

DOI: 10.5846/stxb201810212274

沈威, 鲁丰先, 秦耀辰, 谢志祥, 李阳. 长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素. 生态学报, 2019, 39(11): - .
Shen W, Qin Y C, Lu F X, Xie Z X, Li Y. Analysis of temporal-spatial patterns and influencing factors of urban ecosystem carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): - .

长江中游城市群城市生态承载力时空格局及其影响因素

沈 威, 鲁丰先, 秦耀辰*, 谢志祥, 李 阳

河南大学环境与规划学院/黄河中下游数字地理技术教育部重点实验室, 开封 475004

摘要: 长江中游城市群是我国的典型生态敏感区和重点开发区, 科学评价其生态承载力具有重要的科学价值和现实意义。本文从城市生态系统的组成要素、结构特征出发, 选择状态空间法从社会经济协调力、资源环境支撑力和生态弹性力三个维度构建了城市生态承载力综合评价指标体系, 综合运用空间分析、多元回归、地理加权回归等方法深入分析了 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力的时空格局及其影响因素。结果表明: ①2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力指数总体呈波动上升的“W”型走势, 社会经济协调力维度呈波动下降的趋势, 而资源环境支撑力和生态弹性力维度整体呈波动上升的趋势; ②从空间格局来看, 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力表现出显著的空间关联性与异质性, 环洞庭湖地区和环鄱阳湖城市群地区形成两大高值集聚区, 而在武汉城市圈和环长株潭城市群核心区域形成两大低值集聚区; ③社会发展水平、城镇居民收入水平、人口密度、经济发展效率、资源供给状况和环境污染治理水平等要素对长江中游城市群城市生态承载力空间分异格局的影响较为显著, 影响强度具有空间异质性特征。

关键词: 城市生态承载力; 时空格局; 影响因素; 长江中游城市群

Analysis of temporal-spatial patterns and influencing factors of urban ecosystem carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

SHEN Wei, QIN Yaochen*, LU Fengxian, XIE Zhixiang, LI Yang

College of Environment and Planning, Key Laboratory of Geospatial Technology for Middle and Lower Yellow River Region, Henan University, Kaifeng 475004, China

Abstract: The urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River is within a typical ecologically sensitive area as well as a key development area in China. Scientific assessment of its ecological carrying capacity has important scientific value and practical significance. On the basis of both the components and structural characteristics of urban ecosystems, in this study, we used state-space techniques to construct a comprehensive evaluation index system for the urban ecosystem carrying capacity from three dimensions: socio-economic coordination, resource and environmental supply, and ecological elasticity. Spatial analysis, multiple regression, and geographically weighted regression were used to analyze the temporal-spatial patterns and other factors influencing the urban ecosystem carrying capacity in an urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2006 to 2015. The results indicated that: (1) the urban ecosystem carrying capacity of study area presents a W-shaped fluctuating increasing trend. The dimension of socio-economic coordination follows a fluctuating decreasing tendency, while the dimensions of resource and environment supply and ecological elasticity are

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671536, 41501588)

收稿日期: 2018-10-21; 修订日期: 2019-02-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qinye@henu.edu.cn

increasing with fluctuations. (2) With regard to the perspective of spatial patterns, the urban ecosystem carrying capacity of study area is characterized by an obvious space correlation and heterogeneity. Two hot spots formed in the Poyang Lake urban agglomeration and the area around the Dongting Lake, and two cold zones formed in the core area of the Wuhan urban agglomeration and the urban agglomeration around Changsha-Zhuzhou-Xiangtan. (3) The factors of social development level, income level of urban inhabitants, population density, economic development efficiency, resource supply level, and environmental pollution control level exert significant effects on the spatial differentiation pattern of the urban ecosystem carrying capacity in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River. Moreover, the intensity shows a spatial heterogeneity characteristic.

Key Words: urban ecosystem carrying capacity; temporal-spatial patterns; influencing factors; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River

改革开放 40 年来我国城镇化发展迅速,城镇化率由 1978 年的 17.9% 增长到 2015 年的 56.1%,城镇化率增长了 3.13 倍,年均增长率达 1.03 个百分点。但是城市人口和面积快速增长对不同区域尺度上的土地利用/覆被、生物多样性、水文系统、局部气候等均产生了显著影响,我国城市社会经济发展付出了较大的资源和环境代价^[1]。由于城镇发展的不可逆性,为了引导城镇科学和健康的发展,就有必要根据城市发展现状和发展态势评价城市生态系统的综合支撑和发展能力,然后找出制约其综合支撑和发展能力的影响因素,并在此基础上制定出科学合理的调控政策和措施。生态承载力是一个衡量人类社会经济活动对自然资源利用程度和对生态环境干扰强度的重要测度指标,也是判断区域可持续发展程度的重要依据^[2],近年来引起了国内外学者的持续关注^[3-6]。

纵观国内外相关研究进展,学者们对城市生态承载力的关注和讨论主要聚焦于生态承载力的指标体系构建与评价方法、空间评价与空间耦合、影响因素、以及预测分析等四个方面。从生态承载力的指标体系构建与评价方法上看,伴随着生态承载力概念和内涵的发展,生态承载力评价指标体系逐渐丰富,针对不同问题角度和研究侧重点的评价方法也不断改进和完善,主要方法包括人类净初级生产力估算法(HANPP)^[7-8]、生态足迹法^[9-11]、状态空间法^[12-13]、系统模型法^[14-17]、综合评价法^[18-19]、生态系统服务消耗评价法^[20]等,评价方法呈现多元化、综合化的特点^[13]。从生态承载力空间评价与空间耦合上看,多利用综合空间评价方法^[21-22]、空间自相关方法^[9,13]从空间尺度或多个时间节点尺度上对各类典型区域生态承载力及其各维度承载能力的空间分布特征进行评价;也有学者尝试对生态承载力各维度间的耦合协调程度进行估算和空间表达^[13],以揭示生态系统内部要素之间的协调水平。在生态承载力的影响因素研究方面,已有成果多侧重空间分析,而较少关注影响因素分析,已有研究方法主要包括传统的相关系数分析法^[19]、因子分析法^[23]、多元线性回归模型^[24]等。国内外学者对生态承载力的预测研究相对较少,已有研究多利用马尔科夫模型(Markov)进行时间尺度上的生态承载力预测研究^[25-27],而较少开展空间尺度上的生态承载力预测模拟研究,这是在今后的研究中需要关注的方面。

学界已有研究成果深化了生态承载力的理论内涵、拓展了生态承载力的研究视角,对于深刻认识各类典型区域生态承载力格局及其演化机理,进而优化地区生态承载力格局具有重要意义。但从目前研究进展来看,已有生态承载力研究大多侧重于空间格局的静态评价,缺少基于面板数据的生态承载力时空动态演变分析,有关时空动态预测研究也相对较少;已有研究的评价指标选取多侧重自然要素,较少考虑社会发展进步、资源的消耗水平、环境污染治理水平等因素对城市复合生态系统整体承载能力的影响,指标选取范围有待进一步拓展;传统影响因素研究方法忽略了影响因素对研究单元作用的空间异质性,难以充分展现各影响因素对不同研究单元的影响水平。长江中游城市群是长江流域重要的生态屏障和担负着重要生态污染防治责任的特殊生态敏感区,同时也是我国长江流域中人口最密集、水土资源开发利用强度最高、生态环境问题最严峻的地区之一,目前对城市生态承载力局部时空动态演变及影响因素的研究尚未深入。基于此,本文以长江中

游城市群市域单元为空间分析尺度,基于多元数据构建了城市生态承载力综合评价指标体系,并运用空间自相关方法和地理加权回归模型(GWR)探究 2006—2015 年城市生态承载力时空演变格局和影响因素,重点揭示影响因素对各研究单元影响的空间差异性,有利于揭示区域城市生态承载力差异的内在原因,明确区域城市生态承载力所处发展阶段和制约因素,对引导长江中游城市群的可持续发展具有重要的实践意义。

1 研究区概况

长江中游城市群是以武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群为主体形成的特大型城市群,它地处我国长江流域中段,覆盖湖北、湖南和江西省共 31 个地级市和部分县(区),范围为 26°03′—32°38′N,110°45′—118°21′E,总面积约占 32.6 万平方公里,属亚热带季风性气候,年平均降水量约在 800—1943mm,海拔高度在 20—3105m 之间。长江中游城市群地区以平原为主,土壤肥沃,水资源非常丰富,区域内拥有鄱阳湖、洞庭湖、汉江、清江等众多江河湖泊,水热组合条件较好,农业资源丰富,是中国重要的粮食主产区之一。另一方面,长江中游城市群包含的武汉城市圈、环长株潭城市群、环鄱阳湖城市群作为赣鄂湘三省的人口密集区域和社会经济发展的集聚地区,分别承载了各省经济总量的 60% 以上,该地区作为打造沿江集聚产业带的重点地区,近年来重化工业过度集聚和粗放低效的资源利用方式使得水资源的消耗量和污水的排放量都非常巨大^[28],鄱阳湖、洞庭湖、洪湖等重点湖泊富营养化加剧、水环境容量降低等问题也逐渐凸显,总体上区域城市经济发展过程中的水资源承载压力和水生态安全问题都较为突出;此外,区域内土地资源较为丰富,但土地生态比较脆弱,土地城镇化和产业发展背景下土地水土流失和污染比较严重。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文社会经济统计数据来源于 2007—2016 年《中国城市统计年鉴》、《江西省统计年鉴》、《湖北省统计年鉴》、《湖南省统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》等统计年鉴,土地利用/覆被数据(包括江西省、湖北省和湖南省)源于国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享平台(<http://www.geodata.cn>)。基于相关年份土地利用/覆被数据,采用 Python 脚本进行批量分割、转化和提取,进而分区统计各研究单元的森林和湿地数据。此外,水资源总量、耕地总面积、城乡居民收入等部分缺失指标的数据由水资源公报和地级市统计公报获得。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标体系构建

目前,城市生态承载力尚没有统一的定义,本文综合已有研究成果^[21-23,29],将城市生态承载力的概念定义为:在特定时期和一定压力水平下,城市生态系统能维持其自身健康、协调发展的承载能力,主要表现为城市生态系统中社会经济子系统产生的协调能力、资源环境子系统维持系统健康运行提供的支撑能力、以及生态弹性力子系统达到某一适宜目标的调节能力和发展潜力。从城市生态系统的组成要素、结构特征出发,以人类自身及人类活动的影响为脉络,并在充分考虑长江中游地区资源环境特点的基础上,建立了由社会经济协调力子系统、资源环境支撑力子系统和生态弹性力子系统等 3 个子系统、9 个准则层和 18 个具体指标组成的城市生态承载力综合评价指标体系(表 1)。

在指标数据处理时,为了消除指标间可能存在的量纲和量级的差别,需要将指标数据进行正向化处理和标准化处理。首先对逆向指标进行正向化处理,其中逆向指标正向化处理参考已有正规化转化方法^[30],并对该公式进行改进,使得正向化后的值压缩在 (0,1] 之间。逆向指标的正向化处理公式为:

$$x_{ij}^z = \frac{\text{MAX}(x_{ij}) - x_{ij}}{\text{MAX}(x_{ij}) - \text{MIN}(x_{ij})} + 0.001 \quad (1)$$

式中: x_{ij} 为原始指标值, x_{ij}^z 为原始指标的正向化值, $\text{MAX}(x_{ij})$ 为第 j 个年份第 i 个指标的最大值,

$MIN(x_{ij})$ 为第 j 个年份第 i 个指标的最小值。正向指标标准化采用最大值与最小值标准化方法进行处理。

考虑到本文指标数据是基于行政单元统计的资源环境和社会经济指标,评价指标权重采用熵权法确定^[13,19]。熵权法是一种客观赋权的方法,能够避免人为主观因素的干扰,使评价结果具有客观性和较高的可信度^[31]。

表 1 城市生态承载力指标体系

Table 1 Evaluation index system of urban ecosystem carrying capacity

系统层 System layer	子系统层 Subsystem layer	准则层 Criterion layer	指标层 Basic index layer	指标性质 Properties of index		
城市生态承载力 Urban ecosystem carrying capacity	社会经济协调力 子系统	社会进步因子	城乡人均收入比	逆向		
			人均公路客运量	正向		
	资源环境支撑力 子系统	资源供给因子 子系统	环境治理因子	万人拥有卫生机构床位数	正向	
				人口发展因子	人口密度	逆向
				经济发展因子	城镇化率	逆向
				单位 GDP 能耗	逆向	
				人均 GDP	正向	
				产业结构因子	第三产业产值占 GDP 比重	正向
				资源供给因子	人均水资源占有量	正向
				人均耕地面积	正向	
				工业烟(粉)尘处理率	正向	
				工业废水达标排放率	正向	
	生活污水处理率	正向				
	生态弹性力子系统	生态弹性因子	森林占辖区面积比重	正向		
			湿地占辖区面积比重	正向		
			建成区绿化覆盖率	正向		
			人均公园绿地面积	正向		
生态潜力因子			人均科学技术投入	正向		

2.2.2 状态空间法

状态空间法是欧氏几何空间中用于定量描述系统状态的一种有效方法,一般由表示系统各要素状态向量的三维状态空间轴组成,在三维状态空间中,每一个点都表示一定时间资源环境与人类社会经济活动状况的空间组合,通过点的位置就可以判断系统的一个特定的承载状态^[13]。本文在借鉴前人研究成果的基础上^[18,32],结合长江中游地区特殊的自然、社会、经济、生态和资源背景,将三维状态空间轴分别定义为社会经济协调力轴、资源环境支撑力轴、生态弹性力轴,从而构建长江中游城市群城市生态承载力评价模型。模型计算公式为:

$$ECC = |M| = \sqrt{(w_{1j} SEC_j)^2 + \sum_{j=1}^n (w_{2j} REC_j)^2 + \sum_{j=1}^o (w_{3j} EEF_j)^2} \quad (2)$$

上式中: ECC 为城市生态系统承载力; M 为城市生态系统承载力空间向量的模; SEC_j 为社会经济协调力的第 j 个指标在空间坐标轴上的投影; REC_j 为资源环境支撑力的第 j 个指标在空间坐标轴上的投影; EEF_j 为生态弹性力的第 j 个指标在空间坐标轴上的投影; w_{1j} 、 w_{2j} 、 w_{3j} 分别为 SEC 、 REC 、 EEF 子系统第 j 个指标的权重; m 、 n 、 o 分别为 SEC 、 REC 、 EEF 子系统指标数。

2.2.3 空间自相关

探索性空间分析方法(Exploratory Spatial Data Analysis, ESDA)是针对具有空间异质性特征的研究数据,以检验相临近单元的观测值是否具有空间关联为重点,提供一系列空间数据分析方法和可视化技术的集合^[33]。常用全局 Moran's I 统计量作为测度全局空间关联度的统计量,用于分析区域总体的空间关联和空间差异程度,而用局域关联指标 LISA 来表示局部空间自相关,以此来揭示要素的异质特性。全局自相关计算公

式为:

$$I = \frac{n}{s_o} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

式中: n 为地区总数; x_i, x_j 分别为空间单元 i 和 j 的观测值; w_{ij} 是空间权重矩阵,用来揭示各要素之间的空间联系; s_o 是所有空间权重的聚合, $s_o = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 。Moran's I 指数的取值范围为 $[-1, 1]$ 。

全局空间自相关虽然能够对观测变量整体空间依赖程度进行测度,但一定程度上忽略了空间的局部不平稳。因此,为进一步探讨局部空间关联特征,引入局部空间自相关方法进行局部空间自相关特征分析。具体计算公式如下:

$$I_i = Z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_j \quad (4)$$

式中: Z_i 和 Z_j 分别为空间单元 i 和 j 观测值标准化后的数值; w_{ij} 是空间权重矩阵,用来揭示各空间单元之间的空间联系。

2.2.4 影响因素的指标选取与模型构建

城市生态系统是一个复杂巨系统,系统中承载基体与承载对象的关系复杂且互动性强,因此城市生态系统承载力受多方面因素的综合作用。参考城市生态承载力空间格局影响因素研究成果^[19,34-35],同时考虑影响因素指标数据的综合性、科学性和可获取性,将城市生态承载力作为因变量,分别从社会发展水平、城镇居民收入水平、人口规模、经济发展、自然资源状况、环境污染治理水平、生态环保观念等 7 个方面选取变量构建模型(表 2),探讨长江中游城市群市域城市生态承载力空间格局的主要影响因素。

表 2 长江中游城市群城市生态承载力影响因素指标体系

Table 2 Evaluation index system of influence factors

类型 Type	自变量 Independent variable	计算方法 Calculation method
社会发展水平 Social development level	医疗卫生水平(Health)	卫生技术人员总数/年末常住人口(万人)
城镇居民收入水平 Income level of urban inhabitants	城乡居民人均收入比(UR-Ratio)	城镇居民与农村居民人均可支配收入比值
人口规模 Population density	城镇居民可支配收入(Income)	城乡居民人均可支配收入
经济发展效率 Economic development efficiency	人口密度(PDen)	年末常住人口/辖区土地面积
资源供给状况 Resource supply level	单位 GDP 能耗(ECGDP)	总能耗(吨标准煤)/GDP 总值(万元)
环境污染治理水平 Environmental pollution control level	人均水资源量(WResources)	水资源总量(m^3)/年末常住人口(人)
生态环保观念 Ecological concept	工业废水排放达标量(PControl)	市域全年工业废水排放达标量
	万人中等职业技术学校在校生数(EPro)	中等职业技术学校在校生数/年末常住人口

关于影响因素变量选取,主要基于以下假设:(1)社会发展水平在一定程度上能够体现社会的和谐稳定程度,社会的安定和繁荣可对经济、资源环境等方面产生积极影响,从而对城市生态系统承载能力具有正向促进作用;(2)城镇居民收入水平的提高会促进城镇居民消费水平的增长,这将显著增加地区城市生态系统的能源资源供给压力和生态环境调节压力,从而对城市生态承载力产生负向影响。(3)人口密度的增长需要从区域内或外界获取维持其生存发展的物质和能源也相应增多,这必然会增加城市生态系统的承载压力,对城市生态承载力产生负向影响;(4)经济发展效率越高,资源环境的综合利用水平和可持续发展水平就越高,越

有利于城市生态承载力的提高;(5)资源供给水平作为影响区域发展的基础性要素^[23],其供给水平都有可能制约城市社会经济系统的发展,从而对城市生态系统承载能力产生正向影响;(6)环境污染治理水平和生态环保观念对城市生态系统都起到了生态弹性力和污染抑制力作用,对城市生态承载力的提高具有正向促进作用。

传统线性回归模型在自变量空间特征及其“全局”估计上存在局限性^[36],因此本文以长江中游城市群市域为基本研究单元,综合运用普通最小二乘法(OLS)和地理加权回归模型(GWR)来评价上述影响因子在整体及不同地区对城市生态承载力的影响,以便更加直观的反映城市生态承载力影响因素在空间上的非均衡性及其变化趋势。假定有 $i = 1, 2, \dots, m$ 、 $j = 1, 2, \dots, n$ 的系列解释变量观测值 x_{ij} 和被解释变量 y_j , 全域回归模型如下:

$$Y_j = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_{ij} + \varepsilon_i (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: ε 为误差项, β_0 为回归常数。而地理加权回归模型扩展了传统线性回归模型,其回归系数不再是利用全域信息获取的假定常数 β_0 , 代之以邻近观测值的子样本数据信息进行局域回归估计而得,并随着空间地理位置的变化而变化,地理加权回归模型公式如下:

$$Y_i = \beta_0(S_i, T_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(S_i, T_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中: Y_i 为市域单元 i 的城市生态承载力指数; (S_i, T_i) 是第 i 个市域单元的中心地理位置坐标; $\beta_j(S_i, T_i)$ 是 i 点上第 j 个回归参数,由 i 点的空间位置决定; x_{ij} 为各影响因素 x_j 在 i 点的样本数值。模型计算过程中选用修正的赤池信息准则(AICc)来确定最佳带宽^[37]。

3 长江中游城市群城市生态承载力时空格局

3.1 城市生态承载力时间序列演变特征

由图1可知,2006—2015年长江中游城市群城市生态承载力指数总体呈波动上升的“W”型走势。从长江中游城市群包含的各子城市群城市生态承载力指数的时间变化特征来看,环鄱阳湖城市群城市生态承载力指数均呈现波动上升的“W”型走势,而环长株潭城市群和武汉城市群则呈现出波动上升的“M”型趋势。对比三个子城市群城市生态承载能力,环鄱阳湖城市群整体承载能力最优,环长株潭城市群和武汉城市群次之。

从2006—2015年长江中游城市群城市生态承载力各维度的承载状况及演变特征来看(图2),社会经济协调力承载指数整体高于资源环境支撑力和生态弹性力,研究时段内呈波动下降的趋势,主要是因为研究时段内长江中游城市群处于快速城镇化阶段,人口集聚和建设用地的不断扩张导致区域社会经济系统的承载压力不断增加,因而社会经济调节力整体有所下降。资源环境支撑力和生态弹性力承载指数整体呈波动上升的趋势,区域生态环境保护政策的不断完善和污染治理力度的逐渐提高均在一定程度上提升了城市生态系统的资源环境支撑力和生态弹性力。虽然2006—2015年社会经济协调力承载指数整体有所下降,但得益于资源环境支撑力和生态弹性力的不断提高,因而长江中游城市群城市生态承载力指数整体呈现出波动上升的发展趋势。

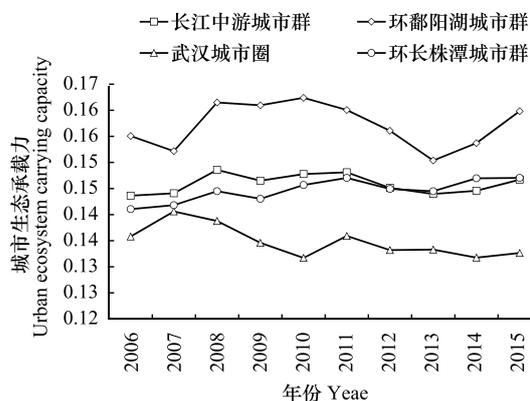


图1 2006—2015年长江中游城市群及各子城市群城市生态承载力时间演变图

Fig.1 The evolution of urban ecosystem carrying capacity's temporal pattern of in the middle reaches of the Yangtze river and suburban agglomerations in 2006—2015

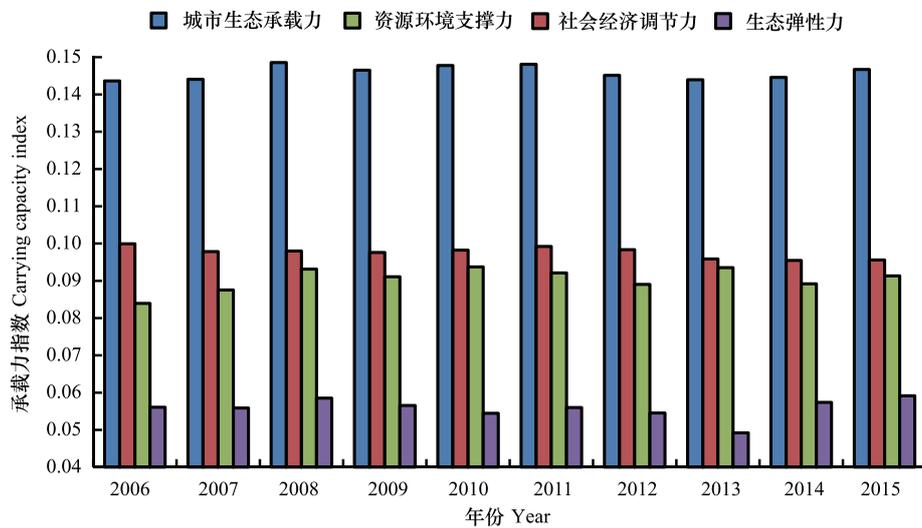


图 2 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力及各维度承载状况时间演变图

Fig.2 The evolution of urban ecosystem carrying capacity with each dimension's temporal pattern of in the middle reaches of the Yangtze river in 2006—2015

3.2 城市生态承载力空间格局演化

为了分析 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力的空间格局演变特征,引入空间自相关分析方法对其全局空间自相关和局部空间自相关特征进行综合分析。

3.2.1 全局空间自相关演变特征

以长江中游城市群地级行政单元为基本研究单元,利用 ArcGIS10.3 软件计算 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力的全局自相关系数(表 3)。从全局自相关的分析结果来看,2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力全局 Moran's I 指数值呈波动下降的态势, Z 值均通过 1% 显著性水平检验,表明长江中游城市群市域城市生态承载力在空间分布上存在显著的正向自相关关系,即市域城市生态承载力呈现出若干市域单元相似属性值在特定空间区域上趋于集聚分布的规律特征。具体表现为具有较高城市生态承载力的市域单元之间趋于相互临近集聚,具有较低城市生态承载力的市域单元之间趋于相互临近集聚。

表 3 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力的全局自相关系数

Table 3 The global spatial autocorrelation of urban ecosystem carrying capacity in the middle reaches of the Yangtze river in 2006—2015

年份 Year	全局自相关系数 Global autocorrelation coefficient			年份 Year	全局自相关系数 Global autocorrelation coefficient		
	Moran's I	Z-score	P-value		Moran's I	Z-score	P-value
2006	0.7218	7.1487	0.0000	2011	0.6757	6.6581	0.0000
2007	0.7132	7.0524	0.0000	2012	0.6308	6.2389	0.0000
2008	0.7545	7.4225	0.0000	2013	0.5796	5.8226	0.0000
2009	0.7247	7.1414	0.0000	2014	0.5983	5.9237	0.0000
2010	0.6225	6.2111	0.0000	2015	0.5981	5.9152	0.0000

3.2.2 局部空间自相关及演变

全局 Moran's I 指数仅是从整体上对长江中游城市群市域城市生态承载力空间自相关的全局评估,存在着忽略空间过程不稳定性的缺陷^[36]。因此为了细致刻画长江中游市域城市群城市生态承载力的局部空间关联特征,有必要引入局部空间自相关。借助 GeoDA 软件分别对长江中游城市群城市生态承载力指数进行 Univariate Local Moran's I 分析,根据局部 Moran's I 指数散点图,可构建出反映市域城市生态承载力指数空间分布差异的四种局域空间集聚类型,即 HH、LH、LL 及 HL 四种类型区,其中 HH(LL) 区表示地区自身与相邻

区域承载力均较高(低),LH(HL)区表明地区自身承载力均较低(高),而相邻区域承载力均较高(低)。

为了比较分析,选取市域单元 2006、2010 和 2015 年三个时间截面城市生态承载力指数进行局部空间自相关分析,并结合局部 Moran's I 指数散点图(图 3)进行局部空间格局演变分析。结果如图 3 所示,2006—2015 年期间,长江中游城市群市域单元以 HH 类型和 LL 类型等空间正相关关系类型为主,HH 类型区集中分布在城市群西部和东南部地区,LL 类型区集中分布在城市群西南部和东北部地区,HL 和 LH 类型区分布数量相对较少。此外,长江中游城市群与三大子城市群之间的承载力差异较大,长江中游城市群和三大子城市群内部地市之间的差异也相对较大。从具体空间格局演化特征来看:

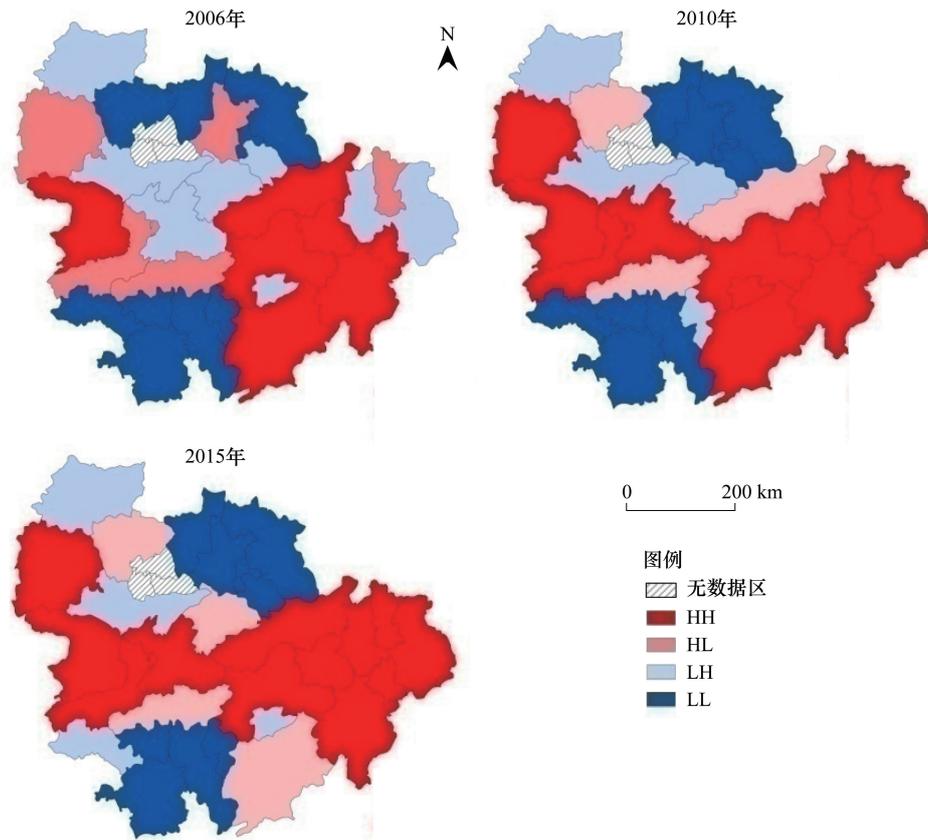


图 3 2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力空间格局演变图

Fig.3 The evolution of urban ecosystem carrying capacity's hot and cold spot spatial pattern of in the middle reaches of the Yangtze river in 2006—2015

HH 类型区多为资源环境支撑力和生态弹性力较强的城市,2006 年主要分布于环鄱阳湖城市群地区,以及环洞庭湖地区;2010 年 HH 类型区分布范围向环长株潭城市群内的洞庭湖区、赣西南地区以及鄂中地区扩展,在环洞庭湖地区和环鄱阳湖城市群两大区域形成高值集聚区;2015 年 HH 类型区分布范围继续向环鄱阳湖城市群中北部地区扩展,但赣西南地区的 HH 类型区数量有所减少,其他地区的空间分布格局基本不变。

HL 类型区分散分布于城市群区域内,研究时段内空间分布格局变化较大。宜昌市、益阳市和景德镇市由 HL 类型逐渐转变为 HH 类型。长沙市得益于较强的社会经济调节力,其城市生态承载力高于相邻的环长株潭城市群南部的湘潭市、娄底市、株洲市和萍乡市,出现空间极化现象。而武汉市虽在 2006 年处于武汉城市群地区的高值区,从 2010 年开始转变为 LL 类型区,原因在于随着城镇化进程的快速推进,其城市生态系统面临着人口、土地、资源环境等多重承载压力,因此城市生态系统承载力有所下降。

LH 类型区多处于高承载力城市与低承载力城市之间,2006 年主要分布于长江中游城市群中部、襄荆宜城市带北部以及赣东地区;2010—2015 年长江中游城市群中部的 LH 类型区分布范围有所收缩,LH 类型区空

间分布格局开始趋于离散化。环鄱阳湖城市群东部的上饶市由 2006 年的 LH 类型转变为 2010 年的 HH 类型,表明上饶市城市生态承载力提升明显。

LL 类型区多为社会经济协调力和资源环境支撑力较弱的城市,2006 年主要分布于武汉城市圈和环长株潭城市群核心区域,形成两个南北遥相呼应的低值集聚区;2010-2015 年 LL 类型区空间分布格局基本不变。究其原因发现,武汉城市圈和环长株潭城市群核心区域作为快速城镇化地区,人口快速集聚和城镇建设用地快速扩张导致区域社会系统人口承载压力增大、资源快速消耗、以及生态环境破坏等一系列问题,从而引起城市生态系统承载力的下降。

4 长江中游城市群城市生态承载力影响因素分析

4.1 基于 OLS 模型的影响因素综合分析

首先利用 SPSS 软件对 2006 年和 2015 年被解释变量和各项影响因素指标进行 Z-score 标准化处理,然后运用容差和膨胀因子(VIF)进行多重共线性检验,发现所有解释变量的容差 >0.1 且膨胀因子 $VIF < 10$ (表 4),说明解释变量之间不存在多重共线性问题。OLS 模型分析结果显示(表 5),2006 年和 2015 年模型整体均通过 1%显著性水平检验,模型拟合优度分别为 64.6%和 71%,说明所选解释变量在 2006 和 2015 年两个节点年份均能较好的解释长江中游城市群市域城市生态承载力整体空间差异格局。

表 4 2006 年和 2015 年 OLS 模型分析结果

Table 4 Result of the OLS model for urban ecosystem carrying capacity

自变量 Independent variable	2006 年				2015 年			
	Beta	t	Sig.	VIF	Beta	t	Sig.	VIF
常数项 Constant term	0.111		1.000		0.100		1.000	
Health	0.478	2.821	0.011	2.251	0.348	1.785	0.090	3.660
UR-Ratio	0.119	0.756	0.459	1.951	-0.277	-1.964	0.064	3.691
Income	-0.103	-0.599	0.556	2.333	-0.399	-2.040	0.055	1.922
PDen	-0.330	-1.932	0.048	2.287	-0.282	-1.855	0.079	2.226
ECCDP	-0.588	-4.100	0.001	1.616	-0.323	-2.670	0.015	1.414
WResou	0.163	0.934	0.362	2.403	0.519	2.676	0.015	3.623
PControl	0.365	2.490	0.022	1.684	0.571	4.872	0.000	1.324
EPro	-0.080	-0.392	0.699	3.273	0.146	0.955	0.352	2.262
AICc		71.68				65.94		
R ²		0.758				0.803		
Adjust R ²		0.646				0.710		
F-statistics		7.431				9.661		
Sig.		0.000				0.000		

2006 年模型分析结果显示,每万人卫生技术人员数、人口密度、单位 GDP 能耗和工业废水排放达标量通过了 5%显著性水平检验,且作用方向均符合理论预期。具体来看,社会医疗卫生水平和环境污染治理水平对城市生态承载力具有正向影响。而人口密度和单位 GDP 能耗的增加在一定程度上加剧了区域能源资源的消耗和生态环境的污染,增加城市生态系统的供给压力和代谢压力,从而对城市生态承载力产生负向影响。

2015 年模型分析结果显示,除每万人中等职业技术学校在校生数变量外其他变量均通过 10%显著性水平检验,且作用方向基本符合理论预期。详细来看,城乡居民人均收入比变量和城镇居民可支配收入变量转变为显著影响因素,医疗卫生水平的正向促进作用有所减弱但依旧显著,说明社会发展水平和城镇居民生活水平对城市复合生态系统的承载能力产生着越来越重要的作用。人口密度和单位 GDP 能耗对城市生态承载力的负向影响依旧显著,人口承载压力和经济发展效率对城市生态承载力的间接制约作用将会长期存在。资源供给水平和环境污染治理水平对区域城市生态承载力的显著影响逐渐显现,地区资源供给水平和环境污染

治理水平对城市复合生态系统的供给能力和环境容量产生着直接影响,因而与区域城市生态承载力之间存在较强的依赖性。

4.2 基于 GWR 模型的影响因素分析

运用 ArcGIS10.3 软件中的空间关系建模模块,构建 GWR 模型分别对 2006 年和 2015 年长江中游城市群市域城市生态承载力指数及其影响因素变量进行拟合分析,其中每万人中等职业技术学校在校生数(EPro)变量的空间异质性特征不显著,未纳入 GWR 模型。结果如表 7 所示,两个年份的模型拟合优度分别为 0.6805 和 0.7308, AICc 分别为 66.97 和 61.33。比较 OLS 模型分析结果(表 4)和 GWR 模型分析结果(表 5)可以发现,GWR 模型的拟合效果明显优于 OLS 模型。根据 Fortheringham 等人的评价标准,若 GWR 模型与 OLS 模型的 AICc 差值大于 3,就可以说明前者比后者模拟效果好。

表 5 长江中游城市群城市生态承载力的 GWR 模型拟合结果
Table 5 Test result of the GWR model for urban ecosystem carrying capacity

模型参数 Model parameter	2006 年	2015 年	模型参数 Model parameter	2006 年	2015 年
Bandwidth	6570785	6570785	R ²	0.7761	0.8134
AICc	66.97	61.33	Adjust R ²	0.6805	0.7308

进一步对 2006 年和 2015 年 GWR 模型分析结果中的标准化残差进行全局自相关分析,分析结果显示(表 6),两个节点年份标准化残差的 Moran's I 指数值分别为 -0.0947 和 0.0306, Z 值分别为 -0.4452 和 0.5126,均未通过显著性检验,说明标准化残差未出现空间聚类现象,呈随机分布,GWR 模型整体高度适用。

表 6 标准化残差的全局空间自相关检验
Table 6 Global spatial autocorrelation test for standardized residues

年份 Year	全局自相关系数 Global autocorrelation coefficient			年份 Year	全局自相关系数 Global autocorrelation coefficient		
	Moran's I	Z-score	P-value		Moran's I	Z-score	P-value
2006	-0.0947	-0.4452	0.6516	2015	0.0306	0.5126	0.6082

4.3 影响因素的空间分异

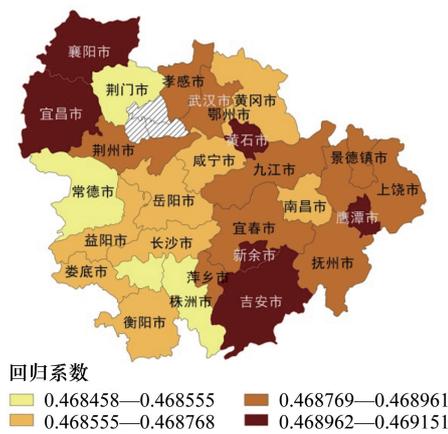
为了展示各影响因素对城市生态承载力作用的空间异质特征,综合考虑 2006 年和 2015 年各解释变量的显著性和作用强度,选取每万人拥有卫生技术人员数、城镇居民可支配收入、人口密度、单位 GDP 能耗、人均水资源量和工业废水排放达标量等 6 个指标,借助 ArcGIS 软件的空间可视化功能分别刻画社会发展、居民生活消费、人口规模、经济发展水平、自然资源状况和环境污染治理水平等要素对长江中游城市群市域城市生态承载力作用的空间分异格局(图 4)。

(1) 社会发展水平。医疗卫生水平对城市生态承载力具有正向影响。2006 年,医疗卫生水平影响的高值区域主要集中在襄荆宜城市带和环鄱阳湖城市群地区,其次为武汉城市圈西部地区,作用强度呈现出显著的空间异质特征。2015 年,医疗卫生水平影响的高值区域向城市群东南部地区偏移,表明襄荆宜城市带地区城市生态承载力对社会发展水平的依赖度有所下降。值得关注的是,2015 年环鄱阳湖城市群地区和洞庭湖地区成为社会发展水平影响最大的地区,可能的原因是在近年来环鄱阳湖地区和洞庭湖地区生态环境保护政策的实施(《洞庭湖生态经济区规划》、环鄱阳湖生态城市群规划(2015-2030)、《长江经济带生态环境保护规划》)和新型城镇化发展规划的推进下,区域逐渐转变以往粗放式的经济发展方式,由发展经济为主导逐渐向综合注重生态环境保护、社会民生保障等可持续发展层面过渡,其社会发展水平大大提升,从而对城市生态承载力的提升产生了重要的推动作用。

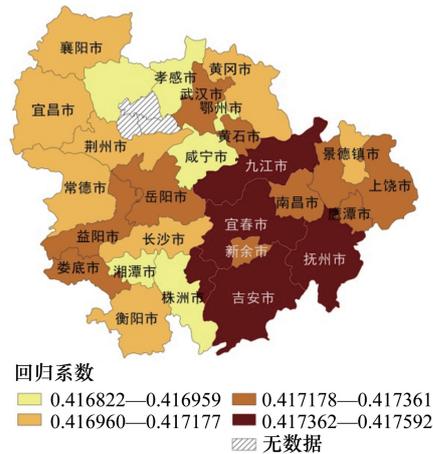
(2) 城镇居民收入水平。城镇居民可支配收入对城市生态承载力具有负向影响,该因素对城市生态承载力影响的空间异质特征较为规律,两个年份均呈现西北低、东南高的分布特征。居民收入水平的提高,尤其是

城镇居民收入水平的提高,会促进城镇居民消费水平的显著增加,从而增加城市生态系统的资源能源供给压力和生态环境调节压力,对城市生态承载力产生负向影响。城镇居民收入水平对各市域城市生态承载力的影响分布特征,原因主要在于各市域城镇居民可支配收入的增幅水平。当前长江中游城市群中部和东南部地区城镇居民可支配收入虽然处于较低水平,但其增长速度高于其他地区。2006—2015 年长江中游城市群东南部地区城镇居民可支配收入年平均增长率达到 11.32%,年平均增长率超过其他地区,其中新余市、鹰潭市、吉安市、九江市年平均增长率分别高达 13.41%、12.01%、11.89%、11.58%。城镇居民收入水平的快速提升,在很大程度上提高了其对城市生态承载力的敏感度。

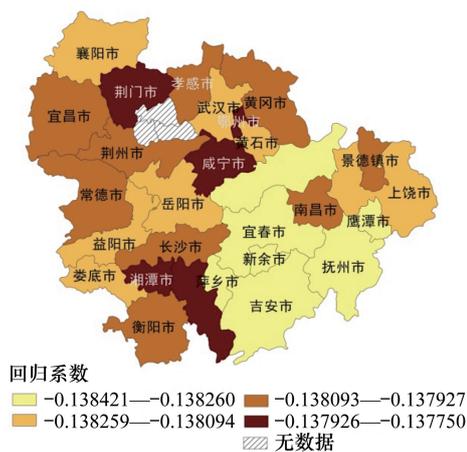
2006年每万人拥有卫生技术人员数



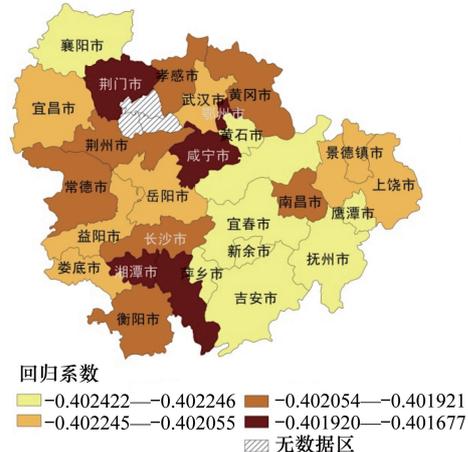
2015年每万人拥有卫生技术人员数



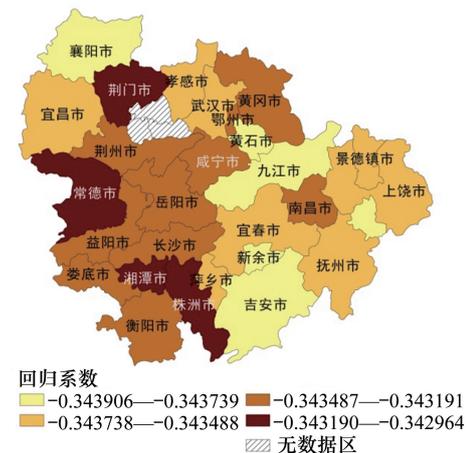
2006年城镇居民可支配收入



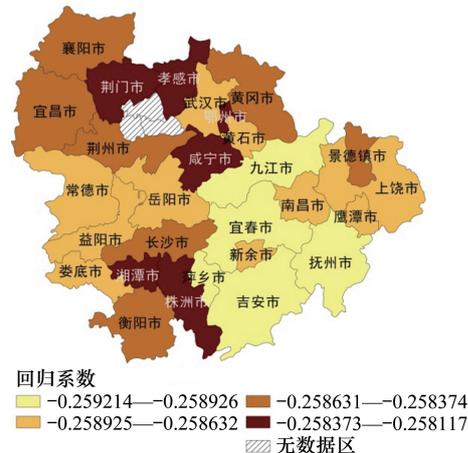
2015年城镇居民可支配收入



2006年年人口密度



2015年人口密度



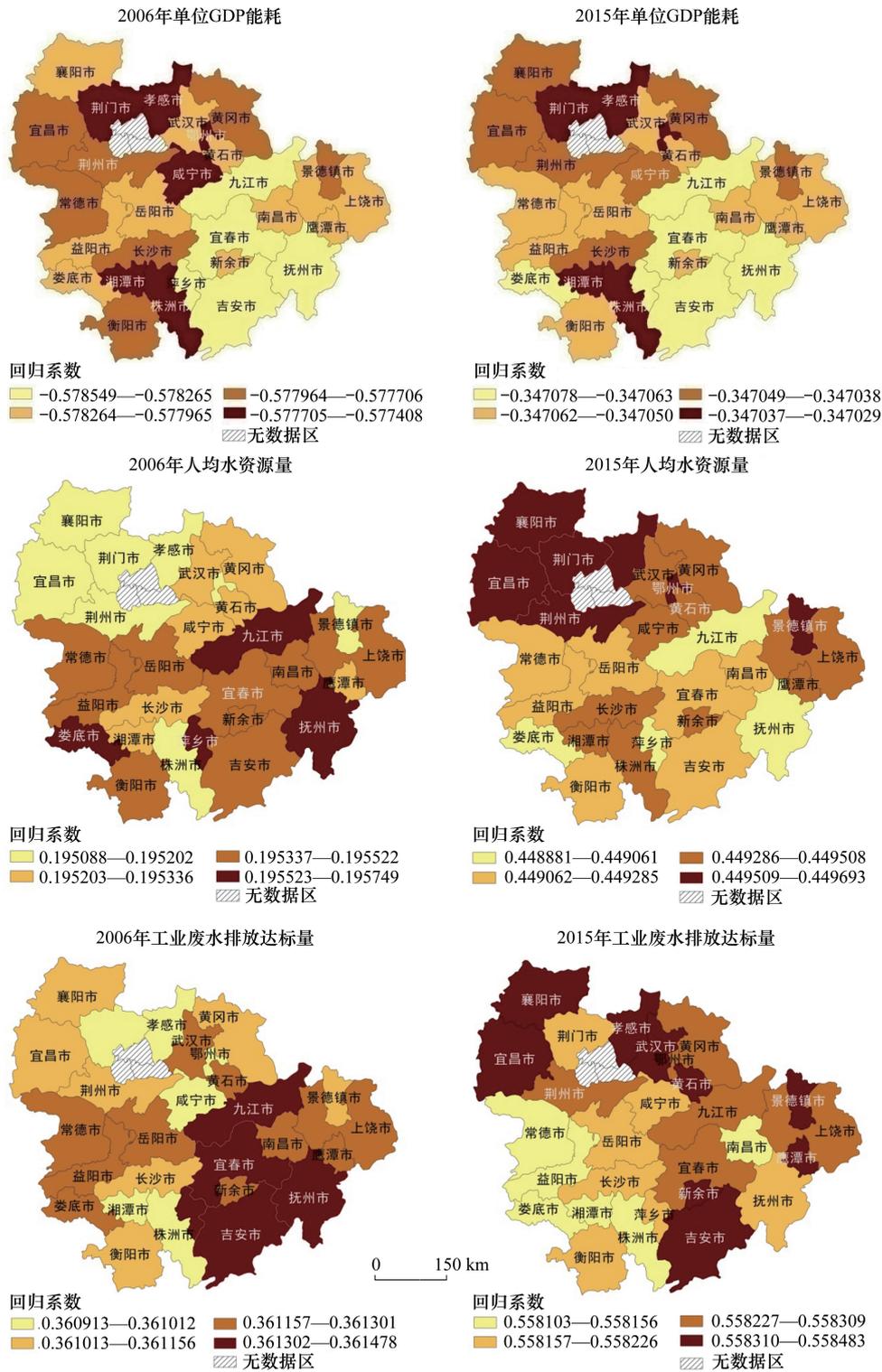


图4 基于GWR模型的城市生态承载力影响因素回归系数空间分布

Fig.4 The influencing factors of urban ecosystem carrying capacity, regression coefficient temporal-spatial distribution map based on GWR model

(3)人口密度。人口密度对城市生态承载力有负向影响,影响强度整体呈现出东部大于西部的东西差异格局。2006年,人口密度影响的高值区主要集中在鄂南地区和环鄱阳湖城市群地区;2015年,人口密度影响的高值区向襄荆宜城市带、赣西及赣南地区偏移。人口密度对地区城市生态承载力的影响机制是通过人口承

载压力间接作用于城市复合生态系统,从而对城市生态承载力产生负向影响。人口密度对各市域城市生态承载力的影响分布特征,原因主要与人口流动有关。武汉、长沙等省会城市及其周边卫星城市(城市生态承载力低值区)等快速城镇化地区以人口集聚为主,地区人口密度增加较快,而鄂北、赣西及赣南地区(城市生态承载力高值区)作为劳动力输出地,跨省市人口外流现象突出,区域人口密度相对较低,因此人口密度对城市生态承载力的影响强度呈现出显著的空间异质性。

(4)经济发展效率。单位 GDP 能耗对城市生态承载力具有负向影响,两个年份均呈现出较为规律的西北低、东南高的南北差异特征,说明经济发展效率对西北部地区的正向促进作用较小,而对东南部地区的正向促进作用较大。这种空间差异特征主要与各市域的产业结构和区域分工密切关联。经济发展效率对城市生态承载力影响的高值区主要集中在省会城市、环洞庭湖片区及环鄱阳湖片区,其中省会城市经济发展以第三产业为主导产业,环洞庭湖片区和环鄱阳湖片区城市受生态环境保护政策制约,产业布局以绿色环保型产业为主,因此该地区经济发展效率均较高;经济发展效率对城市生态承载力影响的低值区主要集中在鄂湘赣三省省会周边地区,该地区由于工业基础较差和承接省会核心城市“三高”产业转移等缘故,导致其一二产业比重较高,经济发展效率相对较低。以 2015 年为例,省会武汉、长沙、南昌第三产业比重分别达到 51.02%、45.06%、41.22%,而三个省会周边低值区的第三产业比重平均值则分别只有 33.09%、35.66%、35.77%。

(5)资源供给状况。人均水资源量对城市生态承载力具有正向影响,两个年份的空间影响格局变化较大。2006 年自然资源状况的空间影响格局呈现出显著的南北差异特征,高值区域主要集中在湘南、环洞庭湖片区以及环鄱阳湖城市群地区,说明丰富的自然资源水平对湘南、环洞庭湖片区以及环鄱阳湖城市群地区城市生态承载力的提升产生了重要的促进作用。2015 年自然资源状况的回归系数整体提升显著,说明自然资源状况对长江中游城市群的整体影响在增加;鄂中地区和三大子城市群核心区超越环洞庭湖片区及环鄱阳湖城市群地区,成为自然资源状况影响最大的区域。究其原因,随着三大子城市群核心区的经济崛起,区域内产业发展和人口集聚将导致能源资源消耗水平急剧增加,自然资源水平成为制约地区城市生态承载力的核心影响因素。近年来,鄂中地区的襄阳和宜昌着力打造建设成为湖北省两大副中心城市,襄荆宜城市带整体社会发展水平和经济协调力大幅提升,该区域丰富的资源供给成为促进区域整体承载能力提升的关键。

(6)环境污染治理水平。工业废水排放达标量对城市生态承载力具有正向影响,两个年份的空间影响格局变化较大。2006 年环境污染治理水平影响的高值区主要分布在环洞庭湖地区和环鄱阳湖城市群地区;2015 年各市域回归系数整体增幅明显,高值区向襄荆宜城市带和武汉城市圈地区偏移。从影响机制来看,环境污染治理水平的提高能对地区城市生态系统产生直接的“环境效益”,从而推动地区城市生态承载力的提升。环境污染治理水平对各市域城市生态承载力的影响分布特征,是与各市域的环境污染治理水平直接相关的。结合图 3 可知,2015 年襄荆宜城市带和环鄱阳湖城市群地区属于高承载力区域,因此该区域属于高环保收益型区域,而武汉城市圈地区属于低承载力区域,因此属于低环保收益型区域。环境污染治理水平对城市生态承载力产生直接的拉动效应,是影响长江中游城市群城市生态承载力的主导因素之一。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文选用状态空间法构建长江中游城市群城市生态承载力综合指标体系,基于 2006—2015 年面板数据,对长江中游城市群城市生态承载力进行了定量评价,并综合运用空间自相关、多元回归和地理加权回归模型等空间分析方法及计量模型,分析了长江中游城市群市域城市生态承载力的时空格局演变特征,深入探讨其影响因素的空间差异,主要结论为:

(1)从时间序列演变特征来看,2006—2015 年长江中游城市群城市生态承载力指数总体呈波动上升的“W”型走势;三个子城市群中,环鄱阳湖城市群整体承载能力最优,环长株潭城市群和武汉城市圈次之。各维度间,社会经济协调力承载指数整体高于资源环境支撑力和生态弹性力,研究时段内社会经济协调力呈波

动下降的趋势,而资源环境支撑力和生态弹性力承载指数整体呈波动上升的趋势。

(2)从空间关联格局及演变特征来看,2006—2015年长江中游城市群城市生态承载力表现出显著的空间关联性与异质性,空间关联类型以HH类型和LL类型等正相关类型为主。HH类型区多为资源环境支撑力指数和生态弹性力指数较高的城市,研究时段内由环鄱阳湖城市群地区和环洞庭湖地区向赣西南地区和鄂中地区扩展,在环洞庭湖地区和环鄱阳湖城市群两大区域形成高值集聚区。LL类型区多为社会经济协调力指数和资源环境支撑力指数较低的城市,研究时段内主要集中分布于武汉城市圈和环长株潭城市群核心区域,形成两个南北遥相呼应的低值集聚区。

(3)OLS定量模拟发现,社会发展水平、城镇居民收入水平、人口密度、经济发展效率、资源供给状况和环境污染治理水平对城市生态承载力均具有显著影响;GWR模型检验结果表明,特定要素对不同地区城市生态承载力的影响存在显著的空间异质性。社会发展水平、经济发展效率、资源供给状况和环境污染治理水平与城市生态承载力呈正相关,而城镇居民收入水平、人口密度与城市生态承载力呈负相关,各区域内影响强度具有一定差异性和敏感性。环鄱阳湖城市群地区和洞庭湖地区城市生态承载力的主导影响因素为社会发展水平、城镇居民收入水平、经济发展效率和环境污染治理水平;襄荆宜城市带受人口密度、资源供给状况和环境污染治理水平等因素影响最为显著;省会城市及省会周边地区受经济发展效率因素影响最为显著,但作用方向相反;三大城市群核心区域则受自然资源状况因素影响较深。此外,值得关注的是,城镇居民收入水平、资源供给状况和环境污染治理水平对经济欠发达区域城市生态承载力的敏感性明显增强。

5.2 讨论

(1)城市生态系统是一个开放的、综合的和具有耗散结构的“社会-经济-自然”复合生态系统,本文选用状态空间法基于对地观测数据和社会经济统计数据等多元数据从宏观尺度上构建了多维度、多指标的城市生态承载力综合评价指标体系,弥补了中微观尺度研究中评价指标缺乏全面性的弊端。此外,城市生态系统在运行发展的过程中始终处于动态正负反馈的状态,系统内部以及系统与外界都不断地进行着物质流动、能量流动、信息流动和人口流动,但本文在对城市生态承载力核算过程中忽视了系统中各要素间的相互作用和空间单元间的要素流动,同时也忽略了城市生态系统结构、过程及其功能对城市生态承载力的传导作用,这是本研究存在的不足。

(2)本文从社会发展、城镇居民收入、人口、经济、资源、环境和环保观念等视角对城市生态承载力影响因素要素进行选取,并详细分析了特定要素对不同地区影响的空间异质性特征,但因指标量化及数据获取难度较大,故尚未关注政策等因素对城市生态承载力的影响,因此影响因素指标体系还有待完善;另外,居民生态环保观念变量的定量衡量由于主观性较强,还需要通过调查问卷等方式获取详细数据,才能更准确的从居民生态环保观念的视角剖析该因素对地区城市生态承载力的影响,这是在今后的研究中需要关注的方面。

参考文献 (References):

- [1] 周侃, 樊杰. 中国欠发达地区资源环境承载力特征与影响因素——以宁夏西海固地区和云南怒江州为例. 地理研究, 2015, 34(1): 39-52.
- [2] 熊建新, 彭保发, 陈端吕, 王亚力, 张猛. 洞庭湖区生态承载力时空演化特征. 地理研究, 2013, 32(11): 2031-2040.
- [3] Wackernagel M, Galli A. An overview on ecological footprint and sustainable development: A chat with Mathis Wackernagel. *International Journal of Ecodynamics*, 2007, 2(1): 1-9.
- [4] Rudolph A, Figge L. Determinants of ecological footprints: What is the role of globalization? *Ecological Indicators*, 2017, 81: 348-361.
- [5] 张引, 杨庆媛, 闵婕. 重庆市新型城镇化质量与生态环境承载力耦合分析. 地理学报, 2016, 71(5): 817-828.
- [6] 李小云, 杨宇, 刘毅. 中国人地关系演进及其资源环境基础研究进展. 地理学报, 2016, 71(12): 2067-2088.
- [7] O'Neill D W, Tyedmers P H, Beazley K F. Human appropriation of net primary production (HANPP) in Nova Scotia, Canada. *Regional Environmental Chang*, 2007, 7(1): 1-14.
- [8] Sjafrie N D M, Adrianto L, Damar A, Boer M. Human appropriation of net primary production (HANPP) in seagrass ecosystem: an example from the east coast of Bintan Regency, Kepulauan Riau Province, Indonesia. *Environment, Development and Sustainability*, 2018, 20(2): 865-881.

- [9] 王恒博,姚顺波,郭亚军,赵敏娟. 基于生态足迹-服务价值法的生态承载力时空演化. 长江流域资源与环境, 2018, 27(10): 2316-2327.
- [10] 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.
- [11] Jiao W J, Min Q W, Cheng S K, Zhang D, Sun Y H. The emergy-based ecological footprint (EEF) of traditional agricultural areas in China: A case study of Congjiang County, Guizhou Province. *Journal of Resources and Ecology*, 2011, 2(1): 56-65.
- [12] 熊建新,陈端吕,谢雪梅. 基于状态空间法的洞庭湖区生态承载力综合评价研究. 经济地理, 2012, 32(11): 138-142.
- [13] 纪学朋,白永平,杜海波,王军邦,周亮. 甘肃省生态承载力空间定量评价及耦合协调性. 生态学报, 2017, 37(17): 5861-5870.
- [14] Lein j k. Mapping environmental carrying capacity using an artificial neural network: A first experiment. *Land Degradation&Development*, 2010, 6(1): 17-28.
- [15] He R W, Liu S Q, Liu Y W. Application of SD model in analyzing the cultivated land carrying capacity: A case study in Bijie Prefecture, Guizhou Province, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 1985-1991.
- [16] Mondino E B, Fabrizio E, Chiabrando R. A GIS tool for the land carrying capacity of large solar plants. *Energy Procedia*, 2014, 48: 1576-1585.
- [17] Ge L Q, Li S M, Xie G D, Cheng Y P, Ni Z S. The population carrying capacity of waters ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2016, 7(1): 21-27.
- [18] 金悦,陆兆华,檀菲菲,张萌,张红玉. 典型资源型城市生态承载力评价——以唐山市为例. 生态学报, 2015, 35(14): 4852-4859.
- [19] 王维,张涛,王晓伟,文春生. 长江经济带城市生态承载力时空格局研究. 长江流域资源与环境, 2017, 26(12): 1963-1971.
- [20] 荣月静,郭新亚,杜世勋,李霞,宁婷,张梦莹. 基于生态系统服务功能及生态敏感性与 PSR 模型的生态承载力空间分析. 水土保持研究, 2019, 26(1): 323-329.
- [21] 王雅敬,谢炳庚,李晓青,赵卫权,王金艳,罗海波. 喀斯特地区耕地生态承载力供需平衡. 生态学报, 2017, 37(21): 7030-7038.
- [22] 潘洪义,朱晚秋,崔绿叶,冯茂秋,朱芳. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异. 生态学报, 2017, 37(19): 6335-6345.
- [23] 殷培杰,杜世勇,白志鹏. 2008 年山东省 17 城市生态承载力分析. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2048-2057.
- [24] 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.
- [25] Yue D X, Ma J H, Guo J J, Zhang J J, Du J, Song Y J, Hui C. RS&GIS-based spatialtemporal analysis of ecological footprint and biocapacity pattern of Jinghe River watershed in China: does supply meet demand? *Advanced Materials Research*, 2012, 2820-2832.
- [26] McBain B, Lenzen M, Wackernagel M, Albrecht G. How long can global ecological overshoot last? *Global and Planetary Change*, 2017, 155: 13-19.
- [27] 向秀容,潘韬,吴绍洪,刘卫东,马丽,王晓峰,尹云鹤,李静. 基于生态足迹的天山北坡经济带生态承载力评价与预测. 地理研究, 2016, 35(5): 875-884.
- [28] 李焕,黄贤金,金雨泽,张鑫. 长江经济带水资源人口承载力研究. 经济地理, 2017, 37(1): 181-186.
- [29] 熊建新,陈端吕,彭保发,游雪姣. 洞庭湖区生态承载力时空动态模拟. 经济地理, 2016, 36(4): 164-172.
- [30] 胡秉民,王兆骞,吴建军,李伟光. 农业生态系统结构指标体系及其量化方法研究. 应用生态学报, 1992, 3(2): 144-148.
- [31] 沈威,杜巧艳,李永贺,赵威,鲁丰先,周雨石,申智锋. 长江经济带新型城镇化时空格局演变及影响因素研究. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2017, 51(4): 534-541.
- [32] 毛汉英,余丹林. 环渤海地区区域承载力研究. 地理学报, 2001, 56(3): 363-371.
- [33] 王承云,孙飞翔. 长三角城市创新空间的集聚与溢出效应. 地理研究, 2017, 36(6): 1042-1052.
- [34] 胡廷兰,何孟常,杨志峰. 城市生态支持系统瓶颈分析方法及应用研究. 生态学报, 2004, 24(7): 1493-1499.
- [35] Yang Z F, Su M R, Zhang B, Zhang Y, Hu T L. Limiting factor analysis and regulation for urban ecosystems—A case study of Ningbo, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(9): 2701-2709.
- [36] 杨宇,刘毅,金凤君,董雯,李莉. 塔里木河流域绿洲城镇发展与水土资源效益分析. 地理学报, 2012, 67(2): 157-168.
- [37] Brunson C, Fotheringham A S, Charlton M. Some notes on parametric significance tests for geographically weighted regression. *Journal of Regional Science*, 1999, 39(3): 497-524.