

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2021.02.013

# 传统工业型城市综合生态承载力评价 ——以株洲市为例

陈紫君, 倪筱珈, 赵先超

(湖南工业大学 城市与环境学院, 湖南 株洲 412007)

**摘 要:** 从城市生态系统支撑力、社会经济协调力、人类活动压力 3 个方面构建了城市综合生态承载力评价指标体系, 并运用组合赋权法和状态空间法相结合的手段, 以株洲市为基本评估单元, 对该市 2007—2018 年城市综合生态承载力进行评估, 探究了影响区域综合生态承载力的关键因素。结果表明: 株洲市综合生态承载力总体呈现小幅度波动上升的发展态势, 2007—2010 年株洲市综合生态承载力处于超载状态, 2011 年基本处于平衡状态, 2012 年后处于可载状态; 经济增长和人口压力的贡献度波动下降, 资源消耗和环境污染波动上升, 地物覆被、资源供给先上升后下降, 环境治理、生活质量、技术进步及经济发展整体呈上升趋势, 2011 年后环境治理对城市综合生态承载力的贡献居主导地位, 人口压力和经济增长对城市生态系统的压力大于资源消耗和环境污染; 环境治理、技术进步、经济发展、环境污染、资源消耗将成为制约株洲市综合生态承载力的关键因素。

**关键词:** 城市综合生态承载力; 传统工业型城市; 状态空间法; 株洲市

**中图分类号:** X821

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2021)02-0088-11

**引文格式:** 陈紫君, 倪筱珈, 赵先超. 传统工业型城市综合生态承载力评价: 以株洲市为例 [J]. 湖南工业大学学报, 2021, 35(2): 88-98.

## Assessment of Comprehensive Ecological Carrying Capacity of Traditional Industrial Cities: a Case Study of Zhuzhou City

CHEN Zijun, NI Xiaojia, ZHAO Xianchao

(College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** An evaluation index system of urban comprehensive ecological carrying capacity has been constructed from such three aspects as urban ecosystem supporting capacity, social and economic coordination capacity and human activity pressure; by adopting the combination weighting method and state space method, and with Zhuzhou City as the basic evaluation unit to evaluate the urban comprehensive ecological carrying capacity from 2007 to 2018, an inquiry has been made into the key factors affecting the regional comprehensive ecological carrying capacity. The results show that the overall comprehensive ecological carrying capacity of Zhuzhou City shows a slight fluctuation rising trend;

收稿日期: 2020-09-09

基金项目: 国家统计局科学研究基金资助重点项目 (2019LZ27); 湖南工业大学研究生创新基金资助项目 (CX2030)

作者简介: 陈紫君 (1995-), 女, 江西上饶人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为城乡发展与区域规划,

E-mail: 358329265@qq.com

通信作者: 赵先超 (1983-), 男, 山东郓城人, 湖南工业大学教授, 博士, 主要从事生态文明建设与低碳发展模拟, 乡村振兴与乡村规划等方面的教学和研究, E-mail: zhaoxianchao@hut.edu.cn

from 2007 to 2010, the comprehensive ecological carrying capacity of Zhuzhou City is in an overloaded state, basically in a balanced state in 2011, while in a loadable state after 2012. The contribution of economic growth and population pressure fluctuated, resource consumption and environmental pollution fluctuated, land cover and resource supply experience an initial increase and a subsequent decrease, meanwhile the environmental governance, quality of life, technological progress and economic development show an overall upward trend. After 2011, the contribution of environmental governance to urban comprehensive ecological carrying capacity keeps dominant, with the pressure of population and economic growth on urban ecosystem greater than resource consumption and environmental pollution. Environmental governance, technological progress, economic development, environmental pollution and resource consumption will become the key factors to be restricting the comprehensive ecological carrying capacity of Zhuzhou City.

**Keywords:** urban comprehensive ecological carrying capacity; traditional industrial city; state-space method; Zhuzhou City

## 1 研究背景

面对快速工业化和城镇化时期的高额资源、环境成本,以及日益趋紧的社会经济发展约束条件,可持续发展理念逐渐发展为全球共识<sup>[1]</sup>。其理论基础为一定时期内,区域生态系统所能承载的环境压力、资源需求是有限的,人类想要实现可持续发展,就必须将社会经济等人类活动控制在该区域生态系统的承载范围内<sup>[2-4]</sup>。因此,通过对区域生态系统与人类活动承载状况的深入研究,定量分析区域生态承载力水平,为区域可持续发展提供有效的参考。

1921年,R. E. Park等<sup>[5]</sup>在生态环境领域引入了承载力(carrying capacity)概念,形成了生态承载力理论雏形。随着生态环境与社会经济发展之间的矛盾日趋尖锐,基于土地、人口、植被、资源环境、自然体系平衡等<sup>[6]</sup>不同角度的承载力研究被提上议程。生态承载力区别于以往单一的承载力,它既考虑社会经济与资源环境的平衡性,又关注生态系统自身运行的可持续性和稳定性,重点关注人类社会经济活动压力对生态系统的压力,人类社会经济发展的动态性、复杂性、多样性决定了生态承载力的空间异质性和不稳定性<sup>[7]</sup>。

目前,国内外学者在生态承载力的理论体系、评估方法及应用领域等方面进行了诸多有益探索。理论体系上以生态系统抗干扰能力<sup>[8]</sup>、生态系统最大承载能力<sup>[9]</sup>、可供养种群数量<sup>[10]</sup>、经济社会可持续发展能力<sup>[11]</sup>4个表征方式为主,但尚未形成科学统一的概念内涵。研究内容上,早期重点关注生态领域单因素承载力大小的测算和生态系统的内涵、结构及功能的研究,如环境承载力测算、资源承载力测算、

海洋生态承载力测算等;后期逐渐将承载力概念从生态领域向社会经济领域延伸,如对城市公共设施承载力的测算<sup>[6]</sup>,但缺少对综合生态承载力(comprehensive ecological carrying capacity)的评估和分析。指标体系构建上形成了两类主流,第一类从承载力属性出发,将指标体系分为支持力-压力体系<sup>[12]</sup>或生态弹性力-压力-承载力体系<sup>[13]</sup>,第二类基于区域生态承载力构成机制,将指标体系分为资源承载力-环境承载力-人口承载力-社会经济承载力体系<sup>[14]</sup>,或引入“压力-状态-响应”(pressure-state-response, PSR)模型,先对人口、资源、环境、社会、经济等指标,按性质分为压力指标、状态指标、响应指标,然后细化指标体系<sup>[4]</sup>。研究方法上主要分为静态现状评估方法和动态仿真预测方法两大类。生态足迹法<sup>[15-17]</sup>、人类净初级生产力占用法<sup>[18-19]</sup>、碳氧平衡法<sup>[20-21]</sup>、状态空间法<sup>[22-23]</sup>、综合评价法<sup>[24-25]</sup>,及其他数理模型<sup>[26-27]</sup>被广泛地应用于静态现状评价中;而动态仿真预测方法则以系统动力学为主,通过构建系统动力学仿真模型对承载力未来发展状况进行预测。研究区域主要集中在流域<sup>[9-28]</sup>、海岸带区域<sup>[29-30]</sup>、生态敏感性区域<sup>[31]</sup>、资源型城市<sup>[32]</sup>及区域核心城市<sup>[33]</sup>等典型空间。除此之外,随着承载力理论的深化和外延,部分学者基于区域生态承载力评价,提出了功能区划方案,指导产业结构优化、加强生态安全等方面的研究也是生态承载力研究的实践应用。上述研究多侧重相关领域单因素承载力大小的静态描述,在城市综合生态承载力评估及其水平方面略显不足,更鲜有学者结合城市转型发展需求对城市综合生态承载力进行深入研究,而如何将城市综合生态承载力为表征方式的生态文明建设理念渗透到城市转型发展过程中,

是亟待解决的问题。

传统工业型城市是指建国初期国家布局建设、以重工业企业为依托的城市,是典型的“资源-环境-社会-经济”复合生态系统,其可持续发展不仅需要关注城市社会经济发展与生态资源环境的协调性和稳定性,还要考虑生态系统自身调节对恢复受损生态系统的能力及社会经济发展对受损生态系统的改善和治理能力。状态空间法能定量描述复合生态系统的系统状态,更能反映系统内不同变量的相互关系,克服了生态承载力评价的主观随意性。因此,本文尝试从传统工业型城市可持续发展的现实角度,提出传统工业型城市综合生态承载力概念,即在一定时间内,特定区域的资源供给、环境循环、社会经济发展、环境治理、技术进步、居民观念转变等多方面耦合而成的支撑区域生态系统良性运作的的能力。以株洲市为案例城市,构建了传统工业型城市综合承载力评价指标体系,并运用组合赋权法和状态空间法相结合的手段,对株洲市 2007—2018 年综合生态承载力状况进行评估,分析了制约株洲市可持续发展的关键因素,为探讨传统工业型城市产业转型升级和创建低碳城市试点工作等方面提供思路和对策建议。

## 2 区域概况与数据来源

### 2.1 区域概况

株洲市位于湖南省东部偏北位置,长株潭城市群核心城市之一。东起罗霄山脉西麓,与江西省西北部城市接壤,南至南岭山脉,与衡阳市、郴州市相连,西邻湘潭市,北与湖南省省会长沙市相邻,全市土地总面积约 11 247.55 km<sup>2</sup>。株洲市是“一五”计划时期长江以南唯一新建的工业城市,先后建立了数百家冶炼、化工厂,“五矿株冶”“中盐株化”等大型央企也在此扎根,为新中国经济发展提供了稳健保障。然而,长期以破坏生态环境为代价的经济模式逐渐面临发展的瓶颈,曾经连续两年被列入“全国十大污染城市”<sup>[34]</sup>。自 2007 年“资源节约型和环境友好型”(“两型”)社会建设起,株洲市采取了“一般改造、落后淘汰、生态优先、绿色转型”等系列行动,以去除污染产能<sup>[34]</sup>,又通过强化拓展自身“火车-飞机-汽车”三大动力优势,增强内生动力,保障新旧产能有效转续。2018 年株洲市 GDP 达到 2 631.54 亿元,其中第三产业比例为 49.20%,经济向后工业时期“三二一”结构转变,全社会研究与试验发展经费支出占 GDP 比例排全省第一,2013—2018 年单位 GDP 能耗累计下降达 27.19%,2018 年全市各地区工

业二氧化硫去除率达 96.10%,市区环境空气质量优良率较 2017 年提高了 5.70 个百分点,地表水水质达标率达到 100%,森林覆盖率达 61.95%。

### 2.2 数据来源

本研究所涉及的人口数据、社会数据及经济数据主要来自于《株洲市统计年鉴》(2007—2019)、《株洲市国民经济和社会发展统计公报》(2007—2018);工业污染物排放及处理利用情况数据主要来自于《株洲市环境统计年鉴》(2007—2018);水资源消耗总量和水资源总量数据来自于《株洲市水资源公报》(2007—2018);耕地面积数据来自于株洲市土地利用变更调查数据(2007—2018)。

## 3 研究方法

### 3.1 指标筛选与构建

为确保指标体系能准确、科学地反映区域生态系统状态和区域实际情况,指标筛选时应遵循科学性、典型性、综合性以及可得性等原则。在大量理论研究的基础上,通过专家咨询和实地调研,结合传统工业型城市综合生态承载力的概念内涵和株洲市的实际情况,本文对株洲市综合生态承载力的评估设计了 4 层 28 个具体指标,具体如表 1 所示。

由表 1 可知,本研究以城市综合生态承载力为目标层,城市生态系统支撑力、人类活动压力、社会经济协调力为准则层。

1) 城市生态系统支撑力。城市生态系统支撑力主要反映生态系统状态和人类通过治理环境来减轻城市生态系统压力的支撑能力指标,包括地物覆被指标、资源供给指标、环境治理指标 3 个维度。城市生态系统支撑力为度量自然生态系统和人工生态系统耦合而成的复合生态系统承受人类经济活动压力的阈值而设定。

2) 人类活动压力。人类活动压力是主要反映社会经济发展和人类繁衍后代过程中对生态系统产生威胁的压力指标,包括人口压力指标、经济增长指标、环境污染指标、资源消耗指标 4 个维度。人类活动压力设定的意义在于度量人类为实现社会经济目的而采取的行动对生态系统产生的种种影响和压力。

3) 社会经济协调力。社会经济协调力主要反映科技进步、居民生活水平提高、产业转型对提高城市综合生态承载力的协调力指标,包括技术进步指标、生活质量指标、经济发展指标 3 个维度。社会经济协调力为度量社会观念转变和人类发挥主观能动性提高城市综合生态承载力的潜力而设定。



表 1 株洲市综合生态承载力评价指标体系

Table 1 Assessment index system of comprehensive ecological carrying capacity in Zhuzhou city

目标层	准则层	因素层	指标层	单位	属性	权重
城市综合生态承载力	A 城市生态系统支撑力	地物覆被	A <sub>1</sub> 林业用地面积	hm <sup>2</sup>	正	0.036 57
			A <sub>2</sub> 森林覆盖率	%	正	0.036 63
		资源供给	A <sub>3</sub> 人均耕地面积	m <sup>2</sup>	正	0.036 26
			A <sub>4</sub> 人均水资源占有量	m <sup>3</sup>	正	0.035 62
		环境治理	A <sub>5</sub> 城镇生活污水处理率	%	正	0.036 83
			A <sub>6</sub> 工业固体废弃物综合利用率	%	正	0.032 91
			A <sub>7</sub> 工业二氧化硫去除率	%	正	0.034 72
			A <sub>8</sub> 工业烟尘去除率	%	正	0.038 79
			A <sub>9</sub> 工业废水化学需氧量去除率	%	正	0.035 68
		人口压力	B <sub>1</sub> 人口密度	人 /km <sup>2</sup>	负	0.038 08
			B <sub>2</sub> 人口自然增长率	‰	负	0.032 49
			B <sub>3</sub> 城市化率	%	正	0.035 66
	B 人类活动压力	经济增长	B <sub>4</sub> GDP 年均增长率	%	负	0.036 49
			B <sub>5</sub> 第三产业 GDP 年均增长率	%	正	0.034 24
		资源消耗	B <sub>6</sub> 万元 GDP 水资源消耗量	m <sup>3</sup>	负	0.035 21
			B <sub>7</sub> 万元 GDP 电耗	kW·h	负	0.036 27
			B <sub>8</sub> 万元 GDP 能耗	t 标准煤当量	负	0.036 77
		环境污染	B <sub>9</sub> 万元 GDP 工业固体废物产生量	t	负	0.034 69
			B <sub>10</sub> 万元 GDP 工业废气排放量	t	负	0.036 70
			B <sub>11</sub> 万元 GDP 工业废水排放量	t	负	0.034 74
		技术进步	C <sub>1</sub> R&D 经费占 GDP 的比重	%	正	0.033 71
			C <sub>2</sub> 高新技术产业总产值	万元	正	0.036 76
	C 社会经济协调力	生活质量	C <sub>3</sub> 城镇居民人均可支配收入	元	正	0.036 17
			C <sub>4</sub> 农村居民人均可支配收入	元	正	0.036 35
			C <sub>5</sub> 城镇民恩格尔系数	%	负	0.034 71
		经济发展	C <sub>6</sub> 农村居民恩格尔系数	%	负	0.035 16
			C <sub>7</sub> 人均 GDP	元	正	0.036 78
			C <sub>8</sub> 第三产业占 GDP 比重	%	正	0.034 98

3.2 城市综合生态承载力评价方法

3.2.1 数据预处理

指标体系中各变量在测度量纲、量级及数据特征上存在较大差异,本研究采用极差标准化法对各变量原始数据进行处理。根据指标属性,将指标分为正向指标和负向指标。

正向指标(效益型指标):

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_i}{\max X_i - \min X_i}, \quad (1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m)。$$
 (1)

负向指标(成本型指标):

$$Y_{ij} = \frac{\max X_i - X_{ij}}{\max X_i - \min X_i}, \quad (1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m)。$$
 (2)

式中:  $X_{ij}$  为第  $i$  项指标第  $j$  年的实际值;  
 $Y_{ij}$  为第  $i$  项指标第  $j$  年的标准化值;  
 $\max X_i$  和  $\min X_i$  分别为第  $i$  项指标的最大值和最

小值,且  $0 \leq Y_{ij} \leq 1$ 。

无论是效益型指标还是成本型指标,经过数据标准化处理后的值,其值越大越好。

3.2.2 指标权重的确定

由于各指标在整体评估城市综合生态承载力中的相对重要水平不同,故评估前需要确定各项指标在整个指标体系中的权重。为剔除主观因素的影响,本研究采用均方差决策法与熵值法组合赋权的方法。

1) 熵值法常用于测度评价对象某项指标的变异程度。熵值法赋权已经相对成熟,在此不对其计算过程进行详细解释。

2) 均方差决策法是一项突出局部差异的客观赋权法,具体方法如下:

①求均值。其计算式为

$$G(Y_{ij}) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{ij}。$$
 (3)

式中  $G(Y_{ij})$  为第  $i$  项指标在  $j$  年内的均值。

②求指标集的均方差值。其计算式为

$$\sigma(Y_i) = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [Y_{ij} - G(Y_{ij})]^2} \quad (4)$$

式中  $\sigma(Y_i)$  为第  $i$  项指标的均方差值。

③求各指标权重。其计算式为

$$c_i = \frac{\sigma(Y_i)}{\sum_{i=1}^n \sigma(Y_i)} \quad (5)$$

式中  $c_i$  为运用均方差决策法求得的第  $i$  项指标的权重。

通过对上述两种方法求得的权重取平均值后,可以得到评价对象第  $i$  项指标的最终权重  $w_i$ , 具体见表1最后一列。

$$w_i = \frac{c_i + b_i}{2} \quad (6)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  项指标的最终权重;

$b_i$  为运用熵值法求得的第  $i$  项指标权重。

### 3.2.3 城市综合生态承载力评价

#### 1) 状态空间法

状态空间法由系统内各要素状态向量的多维状态空间轴组成,在欧氏几何空间中常被用于定量描述系统状态<sup>[22]</sup>。人类活动压力轴、城市生态系统支撑力轴以及社会经济协调力轴共同组成本研究的三维状态空间。在该状态空间中,各个轴的具体数值组合形成一个空间状态点,代表一段时间内综合生态承载力测度要素的特定空间组合。当人类社会经济活动强度与城市复合生态系统支撑处于平衡状态时,状态点在空间上形成一个综合生态承载力均衡曲面,而任何低于该曲面的状态点表示在某一特定社会经济、资源环境的组合下,该区域处于可载状态,反之则处于超载状态。

通过分析三维空间内任一状态点与综合生态承载力均衡曲面的相对位置关系,判断区域综合生态承载力状况,由此区域综合生态承载力的大小可由原点与空间状态点之间的距离即有向矢量的模表示<sup>[22, 29]</sup>,公式如下:

$$V_{cecc} = |\mathbf{M}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2} \quad (7)$$

式中:  $V_{cecc}$  为区域综合生态承载力现实值;

$|\mathbf{M}|$  为原点到状态空间结束点的有向矢量的模;

$C_i$  为第  $i$  项指标的标准化值;

$n$  为指标数量。

由于各维度因子对区域综合生态承载力的贡献存在差异,需引入指标最终权重  $w_i$  加以修正,公式如下:

$$V_{cecc} = |\mathbf{M}| = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i C_i^2} \quad (8)$$

#### 2) 理想参比值的确定

在状态空间法中,利用区域综合生态承载力实际值与理想值的偏差,作为区域综合生态承载力定性与定量描述的基础,因此各指标理想参比值的确定较为关键。指标理想参比值确定的方法有问卷调查法、参考相似研究区确定法、大小值法和平均值法等方法。平均值法具有反映区域资源利用、环境治理保护和社会经济发展等方面多年平均状况的优点,且本研究同一指标年际发展相对稳定,不同指标间存在一定的相互作用关系,因此,选取2006—2017年各指标的平均值作为其理想参比值。

$$V'_{cecc} = |\mathbf{M}'| = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i \bar{C}_i^2} \quad (9)$$

式中:  $V'_{cecc}$  为区域综合生态承载力理想参比值;

$|\mathbf{M}'|$  为原点到状态空间中均衡曲面的有向矢量的模;

$\bar{C}_i$  为第  $i$  项指标2006—2017年的平均值。

根据状态空间模型,可将区域综合生态承载力分为3个等级:满载、超载、可载。具体评判公式如下<sup>[29]</sup>:

$V_{cecc} > V'_{cecc}$ , 区域生态承载力处于可载状态;

$V_{cecc} = V'_{cecc}$ , 区域生态承载力处于满载状态;

$V_{cecc} < V'_{cecc}$ , 区域生态承载力处于超载状态。

#### 3.2.4 贡献度计算

引入“贡献度”概念,用于进一步分析引起区域综合生态承载力变化的主要原因。本研究“贡献度”是指因素层指标生态承载力占区域综合生态承载力的比例,由此,可通过因素层指标贡献度大小来判断某一因素层指标对区域综合生态承载力的促进或抑制作用。贡献度计算的数学表达式如下:

$$V_{cecc}^* = \sqrt{\sum_{i=1}^K w_i C_i^2} \quad (10)$$

$$\gamma = \left( \frac{V_{cecc}^*}{V_{cecc}} \right)^2 \times 100\% \quad (11)$$

式中:  $V_{cecc}^*$  为因素层生态承载力;

$K$  为因素层指标个数;

$\gamma$  为贡献度。

## 4 结果与分析

### 4.1 城市综合生态承载力评价

本文以传统工业型城市株洲市为研究单元进行评估,分析2007—2018年间株洲市综合生态承载力

变化趋势, 结果如图1所示。

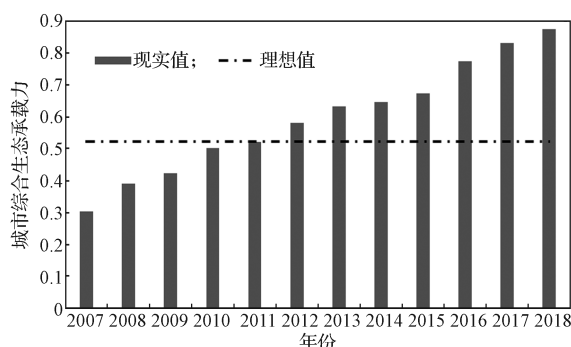


图1 2007—2018年株洲市综合生态承载力变化

Fig. 1 Changes of comprehensive ecological carrying capacity in Zhuzhou from 2007 to 2018

从图1可以看出, 株洲市综合生态承载力整体呈小幅度波动上升趋势, 12年间平均增幅为15.08%, 根据株洲市综合生态承载力年均增长速率变化的特点, 大致可将其分为3个阶段。其中, 第一阶段为2007—2011年, 城市综合生态承载力年均增长速率为14.38%, 该阶段又可分为两个时期, 2007—2010年为前期, 城市综合生态承载力呈快速上升趋势, 涨幅最大, 同比增长65.72%, 年均增幅达16.43%; 2010—2011年为后期, 该时期增长速度有所减慢。第二阶段为2011—2015年, 年均增长速率为5.85%, 城市综合生态承载力重新呈现前期(2011—2013年)快速上升, 后期(2013—2015)缓慢上升的发展趋势, 分别与第一阶段两个时期相比, 该阶段前期年均增长速率下降了9.37%, 后期下降了1.52%, 前期下降幅度较为显著。第三阶段为2015—2018年, 城市综合生态承载力没有出现不稳定波动, 近似线性增长, 年均增长速率为7.39%。

根据生态承载力水平评判原则, 可以得出, 2007—2010年株洲市综合生态承载力现实值小于理想参比值, 处于超载状态; 2011年现实值无限接近理想参比值, 基本处于平衡状态; 2012年后城市综合生态承载力现实值大于理想参比值, 处于可载状态。

#### 4.2 因素层指标贡献度分析

通过计算因素层10个指标因子对株洲市综合生态承载力的贡献度, 分别探讨其对城市综合生态承载力的影响差异。

##### 4.2.1 城市生态系统支撑力

城市生态系统支撑力由地物覆被、资源供给、环境治理3个指标因子构成, 其贡献度如图2所示。由图2可以看出, 资源供给的贡献度呈波动下降趋势, 即从2007年的17.84%下降到2018年的0.03%, 其中以人均水资源占有量的减少最为显著, 地物覆被的

贡献度呈先上升后下降的变化趋势, 说明株洲市作为一座因工业发展而崛起的城市, 其可利用的林业产业、土地资源和水资源拥有重要作用, 必须合理开发并切实开展各类污染防治工作。2007—2009年地物覆被和资源供给的贡献度均高于环境治理的贡献度, 这主要是该阶段株洲市处于工业化和城市化相互推进的加速时期, 2009年以前株洲市的发展对自然资源的依赖较大, 随着可利用资源的减少和环境破坏问题的加剧, 其经济发展逐渐转向以科技创新支撑。另一方面, 12a间环境治理的贡献度呈现出先上升后下降又上升并趋于稳定的发展态势。2011年最高, 为31.39%, 2014年降为21.21%, 2016年又上升到24.15%, 且2011年后环境治理的贡献度高于地物覆被和资源供给的贡献度, 这说明2007年后株洲市以“两型”社会建设为契机, 发展清洁低碳技术, 2010年以前环境治理取得了一定成效, 但并没有遏制资源消耗和污染物排放继续破坏生态系统平衡的趋势。随着“两型”社会建设不断深化, 2011年环境治理取得突破性进展。2013年以后株洲市积极响应“湘江流域污染治理”的号召, 实施绿色转型发展模式, 新兴产业迅速发展, 社会经济稳健发展, 环境治理对于城市综合承载力的贡献逐渐下降。自2014年后, 株洲市大力推动清水塘老工业区搬迁改造工作, 区内企业、工厂陆续关停转型, 引进多项新技术、新工艺, 从源头上处理各类工业污染物, 2015年后环境治理的贡献度小幅上涨。

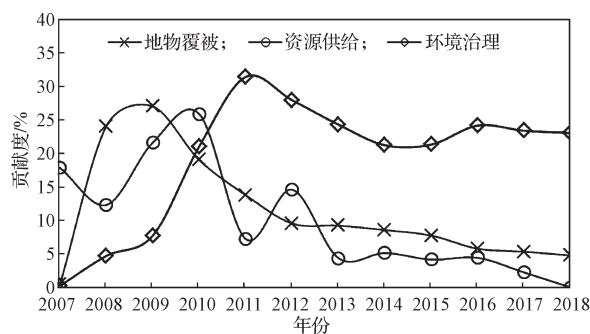


图2 2007—2018年城市生态系统支撑力中因素层指标因子的贡献度变化

Fig. 2 Change of contribution degree of index factors in factor layer of urban ecosystem support from 2007 to 2018

##### 4.2.2 人类活动压力

人类活动压力由资源消耗、人口压力、环境污染和经济增长4个指标因子构成, 其贡献度如图3所示。由图可知, 2007—2010年人口压力和经济增长的贡献度高于资源消耗和环境污染的, 说明2010年之前株洲市发展压力主要来自工业“三废”排放和资源消



耗。2011年以后资源消耗和环境污染的贡献度高于人口压力和经济增长的,说明株洲市通过就地技术改造、推广循环经济、污染物排放和资源消耗对城市生态系统的压力逐渐减弱。同时再次印证了控制各类工业污染物的排放、提高资源的综合利用率是推动株洲市生态环境可持续发展的重要因素。随着对科技创新的投入不断加大,经济结构持续优化,第三产业比例大幅提升,居民生活质量日益提高,后期资源消耗和环境污染对城市综合生态承载力的贡献度逐渐下降。2007—2017年人口压力的贡献度持续下降,而2018年又上升到8.91%,主要是2018年株洲市人口自然增长率下降至3.75%,较2017年下降了3.25个百分点,二胎生育势能集中释放后的影响、生育旺盛期女性大幅下降等都是造成自然增长率大幅下降的原因<sup>[35]</sup>。12a间经济增长的贡献度总体呈波动下降趋势,2010年下降到3.79%,2010—2016年上涨了4.61个百分点,2018年又下降到4.07%,主要是“十五规划”期间,株洲市重点发展第二产业,经济实现了较快发展。面对粗放式经济发展带来的沉疴,株洲市加快淘汰落后产能,实施绿色发展模式,经济实现高质量发展,2010年后经济增长的贡献率有所上升,而随着产业结构持续优化,第三产业增长速度放慢,三次产业趋向协调发展,社会建设日益完善,其对城市综合生态承载力的贡献度逐渐下降。

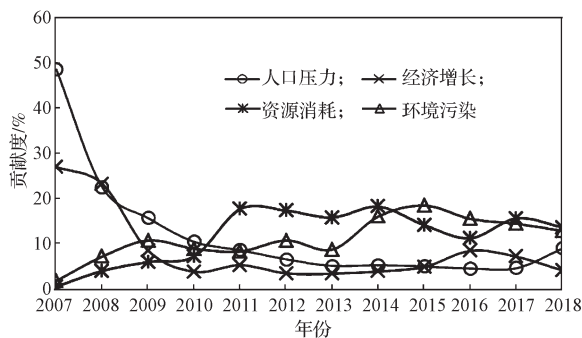


图3 2007—2018年人类活动压力中  
因素层指标因子的贡献度变化

Fig. 3 Change of contribution degree of index factors in factor level of human activity stress from 2007 to 2018

#### 4.2.3 社会经济协调力

社会经济协调力由技术进步、生活质量和经济发展3个指标因子构成,其贡献度如图4所示。由图可知,2007—2011年,社会经济协调力层指标因子的贡献率水平整体偏低,均小于3%,且三者之间的差距较小,说明“十五”规划期间整体科技支撑条件相对薄弱,居民生活水平和第三产业比例有待提高。十八大以后,株洲市通过全力淘汰落后产能,加大研

发经费投入强度和培育先进产业动能,经济逐渐向后工业时期“三二一”结构靠近,技术进步和经济发展的贡献度持续上升,为城市综合生态承载力的提升奠定了坚实基础。2011年以后,生活质量的贡献度大于技术进步和经济发展的贡献度,除2013年出现大幅上升外,总体呈平稳上升趋势,这说明随着综合实力的不断提升,城乡居民可支配收入大幅提高,消费转型升级步伐加快,服务消费所占比例不断扩大,生活质量对城市综合生态承载力的促进作用,大于技术进步和经济发展的。2013年,株洲市城镇居民和农村居民人均食品支出为3816元和1732元,分别同比下降43%,31.23%,城乡居民恩格尔系数大幅下降,生活质量的贡献度出现大幅上涨。

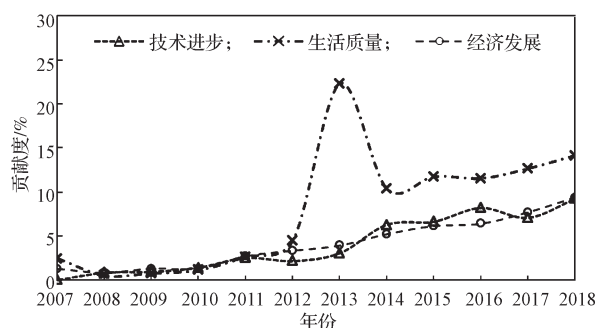


图4 2007—2018年社会经济协调力中  
因素层指标因子的贡献度变化

Fig. 4 Change of the contribution degree of index in the factor level of socio-economic coordination from 2007 to 2018

#### 4.3 城市综合生态承载力关键因子分析

为进一步探讨影响株洲市综合生态承载力水平的关键因子,首先,对准则层3个一级指标进行Spearman秩相关性分析,结果见表2。

表2 准则层主要因素相关分析结果

Table 2 Correlation results of major factors at the criterion layer

相关分析	城市生态系统 支撑力	人类活动 压力	社会经济 协调力
综合生态承载力	0.839**	0.979**	0.972**

注:\*\*表示在 $P < 0.01$ (双尾),相关性显著。

由表2可以得出,株洲市综合生态承载力与生态系统支撑力、人类活动压力和社会协调力均呈正相关,与城市生态系统支撑力的相关系数最小,这说明在3个因子中,城市生态系统支撑力层各指标的协同作用对株洲市综合生态承载力的影响最小。其次,对因素层10个二级指标进行秩相关性分析,结果见表3。

表 3 因素层主要因素相关分析结果

Table 3 Correlation analysis results of major factors at the factor layer

因 子	地物覆被	资源供给	环境治理	人口压力	经济增长	资源消耗	环境污染	技术进步	生活质量	经济发展
城市综合生态承载力	0.077	-0.315	0.965**	-0.091	0.371	0.972**	0.986**	0.993**	0.909**	1.000**
地物覆被	1	0.140	-0.035	-0.042	-0.364	-0.049	-0.119	-0.112	-0.077	-0.077
资源供给		1	-0.336	-0.469	-0.559	-0.301	-0.259	-0.266	-0.441	-0.315
环境治理			1	-0.112	0.294	0.916**	0.944**	0.958**	0.951**	0.956**
人口压力				1	0.608**	-0.161	-0.098	-0.105	-0.189	-0.091
经济增长					1	0.336	0.378	0.378	0.210	0.371
资源消耗						1	0.972**	0.951**	0.874**	0.972**
环境污染							1	0.972**	0.860**	0.986**
技术进步								1	0.902**	0.993**
生活质量									1	0.909**
经济发展										1

注: \*\* 表示  $P<0.01$  (双尾), 相关性显著; \* 表示  $P<0.05$  (双尾), 相关性显著。

从表 3 可以得出, 株洲综合生态承载力与环境治理、资源消耗、环境污染、技术进步、生活质量和经济发展呈显著正相关, 其中经济发展与综合生态承载力的秩相关系数为 1, 呈完全正相关, 说明在 10 个因子中, 经济发展对综合生态承载力的影响最大。而环境治理、资源消耗、环境污染、技术进步、生活质量和经济发展 6 个因子之间也存在正相关关系, 这可能是指标之间自相关性导致的, 需进一步分析。

在上述分析判断的基础上, 对因素层 10 个二级指标进行因子分析, 进一步提取对综合生态承载力起主导作用和协同作用的指标, 得出 KMO 等于 0.59, 大于 0.5, 巴特利特球形检验的显著性  $P$  值小于 0.001, 通过因子分析条件检验。采用主成分分析法提取潜在变量, 结果如表 4 所示, 前 3 个成分特征根  $\lambda$  分别为 6.270, 1.758, 1.055, 大于 1, 其累计贡献率高达 90.725%, 说明这 3 个成分浓缩了原始变量 90.725% 的信息。从表 5 所示旋转成分矩阵中可以看出, 环境治理、资源消耗、环境污染、技术进步、生活质量和经济发展同为第一成分, 其累计贡献率为 62.599%, 主要反映社会经济发展对城市综合生态承载力产生的压力和协调力。根据旋转成分矩阵的计算结果对变量进行排序, 由大到小依次为环境治理、环境污染、技术进步、经济发展、资源消耗、生活质量, 均大于其他变量在第二或第三成分上的载荷。由此可得, 在生态系统支撑力层面上, 环境治理对城市综合生态承载力的影响占主导地位, 社会经济协调力层各变量均与第一因子呈高度正相关, 技术进步与经济发展对城市综合生态承载力的影响最为显著, 而人类活动压力层面上, 环境污染对城市综合生态承载力的影响居主导地位, 资源消耗次之。因此, 结合城市综合生态承载力贡献度分析和相关性分析的结果, 可知环境治理、技术进步、经

济发展、环境污染、资源消耗将成为影响株洲市综合生态承载力的主要因素, 在未来的城市低碳转型、环境管理和政策制定中应予以重点关注。

表 4 因素层主要变量的因子分析结果

Table 4 Factor analysis results of major factors at the factor layer

成分	特征根	贡献率	累积贡献率 /%
1	6.260	62.599	62.599
2	1.758	17.577	80.176
3	1.055	10.549	90.725
4	0.409	4.092	94.817
5	0.313	3.131	97.949
6	0.116	1.159	99.108
7	0.067	0.667	99.774
8	0.011	0.108	99.883
9	0.009	0.093	99.976
10	0.002	0.024	100.000

表 5 因素层主要变量的旋转成分矩阵

Table 5 Matrix of rotation components of major factors at the factor layer

因 子	成 分		
	1	2	3
地物覆被	0.249	0.855	0.253
资源供给	-0.482	0.654	-0.315
环境治理	0.991	-0.001	0.046
人口压力	0.175	-0.228	0.904
经济增长	0.516	-0.663	-0.449
资源消耗	0.928	0.176	0.102
环境污染	0.966	-0.080	-0.101
技术进步	0.968	-0.188	0.082
生活质量	0.905	-0.166	0.110
经济发展	0.930	-0.293	0.154

5 结论

本文从传统工业型城市可持续发展的现实需求出发, 充分考虑人类社会经济活动对城市生态系统造



成的各种影响,构建了传统工业型城市综合生态承载力评估指标体系,以传统工业型城市——株洲市为评估单元,利用组合赋权法和状态空间法,对该市综合生态承载力进行了评价,并采用贡献度分析、相关性分析和因子分析的数据分析方法,探讨了影响传统工业型城市综合生态承载力的关键因子,为传统工业型城市综合生态承载力分析和生态文明建设提供了新思路。其主要研究结论如下:

1) 本文从城市生态系统支撑力、人类活动压力、社会经济协调力3个方面构建了传统工业型城市综合生态承载力多重评价指标体系,结合均权方差决策法和熵值法,对城市综合生态承载力进行组合赋权,有效保证了评估结果的客观性和科学性。评估结果表明,株洲市综合生态承载力整体呈小幅度波动上升的发展态势;2007—2010年株洲市综合生态承载力处于超载状态,2011年基本处于平衡状态,2012年后处于可载状态;2015年以来,城市综合生态承载力没有出现不稳定波动,保持稳定线性增长。

2) 引入“贡献度”概念,对因素层10个二级指标进行了分析,探究了不同因子对城市综合生态承载力的影响程度。结果表明,在人类活动压力层中,经济增长和人口压力波动下降,资源消耗和环境污染波动上升,2011年后人口压力和经济增长对城市生态系统的压力大于资源消耗和环境污染的;在城市生态系统支撑力和社会经济协调力层中,地物覆被、资源供给先上升后下降,环境治理、生活质量、技术进步及经济发展整体呈上升趋势,2011年后环境治理对城市综合生态承载力的贡献居主导地位。

3) 在上述分析的基础上,通过相关性分析和因子分析,得出环境治理、技术进步、经济发展、环境污染、资源消耗将成为制约城市综合生态承载力的关键因素,在今后社会经济发展和环境管理的政策制定中应给予重点关注。

#### 参考文献:

- [1] DEL MONTE-LUNA P, BROOK B W, ZETINA-REJÓN M J, et al. The Carrying Capacity of Ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, 13(6): 485-495.
- [2] 王 静, 袁昕怡, 陈 晔, 等. 面向可持续城市生态系统管理的资源环境承载力评价方法与实践应用: 以烟台市为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(10): 2371-2384.  
WANG Jing, YUAN Xinyi, CHEN Ye, et al. Evaluation Method and Application for Resources-Environment Carrying Capacity Towards Sustainable Urban Ecosystem Management: a Case Study of Yantai City[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(10): 2371-2384.
- [3] 曲修齐, 刘 森, 李春林, 等. 生态承载力评估方法研究进展[J]. *气象与环境学报*, 2019, 35(4): 113-119.  
QU Xiuqi, LIU Miao, LI Chunlin, et al. Review of the Research on Ecological Carrying Capacity Evaluation Methods[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, 35(4): 113-119.
- [4] 魏 超, 叶属峰, 过仲阳, 等. 海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用: 以南通市为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5893-5904.  
WEI Chao, YE Shufeng, GUO Zhongyang, et al. Constructing an Assessment Indices System to Analyze Integrated Regional Carrying Capacity in the Coastal Zones: a Case in Nantong[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5893-5904.
- [5] PARK R E, BURGESS E W. *Introduction to the Science of Sociology*[M]. Chicago: University of Chicago Press, 1921: 740-756.
- [6] 赵东升, 郭彩霞, 郑 度, 等. 生态承载力研究进展[J]. *生态学报*, 2019, 39(2): 399-410.  
ZHAO Dongsheng, GUO Caiyun, ZHENG Du, et al. Review of Ecological Carrying Capacity[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 399-410.
- [7] 向芸芸, 蒙吉军. 生态承载力研究和应用进展[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2958-2965.  
XIANG Yunyun, MENG Jijun. Research and Application Advances in Ecological Carrying Capacity[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2958-2965.
- [8] PIMM S L. The Complexity and Stability of Ecosystems[J]. *Nature*, 1984, 307: 321-326.
- [9] 王家骥, 姚小红, 李京荣, 等. 黑河流域生态承载力估测[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(2): 44-48.  
WANG Jiaji, YAO Xiaohong, LI Jingrong, et al. Assessment for Ecological Carrying Capacity of Heihe River Basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(2): 44-48.
- [10] HUDAK A T. Rangeland Mismanagement in South Africa: Failure to Apply Ecological Knowledge[J]. *Human Ecology*, 1999, 27(1): 55-78.
- [11] 高吉喜. 区域可持续发展的生态承载力研究[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 1999.  
GAO Jixi. Research on Ecological Carrying Capacity of Regional Sustainable Development[D]. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, 1999.

- [12] 朱士鹏, 张志英. 贵阳市生态承载力评价及其障碍因素诊断[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 100-108.  
ZHU Shipeng, ZHANG Zhiying. The Evaluation and Obstacle Factors Diagnosis of Ecosystem Carrying Capacity in Guiyang[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition), 2017, 41(4): 100-108.
- [13] 任彩凤, 程艳妹, 郑欣, 等. 基于均方差决策法的淮北市生态承载力评价[J]. 生态科学, 2019, 38(5): 168-177.  
REN CAIFENG, CHENG Yanmei, ZHENG Xin, et al. Evaluation of Ecological Carrying Capacity in Huaibei City Based on the Mean Square Deviation Decision Method[J]. Ecological Science, 2019, 38(5): 168-177.
- [14] 杨倩, 蒙吉军, 王晓东. 基于多维状态空间法的漓江上游生态旅游承载力空间评价及提升策略[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, 51(1): 131-140.  
YANG Qian, MENG Jijun, WANG Xiaodong. Space Differential Evaluation and Promotion Strategy of Ecotourism Carrying Capacity of Upper Reaches of Lijiang River Based on the Multi-Level State Space Approach[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51(1): 131-140.
- [15] REES W E. Ecological Footprints and Appropriated Carrying Capacity: What Urban Economics Leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 4(2): 121-130.
- [16] HUBACEK K, GILJUM S. Applying Physical Input-Output Analysis to Estimate Land Appropriation (Ecological Footprints) of International Trade Activities[J]. Ecological Economics, 2003, 44(1): 137-151.
- [17] 魏黎灵, 李岚彬, 林月, 等. 基于生态足迹法的闽三角城市群生态安全评价[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4317-4326.  
WEI Liling, LI Lanbin, LIN Yue, et al. Evaluation of the Ecological Security of Urban Agglomeration on Min Delta Based on Ecological Footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4317-4326.
- [18] WACKERNAGEL M, SCHULZ N B, DEUMLING D, et al. Tracking the Ecological Overshoot of the Human Economy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2002, 99(14): 9266-9271.
- [19] DANIEL W O, TYEDMERS P H, BEAZLEY K F. Human Appropriation of Net Primary Production (HANPP) in Nova Scotia, Canada[J]. Regional Environmental Change, 2007, 7(1): 1-14.
- [20] 马巾英, 尹锴, 吝涛. 城市复合生态系统碳氧平衡分析: 以沿海城市厦门为例[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1808-1816.  
MA Jinying, YIN Kai, LIN Tao. Analysis of the Carbon and Oxygen Balance of a Complex Urban Ecosystem: a Case Study in the Coastal City of Xiamen[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8): 1808-1816.
- [21] 周元, 姚崇怀, 贺雪刚. 生态承载力实测研究及其规划应用探讨: 以武汉市东湖绿心为例[J]. 绿色科技, 2018(8): 1-6, 12.  
ZHOU Yuan, YAO Chonghuai, HE Xuegang. Research on Ecological Carrying Capacity and Its Planning Application: A Case Study in Green Heart of East Lake in Wuhan[J]. Journal of Green Science and Technology, 2018(8): 1-6, 12.
- [22] 毛汉英, 余丹林. 区域承载力定量研究方法探讨[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 549-555.  
MAO Hanying, YU Danlin. A Study on the Quantitative Research of Regional Carrying Capacity[J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(4): 549-555.
- [23] 魏程瑞, 王郁. 上海超大城市公共服务承载水平的时空特征演变机制: 基于状态空间法的案例分析[J]. 上海行政学院学报, 2019, 20(6): 52-62.  
WEI Chengrui, WANG Yu. Temporal: Spatial Structure and Transformation Mechanism of Public Service Carrying Capacity in Mega City Shanghai Based on Analysis of State Space Method[J]. The Journal of Shanghai Administration Institute, 2019, 20(6): 52-62.
- [24] 骆建雄, 杜政. 大丰区生态承载力评价[J]. 地理空间信息, 2017, 15(3): 44-47, 11.  
LUO Jianxiong, DU Zheng. Evaluation of the Ecological Carrying Capacity in Dafeng District[J]. Geospatial Information, 2017, 15(3): 44-47, 11.
- [25] 刘婷, 赵伟, 黄婧, 等. 三峡库区重庆段生态承载力时空演变研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(1): 115-125.  
LIU Ting, ZHAO Wei, HUANG Jing, et al. A Space-Time Evolution Research of the Ecological Carrying Capacity of the Chongqing Section of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2018, 40(1): 115-125.
- [26] 夏业领, 朱艳娜, 何刚, 等. 基于DPSIR-加权TOPSIS模型的安徽省生态承载力评价[J]. 淮南师范学院学报, 2018, 20(1): 65-70.  
XIA Yeling, ZHU Yanna, HE Gang, et al. Evaluation of Ecological Carrying Capacity of Anhui Province Based on DPSIR-Weighted TOPSIS Model[J]. Journal of Huainan Normal University, 2018, 20(1): 65-70.
- [27] 张祺, 张娇凤, 王文渊, 等. 基于系统仿真的港口生态承载力动态评价模型[J]. 大连海事大学学报, 2017, 43(1): 91-100.  
ZHANG Qi, ZHANG Jiaofeng, WANG Wenyuan,

- et al. Dynamic Evaluation Model of Port Ecological Carrying Capacity Based on System Simulation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2017, 43(1): 91-100.
- [28] 隋欣, 齐晔. 黄河流域青海片生态承载力动态评价[J]. 生态学报, 2007, 26(3): 406-412.
- SUI Xin, QI Ye. Dynamic Assessment of Ecological Carrying Capacity of Yellow River Basin in Qinghai Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(3): 406-412.
- [29] 崔昊天, 贺桂珍, 吕永龙, 等. 海岸带城市生态承载力综合评价: 以连云港市为例[J]. 生态学报, 2020, 40(8): 2567-2576.
- CUI Haotian, HE Guizhen, LÜ Yonglong, et al. Integrated Assessment of Ecological Carrying Capacity in Coastal Cities: a Case Study in Lianyungang City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): 2567-2576.
- [30] 苏蔚潇. 典型区域海岸带综合承载力评估: 以天津滨海新区为例[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013.
- SU Weixiao. Carrying Capacity Evaluation of Typical Regional Coastal Zone: Tianjin Binhai New Area[D]. Qindao: Ocean University of China, 2013.
- [31] 刘淼, 胡远满, 常禹, 等. 生态足迹改进方法及其在区域可持续发展研究中的应用[J]. 生态学报, 2007, 26(8): 1285-1290.
- LIU Miao, HU Yuanman, CHANG Yu, et al. A Modified Ecological Footprint Approach and Its Application in Regional Sustainable Development Study[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(8): 1285-1290.
- [32] 金悦, 陆兆华, 檀菲菲, 等. 典型资源型城市生态承载力评价: 以唐山市为例[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4852-4859.
- JIN Yue, LU Zhaohua, TAN Feifei, et al. Assessment of Ecological Carrying Capacity on the Typical Resources-Based Cities: a Case Study of Tangshan City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4852-4859.
- [33] 徐孝勇, 王艳冲. 基于状态空间法的重庆市区域环境承载力研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(6): 127-133.
- XU Xiaoyong, WANG Yanchong. Research into Chongqing Regional Environmental Carrying Capacity Based on the State-Space Method[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(6): 127-133.
- [34] 国家发展改革委体改司. 一个老工业基地“脱胎”“换骨”之路: 湖南省株洲市绿色转型发展实践[J]. 中国经贸导刊, 2019(9): 49-53.
- National Development and Reform Commission. The Road of “Reborn” and “Reinvented” in an Industrial City: The Practice of Green Transformation Development[J]. China Economic & Trade Herald, 2019(9): 49-53.
- [35] 株洲市卫生健康委. 人口自然变动情况(2018年)[EB/OL]. [2019-05-14]. <http://wjw.zhuzhou.gov.cn/c16703/20191221/i1317889.html>.
- Zhuzhou Municipal Health Commission. Natural Changes in Population (2018)[EB/OL]. [2019-05-14]. <http://wjw.zhuzhou.gov.cn/c16703/20191221/i1317889.html>.

(责任编辑: 申剑)