

引用格式:李春慧,陈翔,李向阳,等.新型工业化城市环境能源复合承载力评价——以东莞市环境能源可持续发展为例[J].南方能源建设,2024,11(6):79-87. LI Chunhui, CHEN Xiang, LI Xiangyang, et al. Evaluation of environment and energy compound carrying capacity in newly industrialized cities—a case study of environmental and energy sustainable development of Dongguan [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 79-87. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.08.

# 新型工业化城市环境能源复合承载力评价

## ——以东莞市环境能源可持续发展为例

李春慧<sup>1</sup>, 陈翔<sup>2</sup>, 李向阳<sup>2</sup>, 王思淼<sup>1</sup>, 汪子雄<sup>3</sup>, 汪天祥<sup>1,4,5,6,✉</sup>

1. 大连理工大学 化工海洋与生命学院, 辽宁 盘锦 124221;
2. 水利部珠江水利委员会 珠江水利综合技术中心, 广东 广州 510610;
3. 广州珠江水资源保护科技发展有限公司, 广东 广州 510610;
4. 多伦多大学 物理与环境科学学部, 安大略 多伦多 M1C 1A4;
5. 中国科学院地理与湖泊研究所 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008;
6. 自然资源部 海岸带科学与综合管理重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** [目的]高强度人类活动产生的污染排放和能源消耗的双重胁迫直接影响了城市的高质量发展,传统单一的环境承载力或能源承载力评价难以全面评估城市发展面临的压力和所处状态,文章以新型工业化城市广东省东莞市为例,对环境能源复合承载力进行评价,并通过探究影响因素对东莞市发展提出针对性建议。[方法]基于压力-状态-响应分析思想,文章从社会经济与环境能源两个系统中优选了19个评价指标构建了环境能源复合承载力评价指标体系,由层次分析法确定评价指标权重,并进行标准化处理以获得较高的可比性,利用可变模糊评价方法计算样本相对隶属度以反映指标的动态连续变化。[结果]研究表明2005—2021年间东莞市环境能源复合承载力由0.10提升至0.77,在环境治理加强以及能源效率提升的驱动下上呈现改善趋势,东莞市环境能源复合承载力的提升需要关注水资源短缺、林地覆盖率减少与强化市政建设运维方面。[结论]构建的环境能源复合承载力评价体系能有效反映水环境承载力与能源承载力的协同变化,为探索城市环境、能源演化过程以及可持续发展提供参考。

**关键词:** 复合承载力; 环境; 能源; 层次分析法; 可变模糊评价; 障碍度分析

中图分类号: X821

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0079-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.08

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## Evaluation of Environment and Energy Compound Carrying Capacity in Newly Industrialized Cities—A Case Study of Environmental and Energy Sustainable Development of Dongguan

LI Chunhui<sup>1</sup>, CHEN Xiang<sup>2</sup>, LI Xiangyang<sup>2</sup>, WANG Simiao<sup>1</sup>, WANG Zixiong<sup>3</sup>, WANG Tianxiang<sup>1,4,5,6,✉</sup>

1. School of Chemical Engineering, Ocean and Life Sciences, Dalian University of Technology, Panjin 124221, Liaoning, China;
2. Pearl River Water Conservancy Comprehensive Technology Center, Pearl River Water Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510610, Guangdong, China;

收稿日期: 2024-04-02 修回日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“冰生消过程对湾区氮磷在多介质系统中迁移的影响机制研究”(42277383); 湖泊与环境国家重点实验室开放基金项目“冰封期水库冰-沉积物双驱动下的水质模型研究”(2022SKL020); 中央高校基本科研项目“辽河与珠江河口城镇结构对水生态环境的影响”(DUT20RC(3)059); 海岸带科学与综合管理重点实验室开放基金项目“冰封期河口区氮磷多介质垂直向迁移过程及影响因素研究”(2021COSIM1005)

3. Guangzhou Pearl River Water Resources Protection Technology Development Co., Ltd., Guangzhou 510610, Guangdong, China;
4. Department of Physical & Environmental Sciences, University of Toronto, Toronto M1C 1A4, Ontario, Canada;
5. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing 210008, Jiangsu, China;
6. Key Laboratory of Coastal Science and Integrated Management, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, Shandong, China )

**Abstract:** [Introduction] The concurrent stress of pollution emissions and energy consumption resulting from high-intensity human activities directly affect the high-quality development of cities. However, assessing the pressure and status of urban development comprehensively proves challenging through traditional single environment carrying capacity or energy carrying capacity. With a case study of the city of Dongguan, a new industrialized city in Guangdong province, as an example, the paper evaluated the environment and energy compound carrying capacity, and put forward targeted suggestions for the development of Dongguan by exploring the influencing factors. [Method] Based on the idea of pressure-state-response analysis, the paper constructed an evaluation index system of environment and energy compound carrying capacity by selecting 19 evaluation indicators from two systems of social economy and environment and energy. The weights of the evaluation indicators were determined by the hierarchical analysis method and standardized to achieve a high degree of comparability. The relative affiliation of samples was calculated using the variable fuzzy evaluation method to reflect the dynamic changes of the indicators. [Result] The results of this study show that the environment and energy compound carrying capacity of Dongguan increased from 0.10 to 0.77 from 2005 to 2021, indicating an improving trend driven by the strengthening of environmental governance and the improvement of energy efficiency. To improve the environment and energy compound carrying capacity in Dongguan, attention should be paid to the shortage of water resources, the reduction of forest land coverage, and the strengthening of municipal construction and operation. [Conclusion] The environment and energy compound carrying capacity evaluation system constructed in the paper effectively reflects the synergistic changes of water environmental carrying capacity and energy carrying capacity, providing a reference for the study of sustainable urban development and the evolution of urban environment and energy.

**Key words:** compound carrying capacity; environment; energy; hierarchical analysis; variable fuzzy evaluation; obstacle degree analysis  
2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

随着中国城镇化进程的不断推进,水资源供需矛盾、能源过度消耗、生态环境破坏等成了城市发展过程中不可忽视的问题。中国人口基数庞大,人均水资源与能源的占有量在世界上处于较低的水平,且局部环境问题突出,使得城市发展面临严峻的环境与能源压力<sup>[1]</sup>。承载力相关的研究有助于理解上述冲突,已有研究聚焦环境承载力与能源承载力评价开展了大量工作,提出了多目标模型、系统动力学、熵权法、压力-状态-响应分析、主成分分析等评价方法,为区域的城市社会经济和环境能源可持续发展提供了强力支撑<sup>[2-3]</sup>。

以往环境承载力的研究多集中在水环境领域,在城市发展过程中既要保证经济的稳定发展,又要满足水环境状况不恶化,这就需要对水环境承载力评价的研究。彭述权等<sup>[4]</sup>耦合多目标优化模型与遗传算法预测了不同用水结构下长株潭城市群的水环境承载力的变化情况。崔丽影等<sup>[5]</sup>运用熵权

TOPSIS 模型评价了黑龙江 12 市的水环境承载力,研究发现黑龙江水环境承载力总体上呈现上升的趋势。曹若馨等<sup>[6]</sup>采用 BP 神经网络方法对水环境中化学需氧量、氨氮、总氮 3 类污染物进行了预警,并提出了不同的治理对策。

能源消耗引起的碳排放量增加,是导致全球气候变化的重要原因之一,自 2020 年中国提出“碳达峰”与“碳中和”的目标以来,能源消耗的环境影响也逐步受到关注。近年来研究人员围绕碳足迹过程、碳排放影响、能源承载力评估开展了有益探索。刘子西等<sup>[7]</sup>耦合宁夏沿黄带城市的碳水关系,分析了中心城市水资源质量与碳排放足迹的时空变化趋势,研究显示水生态足迹与碳足迹之间存在着显著关联性。黄和平等<sup>[8]</sup>利用 IPCC 碳排放模型与 XGBoost 模型实现了江西省农业碳排放量的计算与预测,结果表明碳排放总量整体呈现上升的趋势,碳排放强度逐年降低。彭璇等<sup>[9]</sup>构建了包含生态环境载体、能源载体与承载客体 3 方面的能源承载力评价体系,并应用到京津冀地区,发现北京和天津的能源承载

力与河北的能源承载力呈现相反的变化趋势。

已有研究从不同角度证实了流域的水环境以及能源状况与人类社会发展密切相关。然而,城市发展过程中的污染排放与能源消耗并不是孤立的过程,两者均是从不同角度反映了人类活动类型与强度,是紧密相关的有机体<sup>[10]</sup>。传统单一的环境或能源承载力评价难以准确反映这一复合过程,新时期高质量发展理念深入人心,单一要素承载力转向环境能源复合承载力(下文简称复合承载力)的探索急需开展。复合承载力的评价涉及到人口、经济、水资源、环境、能源等多个方面,影响因素众多且相互关系复杂,此外,指标值实际上是处于动态变化过程的,具有模糊性,意味着非此即彼的二元分类不能反映出指标的动态变化,因此适宜的评价方法是准确评估复合承载力的关键。

针对上述问题,文章利用压力-状态-响应分析方法构建能够表征环境能源复合状态的指标系统,耦合层次分析法与可变模糊评价方法构建评价模型,并应用于东莞市环境能源复合承载力评价,为区域可持续发展提供参考,也为其他地区的环境能源权衡提供借鉴。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 研究区域概况与数据来源

东莞市地处粤港澳大湾区,经济发展迅速。2021年东莞市地区生产总值达到10855.35亿元,规模以上工业总产值达到24513.14亿元,拥有较高的工业化水平。人口密度为4283人/km<sup>2</sup>,废水排放总量为15.61亿t,全社会用电量达100.12TWh。地少人多、经济活跃造成能源的快速消耗,社会经济可持续发展与能源环境有限性的矛盾异常突出<sup>[11]</sup>。

文章的基础数据来自于相关年鉴与公报数据,其中人口、污水排放数据来自于《东莞市统计年鉴》《广东省统计年鉴》,经济发展数据来自于《东莞市国民经济和社会发展统计公报》,用水与水资源数据来自于《东莞市水资源公报》,污水处理数据来自于《中国城市建设统计年鉴》等。

### 1.2 评价指标体系构建

文章基于压力-状态-响应分析思想,综合考虑东莞市环境与能源的双重影响,通过规整《绿色发展指标体系》《生态文明建设考核目录体系》《国家节水型

城市考核标准》等文件,分析城市绿色可持续发展评价的关键指标,并依据科学性、独立性、整体性、动态性和可操作性原则,从社会经济与环境能源两个系统中优选了代表性强、表征性好的19个评价指标构建东莞市环境能源复合承载力评价指标体系<sup>[12-13]</sup>。见表1。

表1 东莞市复合承载力评价指标体系  
Tab. 1 Evaluation index system of compound carrying capacity in Dongguan

准则层	编号	指标层	评价指标计算方式
社会 经济 系统	11	人口密度	总人口/土地面积
	12	人均GDP	GDP总量/总人口
	13	人均水资源量	水资源总量/总人口
	14	万元GDP用水量	总用水量/GDP总量
	15	林地覆盖率	林地面积/土地面积
	16	排水固定投资占比	排水固定投资增加值/GDP总量
	17	管网密度	管网长度/建成区面积
环境 能源 系统	18	人均化学需氧量入河量	化学需氧量入河总量/总人口
	19	人均总氮入河量	总氮入河总量/总人口
	110	人均总磷入河量	总磷入河总量/总人口
	111	人均氨氮入河量	氨氮入河总量/总人口
	112	化学需氧量削减率	化学需氧量处理量/化学需氧量产生量
	113	总氮削减率	总氮处理量/总氮产生量
	114	总磷削减率	总磷处理量/总磷产生量
	115	氨氮削减率	氨氮处理量/氨氮产生量
	116	污水处理率	污水处理量/污水排放总量
	117	污水排放系数	污水排放总量/总用水量
	118	万元GDP用电量	全社会用电量/GDP总量
	119	碳排放强度	碳排放总量/GDP总量

接下来详细分析采用压力-状态-响应分析方法构建评价指标体系的过程。人口密度与人均GDP体现了社会经济发展水平和对资源环境的压力水平,是压力指标。城镇化与工业化的过程会使得区域资源、能源与环境状态难以满足经济的快速发展,为复合承载力的提升带来巨大压力<sup>[14-15]</sup>。万元GDP用水量、人均水资源量、万元GDP用电量、碳排放强度、林地覆盖率、人均化学需氧量入河量、人均氨氮入河量、人均总磷入河量、人均总氮入河量是资源、能源消耗和环境受到破坏的状态指标。城市发展过程中面临的资源供需不平衡问题与环境污染问题是制

约城市健康与可持续发展的关键问题,影响着区域的复合承载力水平<sup>[16]</sup>。排水固定投资占比、污水处理率、污水排放系数、管网密度、化学需氧量削减率、氨氮削减率、总氮削减率、总磷削减率是城市应对资源供需不平衡与环境污染问题的响应指标。上述各指标相互影响,共同构成了城市社会经济影响下的环境能源复合承载力评价指标体系。

### 1.3 评价指标权重计算

采用层次分析法对评价指标的权重进行赋值<sup>[17]</sup>。层次分析法是一种将研究系统划分为递阶层次结构的主观权重赋值方法<sup>[18]</sup>。首先查阅文献根据九标度法构建判断矩阵  $A=(a_{ij})_n$ , 其中  $n$  为判断矩阵的阶数,  $a_{ij}$  为判断矩阵中第  $i$  行第  $j$  列对应的值<sup>[19]</sup>。接着求出判断矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max}$  与其对应的特征向量  $w_i$ , 经一致性检验 ( $0.015 < 0.1$ ) 后将特征向量归一化后即各评价指标的权重  $w_i$  (表 2)。

表 2 东莞市复合承载力评价指标权重值

Tab. 2 Weight values of compound carrying capacity evaluation indicators in Dongguan

评价指标	特征向量值	权重值/%
万元GDP用水量	2.114	11.129
碳排放强度	2.114	11.129
万元GDP用电量	2.010	10.581
管网密度	1.984	10.442
污水排放系数	1.416	7.451
排水固定投资占比	1.147	6.039
林地覆盖率	1.147	6.039
人口密度	0.923	4.855
人均GDP	0.923	4.855
人均水资源量	0.876	4.608
人均总磷入河量	0.724	3.810
人均氨氮入河量	0.724	3.810
污水处理率	0.527	2.776
总磷削减率	0.481	2.533
氨氮削减率	0.481	2.533
人均化学需氧量入河量	0.477	2.508
人均总氮入河量	0.477	2.508
总氮削减率	0.230	1.213
化学需氧量削减率	0.224	1.181

### 1.4 可变模糊评价方法

确定好评价指标体系与指标权重后,考虑到指

标的动态性和模糊性,采用可变模糊评价模型对东莞市环境能源复合承载力进行评价。由于多数评价指标缺乏统一的标准,而可变模糊评价模型是用数的连续概念来分析样本的动态变化,该方法可通过构建相对差异函数,计算相对隶属度与模糊关系矩阵实现对评价样本集的优劣比较从而确定样本级别,在处理复杂、无标准的问题方面具有较大优势<sup>[20-22]</sup>。

为强化数据的合理性与可比性,对评价指标进行标准化处理以消除评价指标特征值与标准值的量纲,并按照递增型指标(正指标)与递减型指标(逆指标)采取不同的处理方式,见公式(1)。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0, & x_{ij}=x_{\min}(\text{正指标})\text{或}x_{ij}=x_{\max}(\text{逆指标}) \\ \frac{x_{ij}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}(\text{正指标})\text{或}\frac{x_{\max}-x_{ij}}{x_{\max}-x_{\min}}(\text{逆指标}) & (1) \\ 1, & x_{ij}=x_{\max}(\text{正指标})\text{或}x_{ij}=x_{\min}(\text{逆指标}) \end{cases}$$

式中:

$r_{ij}$ ——评价指标  $i$  在第  $j$  年标准化后的取值;

$x_{ij}$ ——指标  $i$  在第  $j$  年的取值。

为保障评价结果更为稳定,接下来将层次分析法确定的指标权重  $w_i$  与标准化后的指标  $r_{ij}$  分别代入以下 4 种模型<sup>[23]</sup>。通过变换模型参数得到各级的相对隶属度  $U_{hj}$ , 其中  $h$  为评价级别,  $a$  为优化准则参数,  $p$  为距离参数,  $m$  为评价指标数量。

1) 令  $a = 1$ 、 $p = 1$ , 样本  $j$  的相对隶属度为模糊综合评判模型。

$$U_{1j} = \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \quad (2)$$

2) 令  $a = 1$ 、 $p = 2$ , 样本  $j$  的相对隶属度为 TOPSIS 理想点模型。

$$U_{2j} = \left\{ 1 + \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij}-1)]^2}}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2} \right\}^{-1} \quad (3)$$

3) 令  $a = 2$ 、 $p = 1$ , 样本  $j$  的相对隶属度为激励函数模型。

$$U_{3j} = \left\{ 1 + \frac{\left( 1 - \sum_{i=1}^m w_i r_{ij} \right)^2}{\sum_{i=1}^m w_i r_{ij}} \right\}^{-1} \quad (4)$$

4) 令  $a = 2$ 、 $p = 2$ , 样本  $j$  的相对隶属度为模糊优

选模型。

$$U_{4j} = \left\{ 1 + \frac{\sum_{i=1}^m [w_i(r_{ij}-1)]^2}{\sum_{i=1}^m (w_i r_{ij})^2} \right\}^{-1} \quad (5)$$

得到4种不同的相对隶属度后,计算其平均值作为东莞市的复合承载力 $\bar{U}$ ,见表3。

表3 东莞市复合承载力评价结果

Tab. 3 Evaluation results of compound carrying capacity in Dongguan

年份	$U_{1j}$	$U_{2j}$	$U_{3j}$	$U_{4j}$	$\bar{U}$
2005	0.10	0.21	0.01	0.06	0.10
2006	0.14	0.22	0.02	0.07	0.11
2007	0.15	0.20	0.03	0.06	0.11
2008	0.31	0.34	0.17	0.21	0.26
2009	0.35	0.37	0.23	0.25	0.30
2010	0.44	0.42	0.39	0.34	0.40
2011	0.45	0.43	0.40	0.37	0.41
2012	0.49	0.47	0.47	0.44	0.47
2013	0.52	0.50	0.54	0.50	0.52
2014	0.57	0.54	0.64	0.58	0.58
2015	0.53	0.52	0.57	0.55	0.54
2016	0.62	0.58	0.73	0.65	0.65
2017	0.65	0.60	0.78	0.70	0.68
2018	0.66	0.61	0.80	0.71	0.70
2019	0.67	0.62	0.80	0.72	0.70
2020	0.72	0.65	0.87	0.77	0.75
2021	0.73	0.67	0.88	0.80	0.77

### 1.5 障碍度分析

障碍度分析是通过计算指标与样本之间的障碍指数来评估指标对样本的影响程度,可用于识别评价指标对复合承载力的障碍程度以及障碍作用的变化趋势<sup>[24]</sup>。障碍度越大表明该指标对复合承载力提升的限制越大,障碍度越小,表明该指标的障碍作用越小。障碍指数( $P_i$ )计算公式如下<sup>[25]</sup>:

$$P_i = \frac{(1-r_{ij})w_i}{\sum_{i=1}^m (1-r_{ij})w_i} \quad (6)$$

## 2 结果分析

### 2.1 环境能源复合承载力变化趋势

表3结果显示,东莞市2005—2021年复合承载

力由0.10增长为0.77,整体呈现上升的趋势。分析认为复合承载力提升与以下原因有关:(1)东莞市在城镇化与工业化的发展进程中努力落实碳达峰、碳中和要求,加快推动产业结构优化、节能技术研发、能源效率提升、碳减排工程,促进经济社会发展绿色化、低碳化;(2)东莞市加大了对水环境的治理力度。2005起,东莞市政府接续发布了《东莞市重点污染企业整治方案》《东莞市水污染防治行动实施方案》《东莞市水污染防治工作方案》等治理方案,加强了水资源与水环境的监管与治理力度,完善了水污染治理配套设施,整治了工业污水与生活污水的水体排污量,实现复合承载力的持续提升。

### 2.2 复合承载力变化影响因素与障碍度分析

2005—2021年间各项评价指标均呈现显著变化,主要包括:人口密度由2665人/km<sup>2</sup>上升为4190人/km<sup>2</sup>;人均GDP由3.23万元上升为9.93万元;人均水资源量由348.39 m<sup>3</sup>/人减少至177.37 m<sup>3</sup>/人;万元GDP用水量由96.25 m<sup>3</sup>/万元下降至18.72 m<sup>3</sup>/万元;林地覆盖率由27.69%缩减至21.30%;管网密度增加6.7倍;排水固定投资占比由0.10%上升至0.40%;污水排放系数提升至0.66;污水处理率提升至100%;氨氮、总磷、化学需氧量、总氮4类污染物平均削减率增长至97.29%;人均污染物入河量年平均降幅为16.69%;万元GDP用电量下降了54.16%;碳排放强度下降了56.30%。

数据显示东莞市万元GDP用水量、万元GDP用电量、碳排放强度与人均污染物入河量逐年减少,排水固定投资占比、管网密度、污染物削减率、污水处理率等指标也呈现改善趋势,但人均水资源量与林地覆盖率的减少,在一定程度上限制了复合承载力的提升。由此可见东莞市经济社会发展迅速,随着市政环保资金的投入,污水处理技术和标准进一步提高,水环境状况得到了明显改善。同时能源得到了更高效地利用,有效促进了碳减排效果。上述作用使得环境能源压力得到了有效缓解。但也注意到随着外来人口的不断涌入,建成区面积的扩大,人口增长对于水资源和林地资源的压力逐渐增大,从而增加了东莞市的环境能源压力。

为进一步探究复合承载力变化的影响因素,分析了评价指标的历年障碍度变化情况。如图1所示,19个评价指标表现出不同的障碍作用,它们对复合

承载力的影响分为两个阶段。第 1 阶段为 2005—2014 年,平均障碍度超过 5% 的指标有人均 GDP、万元 GDP 用电量、碳排放强度、人均水资源量、万元 GDP 用水量、排水固定投资占比、污水排放系数与管网密度。第 2 阶段为 2015—2021 年,这一阶段排水固定投资占比、人均水资源量、林地覆盖率和管网密度的障碍作用更加突出。2021 年人均水资源量与林地覆盖率的障碍度达到了 34% 和 39%,成为制约复合承载力改善的两大因素,如果不加干预,这两个指标将继续阻碍复合承载力的改善。综合来看,2 个阶段平均障碍度超过 10% 的指标有人均水资源量、林地覆盖率、排水固定投资占比和管网密度,与指标值变化趋势相一致,是东莞市复合承载力提升需重点关注的问题。

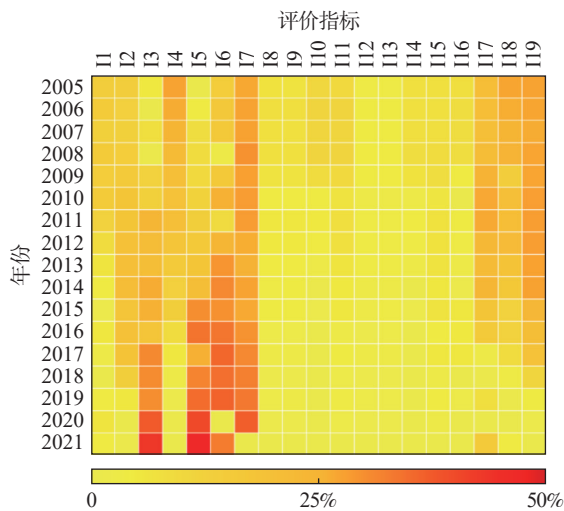


图 1 评价指标障碍度分析结果

Fig. 1 Results of the obstacle degree analysis to the evaluation indicators

### 2.3 讨论与建议

进一步地,为论证环境能源复合承载力评价的优势,对比了东莞市 2005—2021 年环境能源复合承载力、水环境承载力和能源承载力的变化情况。图 2 显示水环境承载力、能源承载力与复合承载力均呈现上升的趋势,水环境承载力由 0.12 上升至 0.75,变化趋势与张扬等的论文结果<sup>[26]</sup>相符;而能源承载力由 0.11 上升至 0.69,这与詹长根等的研究结果<sup>[27]</sup>相似。3 种承载力的相互作用主要分为 3 个阶段,2005—2009 年为第 1 阶段,东莞市经济快速发展带来的水污染问题与能源消耗问题突出,水环境承载

力与能源承载力均处于较低的水平,综合作用下复合承载力的提升效果不显著;第 2 阶段是 2010—2014 年,东莞市污水治理与环境保护工作取得一定成效,水环境承载力呈现出良好的发展态势,提升幅度为 42.86%,但是经济形式仍然较为粗放,能源消耗情况仍未得到广泛关注,复合承载力的变化介于水环境承载力与能源承载力之间,因此该阶段水环境承载力是复合承载力提升的主要驱动力;第 3 阶段为 2015—2021 年,自 2015 年中国提出了自主贡献目标(NDCS)以后,东莞市碳排放问题获得了更高的关注,与此同时东莞市积极响应水十条等政策,能源承载力与水环境承载力均得到了加强,增幅分别为 53.33% 与 44.23%。在能源承载力与水环境承载力的综合作用下,这一阶段的复合承载状况高于单一承载力。综上,文章构建的环境能源复合承载力评价体系能同时反映环境与能源两方面的承载状况,弥补了单一承载力评价的局限性。

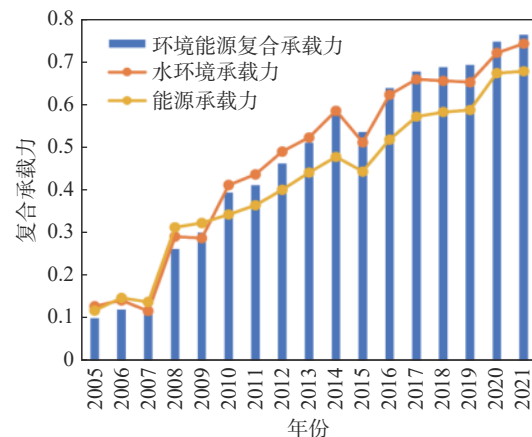


图 2 东莞市承载力变化情况

Fig. 2 Changes in the carrying capacity of Dongguan

在分析东莞市复合承载力的基础上,建议东莞市加快新城镇建设,吸取国内外城镇发展过程中出现“城市病问题”的经验教训,优化城市外来人员的引进政策,使得在注入人口活力的同时,减少对城市的环境与能源压力。此外,还需要从源头出发全面落实国家的节水行动与广东省节水九条,积极推广节水新技术与污水再利用技术,对经济社会发展各行业用水量进行刚性约束,增加水资源的循环利用,缓解水资源的供需矛盾。进而,在市政建设过程中结合东莞市自身的特点,建立健全的市政管理制度,完善城市供水、排水体系建设。最后,优化东莞市主

城区土地结构,全面加强林地保护管理,避免林地资源的过度开发与破坏,增加城市绿化面积,严守生态红线,推动全市生态环境质量持续改善。

### 3 结论

文章立足双碳战略背景,耦合层次分析法、可变模糊评价方法与障碍度分析方法量化东莞市社会发展、环境状况、能源消耗交互影响与动态变化过程。从新的视角探索东莞市环境能源复合承载力的研究方法,解析环境和能源双重胁迫下的东莞市复合承载力动态连续变化情况,得出的主要结论如下:

1)提出了东莞市环境能源复合承载力评价方法。首先,基于压力-状态-响应分析方法挖掘出19个代表性的指标构建评价指标系统。然后,利用层次分析法确定评价指标权重。最后,采用可变模糊评价模型计算指标相对隶属度对城市环境能源复合承载力进行评价,克服了指标评价的二元比较不足和评价标准缺乏的限制。

2)东莞市环境能源复合承载力由2005年的0.10增长为2021年的0.77,主要得益于环境状况的改善和能源效率的提升。障碍度分析结果表明东莞市发展的主要障碍指标是人均水资源量、林地覆盖率、排水固定投资占比和管网密度,它们的平均障碍度均超过10%,并且资源供需压力的障碍作用在2015年后逐渐增强。相较于单一的环境或能源承载力,环境能源复合承载力能够反映两者的协同影响。

#### 参考文献:

- [1] 杨玺,孙奕生,常世彦,等.加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例[J].*环境科学*,2023,44(7):3627-3636. DOI: 10.13227/j.hjcx.202207164.  
YANG X, SUN Y S, CHANG S Y, et al. Assessing the environmental and health co-benefits of accelerated energy transition and industrial restructuring: a case study of the BTHS region [J]. *Environmental science*, 2023, 44(7): 3627-3636. DOI: 10.13227/j.hjcx.202207164.
- [2] 彭颖,朱章林,谭星宇,等.湖北省资源环境承载力评价与预警研究:基于压力-支撑力-调节力视角[J].*环境科学与技术*,2023,46(10):209-218. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.0881.23.338.  
PENG Y, ZHU Z L, TAN X Y, et al. Evaluation and forewarning of resources and environment carrying capacity in Hubei Province from the perspective of pressure, support and regulation [J]. *Environmental science & technology*, 2023, 46(10): 209-218. DOI: 10.19672/j.cnki.1003-6504.0881.23.338.
- [3] 丁宇,张雷,马昕琳.山地城镇化与资源环境承载力耦合协调发展的时空演变[J].*环境科学研究*,2022,35(2):592-600. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.27.  
DING Y, ZHANG L, MA X L. Temporal and spatial evolution of coupling coordination of mountainous urbanization and its resource and environment carrying capacity [J]. *Research of environmental sciences*, 2022, 35(2): 592-600. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.27.
- [4] 彭述权,张珂嘉,彭亚辉,等.长株潭城市群水环境承载力多目标优化研究[J].*安徽农业大学学报*,2020,47(5):763-769. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20201113.004.  
PENG S Q, ZHANG K J, PENG Y H, et al. Study on water environmental carrying capacity of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(5): 763-769. DOI: 10.13610/j.cnki.1672-352x.20201113.004.
- [5] 崔丽影,钱龙.基于熵权TOPSIS模型的黑龙江省水资源承载力评价研究[J].*科技创新与应用*,2024,14(3):114-117. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.03.027.  
CUI L Y, QIAN L. Study on the evaluation of water resources carrying capacity of Heilongjiang Province based on entropy weight TOPSIS model [J]. *Technology innovation and application*, 2024, 14(3): 114-117. DOI: 10.19981/j.CN23-1581/G3.2024.03.027.
- [6] 曹若馨,张可欣,曾维华,等.基于BP神经网络的水环境承载力预警研究——以北运河为例[J].*环境科学学报*,2021,41(5):2005-2017. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0077.  
CAO R X, ZHANG K X, ZENG W H, et al. Research on the early-warning method of water environment carrying capacity based on BP neural network: a case study of Beiyunhe River Basin [J]. *Acta scientiae circumstantiae*, 2021, 41(5): 2005-2017. DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0077.
- [7] 刘子西,席睿,黑正军,等.宁夏沿黄城市带碳足迹及其关联关系研究[J].*水资源与水工程学报*,2023,34(2):1-8. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.01.  
LIU Z X, XI R, HEI Z J, et al. Carbon and water footprints of the yellow river urban belt in Ningxia and their correlations [J]. *Journal of water resources and water engineering*, 2023, 34(2): 1-8. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2023.02.01.
- [8] 黄和平,李紫霞,黄璇,等.“双碳”目标下江西省农业碳排放量测算、影响因素分析与预测研究[J].*生态与农村环境学报*,2024,40(2):179-190. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0207.  
HUANG H P, LI Z X, HUANG D, et al. Research on the measurement, analysis and prediction of agricultural carbon

- emissions in Jiangxi Province under the "dual carbon" goals [J]. *Journal of ecology and rural environment*, 2024, 40(2): 179-190. DOI: [10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0207](https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0207).
- [9] 彭璇, 祝辉, 祝尔娟. 京津冀能源承载力评价与分析——基于 2007-2011 年数据 [J]. *首都经济贸易大学学报*, 2015, 17(4): 15-22. DOI: [10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2015.04.003](https://doi.org/10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2015.04.003).  
PENG X, ZHU H, ZHU E J. Evaluation and analysis of energy bearing capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region: based on data from 2007 to 2011 [J]. *Journal of Capital University of Economics and Business*, 2015, 17(4): 15-22. DOI: [10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2015.04.003](https://doi.org/10.13504/j.cnki.issn1008-2700.2015.04.003).
- [10] XU Q, DONG Y X, YANG R. Urbanization impact on carbon emissions in the pearl river delta region: Kuznets curve relationships [J]. *Journal of cleaner production*, 2018, 180: 514-523. DOI: [10.1016/j.jclepro.2018.01.194](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.194).
- [11] CHEN S Y, HE Y H, TAN Q, et al. Comprehensive assessment of water environmental carrying capacity for sustainable watershed development [J]. *Journal of environmental management*, 2022, 303: 114065. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.114065](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114065).
- [12] 曹文平, 刘喜坤, 赵天晴, 等. 基于压力-状态-响应 (PSR) 模型的潘安湖湿地水环境健康评价 [J]. *环境工程*, 2021, 39(5): 231-237,245. DOI: [10.13205/j.hjgc.202105032](https://doi.org/10.13205/j.hjgc.202105032).  
CAO W P, LIU X K, ZHAO T Q, et al. Evaluation of water environmental health of Pan'an Lake wetland based on pressure-state-response (PSR) model [J]. *Environmental engineering*, 2021, 39(5): 231-237,245. DOI: [10.13205/j.hjgc.202105032](https://doi.org/10.13205/j.hjgc.202105032).
- [13] 刘岚昕, 朱悦. 辽河流域典型控制单元水环境承载力评估与预警 [J]. *环境保护科学*, 2023, 49(2): 132-136,144. DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010039](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010039).  
LIU L X, ZHU Y. Evaluation and early warning of water environment carrying capacity of typical control units in Liao River Basin [J]. *Environmental protection science*, 2023, 49(2): 132-136,144. DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010039](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022010039).
- [14] 张舒, 谢锦林, 程远林. 基于组合赋权与聚类的城市节能指标分解研究 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 112-119. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.013).  
ZHANG S, XIE J L, CHENG Y L. Research on decomposition of urban energy-saving indicator based on combination weighting and clustering [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 112-119. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.013](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.013).
- [15] JIANG Z Q. Prediction and management of regional economic scale based on machine learning model [J]. *Wireless communications and mobile computing*, 2022, 2022: 2083099. DOI: [10.1155/2022/2083099](https://doi.org/10.1155/2022/2083099).
- [16] 郭浩锋, 袁艳斌, 曹阳, 等. 武汉市水资源承载力综合评价及可持续利用研究 [J]. *水电能源科学*, 2023, 41(12): 19-23. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381).  
GUO H F, YUAN Y B, CAO Y, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity and sustainable utilization in Wuhan City [J]. *Water resources and power*, 2023, 41(12): 19-23. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20230381).
- [17] 林佳雄, 罗定贵, 邝著华, 等. 广州市矿山地质环境影响评价 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(增刊 1): 102-109. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.017).  
LIN J X, LUO D G, KUANG Z H, et al. Geological environmental impact assessment of mines in Guangzhou [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(Suppl.1): 102-109. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.017](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.S1.017).
- [18] 王延杰, 徐国智. 基于层次分析法的区域电能替代技术选择研究 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(4): 44-49. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.006).  
WANG Y J, XU G Z. Research on alternatives of regional electric energy based on analytic hierarchy process [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(4): 44-49. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.006](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.04.006).
- [19] CHEN M J, KANG Y L, ZHANG X Y, et al. Evaluation of aqueous phase trapping in shale gas reservoirs based on analytic hierarchy process [J]. *Energy & fuels*, 2021, 35(2): 1389-1397. DOI: [10.1021/acs.energyfuels.0c03867](https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c03867).
- [20] WANG T X, XU S G. Dynamic successive assessment method of water environment carrying capacity and its application [J]. *Ecological indicators*, 2015, 52: 134-146. DOI: [10.1016/j.ecolind.2014.12.002](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.12.002).
- [21] 王玉, 唐蛮. 基于模糊综合评价的 500 kV 输变电工程经济评价研究 [J]. *南方能源建设*, 2022, 9(增刊 2): 118-122. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.019).  
WANG Y, TANG L. Research on economic evaluation of 500 kV power transmission and transformation project based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Southern energy construction*, 2022, 9(Suppl.2): 118-122. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.019](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.S2.019).
- [22] 肖颖涛, 王化全, 俞海峰, 等. 基于主成分分析法和模糊综合评价法的配电网评估 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 105-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018).  
XIAO Y T, WANG H Q, YU H F, et al. Evaluation of distribution network status based on principal component analysis and correspondence analysis [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(3): 105-112. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.018).
- [23] 陈守煜. 水资源系统可变集评价原理与方法 [J]. *水利学报*, 2013, 44(2): 134-142. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.2013.02.011](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.2013.02.011).  
CHEN S Y. Variable sets assessment theory and method of water resource system [J]. *Journal of hydraulic engineering*, 2013,



44(2): 134-142. DOI: [10.13243/j.cnki.slx.2013.02.011](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slx.2013.02.011).

- [24] ZHOU K. Comprehensive evaluation on water resources carrying capacity based on improved AGA-AHP method [J]. *Applied water science*, 2022, 12(5): 103. DOI: [10.1007/s13201-022-01626-2](https://doi.org/10.1007/s13201-022-01626-2).
- [25] WANG X Y, LIU L, ZHANG S L. Integrated model framework for the evaluation and prediction of the water environmental carrying capacity in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. *Ecological indicators*, 2021, 130: 108083. DOI: [10.1016/j.ecolind.2021.108083](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108083).
- [26] 张杨, 付正辉, 张雅然, 等. 气候变化情景下流域水环境承载力评估方法研究 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(2): 242-250. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2023.012](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2023.012).  
ZHANG Y, FU Z H, ZHANG Y R, et al. Evaluation method of watershed water environment carrying capacity under climate change scenarios [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2023, 59(2): 242-250. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2023.012](https://doi.org/10.13209/j.0479-8023.2023.012).
- [27] 詹长根, 吴鼎, 杨如军. 广西能源资源承载力综合评价研究 [J]. *生态科学*, 2018, 37(3): 131-137. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.017](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.017).  
ZHAN C G, WU D, YANG R J. Comprehensive evaluation of energy resources capacity in Guangxi [J]. *Ecological science*, 2018, 37(3): 131-137. DOI: [10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.017](https://doi.org/10.14108/j.cnki.1008-8873.2018.03.017).

#### 作者简介:



李春慧

李春慧(第一作者)

1999-, 女, 环境工程, 硕士研究生, 主要研究方向为能源与环境保护(e-mail) [lichunhui123123@mail.dlut.edu.cn](mailto:lichunhui123123@mail.dlut.edu.cn)。



汪天祥

汪天祥(通信作者)

1987-, 男, 副教授/高级工程师, 博士, 主要从事能源与环境保护相关工作(e-mail) [tianxiang@dlut.edu.cn](mailto:tianxiang@dlut.edu.cn)。

#### 项目简介:

**项目名称** 冰生消过程对湾区氮磷在多介质系统中迁移的影响机制研究(42277383)

**承担单位** 大连理工大学

**项目概述** 湾区作为经济龙头和陆域污染输移终端, 多数存在氮、磷超标问题。本项目利用现场调查、尺度转换、深度学习方法对湾区污染过程与时空特征进行分析。然后, 系统挖掘污染处理、社会经济、能源影响的相互关系。最后, 设计多尺度、多工况模拟实验, 阐明水动力、环境因子、污染源等因素对湾区氮、磷多介质迁移的影响机制, 解析关键水质参数, 构建湾区水质模型, 评估环境影响。从而促进跨学科交叉, 为环境与能源保护提供理论支撑。

**主要创新点** (1)构建环境能源复合模型, 分析污染过程与能源消耗的综合影响;(2)构建湾区污染模型, 预测复杂工况的水质变化过程。

**项目名称** 辽河与珠江河口城镇结构对水生态环境的影响(DUT20RC(3)059)

**承担单位** 大连理工大学

**项目概述** 系统分析城镇结构下的管网、水网、能源、经济复合要素演变特征, 以辽河口和珠江口为例, 对比不同经济水平和治理模式下对水生态环境的影响。本项目首先收集多源信息, 构建基础数据库。然后利用系统动力学、机器学习等方法建立多要素的响应关系。最后, 剖析影响水生态系统的的关键要素, 为河口区的环境管理提供支撑。

**主要创新点** (1)环境能源生态复杂系统动力学模型构建。(2)河口区城镇水生态变化驱动要素识别。

(编辑 徐嘉铨)