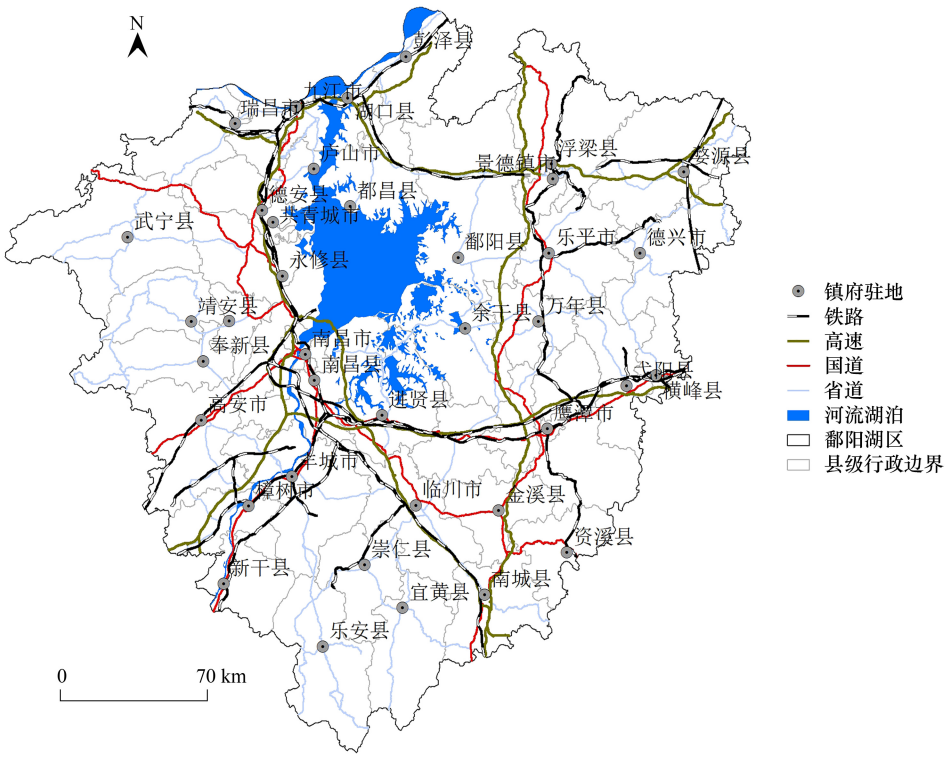

图 1　研究区

Fig.1　Study area

1.2　数据

研究所使用数据主要包括土地利用/土地覆盖数据、道路交通数据、行政边界及地理信息辅助数据。土地利用/土地覆盖数据在中国科学院资源环境科学与数据中心获得(https://www.resdc.cn/),它的空间分辨率为 30m,该数据主要基于美国卫星 Landsat MSS、TM/ETM 和 Landsat 8 卫星遥感数据,通过人机交互式目视解

译的方式获得。综合精度达 95%以上,Kappa 系数为 0.9 以上[29]。道路交通数据来源于北京大学城市与环境学院地理数据平台(http://geodata.pku.edu.cn),使用了 2000 年和 2020 年铁路、高速、国道和省道四种道路类型数据。行政边界数据及地理地理信息辅助数据来源于国家基础地理信息中心(http://ngcc.cn/ngcc),为了保证数据一致性,所有栅格数据采用 Albers 等积圆锥投影,分辨率为 30m。

2 方法

2.1 道路破碎化几何度量

有效粒度尺寸[30—31](Effective Mesh Size,m_{eff})是在某一面积单元内随机两点被连接起来的概率,比如生态学中,在有障碍物(城市、道路、河流等)条件下,在某一景观区域内多栖息地或双栖息地的动物能够不遭遇任何破碎或片段化因素,可以平稳跨越并能够使用不同的栖息地。它也可以被理解为动物在觅食、寻找配偶或水源时顺利到达目的地,不会受到道路等障碍物的隔离[32—33]。所以栖息地斑块面积越大,不期而遇的概率就会越大,景观基质中一旦阻碍物多起来,不期而遇概率就会下降。因此本研究选择有效粒度尺寸(m_{eff})来定量分析道路导致的景观破碎化水平,研究采用跨边界有效栅格,其中整合跨边界算子(Cross Boundary Caculation, CBC),同时还剔除了指标的面积敏感性缺陷[30],计算公式如下:

$$m_{\text{eff}} = A_{\text{total}} \times \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{A_i}{A_{\text{total}}}\right)^2 = \frac{1}{A_{\text{total}}} \sum_{i=1}^{n} A_i^{\,2} \tag{1}$$

式中,m_{eff}表示景观的有效粒度尺寸,单位为 hm^2。n 表示景观中非破碎斑块数量,A_i表示景观中 i 斑块的大小($i=1,\cdots,n$),A_{total}表示景观的总面积。有效粒度尺寸越小,破碎化程度就越高。

在 Fragstats4.2 软件平台支持下,基于 2000 和 2020 年道路数据,分别计算 2000 年和 2020 年铁路、高速、国道和省道不同道路类型的 m_{eff}。同时,合并铁路、高速、国道和省道数据,分别计算出 2000 年和 2020 年全部道路的 m_{eff}。

2.2 量化区域生境质量空间格局

参考国际自然保护联盟发布的生境分类标准[34],选取林地、草地、水域和未利用地作为自然生境,城镇建设用地、城乡居民点、铁路、高速、国道、省道和其他建设用地作为威胁源,使用 InVEST 模型的生境质量模块量化 2000—2020 年区域生境质量空间格局动态。生境质量的计算公式为:

$$Q_{xj} = H_j\left(1 - \frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z}\right) \tag{2}$$

式中,Q_{xj}为 j 类土地利用/覆盖类型中 x 像元的生境质量;H_j为 j 类土地利用/覆盖类型的生境适宜性;D_{xj}为 j 类土地利用/覆盖类型中像元 x 受到的总胁迫水平;k 为半饱和常数,z 为归一化常量。D_{xj}的计算公式为:

$$D_{xj} = \sum_{r=1}^{R} \sum_{y=1}^{Y_r} \left(\frac{w_r}{\sum_{r=1}^{R} w_r}\right) r_y\, i_{rxy}\, \beta_x\, S_{jr} \tag{3}$$

式中,R 为威胁因子总数,Y_r为栅格总数,w_r为受威胁影响的权重,β_x为可达性,S_{jr}为敏感性,i_{rxy}为像元 y 中威胁因子r_y对像元 x 的威胁类型。i_{rxy}的计算公式为:

$$i_{rxy} = 1 - \left(\frac{d_{xy}}{d_{r\max}}\right) \tag{4}$$

$$i_{rxy} = \exp\left[-\left(\frac{2.99}{d_{r\max}}\right) d_{xy}\right] \tag{5}$$

式中,d_{xy}为像元 x 与 y 的距离,$d_{r\max}$为威胁因子的最大影响距离。生境适宜性与威胁因子参数均参考相关研究[15,23,27]及 InVEST 模型使用手册设置,根据国内外学者对各级道路影响生态系统范围的界定[14—16],并结合鄱阳湖区的实际特点,铁路、高速、国道和省道的最大影响距离分别选取 1.00km、1.50km、1.00km 和 0.5km(表 1)。

表 1　InVEST 模型参数

Table 1　The parameters of the InVEST model

威胁因子 Threat	最大影响距离 Maximum distance/km	每种威胁的相对影响 Relative impact of each threat	衰退类型 Decay type	敏感度 Relative sensitivity of each habitat type to each threat			
				林地 Woodland	草地 Grassland	水域 Water	未利用地 Unused land
水田 Paddy	4	0.6	线性	0.6	0.5	0.4	0.3
旱地 Dry land	4	0.6	线性	0.6	0.5	0.5	0.4
城市 Urban	10	1	指数	0.9	0.7	0.7	0.2
农村居民点 Rural	6	0.8	指数	0.7	0.6	0.6	0.2
其他建设用地 Others	5	0.7	指数	0.8	0.6	0.7	0.2
铁路 Roadway	1	0.6	线性	0.8	0.7	0.8	0.3
高速 Highway	1.5	0.7	线性	0.8	0.6	0.6	0.2
国道 National road	1	0.5	线性	0.7	0.6	0.5	0.3
省道 Provincial road	0.5	0.5	线性	0.6	0.6	0.5	0.2

在 ArcGIS 10.6 中按照自然断点分级法,将鄱阳湖区生境质量划分为差(0—0.1)、一般(0.1—0.5)、中等(0.5—0.7)、较高(0.7—0.8)、高(0.8—1.0)五个等级分别统计了不同年份各等级生境面积占比及生境指数平均值[35]。

2.3　评估区域道路扩张过程对生境质量的影响

从道路扩张过程对生境质量的总影响、直接影响与间接影响等三个方面,综合评估鄱阳湖区道路扩张过程对区域生境质量的影响。在参考任强等[36—37]开展的研究基础上,我们通过计算自然栖息地质量的退化率来评估道路扩张对自然栖息地质量的总影响。2000—2020 年道路对生境质量的影响评价公式为:

$$\Delta Q_x^{2000-2020} = \frac{Q_x^{2020} - Q_x^{2000}}{Q_x^{2000}} \times 100\% \tag{6}$$

式中,$\Delta Q_x^{2000-2020}$为 x 地区 2000—2020 年道路扩张引起的生境质量退化率。Q_x^{2000}为 2000 年区域生境质量。Q_x^{2020}为 2020 年受道路扩张影响后的区域生境质量,利用更新后的 LULC 数据和威胁因子进行计算,两者整合了 2000 年的原始数据和 2000—2020 年的道路扩张面积。在这种情况下,未发生扩张的地区的土地覆盖类型及除道路以外的威胁因素均没有更新,以避免道路扩张以外的影响。

3　结果

3.1　区域 2000 年生境质量空间格局

鄱阳湖区自然生境面积大,生境质量整体水平较高。2000 年鄱阳湖区自然生境面积为 44354.15km^2,占区域总面积的 63.45%,其中生境类型以林地为主,林地面积为 35190.50km^2,约占全区自然生境面积的 79.34%。生境质量为 0.74,属于较高水平(图 2)。其中,高质量自然生境面积为 35190.50km^2,占全区自然生境总面积的 79.34%,主要沿着鄱阳湖区林地外围分布。较高质量的自然生境面积为 5574.63km^2,占全区自然生境总面积的 12.57%,主要分布在鄱阳湖区中心地带及其北部地区。差质量的自然生境面积为 864.75km^2,占全区自然生境总面积的 1.95%,主要分布在鄱阳湖核心地带的周边区域,以未利用地为主。

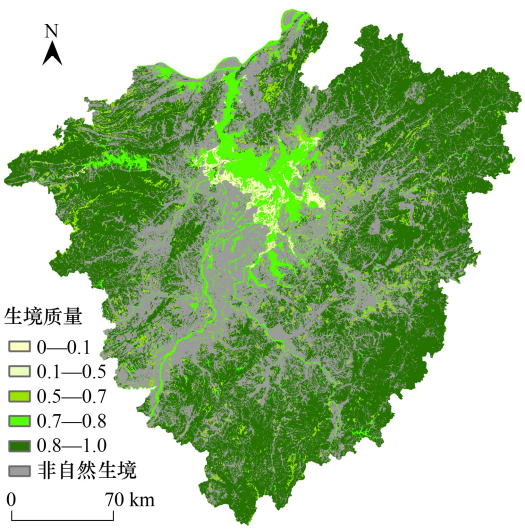

图 2　2000 年鄱阳湖区生境质量空间格局

Fig.2　Spatial patterns of natural habitat quality in 2000

3.2 区域 2000—2020 年道路扩张过程

2000—2020 年间鄱阳湖区经历了快速地道路扩张过程,全区的铁路、高速、国道和省道总里程数从 5152.69km增加到 9213.18km,增长了 4060.49km,约 0.79 倍(图 3)。其中,铁路和高速公路扩张过程尤为明显,铁路里程由 2000 年的 866.30km 增加至 2020 年的 2348.55km,增长了 1.71 倍。如沪昆(上海至昆明)高速铁路,昌福(南昌至福州)铁路、衢九(衢州至九江)铁路等经过区域内的铁路增加。高速公路由 2000 年的 609.42km增加至 2020 年的 1562.37km,增长了约 1.56 倍。如济广高速(G35)、杭瑞高速(G56)、福银高速(G70)等国家高速公路经过鄱阳湖区。国道和省道扩张过程相对缓慢,国道由 2000 年的 1180.44km 增长到 2020 年的 1717.88km,省道由 2000 年的 2496.53km 增长至 2020 年的 3584.39km。

如图 4,鄱阳湖区道路整体景观的 m_{eff}在 2000 年为 3754.32km^2,2020 年大幅减少为 2026.49km^2,减少比例高达 46.02%,说明 20 年间由道路导致的景观破碎化程度大幅加剧。其中高速公路的 m_{eff}变化最大,由 2000 年的 45277.75km^{2}减少至 2020 年的 12563.40km^2,减少了 72.25%。省道和铁路,减少幅度分别达到了 34.93%和 28.43%。国道的 m_{eff}变化最小,2000 年至 2020 年间仅减少了 2.53%。

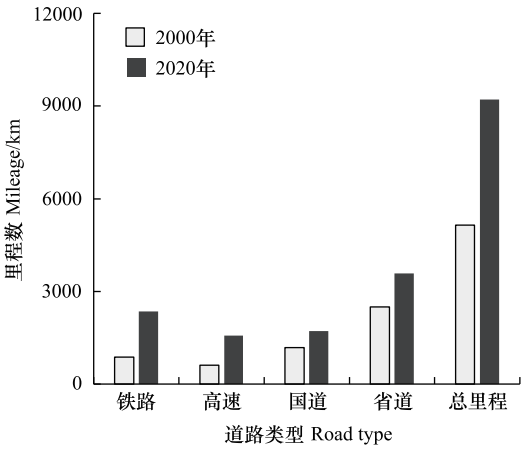

图 3 2000—2020 年道路里程变化

Fig.3 Change of Road mileage from 2000 to 2020

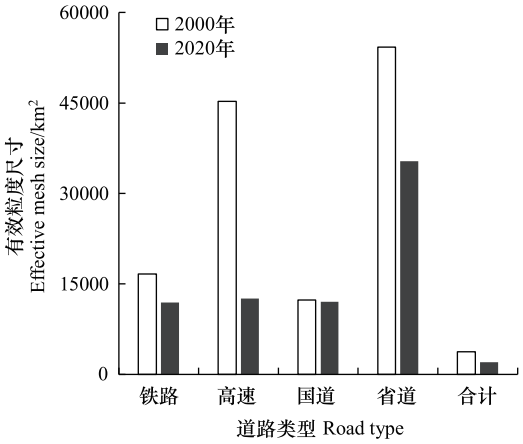

图 4 2000—2020 年 m_{eff}变化

Fig.4 Change of m_{eff} from 2000 to 2020

3.3 区域 2000—2020 年道路扩张对生境质量的影响

鄱阳湖区道路扩张过程加速了占用区域自然生境。2000—2020 年,道路扩张过程占用的自然生境面积由 84.16km^{2}增加至 111.92km^2,增加了 27.76km^2,占全区自然生境总面积的 0.06%。2020 年铁路、高速公路、国道和省道分别占用了 27.93km^2、31.02km^2、12.47km^{2}和 40.50km^{2}的自然生境(表 2)。省道占用的自然生境面积最大,高速公路和铁路,占用自然生境最少的是国道。从不同生境类型来看,林地、草地、水域和未利用地的总面积分别减少了 94.24km^2、8.95km^2、8.53km^{2}和 0.20km^2。

鄱阳湖区道路扩张过程导致区域生境质量下降。2000—2020 年道路扩张过程导致区域生境质量从 0.74 下降到0.71,下降了 4.6%。从空间上来看(图 5),道路缓冲区内的生境质量处于中等水平,2000—2020 年缓冲区内的生境质量由 0.62 下降至 0.57,下降了 7.95%。道路扩张过程对自然生境的直接影响和间接影响存在差异。在道路缓冲区范围内,2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张过程导致的生境质量总影响为 9.63%。如表 3 所示,道路扩张对自然生境的间接影响大于直接影响,其中 2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张过程导致的自然生境直接影响为 2.65%,间接影响为 6.98%。从不同道路类型来看,2000—2020 年间铁路扩张对道路缓冲区范围内的生境质量影响最大,总影响为 11.27%,高速扩张对缓冲区范围内的生境质量影响为10.20%。国道和省道对缓冲区范围内的影响分别为 8.09%和 7.17%,省道扩张对自然生境的直接影响大于间接影响,直接影响为 4.44%,间接影响为 2.73%。

表 2　各道路所占用的生境类型面积

Tabel 2　The loss of natural habitat area from 2000 to 2020

占用面积 Occupied area/km^2	年份 Year	铁路 Railway	高速 Highway	国道 National road	省道 Provincial road	合计 Total
林地 Woodland	2000	9.96	5.91	14.52	39.01	69.41
	2020	22.57	26.80	10.08	34.79	94.24
草地 Grassland	2000	1.17	0.74	1.11	3.32	6.33
	2020	2.75	2.12	0.79	3.29	8.95
水域 Water	2000	1.52	1.41	2.20	2.99	8.11
	2020	2.60	2.04	1.53	2.36	8.53
未利用地 Unused land	2000	0.00	0.06	0.00	0.25	0.31
	2020	0.02	0.05	0.07	0.06	0.20
自然生境 Natural habitat	2000	12.65	8.11	17.82	45.58	84.16
	2020	27.93	31.02	12.47	40.50	111.92

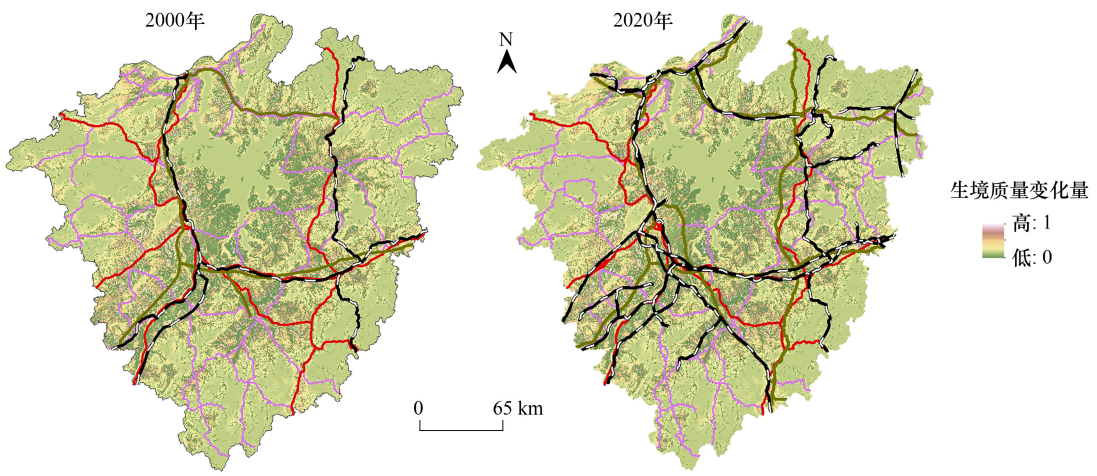

图 5　2000—2020 年道路引起的生境质量变化

Fig.5　Change of Habitat quality from 2000 to 2020

表 3　2000—2020 年道路扩张过程对生境质量的影响

Table 3　Impacts of road expansion on natural habitat quality

道路类型 Road type	总影响 Total impacts	直接影响 Direct impacts	间接影响 Indirect impacts
铁路 Railway	11.27	1.90	9.36
高速 Highway	10.20	2.33	7.87
国道 National road	8.09	2.44	5.65
省道 Provincial road	7.17	4.44	2.73
全区道路 All roads	9.63	2.73	6.98

4　讨论

4.1　m_{eff}指数可以有效地评估道路破碎化

现有评估道路扩张过程对景观破碎化的主要研究集中在道路缓冲区范围内的景观格局变化分析,大多数研究还是使用多个景观指数来综合描述景观破碎化过程。在景观生态学研究框架下,有很多学者提出过许多景观指标,但是用于交通道路扩张所导致的景观破碎化评估方面的量化指标较少,由于缺乏直观和实用的指

标,使用者对景观指标的理解不够充分,很容易导致在指导规划的过程中无法实现生态环境保护的目的。Jaeger[30]选择了效粒度尺寸(m_{eff})在内的22个传统的景观指数,在量化景观破碎化的稳定性方面进行对比研究,并从八方面对指标进行检验,研究发现m_{eff}指数具有直观解释事物的能力、其数学模型具有突出的简单性、低数据需求、对微型斑块的低敏感性、破碎化过程中不同的阶段的单一反馈特征、区分结构性差异的能力和具有数学同质性和添加性。并基于这些标准发现在这些景观破碎化指标中m_{eff}具有最佳适用性,而其他指标在不同程度上存在某些缺陷。该指数适用于分析交通网络的变化,并找出哪种交通模式导致景观破碎化程度最低。

从景观生态学的视角分析道路的扩张过程,道路就犹如人工入侵的建筑物,在基质中经历着和道路扩张对应的过程,即穿刺、切口、切割、扩散、萎缩和消耗六种过程,它代表了道路进入整个景观后土地利用变化的常规模型[9,30](图6)。研究结果与前人研究结果基本一致,Li等[32]使用m_{eff}评估了中国由道路、铁路和城市化引起的景观破碎化程度,发现结合m_{eff}可以真实反映道路变化导致的景观破碎化。鄱阳湖区2000—2020年间m_{eff}大幅下降,说明由道路导致的景观破碎化程度大幅加剧,该结果也与道路里程数呈现相对应趋势。王琪等[38]发现各级道路的影响规模由大到小依次为高速、国道和省道,这与本研究发现一致的规律,20年间,高速公路导致的破碎化程度最高,m_{eff}减少了72.25%,省道和铁路,m_{eff}减少幅度分别为34.93%和28.43%,同时高速公路具有双向车道和隔离护栏等设施,从而导致的景观破碎化程度也是最高,更容易使自然栖息地被剥夺或被片段化,因此要更加合理地规划或避开重要生态功能区。

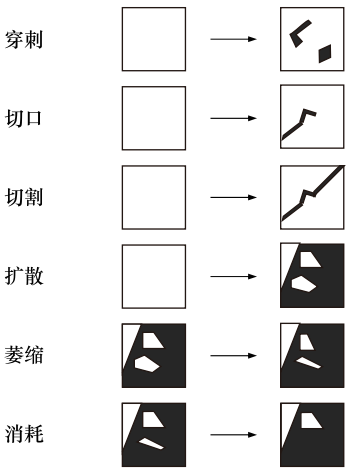

图6 道路扩张和破碎化过程

Fig.6 Road expansion and fragmentation process

4.2 鄱阳湖区道路扩张对自然生境的间接影响大于直接影响

目前,道路扩张已经对不同规模的自然栖息地造成了严重影响。近年来有大量学者开展了道路扩张对景观格局的影响研究,然而很少有研究关注其对自然栖息地的直接和间接影响方面的综合评估[39—40]。道路扩张对自然生境的影响主要涉及两个问题[41],一方面,道路建设直接占用了自然栖息地,剥夺了动物栖息地,另一方面,道路的建设和运营过程中将直接和间接影响到自然栖息地的质量。道路建设除了通过直接占用剥夺自然栖息地外,也可能通过改变当地的水文模式和影响地表径流从而间接影响周边自然栖息地[39]。一些体型大、寿命长、活动范围广、种群密度低和繁殖率低的肉食动物比其他动物更容易失去栖息地,Forman等人[9]的研究发现,为了保持大型肉食动物的种群稳定,其栖息地内的道路密度一般不应超过0.6km/km^2。然而,鄱阳湖区的道路密度由2000年的0.07km/km^{2}增加到2020年的0.13km/km^2,严重影响了区域大型肉食动物种群的稳定。一些森林物种对栖息地的面积的减小特别敏感,因为小森林斑块受到道路破碎化的影响,这意味着边缘化栖息地的比例增加,内部种栖息地会不断减少。特别严重的是穿越大片森林的线性和绵长的公路,这将会形成大量边缘化的栖息地,导致森林内物种将失去大片栖息地,这比森林内部砍伐影响更严重。道路可以直接占用栖息地,或通过间接影响周边栖息地的质量。影响有两种形式,一种是数量响应,在道路附近物种个体的丰富度和密度将降低。第二种是行为响应,形成动物的回避区域,周边栖息地质量的下降可能会导致农田栖息地丧失。鄱阳湖区自然栖息地丰富,物种多样性丰富,同时也是世界上最大的鸟类保护区,如今保护区内的鸟类已达300多种,道路扩张会导致鸟类的活动范围,离公路的距离越来越近,鸟类在繁殖季节还会受到交通干扰的影响。由于道路扩张导致该区域的自然生境破碎化加剧,生境质量下降。因此,评估道路扩张对自然栖息地的直接和间接影响有助于准确定量评价道路的生态效应,为进一步管理道路及其周边生态系

统提供科学依据。蒋爱萍等[40]对西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响,道路建设需要重点关注生态敏感脆弱区的植被保护,不同地区应该制定因地制宜的保护方案。陆晴等[26]发现景观生态风险与道路最短距离呈负相关,与道路密度呈正相关。研究发现道路扩张对鄱阳湖区生境质量的间接影响大于直接影响。2000—2020 年鄱阳湖区道路扩张过程由道路导致对自然生境的直接影响为 2.65%,间接影响为6.98%。通过结果可知,鄱阳湖区道路扩张占用最多的自然生境类型为林地,因而其对林地生态系统服务功能和生物多样性保护功能的影响也更为强烈,因而间接地影响区域生境质量下降。所以应该更加关注该区域道路扩张的间接影响。

4.3　政策启示

鄱阳湖区道路扩张过程对自然生境的影响具有三个特征,一是快速地道路扩张过程导致区域景观破碎化程度加剧,自然生境的阻碍作用明显。二是在不同生境类型中,道路扩张占用的林地面积最大。三是不同道路扩张过程对生境质量的直接和间接影响存在差异,间接影响大于直接影响。鄱阳湖区是中国重要的生态功能保护区,也是世界自然基金会指定的全球重要生态区,它承担着防洪蓄水、气候调节、污染治理等多种生态功能。迫切需要采取有效措施,减少道路扩张对自然栖息地的直接影响和间接影响。要合理规划道路,合理控制道路扩张。对鄱阳湖区重要的生态功能区、物种栖息地和高质量的自然生境地区划定严格的保护红线,减少道路扩张带来的负面影响。在道路规划中,应该充分考虑生物栖息地的完整性和交流,建立更多地生物安全通道,以保证物种的迁徙和生存。本研究在区分道路扩张对自然生境的直接和间接影响时,情景上假设只有道路增加,而其他土地利用类型不变的情况下分析生境质量的变化。但在现实情况中,道路缓冲区外生境质量下降不完全是由于道路扩张导致,还有是由于其他土地利用方式的改变所致。通过区分道路扩张对自然生境的直接和间接影响,能提高我们对不同道路类型对生境质量的不同影响的认识和理解,从而为科学规划道路和生态保护提供政策依据。

5　结论

本研究结合土地利用数据和道路数据,应用 InVEST 生境质量模块,有效地评估了鄱阳湖区近 20 年道路扩张过程及其对自然生境的综合影响。研究结果发现,第一,研究区 2000—2020 年道路扩张迅速,全区的铁路、高速、国道和省道的总里程数从 5152.69km 增加到 9213.18km,增长了 4060.49km。鄱阳湖区道路整体景观的 m_{eff}在 2000 年为 3754.32km^2,2020 年大幅减少为 2026.49km^2,减少比例高达 46.02%,20 年间由道路导致的景观破碎化程度大幅加剧,其中高速公路导致的破碎化程度最高,其次是省道和铁路,影响较小的是国道。第二,道路扩张过程对区域自然生境和生境质量的造成了一定的影响,自然生境和生境质量均表现出数量下降,质量下降的趋势。其中道路扩张主要占用的自然生境是以林地为主,2000—2020 年,道路扩张过程占用的自然生境面积由 84.16km^{2}增加至 111.92km^2,增加了 27.76km^2,占全区自然生境总面积的 0.06%。鄱阳湖区道路扩张过程导致区域生境质量下降。2000—2020 年道路扩张过程导致区域生境质量从 0.74 下降到 0.71,下降了 4.6%。且道路扩张对生境质量的间接影响大于直接影响。

因此,在道路扩张过程中,需同时关注道路建设对自然生境的直接影响和间接影响。建议合理规划和控制道路建设,在生态功能区、物种栖息地和高质量的自然生境地区等关键区域划定严格的保护红线,建立更多地生物安全通道,以保证物种的迁徙和生存,减少道路扩张带来的栖息地破碎化的影响。积极推行生态修复措施,协调道路建设与生物多样性保护,以促进区域可持续发展。

参考文献(References):

[1] 金斌松,聂明,李琴. 鄱阳湖流域基本特征、面临挑战和关键科学问题. 长江流域资源与环境, 2012, 21(3): 268-275.
[2] 傅伯杰. 地理学: 从知识、科学到决策. 地理学报, 2017, 72(11): 1923-1932.
[3] 危小建, 谢亚娟, 孙显星. 城市土地扩张与人类活动之间的关系识别——以环鄱阳湖城市群为例. 测绘科学, 2020, 45(1): 138-148, 156.
[4] 王子羿, 郭倩, 谢世友, 王刚, 李涛, 廖和平.西南贫困山区路网扩张与生态环境压力的关系.生态学报,2021,41(15):5961-5972.

[5] 黄梦娜, 马廷. 中国道路网引起的景观破碎格局及其对保护区的影响. 地球信息科学学报,2019, 21(8): 1183-1195.
[6] Yu X J, Zhang Z S, Xue Z S, Wu H T, Zhang H R. Effects of tidal channels and roads on landscape dynamic distribution in the Yellow River Delta, China. Chinese Geographical Science, 2020, 30(1): 170-179.
[7] Ran B C, Chen S L, Pan S Q, Li P, Ji H Y, Liu Q L. Impacts of sea-access roads on wetland landscape dynamics in the Yellow River Delta front. Ocean & Coastal Management, 2023, 244: 106834.
[8] 胡金晓, 朱明, 濮励杰, 蔡芳芳. 交通道路对区域土地利用变化的影响研究进展. 长江流域资源与环境, 2018, 27(1): 205-214.
[9] Forman R T T. Road ecology: a solution for the giant embracing us. Landscape Ecology, 1998, 13(4): III-V.
[10] Hall Linnea S, Krausman Paul R, Morrison Michael L. The habitat concept and a plea for standard terminology. Wildlife Society Bulletin, 1997, 25(1): 173-182.
[11] 聂宇, 杨彦敏, 王一航, 刘志锋, 何春阳, 陈歆. 拉萨市城关区近 50 年城市扩展过程对自然生境质量的综合影响.生态学报, 2022, 42(6): 2202-2220.
[12] 傅伯杰,陈利顶.景观多样性的类型及其生态意义.地理学报,1996,(5):454-462.
[13] 李月辉, 胡远满, 李秀珍, 肖笃宁. 道路生态研究进展. 应用生态学报, 2003, 14(3): 447-452.
[14] 李双成, 许月卿, 周巧富, 王磊. 中国道路网与生态系统破碎化关系统计分析. 地理科学进展, 2004, 23(5): 78-85+110.
[15] 殷利华, 杜慧敏, 姚忠勇. 京广高铁沿线武汉乌龙泉镇生境质量演变特征研究. 风景园林, 2024, 31(2): 102-110.
[16] 刘世梁, 温敏霞, 崔保山, 董世魁. 道路网络扩展对区域生态系统的影响——以景洪市纵向岭谷区为例. 生态学报, 2006, 26(9): 3018-3024.
[17] 李俊生, 张晓岚, 吴晓莆, 全占军, 范俊韬. 道路交通的生态影响研究综述. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1169-1175.
[18] 刘世梁, 刘琦, 王聪, 杨珏婕, 邓丽. 道路建设对区域植被类型的影响. 应用生态学报, 2013, 24(5): 1192-1198.
[19] 刘世梁, 崔保山, 杨志峰, 董世魁. 道路网络对澜沧江流域典型区土地利用变化的驱动分析. 环境科学学报, 2006, 26(1): 162-167.
[20] 刘佳妮, 李伟强, 包志毅. 道路网络理论在景观破碎化效应研究中的运用——以浙江省公路网络为例. 生态学报, 2008, 28(9): 4352-4362.
[21] 吕大伟, 蔡海生, 张学玲, 罗海玲, 曾珩, 张婷. 基于 InVEST 模型的万年县生境质量时空演变与景观格局分析. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 783-793.
[22] 杨立言, 陈万旭, 曾杰, 王官政, 原晋涛.长江流域城镇化对生境质量的影响梯度差异研究.生态学报, 2024,44(10): 4038-4050.
[23] 赖智勇, 廖富强, 舒晓波, 万智巍. 赣江流域生境质量时空格局演化及预测研究. 长江流域资源与环境, 2024,1-21[2024-09-05].http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20240109.1514.002.html.
[24] 郭泉恩, 钟业喜, 熊文平. 鄱阳湖生态经济区交通格局演变及区域效应研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(9): 1194-1201.
[25] 朱寅健. 环鄱阳湖区域交通网络通达性与旅游一体化发展. 长江流域资源与环境, 2019, 28(4): 853-862.
[26] 陆晴, 刘根林, 闫冰, 赵东升. 道路网络对景观格局及景观生态风险的影响——以瑞兴于地区为例. 生态学杂志, 2022, 41(11): 2236-2244.
[27] 尚俊, 蔡海生, 龙月, 曾君乔, 陈艺, 张学玲. 基于 InVEST 模型的鄱阳湖区生境质量时空演化及其变迁特征分析. 长江流域资源与环境, 2021, 30(8): 1901-1915.
[28] 魏国恩, 刘耀彬, 李汝资, 李硕硕, 骆康, 刘澄浩. 近 40 年鄱阳湖区“三生空间”格局转型与空间异质机制研究. 生态学报, 2024, 44(6):2308-2322.
[29] 徐新良, 刘纪远, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新. 中国多时期土地利用遥感监测数据集(CNLUC).资源环境科学数据注册与出版系统(http://www.resdc.cn/DOI),2018.DOI:10.12078/2018070201).
[30] Jaeger J. Landscape division, splitting index, and effective mesh size: new measures of landscape fragmentation. Landscape Ecology, 2000, 15(2): 115-130.
[31] Moser B, Jaeger J A G, Tappeiner U, Tasser E, Eiselt B. Modification of the effective mesh size for measuring landscape fragmentation to solve the boundary problem. Landscape Ecology, 2007, 22(3): 447-459.
[32] Li T A, Shilling F, Thorne J, Li F M, Schott H, Boynton R, Berry A M. Fragmentation of China's landscape by roads and urban areas. Landscape Ecology, 2010, 25(6): 839-853.
[33] 朱耀军, 王成, 贾宝全, 栗娟. 基于景观可达性的广州市林地边界动态分析. 生态学报, 2011, 31(07): 1962-1969.
[34] IUCN. Habitats Classification Scheme(Version 3.1). In: The IUCN Red List of Threatened Species (Version 2013.1). 2013. Available at: http://www.iucnredlist.org.
[35] 傅春, 王乐志, 邓俊鹏, 罗勇, 付耀宗. 不同影响因素对鄱阳湖流域生境质量变化特征分析. 中国农村水利水电, 2021(11): 1-8, 23.
[36] Ren Q, He C Y, Huang Q X, Shi P J, Zhang D, Güneralp B. Impacts of urban expansion on natural habitats in global drylands. Nature Sustainability, 2022, 5(10): 869-878.
[37] Ren Q, He C Y, Huang Q X, Zhang D, Shi P J, Lu W L. Impacts of global urban expansion on natural habitats undermine the 2050 vision for biodiversity. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 190: 106834.
[38] 王琪, 朱佩娟, 文宁, 张伟娜. 道路交通网络对生态空间质量影响效应研究 ——以长沙市为例. 湖南师范大学自然科学学报, 2023, 46(2): 84-94.
[39] 李倩雯, 靳甜甜, 蒋爱萍, 彭期冬, 林俊强, 张迪. 道路建设对西南地区景观格局的影响. 生态学报, 2023, 43(6): 2310-2322.
[40] 蒋爱萍, 靳甜甜, 张丽萍, 李倩雯, 朱博然, 张迪. 西南地区道路建设对植被净初级生产力的影响. 生态学报, 2022, 42(9): 3624-3632.
[41] 王化平, 李太安. 道路生态学在植物和动物方面的研究动态综. 西部交通科技, 2009, 4(11): 107-116+131.