引文格式:何建华,黄冕,赵红卓,等.城市网络化空间增长过程及其对区域生态系统的影响:以长江中游城市群为例[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(10):2097-2110.DOI:10.13203/j.whugis20230260

Citation: HE Jianhua, HUANG Mian, ZHAO Hongzhuo, et al. Process of Urban Networked Spatial Growth and Its Impact on Regional Ecosystem: A Case Study of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(10):2097-2110.DOI:10.13203/j.whugis20230260

城市网络化空间增长过程及其对区域生态系统的影响:以长江中游城市群为例

何建华[1] 黄 冕[1] 赵红卓[1] 陈 飞[2]

1 武汉大学资源与环境科学学院,湖北 武汉,430079

2 广州市资源规划和海洋科技协同创新中心,广东 广州,510060

摘 要:探讨城市网络化过程的生态效应对区域可持续发展具有重要意义。现有研究从外部性视角开展城市网络对生态系统功能的影响研究,对生态系统网络结构受到的影响关注较少。基于夜间灯光数据和形态学空间格局分析模型分别构建了城市网络和生态网络,以长江中游城市群为研究区域,通过二次指派程序分析和空间分析等方法,探讨城市网络化空间增长对区域生态系统的影响。结果表明:(1)2000—2020年,长江中游城市群网络化空间增长趋势日益显著,由原来的单中心集聚式的发展转向多中心、分散式的增长模式,城市之间的联系日益密切。(2)同时期区域生态网络结构日趋复杂,生态源地和廊道数量有所增加,网络连通效率有所提升。(3)城市网络化空间增长对区域生态系统具有正向外部性。从结构上看,生态系统结构受到城市网络化发展的正向作用,整体网络结构状况有所改善。但随着网络化发展过程的持续推进,生态源地和廊道会逐渐被侵占扰动,网络中物质运输和能量流动受到阻碍。从功能上看,城市网络化发展缓解了区域生态系统功能所受的影响,其受影响程度与网络交互强度呈显著负相关。

关键词:城市网络;生态网络;网络外部性;城市化;长江中游城市群

中图分类号:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-15

DOI:10.13203/j.whugis20230260 **文章编号**:1671-8860(2025)10-2097-14

Process of Urban Networked Spatial Growth and Its Impact on Regional Ecosystem: A Case Study of Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River

HE Jianhua[1] *HUANG Mian*[1] *ZHAO Hongzhuo*[1] *CHEN Fei*[2]

1 School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Collaborative Innovation Center for Natural Resources Planning and Marine Technology of Guangzhou, Guangzhou 510060, China

Abstract: **Objectives**: It is of great significance to explore the ecological effect of urban network process for regional sustainable development. Existing studies have studied the impact of urban network on ecosystem function from the perspective of externality, but paid little attention to the impact of ecosystem network structure. **Methods**: We construct urban network and ecological network respectively based on night light data and morphological spatial pattern analysis model. Taking urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River as the research area, quatratic assumption procedure analysis and spatial analysis are used to explore the impact of urban network on regional ecosystem. **Results**: The conclusions are as follows: (1) From 2000 to 2020, the network spatial growth trend of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River has become increasingly significant. The former single-center agglomeration development has shifted to a multi-center and decentralized growth pattern, and the connections between cities

基金项目:国家自然科学基金(42171260);广州市资源规划和海洋科技协同创新中心项目(2023B04J0301, 2023B04J0326)。

第一作者:何建华,博士,教授,现从事城市网络化重构过程分析建模、空间优化研究。hjianh@whu.edu.cn

通信作者:黄冕,硕士。huangmian0724@whu.edu.cn

have become increasingly close. (2) During the same period, the regional ecosystem network structure became increasingly complex, the number of ecological sources and corridors have increased, and the overall network connectivity efficiency has improved. (3) The growth of urban network has a positive externality on regional ecosystem. From the perspective of structure, the ecosystem structure is affected by the positive effect of urban network development, and the overall network structure has been improved. However, with the continuous advancement of the network development, ecological sources and corridors will gradually be occupied and disturbed, and the flow of matter and energy in the network may be hindered. From the functional point of view, urban network development alleviates the impact of regional ecosystem function. There was a significant negative correlation between ecosystem function and network interaction intensity. **Conclusions**: The results can provide reference for the coordinated development of urban network process and ecosystem.

Key words: urban network; ecological network; network externality; urbanization; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

全球化和交通通讯技术的快速发展,加速了物质、能量、信息等要素在区域间的流动,城市间的联系日益密切[1-2],区域空间组织模式由传统单中心蔓延式的空间增长模式向多中心网络化的空间增长模式转变[3-4]。城市网络化空间增长成为当前城市化的重要趋势和新的发展模式[5],加大对区域生态系统的压力,使人地关系的矛盾日趋凸显,对区域可持续发展产生重大影响[6-7]。具体而言,城市网络化增长过程中不仅会对本地区生态系统产生影响,也会因为网络中的要素流动及其所依托的区域基础设施联通对周边地区生态系统产生间接效应,改变城市化对生态系统影响的方式和程度[8-9]。因此,亟需深入分析城市网络化发展的生态效应,为城市化过程中生态保护、国土空间优化开发提供参考。

当前,针对城市网络化发展的生态效应研究主要从城市网络生态外部性的角度开展,主要包括正的外部性和负的外部性,即有助于生态系统的改善和加大对生态系统的影响[10]。具体来看,持城市网络具有正的生态外部性观点的学者们认为,城市网络化发展比如人口迁徙网络、企业关联网络、高铁交通网络、信息创新网络等网络,将有助于城市获取更大人口规模和先进技术,推动知识外溢和创新要素的空间集聚,提升自身优势[11],推动城市产业转型和绿色升级[12-13],从而改善生态环境质量,减小城市发展的生态压力。与此同时,社会管理网络、政策合作网络等城市网络[14],也将有助于城市之间、城市内部个体间相互沟通联系、协同配合[15],对环境污染[16]、气候治理的联防联治和生态系统服务等内容的管理与调配提供便利[17-18],达到正的生态外部性[19-20]。然而,持城市网络具有负的生态外部性观点的学者们则认为,在地理邻近、密切联系基础之上所形成的城市网络,伴随着外界资金投入、大量资源消耗、交通设施铺设以及环境污染型企业的迁入,更容易加剧区域生态系统的压力,使得环境污染、土地紧缺、碳排放等问题日益严重,产生了更加严重的生态外部性[21-22]。也有部分学者认为城市网络化发展的生态外部性应从正反两个方面结合起来看,比如,基于环境污染型企业所形成的城市网络具有较强的空间指向性和异质性,往往是从东部沿海发达地区指向中西部内陆欠发达地区以及多数工业城市,虽然对迁入地带来负的生态外部性,加大生态系统的负荷,但却为迁出地生态系统的改善、产业的绿色升级转型带来了可能,可以看作是当前经济发展的权宜之计。交通网络的不断推进在改善大城市生态系统的同时,也可能会对小规模、交通体系不成熟的城市带来负的生态外部性,需要结合情况有所权衡。

现有研究在城市网络化发展的生态效应探究为本文奠定了研究基础,也为中国城市化和生态保护的协调决策提供了参考,但仍在以下几个方面有待进一步讨论。首先,现有研究在分析城市网络生态外部性的内容方面,侧重于对生态系统功能等方面的衡量,如空气污染、碳排放、生态系统服务等[23],较少顾及生态网络、连通性、结构稳定性等生态系统结构方面的影响,这可能会降

低生态系统保护的效率[24]。生态网络和连通性体现了不同生态系统或栖息地之间的物种迁移、物质运输和能量流动,稳定性则反映了在外部冲击时生态系统保持其结构和功能的能力,这些指标都是城市网络化进程中生态系统保护需要重点关注的方面。同时,传统要素流构建的城市网络可以看作是城市联系的一种抽象表示,在地理实体上空间显式化的表达有所欠缺,不利于城市网络化发展对生态系统结构的影响探究。

本文从城市网络和生态网络两个系统的关系切入,选用2000—2020年多时相空间信息数据,采用夜间灯光数据和空间显式方法构建城市网络,利用形态学空间格局分析方法(morphological spatial pattern analysis, MSPA)和最小阻力面模型(minimum cumulative resistance, MCR)构建生态网络[25],在各自网络分析的基础上对两者进行空间分析,以长江中游城市群为研究区域,探究城市网络化空间增长过程及其对区域生态系统的影响,分析这一影响的时空变化趋势,为区域可持续发展、生态环境保护提供参考。

1　研究区域与数据

1.1　研究区域概况

长江中游城市群位于中国长江中游地区,包括湖北、湖南、江西3个省份的35个市级行政单元。研究区城市间社会经济等各项合作密切,联系频繁,一体化发展趋势明显。过去20年间经历快速城镇化进程,形成了以武汉为中心的武汉都市圈、以长沙为中心的长株潭城市群和以南昌为中心的环鄱阳湖城市群。区域内有长江、洞庭湖和鄱阳湖等众多河流湖泊和横亘南北的罗霄山脉,又坐拥江汉平原、洞庭湖平原和鄱阳湖平原等平原区域,是中国中部地区重要的生态保育区,生态系统地位重要且面临着日益巨大的城市化压力。本文以长江中游城市群为案例进行研究,探讨城市群网络化空间增长对区域生态系统的影响。

1.2　数据来源

研究框架如图1所示。夜间灯光观测数据、土地利用数据、人口和公里格网数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn/)和国家地球系统科学数据中心共享服务平台(http://www.geodata.cn/)。植被覆盖度、植被净初级生产力等数据从谷歌地球引擎平台(https://code.earthengine.google.com/)计算获取。栖息地质量利用InVEST软件进行测算,景观格局指数使用Fragstats 4.2.1软件进行测算,生态网络通过Guidos tool box 3.1以及Confer 2.6和Linkage mapper 3.0构建,使用Ucinet 6.0进行社会网络分析,Stata软件进行面板计量模型分析,ArcGIS 10.2平台进行空间分析。

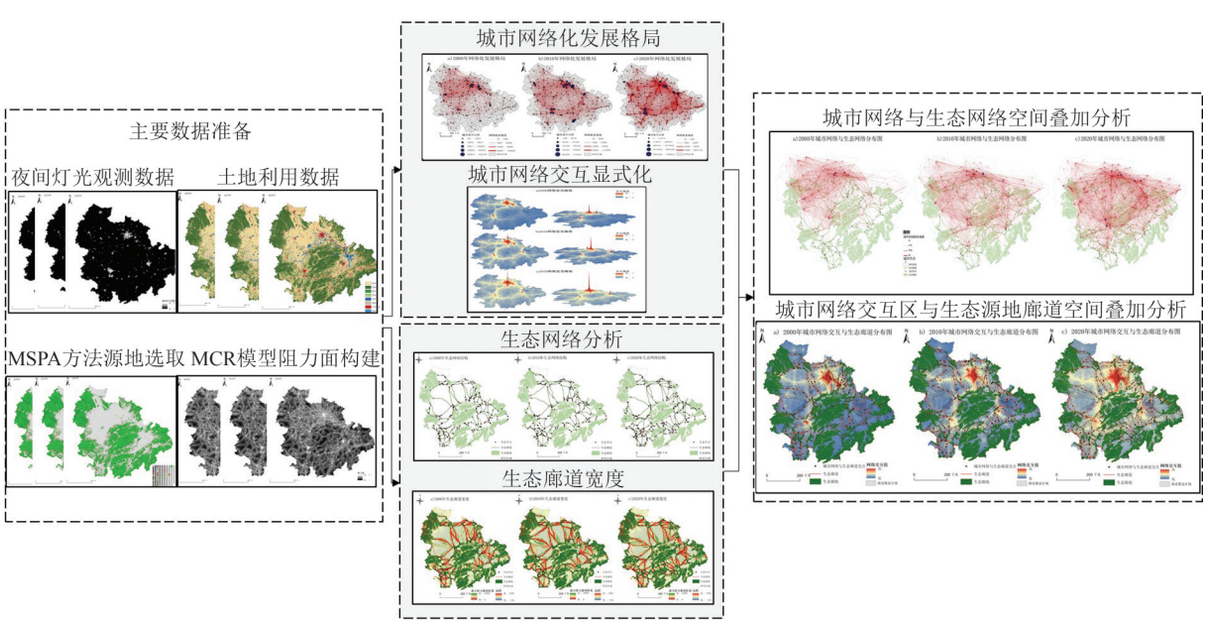


图1　研究框架

Fig. 1　Research Framework

2 研究方法

2.1 城市网络化空间增长测度方法

2.1.1 城市空间增长强度测度

本文运用邻近扩张指数(proximity expansion index, PEI),从空间形态学角度描述城市空间增长的强度和方向,以此来反映网络化发展过程中城市空间增长紧凑或分散发展的趋势[26]。PEI的计算公式为:

$$P=\frac{1}{N+\left(1-\frac{S_t}{S_n}\right)} \tag{1}$$

式中,P为PEI值;N为每个新增城市斑块向外做缓冲区的数量;S_n为最外层缓冲区面积;S_t为最外层缓冲区面积与旧斑块的相交重叠面积。根据不同的PEI值定义不同的城市空间增长类型,其中,PEI属于(2/3,1]为填充型增长,属于(1/2,2/3]为边缘型增长,属于(0,1/2]则为跳跃型增长。

平均邻近扩张指数(mean proximity expansion index, MPEI)反映了整个区域的空间增长强度,MPEI值越大,空间增长强度越小,具体计算公式为:

$$M=\sum_{i=1}^{n}\frac{E_i}{n} \tag{2}$$

式中,M为MPEI值;E_i为第i个新增城市斑块的PEI值;n为区域所有新增斑块的总数量。

面积加权平均PEI(aera weighted mean PEI, AWMPEI)用来反映出整个区域的景观格局。AWMPEI值越大,格局越紧凑,具体计算公式为:

$$A=\sum_{i=1}^{n}E_i\times\frac{S_i}{S} \tag{3}$$

式中,A为AWMPEI值;S_i为第i个新增斑块的面积;S为区域所有新增斑块的总面积。

2.1.2 城市网络化过程测度

夜间灯光数据作为夜间地球光发射的观测记录,其来源主要是居民点建筑灯光和道路等基础设施灯光,与经济发展、人口分布、城市扩张等现象有着高度的相关性。也就是说,夜间灯光可以较好地表征地球表面的人类社会经济等活动,其亮度强度、空间分布与人类活动强度和范围有着高度的相关性。

城市是当今地球人类活动发生最为密集的区域,夜间灯光也多用于反映城市信息,如城市实体范围的划定和提取、城市空间结构识别、城市经济人口总量估算等[27]。由于夜间灯光能够较好地反映人口分布、经济发展、城市扩张等城市人类活动,夜间灯光图像可以类比为反映人类活动的连续表面。在这个表面上,不同区域的人类活动存在着的联系沟通往往沿着最小的成本路径进行,成本面为夜光值倒数。即夜光亮度值越大,人类活动强度越大,成本越小,人类活动越容易进入;反之亦然。在此原则之下,将城市作为节点,区域间人类活动的连通路径抽象作为边,构成了基于夜间灯光数据的城市网络[28]。

网络节点间的联系强度既可以采用引力模型构建的无向交互网络来测算,也可以采用辐射模型等其他方法构建的有向交互网络来衡量。本文采用的是改进的引力模型测算,计算公式为:

$$c_{ij}=\frac{L_i\times L_j}{(d_{ij})^2} \tag{4}$$

式中,c_{ij}表示城市i和城市j之间的网络联系强度;L_i和L_j分别为城市i和城市j的夜间灯光强度最大值;d_{ij}表示城市i和城市j之间的最小成本路径的累计成本值总和。

在网络当中,不同城市的夜光值大小反映着人类活动强度的大小,也表示吸引周围人类活动流入能力的大小,它们之间的距离就是城市间网络连通所要克服的总阻力值。以此来衡量不同城市区域之间的网络联系强度。由此可见,夜间灯光数据可以反映城市网络空间连通这一侧面。相比较通常的采用人口迁徙、企业投资、交通班次和信息关注等流要素构建的城市网络,基于夜间灯光构建的城市网络也具有合理性,由于数据本身属于现实人类活动情况的空间观测记录,具有更多的地理空间实体特征,也为城市网络化发展与区域生态系统的互动关系研究提供了基础。同时,免费开源的夜间灯光数据有着时间跨度、尺度覆盖等方面的特点,可以衡量不同城市间,甚至城市内部不同区域间的空间连通交互,而且其自身与传统流要素构建的网络的拟合程度较好[29],具有适合反映城市网络的潜力和优势。

2.1.3 城市网络交互强度测度

以往分析城市网络生态外部性多从面板计量模型的角度入手,为从区域尺度更好地将网络化过程及其生态效应进行空间显式化表达,本文将基于城市节点的网络联系强度转换为覆盖整个区域栅格层面的网络交互强度。参考数据场理论,测算出长江中游城市群全域网络交互场

强,并最终叠加而成,场强的最终叠加值即为城市空间连通交互强度,从而实现城市群网络化空间增长的空间显化[30]。对网络交互强度进行归一化处理,场强模型的计算公式为:

$$F_{(k,i)}=\frac{Z_k}{L^a_{(k,i)}}\lambda_k \tag{5}$$

式中,$F_{(k,i)}$为城市k在区域i点的网络交互影响;Z_k为城市k在网络空间当中的潜在影响,一般用城市节点网络度中心性表示;$L^a_{(k,i)}$为城市k与区域i点之间的时间成本距离;a为摩擦系数,一般定义为1;λ_k为城市k的影响权重,是根据城市在网络空间当中的潜在影响决定的。

则区域i点所受城市群所有城市网络交互总强度为:

$$F_{(i)}=\sum_{k=1}^{n}F_{(k,i)} \tag{6}$$

时间成本距离计算公式为:

$$C=\frac{1}{V}\times 60 \tag{7}$$

式中,C为成本距离;V为不同地表、道路的通行速度,参考相关文献[31]以及结合交通运输技术标准进行速度赋值。

2.2　生态系统网络构建及影响指标选取

2.2.1　生态系统网络构建

本文从城市网络和生态网络的关系出发,侧重城市网络化发展对区域生态系统结构的影响。基于“源地—廊道—节点”方法,利用MSPA方法选取长江中游城市群生态源地,结合InVEST模型测算的生境质量,选择生境质量较高且面积大于100 km^{2}的斑块作为生态源地。根据MCR构建阻力表面,将不同地理区域的阻力程度量化,计算出最小阻力路径,作为物种迁徙、能量流动的潜在廊道,最大廊道宽度设置为200 km。阻力面构建如表1所示,分辨率为1 000 m,将生态源地和生态廊道的邻接点以及生态廊道之间的交点作为重要生态节点[32]。

表1　生态网络阻力面因子及成本权重

Table 1　Resistance Surface Factor and Cost Weight of Ecological Network

要素	数值	成本	权重	要素	数值	成本	权重
高程/m	<250	1	0.1	归一化植被指数	<0.20	9	0.2
	[250,500)	3			[0.20,0.40)	7	
	[500,1 500)	5			[0.40,0.60)	5	
	[1 500,3 000]	7			[0.60,0.80]	3	
	>3 000	9			>0.80	1	
人口密度/(人·km^{-2})	<2 500	1	0.2	土地利用类型	林地、灌木	1	0.2
	[2 500,5 000)	3			草地、耕地	3	
	[5 000,20 000)	5			水体、湿地	5	
	[20 000,50 000]	7			不透水面	7	
	>50 000	9			裸地、雪地	9	
距离路网远近/km	<3	9	0.2	距离水体远近/km	<1.5	1	0.1
	[3,6)	7			[1.5,3)	3	
	[6,12)	5			[3,6)	5	
	[12,24]	3			[6,12]	7	
	>24	1			>12	9	

2.2.2　生态系统功能影响指标选取

基于结构决定功能的观点,在生态系统结构受到影响的基础上,构建生态系统功能影响指标体系,探究城市网络化空间增长对生态系统功能的影响,从而更加全面地探究城市网络化过程的生态效应。指标体系如表2所示。由于所有指标量纲、大小差别很大,为方便计算,对所有值进行极值法的归一化处理,所有指标均以平均值分区统计到县级行政单元。正向指标表示指标数值越大,受影响就越大;反之亦然。权重由熵值法测算得出,计算方法由数据可获得性并参考文献而定[33]。采用空间计量方法探究城市网络交互对生态系统功能维度的影响。

具体而言,网络连通性作为生态系统网络的核心功能,反映了物种以及物质、能量和信息在生态源地之间凭借生态廊道流动的连通概率,选用功能连通性并将单一生态斑块的连通性空间显化到整个区域栅格尺度。物种迁移阻力是生态系统网络构建的基础,也将其纳入到网络连通性当中。结构稳定性反映了生态系统结构在应

表2 生态系统功能影响指标

Table 2 Ecosystem Function Impact Indices

准则层	指标层	相关性	权重
结构连通性	功能连通性	负向指标	0.038 8
	物种迁移阻力	正向指标	0.211 9
	景观连通性指数	负向指标	0.046 3
	度中心性	负向指标	0.010 5
	香农多样性指数	正向指标	0.063 5
结构稳定性	面积加权平均分形维数指数	正向指标	0.056 1
	景观分形指数	正向指标	0.066 9
	景观蔓延指数	负向指标	0.037 4
	面积加权平均接近指数	负向指标	0.022 7
空气质量	气溶胶光学厚度	正向指标	0.138 8
栖息地质量	生境质量	负向指标	0.179 3
地表覆盖	植被覆盖度	负向指标	0.085 9
净初级生产力	植被净初级生产力	负向指标	0.041 9

对外界干扰时的反应状况以及稳定程度,选取相应景观格局指数以及生态网络度中心性等指标测度生态系统结构的稳定[34]。鉴于生态网络在物种栖息地保护、景观破碎化保护中的作用,空气质量、物种栖息地质量、地表覆盖、植被净初级生产力也作为生态系统功能纳入到指标体系当中[35]。

2.3 城市网络化发展对生态系统影响测度

2.3.1 对结构的影响测度

运用空间分析方法和二次指派程序(quatratic assumption procedure,QAP)分析城市网络化发展过程对生态网络结构的影响。其中,利用空间分析方法来探究网络化空间增长过程对生态网络源地、廊道的侵占以及扰动影响。基于QAP模型,主要以城市网络和生态网络两个矩阵作为解释变量和被解释变量,分析城市网络对生态网络空间矩阵的影响因素。通过比较城市网络和生态网络两个矩阵的对应元素值,对矩阵的列及其对应行进行随机置换,计算两个矩阵之间的相关性和回归性,在对矩阵各单元数据进行置换的基础上对矩阵系数进行非参数检验。通过Ucinet 6.0的QAP相关分析和回归分析功能实现。

2.3.2 对功能的影响测度

利用空间自相关对城市网络化空间增长及其对生态系统功能的影响进行空间分析,并且进一步进行面板计量模型回归分析。变量选取见表3,生态系统功能影响强度值I作为被解释变量,大小由各功能影响指标按照其权重相加得出,网络交互强度i作为核心解释变量。在控制变量选取上,现有研究已经表明,区域经济实力的提升、工业企业规模的扩大和人口数量的增加均会对区域生态系统产生显著影响[36]。教育的普及水平与人们的节约资源保护环境的意识,对污染治理和节能减排的关注有关。结合参考文献和数据可获得性,分别选取以上指标作为控制变量纳入回归计量模型[37]。计量模型分别选取混合 正常最小二乘、固定效应模型作为非空间面板计量模型。基于变量间存在的空间效应,选用地理邻接矩阵,在进行Hausman检验、LM检验、以及LR检验的基础之上,选用效果相对较好、结果较为理想的时空固定效应空间杜宾模型[6]。具体一些细节由于篇幅原因有所省略。

表3 面板计量模型变量选取

Table 3 Panel Econometric Model Variable Selection

变量	含义	符号	描述
被解释变量	生态系统功能影响程度	I	影响强度值
核心解释变量	交互强度	i	交互强度值
控制变量	经济实力	X_1	地区生产总值/万元
	人口数量	X_2	人口数量/人
	教育水平	X_3	中小学在校生/人
	工业规模	X_4	规模以上工业企业数量/个

3 研究结果

3.1 长江中游城市群网络化空间增长过程

2000—2020年长江中游城市群经历了快速城市空间增长过程,城市用地大幅增加,土地迅速扩张。2000—2010年城市群新增城市用地20 608.37 km^2,2010—2020年城市群新增城市用地27 559.85 km^2。城市群PEI指数计算结果见表4。长江中游城市群在过去20年间空间增长以边缘型增长为主,跳跃型增长比例高于填充型增长比例。对比两个时间段的MPEI和AWMPEI指数可以看出,MPEI指数从0.510 1升高至0.512 9,

整个城市群空间增长强度有所放缓,AWMPEI指数从0.501 1下降至0.500 1,城市群整体空间结构呈现出分散化的趋势。

表4　城市群空间增长类型统计结果

Table 4　Results of Urban Agglomeration Spatial Growth Types

时期	填充型增长	边缘型增长	跳跃型增长	MPEI	AWMPEI
2000—2010年	0.219 9	0.495 6	0.284 5	0.510 1	0.501 1
2010—2020年	0.228 8	0.489 6	0.281 4	0.512 9	0.500 1

如图2所示,填充型增长分散分布于个别大城市的中心城区,2000—2010年和2010—2020年高值区域均主要集中在武汉、长沙、南昌和襄阳等区域中心城市的主城区。边缘型增长具有跨市域甚至省域的分布特征,2000—2010年集中在武汉城市圈、长沙、环鄱阳湖以及襄阳都市圈等区域,分布范围要比填充型增长更为分散;2010至2020年武鄂黄黄等沿江城市和沪昆铁路发展轴线上的城市也都连成一片。跳跃型增长空间分布变化较大,2000—2010年仍集中分布在武汉、长沙、南昌等省会地区,2010—2020年分散化、网络化趋势明显加大,武鄂黄黄和长株潭跨区域空间增长较为明显。跳跃型增长的空间演变特征与长江中游城市群空间增长的一般特征相契合,整体强度有所减缓,分布范围逐渐分散。

城市群网络化发展格局如图3所示,网络分析结果如表5所示。具体而言,度中心性表示某节点与所有其他节点的直接联系程度,反映该节点在网络中的重要程度。平均度表示所有节点的度中心性总和除以节点数量,反映网络的各个节点的关联程度。平均加权度表示根据各个边的实际权重计算网络中所有节点的平均度。2000—2020年长江中游城市群网络交互日趋密切,网络结构日益复杂,城市节点中心性均有所提升,城市连通度显著增强。平均度持续和平均加权度持续提升,表明城市节点地位持续提升,城市群网络交互日趋密切,交流联系更加紧密。

可以看到城市群网络化发展分布西密东疏、北密南疏,网络交互密切区域集中在城市群和交通发展轴线。城市群西北部网络化发展主要集中在以武汉为中心的武汉城市圈和以宜昌为中心的宜荆荆都市圈,城市群西南部网络化发展主要集中在以长沙为中心的长株潭城市群,城市群

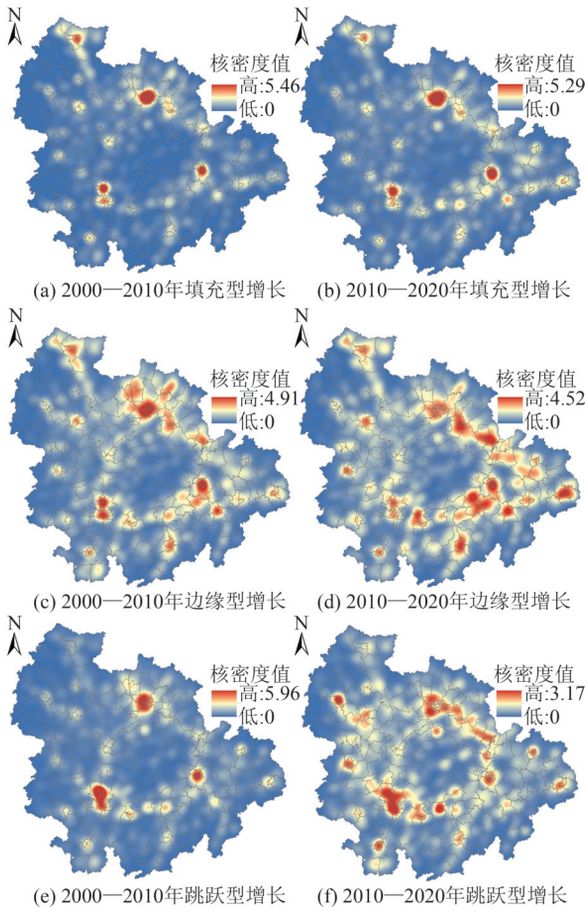


图2　城市群空间增长类型核密度图

Fig. 2　Kernel Density of Urban Agglomeration Spatial Growth Types

东南部网络化发展主要集中在以南昌为中心的南昌都市区和以九江为中心的九江都市区。长江沿线发展轴、京广铁路发展轴和沪昆铁路发展轴也成为网络化发展的集中区域。

网络化发展空间显化结果如图4所示,2000至2020年中心城市武汉以及武鄂黄黄都市圈始终作为网络化发展的高值集中区;随着时间推移呈现出分散化的趋势,网络覆盖范围越来越广;城市群网络交互呈现出从单中心、集中式的空间分布,到多中心、分散式的分布趋势。2000年城市群网络交互集中在武汉都市圈和长沙等区域;2010年交互峰值开始扩散,涌现出南昌、宜昌、九江等交互峰值区域;2020年分散化趋势持续显著,在武汉都市圈、长株潭城市群、环鄱阳湖城市群的基础上,呈现出沿长江干流、京广铁路、沪昆铁路发展的趋势。2000—2020年长江中游城市群网络化空间增长趋势日益明显,呈现出区域联系一体化、空间增长多中心分散化趋势。武汉、长沙和南昌等区域中心成为网络化空间增长热点区域。

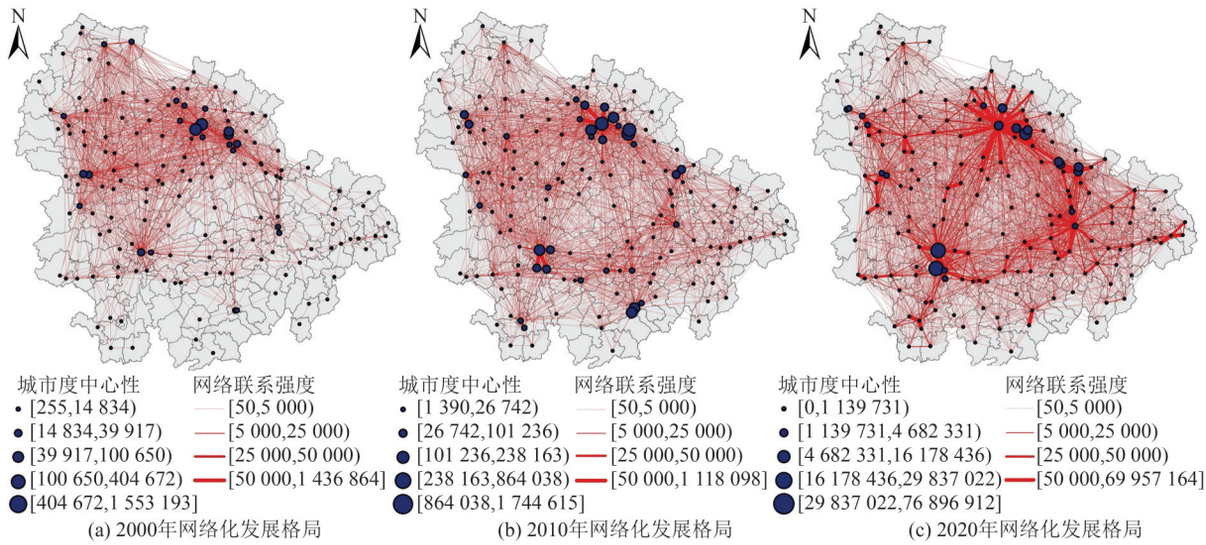


图3 城市群网络化发展格局图

Fig. 3 Distribution of Networked Development Pattern of Urban Agglomeration

表5 城市群网络分析结果

Table 5 Results of Urban Agglomeration Network Analysis

网络分析参数	2000年	2010年	2020年
节点/个	150	156	177
边/条	11 176	12 090	15 571
平均加权度	151	155	176

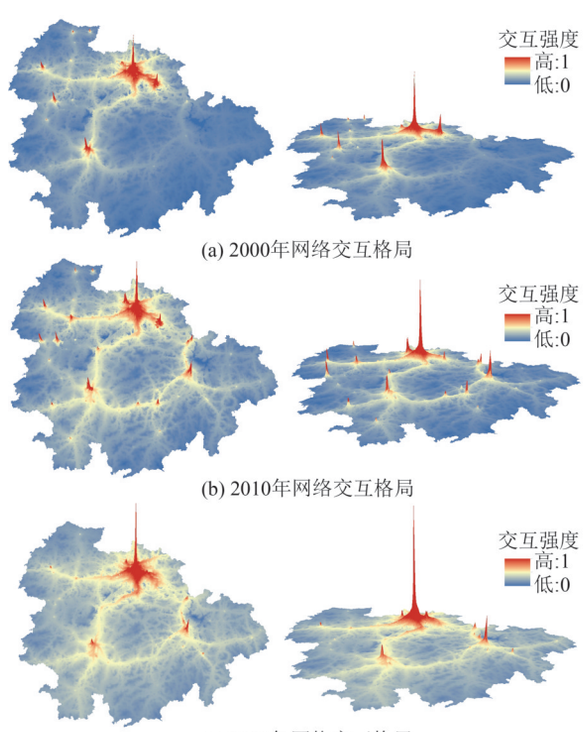


图4 城市群网络空间显化图

Fig. 4 Spatially Explicit of Urban Agglomeration Network

3.2 长江中游城市群生态系统网络结构演变

如图5所示,长江中游城市群生态源地主要位于研究区中南部以及东西边缘的山地区域,绝大部分是林地和草地,距离城市建成区较远,受人类活动的影响较小,同时生态环境也较为脆弱。而生态廊道大多分布在源地之间的江汉平原、洞庭湖平原以及鄱阳湖平原等地,这些地方本就地势平坦,人口众多,土地类型以耕地、林地、水体和建设用地为主,极易受人类活动的干扰,生态廊道从这里经过极有可能会被人类活动阻断或者影响。

整体来说,2000—2020年长江中游城市群生态源地数量从57块增加到67块,生态廊道数量从126条增加到149条,表明区域生态系统网络结构日趋复杂完善。从网络特征指数来说,其中α指数反映网络闭合程度,即网络中实际闭合回路数与可能容纳的最大闭合回路数的比值;β指数反映网络中节点与其他节点联系的难易程度,即网络中每个节点的平均边数;γ指数反映网络连接程度,即网络中所有节点被连接的程度网络特征[38]。

如表6所示,区域生态网络β指数持续增大,表明生态网络结构日趋复杂,稳定性有所提升。α和γ指数在2000—2020年先增大后减小,整体仍持续增大,说明区域生态系统在初期城市网络化发展程度较小的时候,物质、能量流动比较通畅,在城市网络化发展程度日趋明显的时候,物质、能量流动较前一阶段有所阻碍。网络的连通效率先变大后变小,生态网络连通效率仍有所提升。可见2000—2020年区域生态系统网络结构日益完善,但受城市网络发展化的影响越来越大。

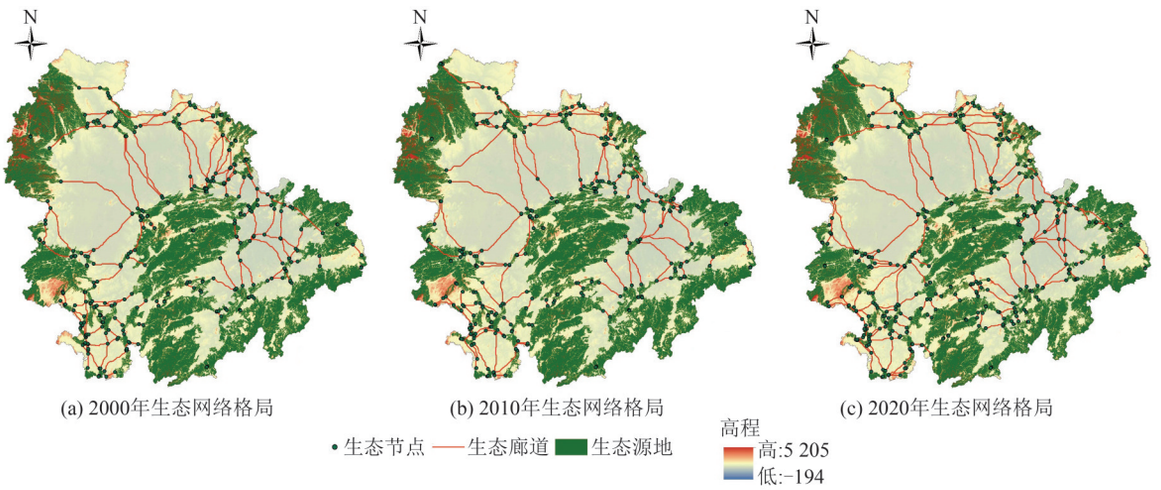


图 5　城市群生态网络图

Fig. 5　Urban Agglomeration Ecological Network

表 6　2000—2020 年城市群生态网络特征

Table 6　Ecological Network Characteristics of Urban Agglomeration from 2000 to 2020

年份	源地数量/块	廊道数量/条	α指数	β指数	γ指数
2000	57	126	0.642	2.210	0.763
2010	59	131	0.646	2.220	0.766
2020	67	149	0.643	2.223	0.764

3.3　长江中游城市群网络化空间增长对区域生态系统的影响

3.3.1　城市网络化发展对生态系统网络结构的影响

从城市网络和生态网络两个系统的角度,利用QAP分析方法对城市网络和生态网络进行相关性分析和回归分析,结果见表7。从QAP相关系数以及QAP回归系数结果来看,区域城市网络化发展对生态网络具有正向促进关系,这种正向作用在2000—2010年先增大,在2010—2020年有所回落,与生态网络特征分析结果相印证。这表明区域在城市网络化发展过程中,区域生态网络结构日趋完善,但随着时间推移,随着网络化空间增长强度越来越大,这种正向促进作用有所下降,生态网络结构受到其扰动也越来越大。

随后,将网络空间交互与区域生态源地、生态廊道进行空间叠置分析。通过自然断裂点法进行分类,提取出网络交互高值区后与生态源地和生态廊道叠加,具体结果见表8和图6。生态源地被城市网络所分割,生态廊道受到阻断,对区域生态系统物种迁徙、物质能量流动起到了阻碍作用。同时,城市网络交互热点区域也覆盖到生态源地和生态廊道,并随时间推移交互高值区域不断扩大,对生态源地和廊道的侵占面积和比例也在不断扩大。随着城市网络化空间增长趋势日益明显,区域生态网络将会受到越来越大的扰动,受到影响较大的生态源地和廊道大都位于武汉以及长株潭周边等交互高值区,也表明城市网络化发展对生态网络结构的影响已经有所显现,不容忽视。

表 7　城市网络与生态网络 QAP 分析

Table 7　QAP Analysis of Urban Network and Ecological Network

分析参数	2000年	2010年	2020年
QAP 相关分析结果	0.240^{***}	0.303^{***}	0.271^{***}
QAP非标准化系数	0.121^{***}	0.146^{***}	0.205^{***}
QAP标准化系数	0.239^{***}	0.303^{***}	0.271^{***}
R^2	0.058	0.092	0.074

注:***表示 $P<0.01$。

表 8　城市网络化空间增长侵占源地、廊道面积

Table 8　Area of Sources and Corridors Encroached by Urban Networked Spatial Growth

年份	生态源地			生态廊道		
	源地面积/km²	源地侵占面积/km²	占比/%	廊道面积/km²	廊道扰动面积/km²	占比/%
2000	115 499.87	1 953.81	1.69	122 046	24 711.73	20.25
2010	116 631.68	6 444.17	5.53	132 372	45 948.58	34.71
2020	108 328.50	9 563.88	8.83	135 925	58 055.59	42.71

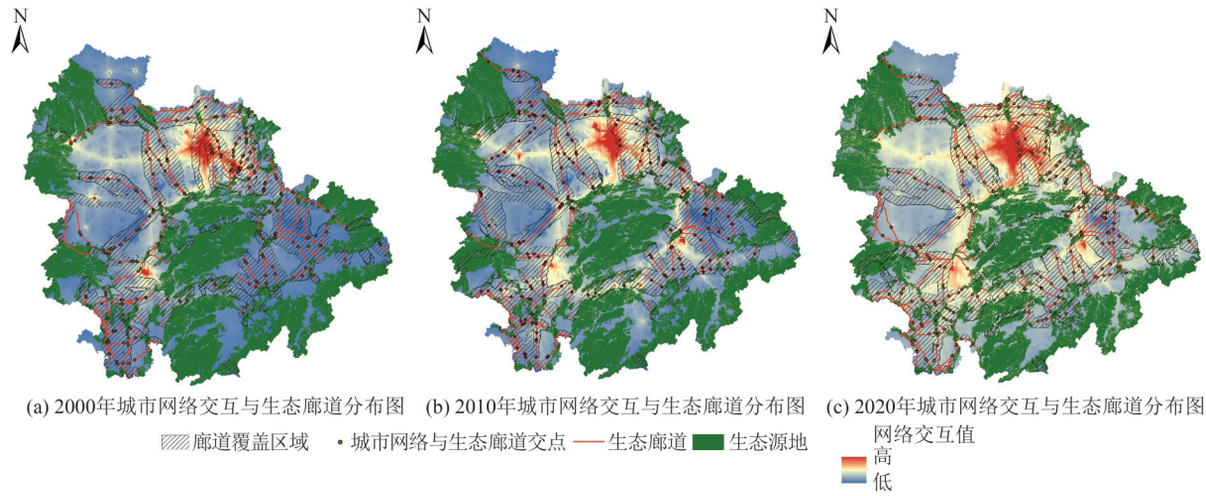


图6 城市网络交互对生态网络结构的影响

Fig. 6 Impact of Urban Networked Interaction on Ecological Network Structure

3.3.2 城市网络化发展对区域生态系统功能的影响

由表9和图7可知,总体来说,城市网络化发展对生态系统功能影响在空间上呈集聚分布,但具有分散化的趋势。同时,生态系统功能影响强度也随着城市网络交互强度的增大而减小,两者呈现出显著的负相关关系,生态系统功能受城市网络化发展的影响高值区域集中在中南部的罗霄山脉地区。此处多属于生态源地,区域结构连通性较高,生境质量较好,但结构稳定性较差,生态环境较为脆弱,虽然位于城市网络化空间增长的低值区域,随着时间推移网络化程度持续增大,人类活动逐渐侵入,网络化空间增长带来的生态系统网络结构上的较小扰动便会带来较大的生态系统功能影响,而且这种负向关系会随时间越来越明显。

表9 城市网络化对生态系统功能影响的空间自相关分析结果

Table 9 Results of Spatial Autocorrelation Analysis of the Impact of Urban Networking on Ecosystem Function

莫兰指数	2000年	2010年	2020年
网络交互强度	0.709^{***}	0.727^{***}	0.758^{***}
生态系统功能影响	0.815^{***}	0.788^{***}	0.751^{***}
两者空间相关关系	-0.268^{***}	-0.279^{***}	-0.293^{***}

注:***表示$P<0.01$。

如表10所示,在非空间计量模型回归结果中,解释变量的系数均为负,表明生态系统功能影响将会随着城市网络交互强度的增大而有所缓解。空间杜宾模型中的间接效应大于直接效应,但模型总体而言并不太显著,说明随着网络不断发展,网络交互对区域生态系统功能影响的外部性逐渐显现,但作用并不是很大。对控制变量而言,经济发展水平越高、基础教育覆盖人数越多,规模以上工业企业数量越多,城市经济效益就越好,居民环保意识越高,一定程度上能够缓解城市化过程对生态系统的影响;人口基数越大,对区域生态系统产生的压力就越大。

4 讨 论

城市网络化空间增长作为城市化进程的新发展模式[39],相较于以往单体城市蔓延的发展模式而言,区域整体空间增长强度有所放缓,城市网络结构日趋完善,城市间联系日益密切,网络交互强度持续增强。总的来说,城市网络化发展对区域生态系统具有正的外部性。这一点在城市网络对生态系统功能的影响方面尤为明显,城市网络化发展带来了资金、知识技术和劳动力等发展要素的充分流动和空间集聚,将有助于提升城市实力[40],推动城市产业绿色转型,减少对高能耗资源的依赖,从而改善区域景观格局、植被覆盖以及生产力水平,也使得以往集中式的影响呈现出分散化的趋势,缓解区域生态系统的压力。城市间互联互通也会促使在政策等方面的合作,有助于跨区域生态治理和环境保护,特别是对物种跨区域迁移、大气污染的联防联控等方面,这都将降低对区域生态系统功能的影响[41]。

对于生态系统结构而言,伴随着城市网络化进程,区域生态系统结构状况也在逐渐改善,源地和廊道数量均有所增加,网络结构日益复杂,网络连通效率有所提升,有助于物种迁移、物质和能量流动等。但随着时间推移,城市网络化空

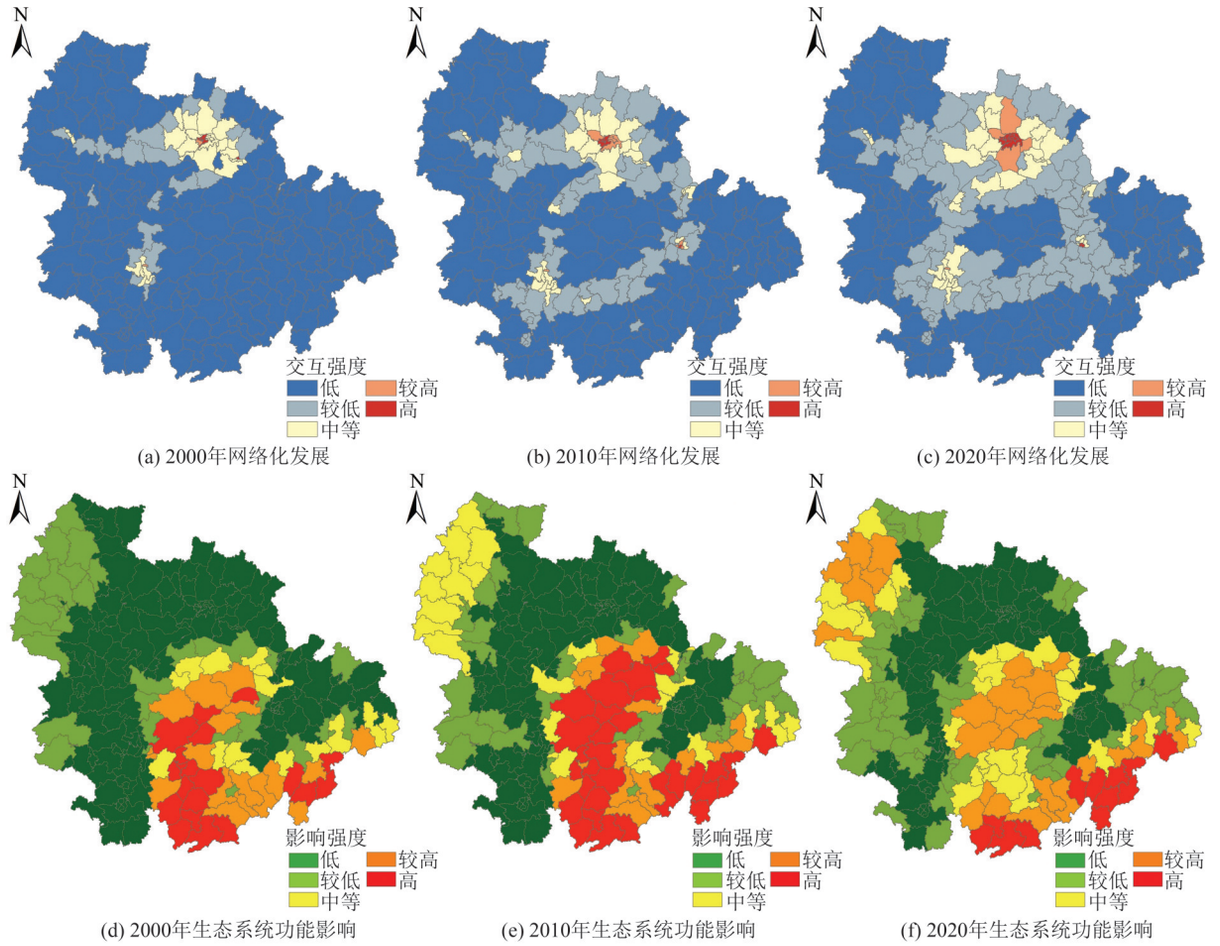


图 7　生态系统功能影响分布图

Fig. 7　Distribution of the Impact on Ecosystem Function

间增长过程对区域生态系统结构的扰动愈加明显,城市网络化发展对生态网络的正向促进作用有所减弱。网络化发展虽然可能减缓对城市周边紧邻的个别重要生境斑块大规模、高强度的影响,但却会对更大范围、更远距离的生态源地和廊道进行侵占,受影响的面积随网络化发展程度的增大而增加[42]。那些长期以来网络化发展程度较高的区域,主要为城市化地区,本身人类活动密集,生态系统结构受到的影响有限。随着网络交互影响范围持续扩大,原来鲜受人类活动影响的区域,特别是那些重要的生态源地,受到轻微的网络交互影响,便会发生较为剧烈的变化。随着城市网络化持续推进,还可能将愈演愈烈,伴随着生态源地被城市网络所切割、生态廊道受到网络交互高值区域的扰动[43],动物迁徙、物质能量流动也会受到阻碍,整个生态系统网络结构特征也会受到影响,特别在 2010—2020 年区域网络化发展日趋明显的阶段。总之,在当前推动城市网络化发展的过程中,既要看到其对区域生态系统的正外部性,也需要关注城市网络化发展对生态系统网络结构的扰动,从而权衡城市网络和生态网络两个系统的发展。

本文研究还存在一些有待改进之处,比如,生态系统功能影响指标体系有待进一步完善,部分定义和指标选取可以有所拓展,未来可以加入生态系统健康、生态系统韧性等内容来丰富生态系统结构和功能的多维度内涵。同时,本文研究属于时间序列上的纵向对比,今后可以进行城市网络化空间增长的预测和模拟,以及不同城市化地区、不同发展情境和模式对生态系统影响的横向对比。此外,现实中城市网络化过程对生态系统的影响较为复杂,可能会存在非线性的影响特征,线性回归计量模型解释能力相对有限,这些都有待将来进一步探究讨论。

5　结　语

在当前城市网络化发展的趋势下,探究城市网络对区域生态系统的外部性具有一定的现实意义。本文从城市网络和生态网络两个系统的

表10 空间计量模型结果

Table 10 Results of Spatial Econometric Model

变量	混合普通最小二乘模型	时空固定效应模型	时空固定效应空间杜宾模型		
			直接效应	间接效应	总效应
i	−3.166 0***	−1.911 0***	−0.143 1	−5.941 3	−6.084 4
	(−3.37)	(−3.48)	(−0.32)	(−0.84)	(−0.83)
X_1	−0.487 6**	−0.216 6**	−0.190 9**	−2.865 3*	−3.056 2*
	(−2.29)	(−2.27)	(−2.38)	(−1.83)	(−1.88)
X_2	−0.023 2	−0.162 6	0.055 7	2.007 7	2.063 4
	(−0.08)	(−1.44)	(0.37)	(0.67)	(0.66)
X_3	−0.216 9*	−0.102 6	−0.008 0	−0.097 5	−0.105 5
	(−1.72)	(−1.25)	(−0.16)	(−0.12)	(−0.13)
X_4	−0.331 8**	−0.155 0*	0.034 8	−0.389 2	−0.354 4
	(−2.01)	(−1.85)	(0.53)	(−0.35)	(−0.30)
常数项	0.889 94***	0.873 40**			
	(24.94)	(20.73)			
空间自相关系数				0.936 5***	
				(72.97)	
LM滞后检验		1 026.328***			
稳健LM滞后检验		30.395***			
LM误差检验		998.502***			
稳健LM误差检验		2.569*			
LR滞后检验				5.58	
LR误差检验				5.97	
Wald滞后检验				5.41	
Wald误差检验				10.39	
Hausman检验				41.60***	
R^2	0.116 0	0.147 4		0.227 7	

注:*、**、*** 分别表示$P<0.1$、$P<0.05$、$P<0.01$;括号内数值表示t统计量。

关系入手,以长江中游城市群为例,探究城市网络化空间增长对区域生态系统的影响。结果表明,2000—2020年长江中游城市群网络化空间增长过程持续推进,网络化发展趋势日益凸显,城市网络具有正向的生态效应。城市网络化空间增长一方面使得区域生态系统网络结构更为复杂,缓解区域生态系统功能受到的影响,另一方面却会对远距离、大范围生态系统网络结构进行扰动,侵占生态源地和生态廊道,进而也会影响到区域生态系统的功能,因此,城市网络化发展对区域生态系统产生正的外部性的同时,也会因对生态系统网络结构的扰动从而对区域生态系统带来一定的负面影响。研究结果可以为城市网络化过程与生态系统协调发展提供参考。

参 考 文 献

[1] QIAO W Y, HUANG X J. The Impact of Land Urbanization on Ecosystem Health in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations, China [J]. *Cities*, 2022, 130: 103981.

[2] 沈文成, 李培庆, 姚雯雯, 等. 多重流空间视角下的中国城市网络空间结构特征及组织模式[J]. 地理研究, 2023, 43(2): 514-533.
SHEN Wencheng, LI Peiqing, YAO Wenwen, et al. The Structural Characteristics and Spatial Organization Pattern of China's Urban Network Based on the Multiple Flow [J]. *Geographical Research*, 2023, 43(2): 514-533

[3] 姜炎鹏, 陈囿桦, 马仁锋. 全球城市的研究脉络、理论论争与前沿领域[J]. 人文地理, 2021, 36(5): 4-14.
JIANG Yanpeng, CHEN Youhua, MA Renfeng. Research Progress, Theoretical Debates and Frontier Fields of the Global City[J]. *Human Geography*, 2021, 36(5): 4-14.

[4] 高鹏, 宁越敏, 何丹. 长三角地区多尺度城市网络空间演化及互馈效应研究[J]. 地理科学, 2022, 42(10): 1767-1777.
GAO Peng, NING Yuemin, HE Dan. Spatial Evolution and Interaction Effects of Multi-scalar Urban Networks in the Yangtze River Delta[J]. *Scientia*

Geographica Sinica, 2022, 42(10): 1767-1777.

[5] 邱坚坚, 刘毅华, 陈浩然, 等. 流空间视角下的粤港澳大湾区空间网络格局: 基于信息流与交通流的对比分析[J]. 经济地理, 2019, 39(6): 7-15.
QIU Jianjian, LIU Yihua, CHEN Haoran, et al. Urban Network Structure of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area with the View of Space of Flows: A Comparison Between Information Flow and Transportation Flow[J]. *Economic Geography*, 2019, 39(6): 7-15.

[6] 周宏浩, 谷国锋. 外部性视角下中国城市网络演化及其环境效应研究[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 268-285.
ZHOU Honghao, GU Guofeng. The Evolution of China's City Network and Its Environmental Effects from the Perspective of Externalities[J]. *Geographical Research*, 2022, 41(1): 268-285.

[7] 何建华, 施璇, 龚健, 等. 顾及空间交互作用的城市群联动空间增长模拟: 以武汉都市区为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 462-467.
HE Jianhua, SHI Xuan, GONG Jian, et al. Modeling the Spatial Expansion of Urban Agglomeration Considering Their Spatial Interaction: A Case Study of Wuhan Metropolitan Area[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(4): 462-467.

[8] JIAO L D, LUO F L, WU F Y, et al. Can the Opening of Urban Rail Transit Improve Urban Air Quality? Evidence from 94 Lines in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2022, 97: 106857.

[9] 郑茜, 曾菊新, 罗静, 等. 武汉市生态网络空间结构及其空间管治研究[J]. 经济地理, 2018, 38(9): 191-199.
ZHENG Qian, ZENG Juxin, LUO Jing, et al. Spatial Structure and Space Governance of Ecological Network in Wuhan City[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(9): 191-199.

[10] 刘耀彬, 邱浩, 戴璐. 生态安全约束下城市群空间网络结构动态演变及关联特征分析: 以环鄱阳湖城市群为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(4): 522-535.
LIU Yaobin, QIU Hao, DAI Lu. Spatial Network Structure Dynamic Evolution and Correlation Characteristics Analysis of Urban Agglomeration Under Ecological Security Constraint: A Case of Urban Agglomeration Around the Poyang Lake[J]. *Journal of Central China Normal University* (*Natural Sciences*), 2020, 54(4): 522-535.

[11] 张旭, 孙传祥. 基于环境污染型企业的中国城市网络空间结构研究[J]. 地理研究, 2022, 41(9): 2516-2530.
ZHANG Xu, SUN Chuanxiang. The Spatial Structure of the Urban Network of Environmentally Polluting Enterprises in China [J]. *Geographical Research*, 2022, 41 (9): 2516-2530.

[12] TANG C H, GUAN M M, DOU J M. Understanding the Impact of High Speed Railway on Urban Innovation Performance from the Perspective of Agglomeration Externalities and Network Externalities [J]. *Technology in Society*, 2021, 67: 101760.

[13] LI H, WANG W. The Road to Low Carbon: Can the Opening of High-Speed Railway Reduce the Level of Urban Carbon Emissions? [J]. *Sustainability*, 2023, 15(1): 414.

[14] WEI G E, BI M, LIU X, et al. Investigating the Impact of Multi-dimensional Urbanization and FDI on Carbon Emissions in the Belt and Road Initiative Region: Direct and Spillover Effects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 384: 135608.

[15] LU F, LIU M H, WANG W W, et al. Impact of Polycentric Urban Network on Industrial Structure Upgrades: Evidence from the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2022, 148(3): 04022024.

[16] PAŘIL V, TÓTHOVÁ D. Assessment of the Burden on Population Due to Transport-Related Air Pollution: The Czech Core Motorway Network [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 275: 123111.

[17] CONNOLLY J J, SVENDSEN E S, FISHER D R, et al. Organizing Urban Ecosystem Services Through Environmental Stewardship Governance in New York City [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 76-84.

[18] YANG C, ZHUO Q, CHEN J, et al. Analysis of the Spatio-Temporal Network of Air Pollution in the Yangtze River Delta Urban Agglomeration, China [J]. *PLoS One*, 2022, 17(1): e0262444.

[19] ENQVIST J, TENGÖ M, BODIN Ö. Citizen Networks in the Garden City: Protecting Urban Ecosystems in Rapid Urbanization[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 130(1): 24-35.

[20] INOSTROZA L, ZEPP H. The Metabolic Urban Network: Urbanisation as Hierarchically Ordered Space of Flows[J]. *Cities*, 2021, 109: 103029.

[21] HUANG Y, HONG T, MA T. Urban Network Externalities, Agglomeration Economies and Urban Economic Growth[J]. *Cities*, 2020, 107: 102882.

[22] ZHONG J, LIU J F, JIAO L M, et al. Assessing

the Comprehensive Impacts of Different Urbanization Process on Vegetation Net Primary Productivity in Wuhan, China, from 1990 to 2020[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2021, 75: 103295.

[23] CHEN W X, GU T C, ZENG J. Urbanisation and Ecosystem Health in the Middle Reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations, China: A U-Curve Relationship[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 318: 115565.

[24] SAHRAOUI Y, FOLTÊTE J C, CLAUZEL C. A Multi-species Approach for Assessing the Impact of Land-Cover Changes on Landscape Connectivity[J]. *Landscape Ecology*, 2017, 32(9): 1819-1835.

[25] 姚采云, 安睿, 窦超, 等. 基于MSPA与MCR模型的三峡库区林地生态网络构建与评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(9): 1953-1962.
YAO Caiyun, AN Rui, DOU Chao, et al. Research on Construction and Evaluation of Forest Land Ecological Network in Three Gorges Reservoir Area Based on MSPA and MCR Model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(9): 1953-1962.

[26] ZHONG J, JIAO L M, DROIN A, et al. Greener Cities Cost More Green: Examining the Impacts of Different Urban Expansion Patterns on NPP[J]. *Building and Environment*, 2023, 228: 109876.

[27] ZHAO X, LI X, ZHOU Y Y, et al. Analyzing Urban Spatial Connectivity Using Night Light Observations: A Case Study of Three Representative Urban Agglomerations in China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 1097-1108.

[28] TU Y, CHEN Z Q, WANG C X, et al. Quantitative Analysis of Urban Polycentric Interaction Using Nighttime Light Data: A Case Study of Shanghai, China[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, 15: 1114-1122.

[29] YU B, ZHOU Y, SMALL C, et al. Foreword to the Special Issue on Advances in Remote Sensing of Nighttime Lights: Progresses, Challenges, and Perspectives[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 6454-6456.

[30] HE J H, LI C, YU Y, et al. Measuring Urban Spatial Interaction in Wuhan Urban Agglomeration, Central China: A Spatially Explicit Approach[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2017, 32: 569-583.

[31] 李宇, 李涛, 邱孟龙, 等. 基于交通流的关中城市群城际交互对城市空间增长的影响[J]. 人文地理, 2023, 38(1): 147-157.
LI Yu, LI Tao, QIU Menglong, et al. Impact of Intercity Interaction on Urban Space Growth in the Guanzhong Plain Urban Agglomeration Based on Traffic Flows[J]. *Human Geography*, 2023, 38(1): 147-157.

[32] 潘越, 龚健, 杨建新, 等. 基于生态重要性和MSPA核心区连通性的生态安全格局构建: 以桂江流域为例[J]. 中国土地科学, 2022, 36(4): 86-95.
PAN Yue, GONG Jian, YANG Jianxin, et al. Construction of Ecological Security Pattern Based on Ecological Importance and Connectivity of MSPA-core Area: A Case Study of Guijiang River Basin[J]. *China Land Science*, 2022, 36(4): 86-95.

[33] LI S N, HE Y Y, XU H L, et al. Impacts of Urban Expansion Forms on Ecosystem Services in Urban Agglomerations: A Case Study of Shanghai-Hangzhou Bay Urban Agglomeration[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(10): 1908.

[34] CHEN Z F, LI Y R, LIU Y S, et al. Does Rural Residential Land Expansion Pattern Lead to Different Impacts on Eco-Environment? A Case Study of Loess Hilly and Gully Region, China[J]. *Habitat International*, 2021, 117: 102436.

[35] HOU W, ZHOU W, LI J Y, et al. Simulation of the Potential Impact of Urban Expansion on Regional Ecological Corridors: A Case Study of Taiyuan, China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 83: 103933.

[36] LI F Z, YIN X X, SHAO M. Natural and Anthropogenic Factors on China's Ecosystem Services: Comparison and Spillover Effect Perspective[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 324: 116064.

[37] 张紫怡, 刘艳芳, 张扬, 等. 生态系统服务协同权衡对影响因子的空间响应:以福建省生态功能区为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(1): 111-125.
ZHANG Ziyi, LIU Yanfang, ZHANG Yang, et al. Spatial Non-stationary Response of the Ecosystem Services Synergy and Tradeoff to Influencing Factors: A Case Study of Ecological Function Area in Fujian Province[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(1): 111-125.

[38] 何建华, 覃荣诺, 丁愫, 等. 基于乡村宜居性和人口流动网络特征的农村居民点重构[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(3): 402-409.

(下转第2134页)