

DOI: 10.5846/stxb202101050032

吕天宇, 曾晨. 交通网络空间互动视角下生态足迹驱动机制. 生态学报, 2022, 42(4): 1340-1353.

Lü T Y, Zeng C. Driving mechanism of ecological footprint from the perspective of spatial interaction of transportation network. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1340-1353.

## 交通网络空间互动视角下生态足迹驱动机制

吕天宇, 曾 晨\*

华中农业大学公共管理学院, 武汉 430070

**摘要:**长江中游城市群是中部崛起战略的重要区域,同时依托长江黄金水道面临发展和保护的困境。交通网络空间互动视角下的生态足迹驱动机制研究对统筹长江中游城市群经济社会高质量发展和生态文明高水平建设以实现可持续发展具有重要意义。基于生态足迹模型测度了长江中游城市群县域尺度的可持续发展状况,并在 STIRPAT 模型框架下基于交通网络空间互动关系挖掘生态足迹的驱动机制和空间效应,为交通网络扩张背景下的跨区域生态治理与可持续发展提供参考。研究结果显示:(1)2010—2017 年,长江中游城市群县域生态足迹均值有所下降;(2)道路交通网络和铁路交通网络规模均有所扩大,但连通性略有下降;(3)在基于交通网络构建的空间互动媒介下,城镇化率和人均 GDP 对生态足迹具有显著的促进作用,而第三产业增加值占比对生态足迹产生抑制影响,且生态足迹表现出积极的空间外溢效应。基于以上研究结果,建议在基于交通网络加强区域生态协同发展的同时,建设产业互促、资源互通、技术互享的区域联动可持续发展新格局。

**关键词:**生态足迹;交通网络;空间外溢;长江中游城市群;生态文明

## Driving mechanism of ecological footprint from the perspective of spatial interaction of transportation network

LÜ Tianyu, ZENG Chen\*

College of Public Administration, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

**Abstract:** The urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River is the key area for the Central Region Rise Strategy in China. This area has long been confronted with the dilemma of development and protection. Research on the driving mechanism of ecological footprint from the perspective of spatial interaction of transportation network is of great significance for coordinating the high-quality socio-economic development and the high-level ecological civilization construction to achieve sustainable development. This paper internalizes the transportation network as a “channel” for the spatial interaction of ecological footprints between county units to explore the path of ecologically coordinated development. First, we used a ecological footprint model to assess the sustainable development level. The indicator of ecological footprint is an extensive and comprehensive measure of sustainable development. Second, complex network model was employed to characterize the scale and connectivity of the transportation network. Third, we established a transportation spatial interaction relationship based on the gravity model, and embed the “transportation” spatial weight matrix into the spatial econometric model. Integrated with the STIRPAT model, the model is established to explore the spatial effect of the transportation network on ecological footprint and the driving factors of ecological footprint. The results show that: (1) from 2010 to 2017, the average value of the ecological footprint for counties in the middle reaches of the Yangtze River has decreased from 1.73 to 1.66. (2) The scales of the road transportation network and the railway transportation network have both expanded, whereas the connectivity has decreased. (3) The spatial dependence of the ecological footprint was confirmed, and the ecological footprint shows a positive spatial spillover influence through the transportation network. This spatial influence had slightly enhanced from 2010 to 2017. The urbanization and per capita GDP have significantly positively influenced the ecological footprint, and the proportion of the tertiary sector to the total GDP negatively influenced ecological

**基金项目:**国家自然科学基金(41771563,42171262);中国人民大学教育基金会林增杰土地科学发展基金优秀学术论文资助项目(2021)

**收稿日期:**2021-01-05; **网络出版日期:**2021-11-04

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zengchen@igsrr.ac.cn

footprint. The research implies that the overall level of sustainable development of the middle reaches of the Yangtze River urban agglomeration has improved; the inter-regional sustainable development is strengthened by the spatial influence of the transportation network. In addition, socio-economic development has exacerbated unsustainability, while industrial transformation and upgrading showed a positive influence. In the future, while strengthening regional ecological integration based on transportation networks, a new pattern of sustainable development with regional linkages through the interaction of industries, exchange of resources, and sharing of technologies should be established.

**Key Words:** ecological footprint; transportation network; spatial spillover; urban agglomeration in the middle of the Yangtze River; ecological civilization

现代工业文明带给人类极大物质财富的同时,产生的自然资源损耗正日益成为制约社会经济发展的“短板”,并在交通网络现实空间关联下产生跨区域的复合而巨大的影响。空间视角下评价人类活动对区域自然环境的影响并挖掘潜在驱动因子,对实现区域可持续发展具有重要意义。生态足迹是测度人类社会对生态系统的利用状况和区域可持续发展现状的广泛指标,通过测定支持人类对自然资源需求和隔离人类活动产生的废物所需要的生产性土地来评估人类对生态系统的影响<sup>[1]</sup>。全球足迹网络显示,2017年中国生态足迹总量约占全球的1/4,排名世界第一,中国已消耗自身生物承载力4倍的资源<sup>[2]</sup>。在资源环境紧迫约束下,国家“十四五”规划高度重视绿色发展,提出完善生态文明领域统筹协调机制。因此,如何实现自然资本的可持续利用,并在交通网络互联互通的空间视角下协调人类系统与自然系统之间的关系成为生态文明建设和可持续发展战略亟需探讨的议题。

迫于社会经济发展压力下生态赤字普遍存在的困境,生态足迹影响因素研究已成为推动可持续发展和生态文明建设的新兴话题。自生态足迹提出以来,已广泛的应用于全球<sup>[2]</sup>、国家<sup>[3-4]</sup>、城市群<sup>[5]</sup>、省<sup>[6]</sup>、市<sup>[7]</sup>等不同尺度生态足迹的时空演变和可持续发展测度。在驱动机制方面,国内外学者基于库兹涅茨曲线或STIRPAT模型,广泛研究诸如城镇化率、GDP、产业结构、收入水平等在内的社会经济指标对生态足迹的影响<sup>[3-4,8-10]</sup>。然而,由于人口、经济、自然资本等要素的跨区域流通以及生态功能性边界与行政区划的不一致性,行政单元间存在着极强的生态互动<sup>[11]</sup>,忽略空间效应的生态足迹研究会导致结果偏误。随着研究的深入,空间视角下跨行政区的生态足迹空间依赖性与异质性逐渐被揭示,如Van den Bergh<sup>[12]</sup>和吴德存<sup>[11]</sup>分别在国家和省域尺度证实了行政相邻的空间关系会显著产生生态足迹的空间外溢效应。

交通网络空间互动是跨行政区划下生态协同发展的现实路径。生态文明建设强调区域生态协同发展,建立区域共同治理与响应的生态共同体<sup>[13]</sup>,这就要求充分考虑区域间资源禀赋与社会经济发展的差异性,在跨行政区视角下实现生态协同保护与可持续发展<sup>[14]</sup>。交通网络凭借要素流通廊道和跨行政区连通的空间属性,在区域可持续协同治理中里的重要性得到彰显。首先,交通融入可持续城市的规划中,可持续城市离不开发达高效的交通网络。其次,区域可持续发展受社会经济系统开放性、动态性、复杂性的综合影响,需要从区域交通互动的空间尺度综合权衡<sup>[15]</sup>。此外,交通网络的空间特性和廊道特质为生态系统区域间互动提供有力支撑,在空间互动视角下对生态足迹产生跨行政区的空间依赖影响。如何以交通网络为切入点,深入探究交通空间互动关系下的区域可持续发展,并基于生态足迹对可持续发展进行定量测度以摸清现状情况,是中国实现生态协同发展与优势要素跨区域耦合互补的重要路径。

过去在生态足迹的评估和影响机理方面的研究成果较为丰富,以交通作为生态足迹的解释变量来探索驱动机制的研究较多,但将交通网络内化为空间影响介质来挖掘其空间属性对区域生态足迹影响的研究则相对较少。而在交通网络日益密集化、区域联系不断加深的背景下,以交通作为空间互动的介质,挖掘可持续发展的实现机制是区域生态协同治理与发展的现实需要。综上,本文基于长江中游城市群县域单元,利用复杂网络理论和引力模型构建交通网络的空间互动关系,在STIRPAT模型框架下对生态足迹的空间效应和驱动机制展开研究,以期为生态文明和可持续发展提供参考。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

长江中游城市群是长江经济带的重要组成部分,具有高密度、高关联的城市网络空间结构,已成为引领中部地区崛起的重要引擎。长江中游城市群以武汉城市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群为主体,涵盖湖北省的武汉市、孝感市、荆门市、荆州市、黄冈市、黄石市、鄂州市、咸宁市、仙桃市、天门市、潜江市、襄阳市、宜昌市,湖南省的长沙市、株洲市、湘潭市、岳阳市、益阳市、常德市、衡阳市、娄底市,江西省的南昌市、九江市、景德镇市、鹰潭市、新余市、宜春市、萍乡市、上饶市、抚州市、吉安市(图1)。2019年长江中游城市群总人口为1.20亿,国内生产总值达8.46万亿,是中部地区的重要增长极。境内交通网络密集,是承接南北和东西的重要交

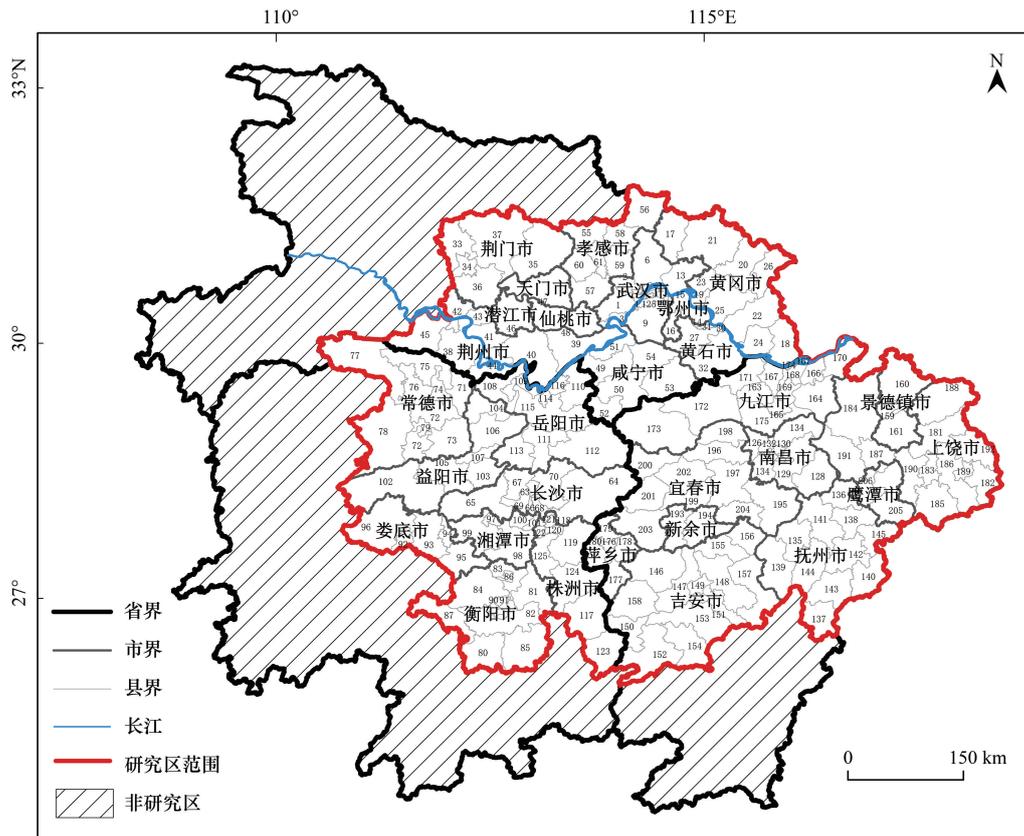


图1 研究区域

Fig.1 Study area

研究区基本单元:武汉市(蔡甸区、东西湖区、汉南区、汉阳区、洪山区、黄陂区、江岸区、江汉区、江夏区、硚口区、青山区、武昌区、新洲区);鄂州市(鄂城区、华容区、梁子湖区);黄冈市(红安县、黄梅县、黄州区、罗田县、麻城市、蕲春县、团风县、武穴市、浠水县、英山县);黄石市(大冶市、黄石港区、铁山区、西塞山区、下陆区、阳新县);荆门市(东宝区、掇刀区、京山县、沙洋县、钟祥市);荆州市(公安县、洪湖市、监利县、江陵县、荆州区、沙市区、石首市、松滋市);潜江市;天门市;仙桃市;咸宁市(赤壁市、崇阳县、嘉鱼县、通城县、通山县、咸安区);孝感市(安陆市、大悟县、汉川市、孝昌县、孝南区、应城市、云梦县);长沙市(芙蓉区、开福区、浏阳市、宁乡市、天心区、望城区、雨花区、岳麓区、长沙县);常德市(安乡县、鼎城区、汉寿县、津市市、澧县、临澧县、石门县、桃源县、武陵区);衡阳市(常宁市、衡东县、衡南县、衡山县、衡阳县、耒阳市、南岳区、祁东县、石鼓区、雁峰区、蒸湘区、珠晖区);娄底市(冷水江市、涟源市、娄星区、双峰县、新化县);湘潭市(韶山市、湘潭县、湘乡市、雨湖区、岳塘区);益阳市(安化县、赫山区、南县、桃江县、沅江市、资阳区);岳阳市(华容县、君山区、临湘市、汨罗市、平江县、湘阴县、岳阳楼区、岳阳县、云溪区);株洲市(茶陵县、荷塘区、醴陵市、芦淞区、石峰区、天元区、炎陵县、攸县、株洲县);南昌市(安义县、东湖区、进贤县、南昌县、青山湖区、青云谱区、湾里区、西湖区、新建区);抚州市(崇仁县、东乡区、广昌县、金溪县、乐安县、黎川县、临川区、南城县、南丰县、宜黄县、资溪县);吉安市(安福县、吉安县、吉水县、吉州区、井冈山市、青原区、遂川县、泰和县、万安县、峡江县、新干县、永丰县、永新县);景德镇市(昌江区、浮梁县、乐平市、珠山区);九江市(德安县、都昌县、共青城市、湖口县、九江县、濂溪区、庐山市、彭泽县、瑞昌市、武宁县、修水县、浔阳区、永修县);萍乡市(安源区、莲花县、芦溪县、上栗县、湘东区);上饶市(德兴市、广丰区、横峰县、鄱阳县、铅山县、上饶县、万年县、婺源县、信州区、弋阳县、余干县、玉山县);新余市(分宜县、渝水区);宜春市(丰城市、奉新县、高安市、靖安县、上高县、铜鼓县、万载县、宜丰县、袁州区、樟树市);鹰潭市(贵溪市、余江县、月湖区)

通枢纽。同时,长江中游城市群依托长江黄金水道,是我国生态重点保护区域。国家发改委印发的《长江中游城市群发展规划》<sup>[16]</sup>明确提出进一步加强长江中游城市的生态文明共同建设,力求共同构筑生态屏障,建立健全区域生态文明建设联动机制,形成人与自然和谐发展格局。因此,经济快速发展与生态环境可持续保护之间的现实困境使得研究长江中游城市群基于交通网络的生态足迹空间效应和驱动机制具有十分重要的现实意义。此外,需要特别说明的是,考虑到数据的可获取性,长江中游城市群内的湖北省宜昌市和襄阳市并未纳入本文研究范围。

## 1.2 数据来源

本研究主要使用了 2010 和 2017 年长江中游城市群的各县(区)生物资源消耗量、能源消耗量、社会经济数据、土地利用数据以及交通路网数据。由于县域层面难以获取生物资源消耗量,因此借鉴相关学者的研究<sup>[17-18]</sup>,以生产量替代生物资源的消耗量进行计算。此外,由于从相关统计部门和年鉴中难以获得县(区)层面各类能源消耗数据,因此本文使用“生产总值指数”,将各县(区)国内生产总值换算成以 2010 年价格计算的 GDP 总值,然后乘以单位 GDP 能耗得出以 2010 年价格计算的能源消耗,并乘以各省各类能源消费构成比例计算出县(区)各类能源的消耗量<sup>[17-18]</sup>。生物资源生产量、能源消耗量以及社会经济数据均来源于各省统计年鉴、各地级市统计年鉴、《湖北农村统计年鉴》、各县(区)统计公报等。土地利用数据来源于空间分辨率为 30m 的 Landsat TM/ETM 影像进行的遥感解译,交通路网数据来源于交通部门。全球主要农产品平均产量和土地类型(对应于各种消费)参考谢鸿宇<sup>[19]</sup>的研究。此外,因为不同土地的生产能力差异很大,需要用产量因子和均衡因子进行调整,产量因子参考刘某承等计算的产量因子<sup>[20]</sup>,均衡因子根据 2018 年《国家生态足迹核算指南》<sup>[21]</sup>计算,生物多样性保护应按世界环境与发展委员会的要求扣除 12% 的生态面积<sup>[22]</sup>(表 1)。

表 1 生态足迹账户及因子

Table 1 Accounts and factors of ecological footprint

	生物生产性土地 Biological productive land	消费项目类型 Consumption item type	均衡因子 Equivalence factors	产量因子 Yield factors
生物账户 Biological account	耕地	稻谷、小麦、玉米、大豆、棉花、蔬菜瓜类、猪肉、牛肉(86%)、羊肉(57%)、禽肉、禽蛋	2.52	1.74
	草地	牛肉(14%)、羊肉(43%)	0.46	0.51
	林地	油桐籽、茶叶、园林水果、木材	1.29	0.86
	水域	水产品	0.37	0.74
能源账户 Energy account	化石燃料用地	煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气	1.29	0
	建筑用地	电力	2.52	1.74

产量因子参考刘某承等<sup>[20]</sup>研究,均衡因子参考 2018 年《国家生态足迹核算指南》<sup>[21]</sup>

## 2 研究方法

### 2.1 生态足迹模型

生态足迹是指满足区域人口消费的所有资源和吸纳区域产生的所有废弃物所需要的生物生产性土地总面积,本文将生态足迹划分为生物资源账户和能源消耗账户进行计算<sup>[23]</sup>。计算公式如下:

$$EF = N \times ef = N \times (r_j \times aa_j) = N \times \sum_{j=1}^6 [r_j \times \sum_{i=1}^n a_j] = N \times \sum_{j=1}^6 \left[ r_j \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_i}{p_i} \right) \right] \quad (1)$$

式中,EF 为区域总生态足迹,N 为人口数,ef 为人均生态迹, $r_j$  为均衡因子, $aa_j$  为各类生物生产土地面积, $j=1, 2, \dots, 6$  表示 6 类生物生产土地面积, $p_i$  为  $i$  种消费品的平均生产能力, $c_i$  为  $i$  种消费品的人均年消费量, $n$  为消费品的数量。

生态承载力是指一个地区能够提供的生态生产性土地的总面积<sup>[19]</sup>。计算公式如下:

$$EC = N \times ec = N \times \sum_{j=1}^6 (a_j \times r_j \times y_j) \quad (2)$$

式中,  $EC$  为区域总生态承载力,  $N$  为人口数,  $ec$  为人均生态承载力,  $a_j$  为实际人均占有的  $j$  类生物生产土地面积,  $r_j$  为均衡因子,  $y_j$  为产量因子。

生态盈亏是生态足迹与生态承载力的差值, 反映区域生态盈余或生态赤字状况。若  $EC > EF$ , 则为生态盈余; 反之, 则为生态赤字。计算公式如下:

$$ED = EC - EF \quad (3)$$

式中,  $ED$  为生态盈亏。

## 2.2 复杂网络模型

复杂网络的拓扑分析已广泛应用于各种现实世界系统(交通、通信、社会), 以揭示其模式和结构<sup>[24]</sup>。从复杂网络视角看, 运输系统本质是由节点和边构成的复杂网络, 因此本研究基于复杂网络模型对交通网络进行拓扑, 采用 L 空间法分别构建长江中游城市群的道路交通复杂网络和铁路交通复杂网络<sup>[25]</sup>, 即将道路交叉点(火车站)视为节点, 相邻节点间的道路(铁路)视为边对现实交通网络进行拓扑<sup>[26]</sup>。本研究构建的复杂网络是无向无权网络, 主要用平均度、网络直径、平均路径长度等指标来衡量网络的特性, 并基于平均度(公式 4)在 2.3.2 节构建交通空间互动关系。节点的度  $k_i$  表示节点  $i$  所拥有的边的数量, 它是用来衡量一个节点在网络中的重要程度最直观最简单的统计量。节点的度越大, 表明该节点在网络中的重要性就越高。

$$k_i = \sum_{j \in N} a_{ij} \quad (4)$$

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 存在边} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 不存在边} \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{d} = \frac{1}{N} \sum_i k_i \quad (6)$$

式中,  $k_i$  为节点  $i$  的度,  $a_{ij}$  表示的是网络邻接矩阵  $A$  中的元素,  $\bar{d}$  为区域平均度。

## 2.3 空间计量模型的构建

### 2.3.1 基于 STIRPAT 模型的驱动因素选取

STIRPAT 模型是在 IPAT 模型改进的基础上, 用于分析人口、财富水平和技术水平对环境的影响。因其灵活性, STIRPAT 模型已成为生态足迹驱动因素研究的重要方法之一<sup>[4, 27]</sup>。通常在等式两边取对数以减少异方差, 模型表达式如下:

$$\ln I = a + b(\ln P) + c(\ln A) + d(\ln T) + e \quad (7)$$

式中,  $a$  为常数项,  $b$ 、 $c$ 、 $d$  分别为  $P$ 、 $A$ 、 $T$  的指数项,  $e$  为随机误差项。

具体就本研究而言, 在 STIRPAT 模型框架下选取以下指标作为解释变量: ①城镇化率( $UR$ )。城镇化率表征城市人口占总人口比例, 反映人口向城市聚集的程度。在新型城镇化与生态文明协同推进的背景下, 亟需扭转人口膨胀、土地资源匮乏且配置不合理、环境恶化等“城市病”问题<sup>[28]</sup>, 探究城镇化对生态足迹的影响是审视城市化进程对资源环境依赖性的重要手段。因此本研究将城镇化率( $UR$ )纳为人口( $P$ )指标; ②人均 GDP( $PGDP$ )。中国经济已由高速增长阶段转向高质量发展阶段, 意味着经济发展的同时带来的资源消耗与环境负面效应的减少, 经济发展和生态资源环境之间的共赢局面是生态文明倡导的长远发展之路。为了探究经济发展对生态足迹的影响, 本研究将人均 GDP( $PGDP$ )视为财富( $A$ )指标; ③第三产业占比( $PTS$ )。第三产业占比常被视为技术( $T$ )指标<sup>[29]</sup>。在本研究中, 产业异质性对生态足迹有着不可忽视的影响, 第三产业主要包括资源节约型、环境友好型产业, 消耗更少的资源能源并产生较少的废弃物。因此本研究将第三产业占比( $PTS$ )纳为技术( $T$ )指标。

### 2.3.2 基于交通网络的空间互动关系构建

在交通网络空间互动视角下, 本研究采用基于公路-铁路的陆路交通平均度的引力模型构建空间互动关

系。平均度是描述区域交通优势地位的重要指标,反映了区域交通优势和对外通达潜力。考虑到公路和铁路之间的异质性,我们以公路和铁路的客运量为权重,构建基于公路-铁路的陆路交通平均度(式 8),以反映区域陆路综合交通网络的外部通达潜力。在计算了各县域单元的陆路交通平均度后,本研究尝试采用引力模型构建基于陆路交通平均度的交通空间互动关系。引力模型用于计算不同地点之间的流量或特定性质的相互作用<sup>[30]</sup>,该模型已成功应用于经济<sup>[31]</sup>、贸易<sup>[32]</sup>和运输<sup>[30]</sup>等多个领域。引力值与流量或某种属性呈正相关,与距离呈负相关。在本研究中,考虑到交通优势大、对外潜在可达性高、距离阻抗小的空间单元往往倾向于建立更紧密的学习模仿和要素互通,从而产生更强的空间互动,因此我们利用引力模型将县域单位的陆路交通平均度关联起来,反映区域交通网络间的空间互动关系,并基于此构造空间权重矩阵(式 9)。

$$\bar{d} = w_1 \overline{d_{road}} + w_2 \overline{d_{railway}} \quad (8)$$

$$\overline{D_{ij}} = r \times \frac{\bar{d}_i \bar{d}_j}{d_{ij}^2} \quad (9)$$

式中, $d$ 为县域综合陆路交通平均度, $d_{road}$ 为公路交通平均度, $d_{railway}$ 为铁路交通平均度, $w_1$ 为公路交通旅客发送量占比, $w_2$ 为铁路交通旅客发送量占比, $D_{ij}$ 为*i* $\rightarrow$ *j*两地间的交通引力, $d_i$ 和 $d_j$ 分别为*i* $\rightarrow$ *j*两地的平均节点度, $r$ 为引力系数,通常取 1。

### 2.3.3 空间检验与计量模型构建

在 Morans'I 检验通过的基础上<sup>[33-34]</sup>,引入空间计量模型对其展开进一步研究,形成考虑空间互动关系的 S-STIRPAT,即空间 STIRPAT 模型:

$$\ln EF = a + \alpha W_1 EF' + \beta_1 \ln P + \beta_2 \ln A + \beta_3 \ln T + \lambda_1 W_2 \ln P + \lambda_2 W_2 \ln A + \lambda_3 W_2 \ln T + \eta W_3 \varepsilon \quad (10)$$

式中, $\alpha$ 为空间滞后项的系数; $\beta$ 和 $\lambda$ 为解释变量的系数; $\eta$ 为误差项的系数; $a$ 表示常数项, $EF$ 为生态足迹, $EF'$ 为“邻居”的生态足迹。 $W_1$ 是滞后项上的空间权重矩阵, $W_2$ 是解释变量中的空间权重, $W_3$ 是误差项的空间权重矩阵。当 $W_1$ 和 $W_2$ 等于 0 时,空间回归模型的一般形式转化为空间误差模型(SEM)。当 $W_2$ 和 $W_3$ 等于 0 时,空间回归模型的一般形式转化为空间滞后模型(SAR)。当 $W_3$ 等于 0 时,空间回归模型的一般形式转化为空间杜宾模型(SDM)。

## 3 结果

### 3.1 生态足迹与生态承载力时空分布特征

#### 3.1.1 生态足迹时空变化

生态足迹时空变化情况如图 2 所示。2010—2017 年,长江中游城市群生态足迹整体呈下降趋势,且表现出明显的空间异质性。具体来说,从时间趋势看,长江中游城市群分县的人均生态足迹均值由 1.73 降为 1.66,极差由 13.15 增加到 14.86,这意味着尽管长江中游城市群自然资本消耗减少,但县域单元间的差距进一步拉大。其中,长株潭城市群分县人均生态足迹均值最大,由 2010 年的 2.00 降至 2017 年的 1.97;环鄱阳湖城市群分县人均生态足迹均值最小,由 2010 年的 1.34 减少至 1.33。从空间尺度看,生态足迹的空间分布较不均衡,且空间集聚状态随时间推移不断趋于明显,呈现西高东低的分布格局。其中,高值区主要集聚在省会城市(武汉市、南昌市、长沙市)、荆门市、湘潭市、岳阳市、咸宁市的县域单元,低值区多分布于环鄱阳湖城市群的非省会城市。其中,武汉市青山区的生态足迹最大,分别为 13.60(2010 年)和 15.08(2017 年),这主要是青山区工业发达,能耗较大造成的。

#### 3.1.2 生态承载力时空变化

生态承载力时空变化情况如图 3 所示。2010—2017 年,长江中游城市群生态承载力整体呈下降趋势,空间“集群化”明显。2010—2017 年,长江中游城市群分县的人均生态承载力均值由 0.5838 降至 0.5655,极差由 1.99 减小至 1.43,表明长江中游城市群生态系统的整体供给能力下降,且县域单元间生态供给的差异性逐渐缩小。其中,环鄱阳湖城市群分县人均生态承载力最大,由 2010 年的 0.70 降至 2017 年的 0.68;长株潭城市群

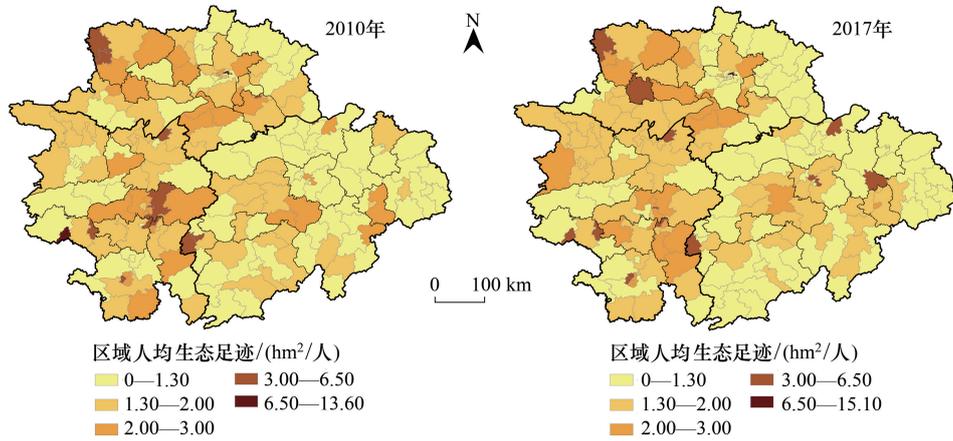


图 2 生态足迹时空分异图

Fig.2 The spatiotemporal distribution of Ecological Footprint

分县人均生态承载力均值最小,由 2010 年的 0.45 升至 0.44。从空间分布格局看,生态承载力“集群化”格局明显,低值区集中分布在各地级市的中心城区,在武汉市、娄底市、湘潭市、长沙市、南昌市的中心城区体现的尤为明显。高值区集中分布在武汉城市圈和环鄱阳湖城市群的外围。而国家级生态县——荆门市京山县是生态承载力最大的县域单元。

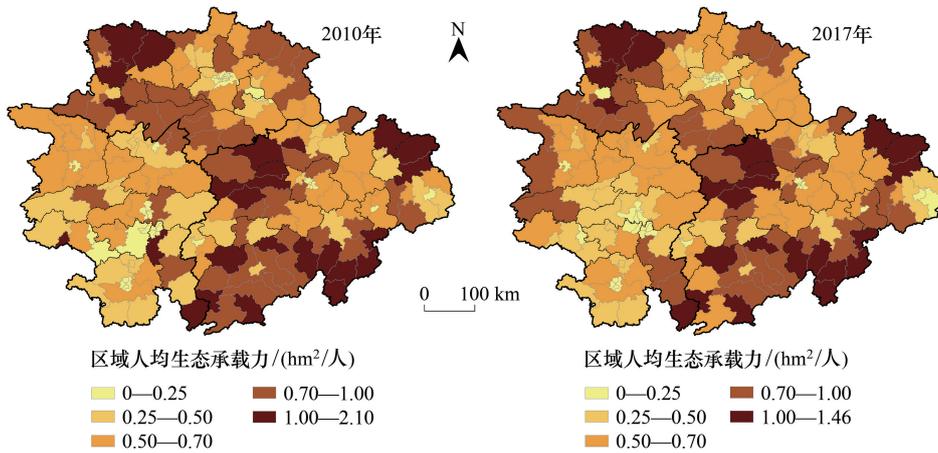


图 3 生态承载力时空分异图

Fig.3 The spatiotemporal distribution of ecological carrying capacity

### 3.1.3 生态盈亏时空变化

生态盈亏时空变化情况如图 4 所示。2010—2017 年,长江中游城市群分县生态盈亏指数均值从-1.15 减少至-1.10,表明生态赤字稍有缓解,但整体仍处于超载的状态。从面积看,2010 和 2017 年生态赤字地区分别占据了约 90.76%、91.46%的土地面积,但承载着约 95.99%、97.18%的人口,长江中游城市群生态承载力空间分布呈现一定的失衡状态。从数量关系看,2010 年长江中游城市群生态盈余和生态赤字的县域单元数量分别为 194 个和 12 个;2017 年分别为 196 个和 11 个,以生态赤字为主导的长江中游城市群生态超载情况依然严峻。从空间布局看,武汉城市圈和长株潭城市群生态赤字县域单元空间聚集态势尤为明显,生态超载的县域单元集中分布在长沙市、湘潭市、娄底市、株洲市、荆门市、武汉市、鄂州市、潜江市和仙桃市,生态赤字最严重的县域单元为青山区。环鄱阳湖城市群生态赤字压力相对较小,除长株潭城市群的炎陵县以外,其他生态盈余县域单元均分布于环鄱阳湖城市群外围圈层。

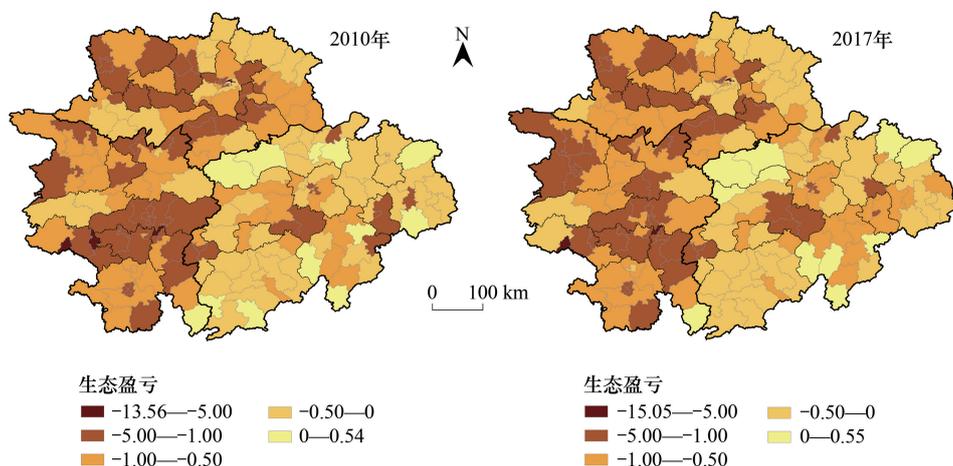


图 4 生态盈亏时空分异图

Fig.4 The spatiotemporal distribution of ecological surplus and deficit

### 3.2 交通复杂网络模型

#### 3.2.1 道路交通复杂网络

道路交通复杂网络的基本特征和空间分布情况分别如表 2 和图 5 所示。2010—2017 年,长江中游城市群公路网络发展迅速,公路复杂网络由 2010 年的 4359 个节点和 6546 个拓扑边增长至 2017 年的 5684 个节点和 8854 个拓扑边,节点度为 3 和 4 的节点数显著增加,县域公路交通平均度均值由 3.00 提高到 3.12,城市群整体可达性有所提高。与此同时,网络规模进一步扩大,网络直径由 101 增加至 104。但在网络规模扩大的同时,长江中游城市群的平均最短路径由 41.15 增加至 41.67,表明网络连通性下降,这可能网络规模扩大的同时,网络覆盖面增加导致的运输效率降低。2010—2017 年,三大城市群平均度均呈增加态势,表明三大城市群交通可达性均有所提高,其中,武汉城市群平均度最高,环鄱阳湖城市群平均度最低,表明武汉城市群公路交通最为发达,环鄱阳湖城市群道路交通可达性相对欠缺。

表 2 道路复杂网络度特征表

Table 2 Characteristics of Road Complex Network Degree

年份 Year	度 Degree	长江中游城市群 Urban Agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River			武汉城市群 Wuhan agglomeration			长株潭城市群 Chang-Zhu-Tan urban agglomeration			环鄱阳湖城市群 Poyang lake urban agglomeration		
		数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度
2010	1	530	12.16	3	165	12.60	3.04	182	11.02	3.01	183	13.09	2.97
	2	10	0.23		4	0.31		2	0.12		4	0.29	
	3	2755	63.20		767	58.55		1093	66.20		895	64.02	
	4	1044	23.95		368	28.09		369	22.35		307	21.96	
	5	19	0.44		6	0.46		5	0.30		8	0.57	
	6	1	0.02		0	0		0	0		1	0.07	
2017	1	575	10.12	3.12	163	10.51	3.14	201	9.03	3.14	211	11.06	3.07
	2	23	0.40		8	0.52		6	0.27		9	0.47	
	3	3267	57.48		834	53.77		1309	58.81		1124	58.94	
	4	1808	31.81		544	35.07		707	31.76		557	29.21	
	5	8	0.14		1	0.06		2	0.09		5	0.26	
	6	3	0.05		1	0.06		1	0.04		1	0.05	

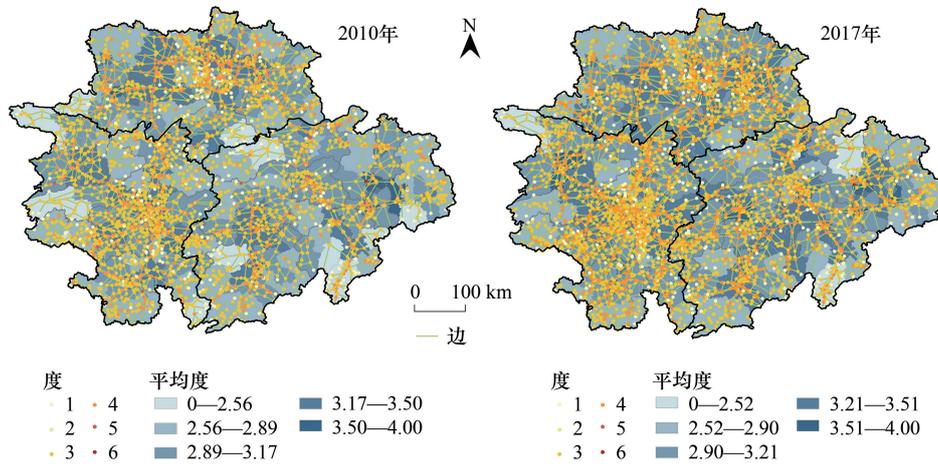


图5 道路复杂网络模型

Fig.5 Road complex network model

3.2.2 铁路交通复杂网络

铁路交通复杂网络的基本特征和空间分布情况分别如表3和图6所示。2010—2017年,长江中游城市群铁路网络进一步拓展,由2010年有109个节点和119个拓扑边增加至2017年的187个节点和219个拓扑边,且度为2和3的节点数显著增加。长江中游城市群分县的铁路交通平均度由2.18提高到2.34,城市群的整体铁路可达性有所提升,网络直径由28增加至30,铁路网络规模进一步扩大,但平均最短路径由11.94增加至12.27,表明长江中游城市群铁路网络平均连通性下降。从具体城市群情况看,2010—2017年,长江中游城市群涵盖的三大城市群铁路复杂网络平均度均呈增加态势,其中,2010年武汉城市群平均度最高,环鄱阳湖城市群平均度最低,但2017年环鄱阳湖城市群平均度最高,其铁路建设速度及优势性得以凸显。

表3 铁路复杂网络度特征表

Table 3 Characteristics of Railway Complex Network Degree

年份 Year	度 Degree	长江中游城市群 Urban Agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River			武汉城市圈 Wuhan agglomeration			长株潭城市群 Chang-Zhu-Tan urban agglomeration			环鄱阳湖城市群 Poyang lake urban agglomeration		
		数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度	数量	占比/%	平均度
2010	1	17	15.60	2.18	6	19.35	2.26	5	13.89	2.22	6	14.29	2.1
	2	65	59.63		16	51.61		21	58.33		28	66.67	
	3	20	18.35		5	16.13		8	22.22		7	16.67	
	4	4	3.67		3	9.68		1	2.78		1	2.38	
	5	3	2.75		1	3.23		1	2.78		0	0	
2017	1	20	10.70	2.34	8	12.90	2.31	6	9.52	2.27	6	9.68	2.45
	2	108	57.75		37	59.68		40	63.49		31	50.00	
	3	40	21.39		11	17.74		11	17.46		18	29.03	
	4	15	8.02		4	6.45		6	9.52		5	8.06	
	5	2	1.07		0	0		0	0		2	3.23	
	6	2	1.07		2	3.23		0	0		0	0	

3.2.3 交通网络空间互动引力分析

图7通过和弦图(chord diagram)的方式对2010和2017年长江中游城市群基于陆路交通平均度的县域间交通引力联系进行可视化表达,直观地揭示县域间交通的拓扑互动关系。为了使表达更加清晰,图7中只展示了各县与其他县域交通互动最强的3个空间互动连线。圆弧长短表示交通引力的大小,节点间弦连线的

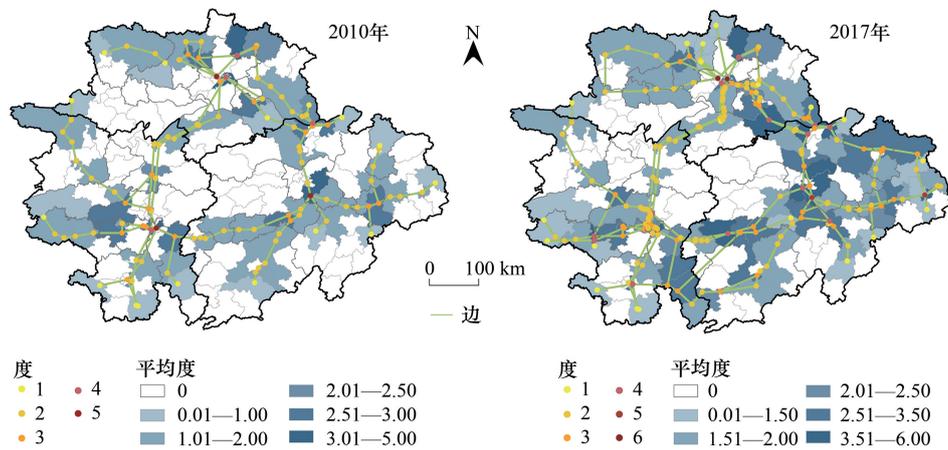


图6 铁路复杂网络模型

Fig.6 Railway complex network model

粗细反映交通联系强弱程度,数字代表的县域单元与图1图注县域单元的顺序一致。以2017年为例展开分析,在2017年公路-铁路综合陆路复杂网络节点度引力和弦图中,引力最强的前3对县域组合为青山湖区(171)和东湖区(168)、南岳区(77)和衡山县(74)、青云谱区(172)和西湖区(174)。此外,从图7中可以看出,引力最强的连线均主要集中在县域所属地级市内部,这可能是由地理距离所驱动。

### 3.3 生态足迹的驱动机制和空间效应

在STIRPAT模型框架选取驱动因子的基础上,本研究对所选因子进行相关性分析(图8),发现被解释变量( $EF$ )与解释变量中的 $UR$ 和 $PGDP$ 存在显著的正向相关性,与 $PTS$ 存在显著的负向相关关系,且解释变量间无高度相关性,共线性处于容差范围内( $VIF < 3$ )。因此, $UR$ 、 $PGDP$ 和 $PTS$ 是影响 $EF$ 的潜在因子,需进一步将其纳入回归方程考察其驱动影响。

为了对解释变量进行初步预判并与空间计量模型进行比较,本文首先采用最小二乘法(OLS)进行回归,以2010年和2017年两个年份的生态足迹( $EF$ )为被解释变量,以城镇化率( $UR$ )、人均GDP( $PGDP$ )、第三产业占比( $PTS$ )为解释变量进行回归分析。进一步将空间效应纳入考虑发现,2010和2017年Morans' $I$ 均显著为正,表明生态足迹具有显著的空间效应。其次,为了考察基于交通网络的 $EF$ 的空间溢出效应,本研究选择空间滞后模型(SAR)进行空间效应和驱动机制的研究。下面基于SAR回归结果对生态足迹的驱动因素和空间效应展开分析。

城镇化率和人均GDP对生态足迹产生积极影响,而第三产业增加值占比则显著抑制生态足迹的增加。具体而言,城镇化率仅在2017年对生态足迹具有显著正向影响,城镇化率每增加1%,生态足迹增加0.2499%。人均GDP对生态足迹产生显著正向影响,但随着时间推移,这种影响呈现减弱趋势,人均GDP每增加1%,生态足迹分别增加0.5197%和0.2075%。第三产业增加值占比对生态足迹产生显著负向影响,且这种负向影响在2017年超过了城镇化率和人均GDP的正向促进影响。第三产业增加值占比每增加1%,生态足迹分别减少0.5174%和0.4379%。进一步探究生态足迹的空间溢出效应,结果显示,2010和2017年交通网络空间互动关系下的空间滞后系数均显著为正,表明县域间的生态足迹存在显著空间溢出效应,交通互动“邻居”生态足迹每变动1%,本县域单元的生态足迹会往相同的方向变动0.3382%、0.3899%,表明基于交通网络“媒介”产生的生态足迹溢出效应逐渐增强(表4)。

## 4 讨论

可持续发展是涵盖自然、生态、环境等复杂系统的全面动态过程,需要考虑区域间的空间联系与互动,而

交通网络是跨区域互动的重要媒介。基于此,本文的主要贡献在于基于 STIRPAT 模型和交通网络空间互动关系研究生态足迹的驱动机制和空间影响,从而在区域间交通互联互通的现实空间互动下为实现区域生态协调发展提供参考。

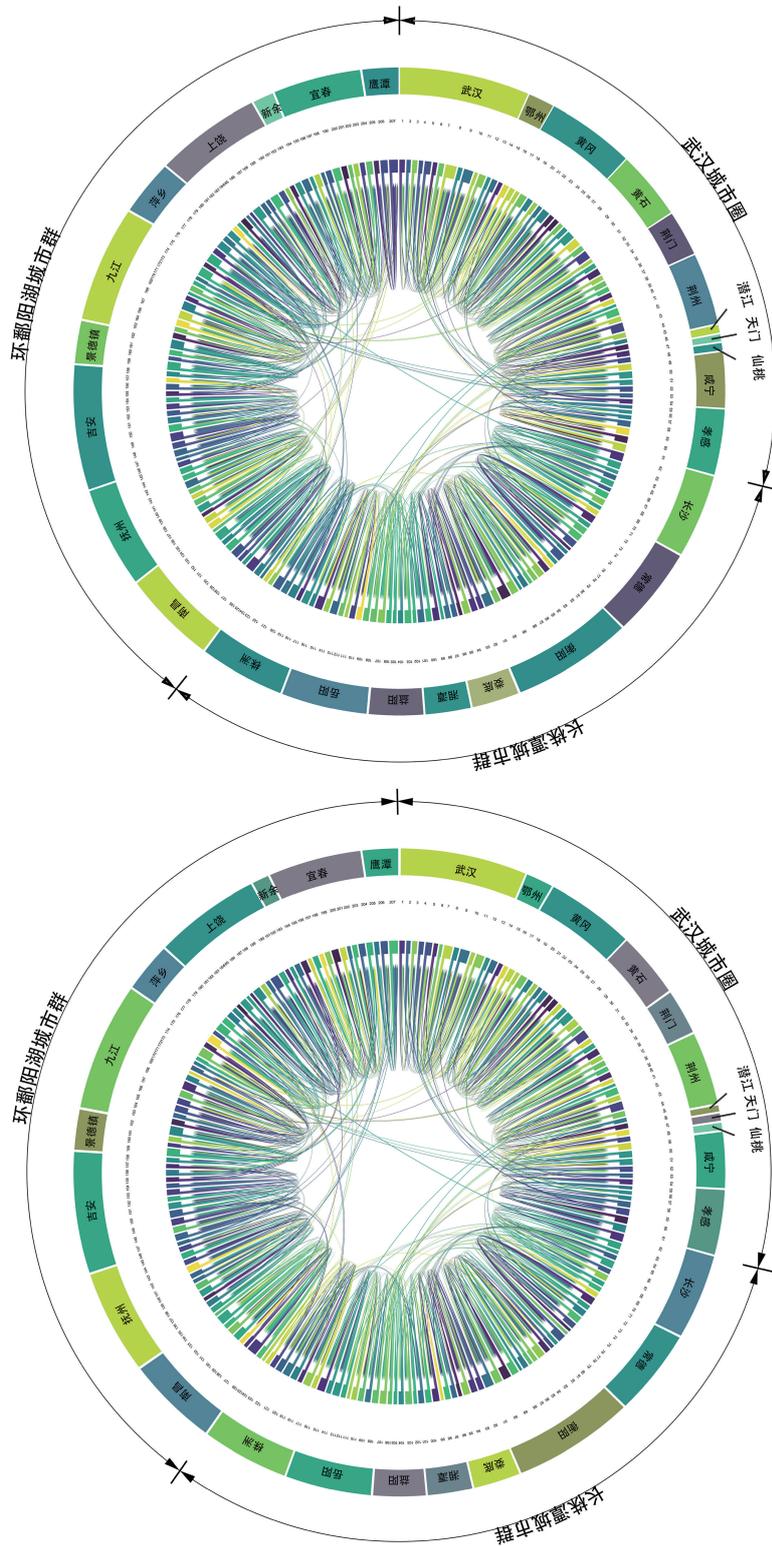


图7 引力关系图

Fig.7 Gravitational relationship diagram

由外圈层向内圈层依次表征城市群、城市、县域尺度的引力份额与互动关系

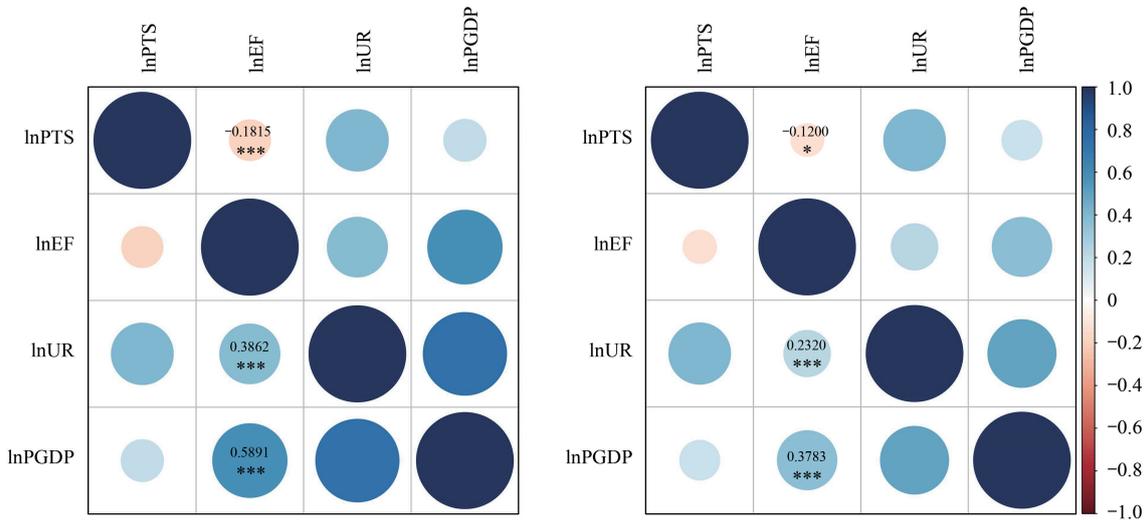


图 8 相关性关系图

Fig.8 Correlation diagram

EF:生态足迹 Ecological footprint;UR:城镇化率 Urbanization rate;PGDP:人均 GDP Per capita GDP;PTS:Proportion of the tertiary sector to the total GDP。因 STIRPAT 模型需要,各变量均取对数(取 ln)处理

表 4 驱动机制回归结果

Table 4 Regression results of driving mechanism

年份 Year	OLS		SAR	
	2010	2017	2010	2017
lnUR	0.0845	0.2815 **	0.0375	0.2499 *
lnPGDP	0.5330 ***	0.2207 ***	0.5197 ***	0.2075 ***
lnPTS	-0.5152 ***	-0.4135 **	-0.5174 ***	-0.4379 ***
Moran's I	—	—	0.150 ***	0.114 ***
Moran's I-error	—	—	5.560 ***	3.898 ***
LM error	—	—	25.090 ***	12.120 ***
R-LM error	—	—	13.164 ***	0.148
LM lag	—	—	12.459 ***	12.956 ***
R-LM lag	—	—	0.534	0.984
Rho	—	—	0.3382 ***	0.3899 ***
常数项 Constant term	-3.4358 ***	-1.6276 ***	-3.2669 ***	-1.4207 ***

OLS:经典最小二乘法 Ordinary least square;SAR:空间滞后模型 Spatial lag model;UR:城镇化率 Urbanization rate;PGDP:人均 GDP Per capita GDP;PTS:Proportion of the tertiary sector to the total GDP

交通互动视角下的跨行政区生态足迹研究是迎合新时代生态文明背景下生态协同治理的现实需要,基于交通网络的自然资源跨区域调配互补是实现可持续发展的现实路径。本文构建的嵌入交通网络空间互动关系的空间计量模型结果显示,在基于交通网络的区域一体化程度加深的背景下,生态足迹的空间外溢效应呈现增强态势,表明在国家“十三五”规划的科学引领下,长江中游城市群内部县域单元基于交通网络不断通过外化空间的生态供给以维持自身生存和发展的需要,区域间良性可持续发展的生态良性互动与互促得到加强。今后在国家“十四五”规划的统筹和指导下,要进一步建立健全城市群一体化协调发展机制,统筹推进基础设施协调布局 and 生态共建环境共治,但同时也要防范交通基础设施规划和工程建设带来的生态负面影响,避免一味追求交通基础设施建设而引起城镇土地“摊大饼”式扩张和景观生态的破碎,这应得到工程领域和道路景观生态学的广泛关注。此外,在驱动机制研究中,本文证实了城镇化水平、经济发展和产业结构对生态

足迹的重要影响。但随着时间推移,经济发展对生态足迹的积极影响已经得到削弱,而城镇化率的促进作用得以显现和增强。《长江中游城市群发展规划》将长江中游城市群定位为中国经济新增长极,区域开发和经济发展加速推进,加之前期以牺牲自然资源换取经济发展的模式致使区域可持续发展程度加深。但随着新旧动能转换以及转型升级,“绿色经济”逐渐取代了粗放式经济发展,实现经济增长、资源节约与环境保护的相对兼顾,表现为经济增长对长江中游城市群生态足迹的驱动力有所下降。而快速城镇化进程对可持续发展造成了较大的“逆向胁迫效应”,加速建设用地和能源用地的需求,同时引发高强度的人类开发活动,致使资源消耗强度增大,消费数量和结构的改变,并产生大量污染物,导致生态足迹的增加。此外,值得特别关注的是,第三产业发展对生态足迹的抑制作用应该得到重视,以产业结构转型为重要落脚点协调经济社会发展和生态文明建设之间的矛盾。产业结构是区域自然资本利用方式的体现,产业发展粗放、结构不合理会造成资源配置帕累托效率难以提高、资源要素过度拥挤,从而增加自然资本需求,破坏生态环境并减少其供给<sup>[35]</sup>。近些年来,长江中游城市群产业结构不断优化升级,一产比重降低、二产提质发展、三产比重提高,产业结构形态更加合理化,第三产业主要是资源节约型、环境友好型产业,其对资源和能源的需求不大,且需要消纳的废弃物较少,因此第三产业的兴起对生态足迹具有负向抑制作用。

高效的交通网络为建设区域生态可持续一体化建设提供了支撑。未来在生态一体化治理中,应充分考虑区域间的交通互动,加强区域间资源互补与清洁技术互享,尤其要调整产业结构,发挥第三产业的清洁作用,形成产业互促、资源互通、技术互享的区域联动可持续发展新格局。尽管本文考虑了交通网络对生态足迹的溢出效应,但未区分道路网络和铁路网络的差异化空间影响,差异化运输网络是否会产生差异化的空间溢出效应仍需进一步探讨。此外,由于县域尺度生物和能源生产和消费数据获取困难,本研究只进行了2010和2017年两个年份的截面分析,而未采用面板数据反映长期变化趋势和驱动机制。因此,把不同运输方式的交通网络空间互动关系嵌入空间计量模型,并采用面板数据进一步探讨差异化交通运输网络空间互动关系下的生态足迹空间效应和驱动机制的异同是今后改进的重要方向之一。

## 5 结论

本文首先基于生态足迹模型测度了长江中游城市群各县域单元的生态足迹、生态承载力和生态盈亏情况,并基于复杂网络模型构建了道路复杂网络和铁路复杂网络,在此基础上构建了陆路交通平均度指标并基于引力模型建立了区域交通互动关系,研究基于交通网络的生态足迹的驱动机制和空间效应,主要结论如下:①2010—2017年,长江中游城市群分县生态足迹均值减小,生态承载力均值减少,但仍呈现以生态赤字为主导的生态超调局面。②2010—2017年,交通复杂网络和铁路复杂网络规模均有所扩大,但连通性有所下降。③城镇化率、人均GDP对生态足迹增加有显著的促进作用,而第三产业增加值占比显著抑制生态足迹增加,生态足迹在交通网络空间互动关系下的空间溢出效应呈增强态势,区域生态关联随时间推移进一步加强。

## 参考文献 (References):

- [1] 鹿瑶,李效顺,蒋冬梅,郎文婧,沈春竹,魏旭晨. 区域生态足迹盈亏测算及其空间特征——以江苏省为例. 生态学报, 2018, 38(23): 8574-8583.
- [2] Global Footprint Network. Ecological Footprint, 2017. [2021-06-16]. [https://data.footprintnetwork.org/?\\_ga=2.91151834.1176692907.1606885887-422587102.1594349449#/compareCountries?cn=all&type=EFcpc&yr=2017](https://data.footprintnetwork.org/?_ga=2.91151834.1176692907.1606885887-422587102.1594349449#/compareCountries?cn=all&type=EFcpc&yr=2017).
- [3] Danish, Hassan S T, Baloch M A, Mahmood N, Zhang J W. Linking economic growth and ecological footprint through human capital and biocapacity. Sustainable Cities and Society, 2019, 47: 101516.
- [4] Nathaniel S, Khan S A R. The nexus between urbanization, renewable energy, trade, and ecological footprint in ASEAN countries. Journal of Cleaner Production, 2020, 272: 122709.
- [5] 杜悦悦,彭建,高阳,赵会娟. 基于三维生态足迹的京津冀城市群自然资本可持续利用分析. 地理科学进展, 2016, 35(10): 1186-1196.
- [6] 王业宁,周强,王宏伟. 中国34个省级行政区三维生态足迹动态研究. 生态学报, 2020, 40(18): 6434-6444.
- [7] 曾晓霞,刘云国,黄磊,胡新将,曾光明,谭小飞,汤慧,樊扬帆. 基于能值定理的生态足迹模型修正研究——以长沙市为例. 中国环境

- 科学, 2015, 35(1): 312-320.
- [ 8 ] Destek M A, Sarkodie S A. Investigation of environmental Kuznets curve for ecological footprint: the role of energy and financial development. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2483-2489.
- [ 9 ] 杨屹, 樊明东, 张景乾. 陕西省区域生态足迹动态变化及驱动因素差异研究. *生态科学*, 2018, 37(3): 67-76.
- [ 10 ] 胡雪萍, 李丹青. 城镇化进程中生态足迹的动态变化及影响因素分析——以安徽省为例. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(2): 300-306.
- [ 11 ] 吴德存, 刘金平, 杨贺. 中国省域生态足迹空间效应及社会经济因素研究——基于空间杜宾面板 STIRPAT 模型. *经济问题探索*, 2017, (3): 162-169.
- [ 12 ] Van den Bergh J C J M, Verbruggen H. Spatial sustainability, trade and indicators: an evaluation of the 'ecological footprint'. *Ecological Economics*, 1999, 29(1): 61-72.
- [ 13 ] 赵琳琳, 张贵祥. 京津冀生态协同发展评测与福利效应分析. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(10): 36-44.
- [ 14 ] 王振波, 梁龙武, 王新明, 王旭静. 环京津山水林田湖草多目标跨区联动保护修复模式. *生态学报*, 2019, 39(23): 8798-8805.
- [ 15 ] 岳文泽, 王田雨. 资源环境承载力评价与国土空间规划的逻辑问题. *中国土地科学*, 2019, 33(3): 1-8.
- [ 16 ] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发长江中游城市群发展规划的通知. (2016-05-12) [2021-04-17]. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/xxzhjs/ghzc/201605/t20160512\\_971938.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztl/xxzhjs/ghzc/201605/t20160512_971938.html).
- [ 17 ] Dong H W, Li P, Feng Z M, Yang Y Z, You Z, Li Q. Natural capital utilization on an international tourism island based on a three-dimensional ecological footprint model: a case study of Hainan Province, China. *Ecological Indicators*, 2019, 104: 479-488.
- [ 18 ] 杨屹, 胡蝶. 生态脆弱区榆林三维生态足迹动态变化及其驱动因素. *自然资源学报*, 2018, 33(7): 1204-1217.
- [ 19 ] 谢鸿宇, 王羚邨, 陈贤生. 生态足迹评价模型的改进与应用. 北京: 化学工业出版社, 2008: 12-59.
- [ 20 ] 刘某承, 李文华, 谢高地. 基于净初级生产力的中国生态足迹产量因子测算. *生态学杂志*, 2010, 29(3): 592-597.
- [ 21 ] Lin D, Hanscom L, Martindill J, Borucke M, Cohen L, Galli A, Lazarus E, Zokai G, Iha K, Wackernagel M. Working Guidebook to the National Footprint Accounts. Oakland: Global Footprint Network, 2018.
- [ 22 ] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [ 23 ] 杨璐迪, 曾晨, 焦利民, 刘钰. 基于生态足迹的武汉城市圈生态承载力评价和生态补偿研究. *长江流域资源与环境*, 2017, 26(9): 1332-1341.
- [ 24 ] Wang S G, Zheng L L, Yu D X. The improved degree of urban road traffic network: a case study of Xiamen, China. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2017, 469: 256-264.
- [ 25 ] Derrible S, Kennedy C. The complexity and robustness of metro networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2020, 389(17): 3678-3691.
- [ 26 ] Shen Y, Ren G, Ran B. Cascading failure analysis and robustness optimization of metro networks based on coupled map lattices: a case study of Nanjing, China. *Transportation*, 2021, 48(2): 537-553.
- [ 27 ] 卢娜, 曲福田, 冯淑怡, 邵雪兰. 基于 STIRPAT 模型的能源消费碳足迹变化及影响因素——以江苏省苏锡常地区为例. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 814-824.
- [ 28 ] 李佳佳, 罗能生. 城镇化进程对城市土地利用效率影响的双门槛效应分析. *经济地理*, 2015, 35(7): 156-162.
- [ 29 ] 甄翌, 麻学锋, 李志龙. 旅游城镇化不可转移生态足迹演变及驱动因素. *生态学报*, 2020, 40(21): 7908-7920.
- [ 30 ] Zeng C, Song Y, Cai D W, Hu P Y, Cui H T, Yang J, Zhang H X. Exploration on the spatial spillover effect of infrastructure network on urbanization: a case study in Wuhan urban agglomeration. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 47: 101476.
- [ 31 ] 苗洪亮, 周慧. 中国三大城市群内部经济联系和等级结构的比较——基于综合引力模型的分析. *经济地理*, 2017, 37(6): 52-59.
- [ 32 ] Mátyás L. Proper econometric specification of the gravity model. *The World Economy*, 1997, 20(3): 363-368.
- [ 33 ] Moran P A P. A test for the serial independence of residuals. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 178-181.
- [ 34 ] LeSage J, Pace R K. *Introduction to Spatial Econometrics*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [ 35 ] 俞海, 王勇, 张永亮, 赵子君, 张燕. “十三五”中国绿色增长路径识别分析. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S1): 1-8.