

DOI: 10.5846/stxb201902130257

崔昊天, 贺桂珍, 吕永龙, 苑晶晶. 海岸带城市生态承载力综合评价——以连云港市为例. 生态学报, 2020, 40(8): - .

Cui H T, He G Z, Lu Y L, Yuan J J. Integrated assessment of ecological carrying capacity in coastal cities: a case study in Lianyungang. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(8): - .

海岸带城市生态承载力综合评价 ——以连云港市为例

崔昊天^{1,2}, 贺桂珍^{1,2}, 吕永龙^{1,2,*}, 苑晶晶¹

1 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 101407

摘要: 海岸带是人类聚居和海洋资源开发利用的重点区域。海岸带城市综合生态承载力体现了海岸带生态系统对人类社会经济活动的承受能力, 是判断海岸带城市生态系统健康程度和制定海岸带环境管理政策的重要依据。基于“压力(P)—状态(S)—响应(R)”概念模型, 以连云港市为例, 构建海岸带综合生态承载力评价指标体系, 并对 2005—2014 年间连云港市的综合生态承载力进行评价。结果显示: 连云港市海岸带综合生态承载力呈现逻辑斯蒂式波动上升趋势, 2005—2007 年处于超载状态, 2008—2011 年基本处于平衡状态, 2012 年后处于可载状态。对影响承载力的主要因素进行贡献度分析的结果表明: 负向指标中, 海岸带环境压力大于人口压力; 正向指标中, 海岸带经济发展水平及科技支撑条件的贡献呈上升趋势, 海岸带可利用资源波动下降。结合相关分析和因子分析, 得出海岸带环境压力、科技支撑条件及经济发展水平是制约综合承载力的关键因素。研究结果对海岸带地区环境管理及可持续发展政策制定具有重要意义。

关键词: 海岸带; 复合生态系统; 连云港; 综合生态承载力; 生态评估

Integrated assessment of ecological carrying capacity in coastal cities: a case study in Lianyungang

CUI Haotian^{1,2}, HE Guizhen^{1,2}, LU Yonglong^{1,2,*}, YUAN Jingjing¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

Abstract: Coastal cities are key areas for human settlement and exploitation of marine resources. With human activities extended to the sea, the coastal ecosystem has been affected to a certain extent. The comprehensive coastal ecological carrying capacity (CECC) reflects the integrated impacts of environmental, economic and social activities on coastal ecosystems, which is very important for evaluating coastal ecosystem health and formulating environmental management policies. We applied "pressure(P)—state(S)—response(R)" conceptual model to construct a comprehensive assessment index system for measuring ecological carrying capacity. Combing the Entropy value method with Delphi method for weighing the indicators, together with space—state model, we calculated the comprehensive ecological carrying capacity (CECC) of Lianyungang city from 2005 to 2014. Results showed that: (1) The comprehensive ecological carrying capacity in Lianyungang city has been increasing with fluctuation, from 0.374–0.831, with an annual growth rate of 10.47%. (2) The comprehensive ecological carrying capacity was overloaded from 2005 to 2007, in a state of equilibrium from 2008 to 2011,

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0505801); 国家自然科学基金项目(71761147001, 41877529); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-322)

收稿日期: 2019-02-13; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yllu@rcees.ac.cn

and below the limits after 2012. In addition, using the contribution ratio analysis of different factors, their contributions to the comprehensive carrying capacity were also estimated: (1) The contribution of coastal environmental pressure was more significant than population growth. (2) The coastal resource availability fell from 32.08% to 9.84%. (3) The coastal zone economic development, social and technology support were on the rise as a whole. Through correlation analysis and factor analysis, we found that the coastal environmental pressure, technological support and economic development were the key factors restricting the comprehensive ecological carrying capacity. The assessment results can be used as a scientific basis for formulation of long-term coastal sustainable development plans and environmental management policies.

Key Words: coastal zone; complex ecosystem; Lianyungang; comprehensive ecological carrying capacity; ecological evaluation

承载力最早起源于古希腊时代的工程力学领域,是指建筑物不发生破坏时的最大荷载能力^[1]。随着资源短缺、生态破坏等问题的出现,生态学家 Park、Burgess 和 Odum 首次在生态环境领域提出了承载力 (Carrying Capacity) 的概念^[2-3],研究领域从种群承载力、土地承载力逐渐拓展到区域承载力和生态承载力^[4]。生态承载力不同于单一要素的承载力,它既考虑自然资源与环境的可持续性,同时也关注人类社会经济与生态系统完整性、协调性与相关性,重点关注人类经济社会发展压力与资源环境的关系,并结合相关要素的动态变化以及管理目标具体分析^[5-6]。目前,在国际国内,生态承载力并没有形成科学统一的内涵^[7-8]。随着复合生态系统理论的提出,生态承载力被认为是在资源合理开发利用和环境良性循环的条件下复合生态系统的承载能力与压力的反映^[7-9],并逐渐成为评估区域生态环境质量的重要指标,广泛应用到陆地生态系统功能评价中^[7]。

海岸带是海陆相互作用的过渡地带,是人类活动密集的生态脆弱带,也是社会经济最为活跃的区域。全球海岸带以地球表面积的 20% 养育着全球约 50% 的人口^[10],且仍有继续上涨的趋势^[11]。随着人类活动向海洋的不断拓展,全球范围约 41% 的海岸带受到人类活动的强烈影响^[12]。我国海岸带地区聚集了大约 60% 的人口和三分之二的大中型城市。近些年来,海岸带地区的城市化和工业化进程加速,然而区域发展缺乏科学规划,导致过度及不良空间竞争,资源环境压力大,区域产业结构不合理,污染排放总量不断增加,对近海生态系统产生了日益严重的影响^[13-14]。国内外学者针对海岸带污染胁迫与响应、海域综合评价、生态脆弱性、生态敏感性、生态系统健康等方面开展了一系列研究^[15-19],其工作重点主要是对海岸带城市环境质量进行承载力的评价,或者是对地质环境、水产养殖、滨海旅游承载力等某一特定方面进行研究^[20-24]。

然而,海岸带生态系统属于典型的“社会—经济—自然”复合生态系统,它的承载力涉及到生态、经济、社会等很多方面,单一指标、静态分析往往难以评价复合生态系统的持续发展问题,所以需要构建指标体系进行多目标分析以及动态综合评价^[25]。因此,本文提出综合生态承载力 (CECC) 概念,指的是在一定时空尺度下,特定区域的自然资源、环境质量、生产消费、基础设施、科技创新等方面共同支撑区域可持续发展的能力。通过构建 P(压力)—S(状态)—R(响应) 概念模型,分析社会—经济—自然不同要素与生态系统综合承载力的关系,以连云港为例定量评价城市生态承载力,为沿海地区科学合理地进行产业结构优化调整及海陆环境管理提供技术支撑。

1 研究区域与方法

1.1 研究区概况

连云港位于江苏省东北部,北纬 33°59′—35°07′、东经 118°24′—119°48′之间。东濒黄海,与韩国、日本隔海相望,北与山东日照市接壤,西与山东临沂市毗邻,海域面积 6677 km²,海岸线长度 204.817 km。

连云港经济发展位居江苏省前列,2015 年连云港地区生产总值、工业增加值、工业用电量、社会消费品零售总额等增幅全省第一,工业投资增幅全省第三^[26]。连云港作为长江三角洲的重点发展区域,北接渤海湾,

西依大陆桥,处于连接新亚欧大陆桥产业带、亚太经济圈、环渤海经济圈和长三角经济圈的“十字结点”位置,同时又是国家“一带一路”建设重点发展区域,在全省乃至全国的地理位置与经济地位十分重要^[27]。随着《江苏沿海地区发展规划(2009—2020年)》等战略规划的实施,连云港的发展迎来了新的战略机遇,同时也面临资源与环境的严峻挑战^[28]。

1.2 综合生态承载力评价模型

1.2.1 模型构建的假设

本文采用的 P—S—R 概念模型基于海岸带环境压力、海岸带城市经济社会发展现状以及人类和生态系统共同做出的响应三者间的因果关系链条,突出展现人类活动对海岸带生态系统的影响。模型的建立主要基于以下三个假设:

(1)模型由压力指标和单向承压指标共同支撑,使承载状态保持稳定;(2)模型假设在某一连续的时间段内,环境、资源、经济要素呈线性变化,国家和区域政策导向相对稳定;(3)模型假设生态承载力在有单向外力的支持下可以保持健康发展,当某一方向的外力不足时,生态承载力降低,生态系统出现退化。

1.2.2 指标体系的构建

综合生态承载力指标体系应体现连云港作为海岸带城市的发展特点以及社会-经济-自然子系统间的耦合关系,但任何一个承载力评价指标体系都难以完全涵盖影响该城市承载力大小的各项因素。本文遵循科学性、全面性、层次性、独立性、动态性、可操作性等基本原则,构建 P—S—R 模型指标体系。

在 P—S—R 模型框架内,海岸带城市生态承载力具体指标的选取主要取决于以下三个方面:

一是压力层面,反映的是人类社会经济活动对海岸带生态系统造成的负荷,主要包括当前海岸带城市面临的环境问题及人口压力等,如万元 GDP 工业 COD 排放强度、人口密度等。

二是状态层面,反映的是生态系统结构功能以及区域环境质量的现状,主要包括当前海岸带城市的资源环境现状、经济社会发展水平、重点海洋产业的发展能力等,如海洋渔业总产值、港口货物吞吐量等。

三是响应层面,反映的是人类面临环境问题,为保持和提高生态系统稳定性、服务功能及承载能力采取的的必要措施,主要包括当前国家和地方政府制定的海岸带社会及科技支撑政策,如污水处理率、研发经费投入占 GDP 比重、高新技术产业产值^[29]等。

在具体指标的筛选过程中,为了确保指标选取的科学性、系统性,避免各指标间的重复性,在考虑数据可得性的同时,参考国内外大量文献,通过实地调研以及专家研讨,充分考虑海岸带城市的环境压力、资源供给及经济发展特点,将人类经济社会活动与生态环境变化有机结合在一起,最终确定了 4 层 23 个具体指标(表 1)。

1.2.3 评估数学模型

国内外对生态承载力进行定量评估的模型有海岸带综合管理周期模型、净初级生产力模型、生态足迹模型、状态空间模型等^[30-31]。其中,状态空间模型可以综合评价社会、经济、自然等多方面的影响因素,适合本文基于 P—S—R 概念模型建立的综合评价体系,因此选用状态空间模型进行数据的定量描述。

状态空间模型中的承载状态点(图 1)(图中 A、B、C 点),表示一定时间段内生态承载力的不同状况。任何低于该曲面的点(如图中 B、C 点)代表某一特定资源环境组合下,该区域处于平衡或可载状态,而任何高于该曲面的点(如图中 A 点)则表明人类活动导致该区域处于超载状态,生态承载力评估的最终目的就是要在可持续发展的原则下,使曲面上任意一点的配置达到均衡^[32-33]。

1.2.4 可载性判断

通过比较空间原点到该状态点和状态点在 $X_{\max} O Y_{\max}$ 上的投影之间的矢量模的大小判定空间内一点同曲面 $X_{\max} O Y_{\max}$ 间的位置关系,该区域的综合生态承载能力可由矢量在坐标轴上的模计算得出^[34]。由于同一指标年际变化相对稳定,且指标之间存在一定的相互作用关系,因此,本文拟采用指标的平均值作为其理想值。基于状态空间模型的海岸带生态承载力的实际值与理想值的计算公式如下:

表 1 海岸带生态承载力综合评价指标体系

Table 1 Comprehensive evaluation index system of coastal ecological carrying capacity

| 目标层 Object layer | 准则层 Rule layer | 因素层 Factor layer | 指标层 Indicator layer | 组合权重 Combination weight | |
|--|-------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------|--------|
| 海岸带生态承载力综合评价 Comprehensive evaluation of coastal ecological carrying capacity | 压力层(P) | 海岸带环境压力 | 万元 GDP 工业 COD 排放强度 | 0.0430 | |
| | | | 万元 GDP 工业 SO ₂ 排放强度 | 0.0383 | |
| | | | 万元 GDP 工业废气排放强度 | 0.0422 | |
| | | | 万元 GDP 工业废水排放强度 | 0.0464 | |
| | | | 万元 GDP 工业固废排放强度 | 0.0385 | |
| | 状态层(S) | 海岸带人口聚集度 | 人口密度 | 0.0601 | |
| | | | 旅游人次 | 0.0401 | |
| | | | 人均 GDP | 0.0536 | |
| | | 海岸带经济发展水平 | 海洋渔业总产值 | 0.0580 | |
| | | | 港口货物吞吐量 | 0.0482 | |
| | | | 海洋产品产量 | 0.0417 | |
| | | | 海岸带可利用资源 | 海岸带植物初级生产力 | 0.0433 |
| | | | | 人均海岸带长度 | 0.0542 |
| | | | | 人均水资源量 | 0.0392 |
| | | | | 森林覆盖率 | 0.0396 |
| | 响应层(R) | 社会支撑条件 | 人均公园绿地面积 | 0.0318 | |
| | | | 工业固废综合利用率 | 0.0301 | |
| | | | 城市绿化覆盖率 | 0.0421 | |
| | | | 污水处理率 | 0.0451 | |
| | | | 外资投入(整体) | 0.0326 | |
| 科技支撑条件 | | "三废"综合利用产品产值/亿元 | 0.0425 | | |
| | | 研发经费投入占 GDP 比重 | 0.0419 | | |
| | | 高新技术产业产值 | 0.0478 | | |

实际值:

$$CECC = \sqrt{\sum_{i=1}^m \omega_i \chi_i^2} \quad (1)$$

理想值:

$$CECC' = \sqrt{\sum_{i=1}^m \omega_i \bar{\chi}_i^2} \quad (2)$$

式中: m 为指标的个数; ω_i 表示第 i 个指标的权重; χ_i 表示第 i 个指标的值; $\bar{\chi}_i$ 表示第 i 个指标的平均值; $CECC$ 表示综合生态承载力实际值, $CECC'$ 表示综合生态承载力理想值。

根据状态空间模型,将生态承载力状况分为 3 个级别,即可载、满载、超载。生态承载力综合判定标准如下:

当 $CECC > CECC'$ 时,可载;

当 $CECC' - r \leq CECC \leq CECC' + r$ 时,满载;

当 $CECC < CECC' - r$ 时,超载。

其中,根据海岸带区域综合承载力已有的容差研究结果^[21],结合评价区域调研及专家建议,将容差 r 取 0.1。

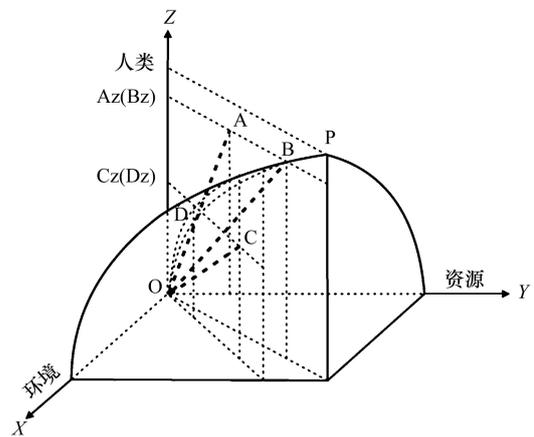


图 1 状态空间法评价模型

Fig.1 Spatial-State evaluation model

1.3 数据来源与处理

1.3.1 数据来源

本文通过选取 2005—2014 年 10 年间连云港市的社会、经济、环境等方面的数据构建综合生态承载力评价模型, 为确保评估体系的类比性及可靠性, 本文的数据主要通过以下几个渠道获得: 生态环境数据主要来源于《江苏省环境统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》及部分以往的研究数据; 社会经济数据主要来源于《江苏省统计年鉴》、《连云港市统计年鉴》、《连云港市国民经济与社会发展统计公报》以及各年度的《连云港市政府工作报告》等。

1.3.2 数据预处理

指标层中的各项指标相互之间在数据特征、数量级及量纲上存在着差异, 为了保证指标间可以进行对比, 运用极差法对指标进行无量纲化处理。根据指标内容, 将指标分为成本性指标与效益性指标两大类, 成本性指标为压力层下的指标, 与其属性数据成反比关系, 效益性指标与其属性数据成正比关系, 包括状态层和响应层下的指标。具体计算过程如下:

假设有 m 个指标的数据集 $(X_i)_m$, 对于成本性指标, 有:

$$Y_i = \frac{\max(X_i) - X_i}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (3)$$

对于效益性指标, 有:

$$Y_i = \frac{X_i - \min(X_i)}{\max(X_i) - \min(X_i)} \quad (4)$$

式中, Y_i 为指标归一化值, X_i 为指标初始值, $\max(X_i)$ 和 $\min(X_i)$ 分别为指标数据的最大值和最小值。当 $Y_i = 0$ 时, 指标状态最差, 当 $Y_i = 1$ 时, 指标状态最好。

1.3.3 指标权重的确定

某一指标的权重是指该指标在整体评估中的相对重要水平。常用的权重确定方法分为主观赋权法和客观赋权法两类。两种方法各有优劣^[34]。因此, 本文采用主客观组合赋权的方法, 通过德尔菲法与熵值法分别计算指标权重, 在吸纳专家经验和建议的同时, 结合数据本身的属性, 从而尽量避免两种方法的缺点, 充分发挥其优势, 计算其组合权重。

(1) 熵值法。熵值法赋权已相对成熟, 在此不再对其具体过程赘述。

(2) 德尔菲法。具体的实现过程如下:

①从环境科学与生态学领域邀请 10 位专家进行首轮打分, 对分数进行统计分析, 采访部分专家听取其意见和建议。然后, 将首轮专家打分的统计分析结果整理出详细报告, 再次征询专家意见并依据反馈报告修改意见, 经过若干轮反馈, 专家意见逐渐趋向统一。

②计算权重。计算专家对各指标赋分的平均值, 再对其进行归一化处理, 具体计算过程如下:

$$d_i = \frac{x_{1i} + x_{2i} + x_{ji} \cdots + x_{10i}}{10} \quad (5)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (6)$$

式中, d_i 表示 10 位专家对第 i 个指标赋分的平均值, x_{ji} 表示第 j 个专家对第 i 个指标所赋分值。

本研究结合上述两种方法, 通过组合权重的计算方法, 保证指标权重的主观性与客观性, 计算方法如下:

$$w_j^* = \alpha w_{jm} + (1 - \alpha) w_{jn} \quad (7)$$

式中, 组合权重为 w_j^* , 熵值法所赋权重为 w_{jm} , 德尔菲法所赋权重为 w_{jn} , α 为熵值法权重占组合权重的比例, $(1 - \alpha)$ 为德尔菲法权重占组合权重的比例。根据迟国泰等人的研究结果, 最佳的组合权重结果是主观权重和客观权重各占 50%^[35], 本文 α 取 0.5。

1.3.4 数据分析方法

(1) 贡献度判断

为具体分析引起连云港综合生态承载力变化的原因,本文引入“贡献度”的概念。所谓“贡献度”,就是指不同因素层指标的承载力占综合承载力的百分比,可用于分析导致承载力满载或超载的具体因素。因素层的指标贡献度越大,对生态承载力有促进作用;反之,对生态承载力有抑制性作用。公式如下:

$$CECC_k = \sqrt{\sum_{i=1}^j \omega_i \chi_i^2} \quad (8)$$

$$R_k = \left(\frac{CECC_k}{CECC} \right)^2 \times 100\% \quad (9)$$

式中, χ_i 表示第 i 个指标的值, j 表示因素层中具体指标的个数, $CECC_k$ 表示因素层指标的承载力, R_k 表示因素层指标对综合生态承载力的贡献度。

(2) 相关与因子分析

相关分析是一种研究两个或两个以上同等地位随机变量间的相关关系的统计分析方法,可以体现总体间的因果关系,其结果表示变量间相互关系的密切程度。本研究通过相关分析,探究综合生态承载力与因素层指标间的依赖性,分析影响承载力的关键因素。

因子分析是指研究从变量群中提取共性因子的统计技术,可用于确定多变量之间的联系。因子分析的结果将相关比较密切的几个变量归位同一类因子并找到有代表性的变量。通过因子分析,我们可以确定变量与因子之间的相关系数,从而反映变量对于总体的重要性。

本研究中,相关性与因子分析均通过 SPSS 22.0 软件进行分析计算,计算过程不再赘述^[36]。

2 结果与分析

2.1 综合生态承载力分析

本文以连云港市为评价单元,计算 2005—2014 年间的综合生态承载力,得到连云港市 10 年间综合生态承载力的变化趋势,结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,连云港市海岸带综合生态承载力总体呈现波动上升趋势,10 年间的平均增幅达到 10.4%。其中,2007—2008 年涨幅最大,同比增长 46.59%,2006—2007 年的涨幅也达到了 26.64%。2008—2011 年的四年时间里其承载力出现不稳定波动,并呈现小幅下降,2011 年后承载力空间重新呈现上升趋势并趋于稳定,但增长速度有所减慢,这种波动式阶梯逻辑斯蒂上升模式符合多数城市的发展模式^[37]。

根据综合生态承载力判定标准,设置生态承载力理想值的误差线为 0.1,可以得出,2005—2007 年连云港海岸带生态承载力小于理想值,处于超载状态,2008—2011 年的生态承载力基本处于平衡状态附近,2012 年后的生态承载力大于理想值,处于可载状态。

2.2 贡献度判断

本文通过贡献度分析,分别探讨因素层 6 个指标影响综合承载能力的差异。

压力层两个影响因素属于成本性指标,其贡献度如图 3 所示。10 年间连云港海岸带环境压力的贡献度呈现先上升后下降的态势,2009 年环境压力的贡献度最大。这说明随着初期沿海工业的不断发展,各类污染

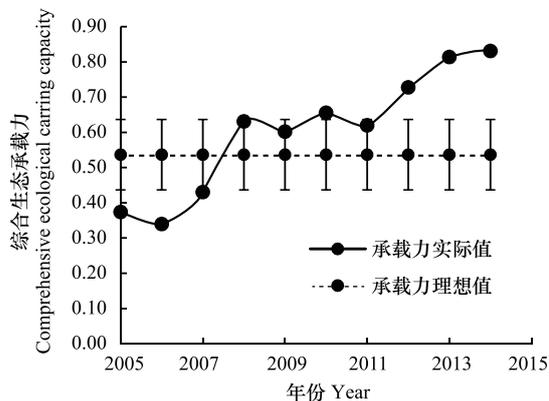


图 2 连云港综合生态承载力变化趋势

Fig.2 The temporal change of comprehensive ecological carrying capacity in Lianyungang

物的排放成为破坏生态系统平衡的重要因素。随着“十一五规划”的实施,倡导沿海地区转变经济增长方式,实现可持续发展。2007年后连云港市大力发展节能环保产业、推广低碳经济,开发清洁能源,加强水源保护及海洋综合管理并疏散中心城区人口,使污染排放对生态承载力的影响逐渐减弱。但是,2009年后环境压力的整体贡献程度进一步下降,说明环境压力综合指标逐渐减小,各类环境污染物排放再次增加,抑制了生态系统承载力的上升趋势。另一方面,海岸带人口聚集度的贡献度在2006年小幅上升后,总体呈下降趋势,2012年后趋于平稳。在2008年之前,海岸带人口聚集度大于海岸带环境压力的贡献度,说明2008年之前发展压力主要来源于人口,而在2009年以后连云港逐渐控制人口增长,虽然旅游人次有所增加,但总体趋于稳定。随着沿海工业的迅速发展,2008年后生态系统的主要压力来源逐渐变为环境压力并且始终大于人口聚集度,再次印证各类工业污染物的排放成为限制连云港生态环境可持续发展的重要因素。

状态层两个影响因素的贡献度如图4所示。2005—2014年连云港市海岸带经济发展水平尤其是港口经济的贡献度呈现上升趋势,2014年达到29.19%。而海岸可利用资源的贡献度呈波动下降趋势,从2005年的32.08%下降到2014年的9.84%,其中以人均可利用水资源的减少最为显著。这说明连云港作为沿海港口城市,其海洋经济产业及海岸带资源拥有重要地位,必须合理开发并加以保护。在2010年之前,海岸带可利用资源的贡献度大于海岸带经济发展水平,说明2010年之前连云港的发展以海岸带自然资源为依托,为整体经济发展提供了重要保障,但是随着海岸带可利用资源的减少,其经济发展模式逐渐转变,已经不单纯依赖于资源支撑,逐渐转向科技支撑。

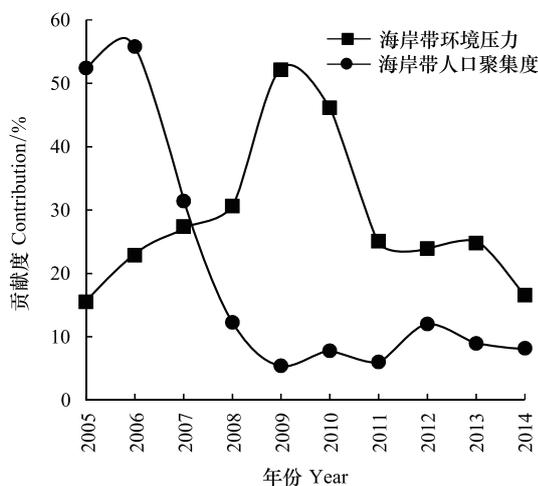


图3 压力层二级指标贡献度

Fig.3 Contribution of the secondary indicators at “pressure” level

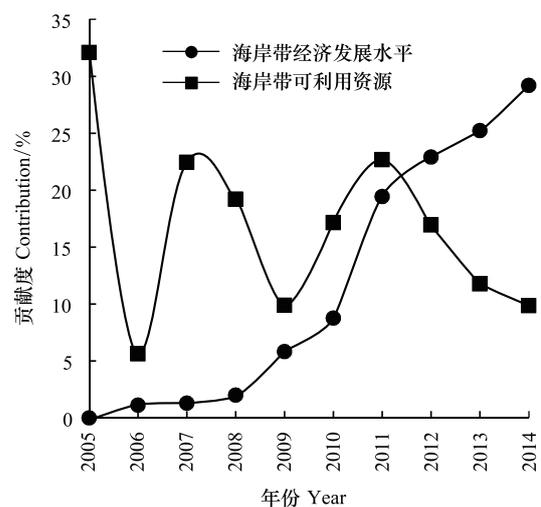


图4 状态层二级指标贡献度

Fig.4 Contribution of the secondary indicators at “state” level

图5显示了响应层两个影响因素的贡献度,结果表明,10年间连云港社会支撑条件的贡献度先上升再缓慢下降又上升,2008年最高为32.2%,2010年为15.39%,2014年又上升到23.21%,说明2008年之前连云港大力发展城市基础设施建设,拓展城市空间,通过积极对接国家推动江苏沿海开发的战略部署,广泛招商引资,城市化建设取得突破性进展,社会支撑条件迅速提升,但是随着基础设施的日益完善,其对于综合承载力的贡献度逐渐下降。2012年后,由于注重污染物综合治理与利用、外资引进等方面的工作,社会支撑条件的贡献度小幅上涨。而科技支撑条件的贡献度呈持续上升趋势,2014年达到13%。连云港针对环境污染和生态破坏的压力,在国家和区域政策的支持下,进行了经济转型和产业结构调整,注重高新技术产业的发展,推行科技强市的战略方针,其创新研发投入与高新技术产业产值逐渐增加,为生态承载力的提升打下了基础,但是目前的整体科技支撑条件仍相对薄弱,如研发经费投入与高新技术产业产值占比不高,有进一步提升的空间。

2.3 综合生态承载力的关键因素分析

为进一步分析影响综合生态承载力的关键因素,对因素层的 6 个二级指标进行 Spearman 秩相关分析,结果如表 2 所示,在相关分析的过程中,我们发现状态层的海岸带经济发展水平与响应层的科技支撑条件与综合生态承载力呈极显著正相关,而海岸带经济发展水平、社会支撑条件和科技支撑条件三个变量相互之间可能由于存在一定的自相关性导致其存在极显著正相关关系,在此通过因子分析进一步判断。

在进行相关性检验的基础上,对因素层的 6 个指标进行因子分析,进一步验证结果的准确性,得出 $KMO = 0.609, P < 0.05$, 数据满足因子分析条件,结果如表 3 所示,选取特征根 $\lambda > 1$,可以得到两个主成分,其累积贡献度为 85.74%,分析因子载荷矩阵可得海岸带经济发展水平、海岸带可利用资源、社会支撑条件和科技支撑条件具有一定的自相关性,同为第一因子,根据因子载荷矩阵(表 4)的计算结果,科技支撑条件和经济发展水平的因子载荷量最大,分别为 0.980 和 0.951,因此在正向指标层面上,科技支撑条件和海岸带经济发展水平对于综合生态承载力的影响居于主导地位,而负向指标层面上,人口聚集度对于综合生态承载力的影响并不显著。因此,结合贡献度分析及相关分析的计算结果,可以明确得出海岸带环境压力、科技支撑条件及经济发展水平在未来将成为制约连云港市综合生态承载力的三个关键因素,需要在未来的政策调整中给予重点关注。

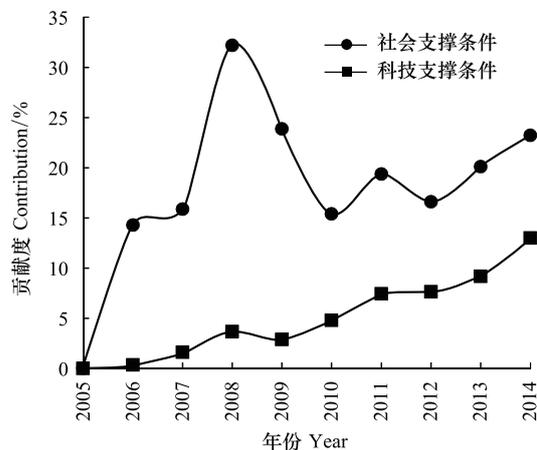


图 5 响应层二级指标贡献度

Fig.5 Contribution of the secondary indicators at "response" level

表 2 主要因素相关分析结果

Table 2 Correlation analysis of major factors

| 相关分析 correlation analysis | 海岸带 环境压力 Coastal environmental pressure | 海岸带人 口聚集度 Coastal population | 海岸带经济 发展水平 Coastal economic development level | 海岸带可 利用资源 Coastal available resources | 社会支 撑条件 Social supporting conditions | 科技支 撑条件 Science and technology supporting conditions |
|---|---|---------------------------------------|--|---|--|---|
| 综合生态承载力 Comprehensive ecological carrying capacity | -0.612 | -0.236 | 0.927 ** | 0.661 | 0.879 * | 0.952 ** |
| 海岸带环境压力 Coastal environmental pressure | 1.000 | -0.588 | 0.564 | 0.333 | 0.539 | 0.527 |
| 海岸带人口聚集度 Coastal population | | 1.000 | -0.321 | -0.103 | -0.333 | -0.285 |
| 海岸带经济发展水平 Coastal economic development level | | | 1.000 | 0.624 | 0.842 ** | 0.988 ** |
| 海岸带可利用资源 Coastal available resources | | | | 1.000 | 0.503 | 0.685 * |
| 社会支撑条件 Social supporting conditions | | | | | 1.000 | 0.867 ** |
| 科技支撑条件 Science and technology supporting conditions | | | | | | 1.000 |

** . 在 $P < 0.01$ (双侧), 相关性显著; * . 在 $P < 0.05$ (双侧), 相关性显著

表 3 因子分析结果

Table 3 Factor analysis result

| 因子 Factor | 特征根 Characteristic root | 贡献度 Contribution/% | 累积贡献度 Cumulative contribution/% |
|--------------|----------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| 1 | 3.976 | 66.26 | 66.26 |
| 2 | 1.169 | 19.48 | 85.74 |
| 3 | 0.476 | 7.93 | 93.67 |
| 4 | 0.238 | 3.96 | 97.63 |
| 5 | 0.135 | 2.26 | 99.89 |
| 6 | 0.007 | 0.11 | 100.00 |

表 4 因子载荷矩阵

Table 4 Factor loading matrix

| | 因子 Factor | |
|---|-----------|--------|
| | 1 | 2 |
| 海岸带环境压力 Coastal environmental pressure | 0.636 | 0.687 |
| 海岸带人口聚集度 Coastal population | -0.013 | -0.966 |
| 海岸带经济发展水平 Coastal economic development level | 0.951 | 0.016 |
| 海岸带可利用资源 Coastal available resources | 0.761 | 0.182 |
| 社会支撑条件 Social supporting conditions | 0.844 | 0.369 |
| 科技支撑条件 Science and technology supporting conditions | 0.980 | 0.082 |

3 结论与建议

本文充分考虑人类社会经济活动对海岸带生态系统造成的各种影响,建立了海岸带城市综合生态承载力评价的具体指标,将 P(压力)—S(状态)—R(响应)综合评估模型与状态空间模型相结合,以连云港市为基本评价单元,通过贡献度分析、相关分析及因子分析,提出海岸带城市综合生态承载力及其关键影响因素评价方法,为海岸带城市综合承载力研究提供了新的研究思路。

首先,本文通过构建多重指标体系,结合熵值法与德尔菲法,对承载力的指标权重进行组合修正,保证评价结果的准确性与科学性。研究表明:(1)连云港海岸带综合生态承载力呈现阶梯逻辑斯蒂上升趋势。(2)2005—2007 年生态承载力处于超载状态,2008—2011 年基本处于平衡状态附近,2012 年后处于可载状态。(3)虽然 2011 年以来生态承载力呈现明显上升趋势,但是其增长速率在逐渐减慢。

其次,本文对因素层指标进行贡献度分析,探讨不同因素对综合承载力的影响强度,可以得出:连云港市海岸带环境压力和人口聚集度先降后升,海岸带可利用资源波动下降,海岸带经济发展水平、社会支撑条件以及科技支撑条件整体呈上升趋势,是综合生态承载力上升的关键因素。结合相关分析和因子分析,得出海岸带环境压力、科技支撑条件及经济发展水平是制约综合承载力的关键因素。

从评价结果上看,连云港综合生态承载力变化趋势呈现“U 型”,即“先破坏—后治理”的模式。作为我国重要的沿海城市,连云港经济社会发展模式正是我国众多海岸带城市的典型代表,为了避免生态承载力再度下降,同时为其他海岸带城市提供借鉴经验,提出以下政策建议。

(1) 为减小海岸带环境压力,应当统筹推进陆海环境综合治理,强化主要污染物减排,建立完善污染物排放总量控制制度,推进沿海地区重点耗能企业的改造,淘汰落后产能,大力发展循环经济和节能环保产业,以持续改善环境质量,使生态承载力进一步提升。

(2) 针对海岸带可利用资源减少以及科技支撑能力不强的现状,应充分运用沿海地区良好的地理位置和资源条件,大力发展蓝色海洋经济,优化海洋经济布局,以连云港为核心的江苏沿海港口群建设推动临港工业发展,合理开发促进资源集约高效利用;深化落实创新驱动发展战略,继续保持科技支撑条件稳定提升,增加

研发经费占 GDP 的比重,大力发展科技创新企业,使沿海地区形成以创新为导向的经济发展方式。

(3) 为保障社会支撑条件继续改善,应当进一步完善沿海交通、绿化、水利等基础设施建设,构建规划合理、性能完善、保障有力的绿色基础设施支撑体系,提高生态承载力。

参考文献 (References):

- [1] 刘殿生. 资源与环境综合承载力分析. 环境科学研究, 1995, 8(5): 7-12.
- [2] 王奎峰, 李娜, 于学峰, 王岳林, 刘洋. 基于 P-S-R 概念模型的生态环境承载力评价指标体系研究——以山东半岛为例. 环境科学学报, 2014, 34(8): 2133-2139.
- [3] 唐剑武, 叶文虎. 环境承载力的本质及其定量化初步研究. 中国环境科学, 1998, 18(3): 227-230.
- [4] 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.
- [5] 隋欣, 齐晔. 黄河流域青海片生态承载力动态评价. 生态学杂志, 2007, 26(3): 406-412.
- [6] 张林波. 城市生态承载力理论与方法研究——以深圳为例. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [7] Rajaram T, Das A. Screening for EIA in India: enhancing effectiveness through ecological carrying capacity approach. Journal of Environmental Management, 2011, 92(1): 140-148.
- [8] Xu L Y, Xie X D. Theoretic research on the relevant concepts of urban ecosystem carrying capacity. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 863-872.
- [9] 赵东升, 郭彩霞, 郑度, 刘磊, 吴绍洪. 生态承载力研究进展. 生态学报, 2019, 39(2): 399-410.
- [10] ICRI. Reefs at Risk Revisited - Regional Key Points. <https://www.icriforum.org/news/2011/02/reefs-risk-revisited-regional-key-points>.
- [11] EEA. The Changing faces of Europe's coastal areas. EEA Report 6/2006. OPOCE, Luxembourg. https://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_6.
- [12] Halpern B S, Walbridge S, Selkoe K A, Kappel C V, Micheli F, D'Agrosa C, Bruno J F, Casey K S, Ebert C, Fox H E, Fujita R, Heinemann D, Lenihan H S, Madin E M P, Perry M T, Selig E R, Spalding M, Steneck R, Watson R. A global map of human impact on marine ecosystems. Science, 2008, 319(5865): 948-952.
- [13] 赵国杰, 张炜熙. 海岸带社会经济脆弱性研究. 统计与决策, 2006, (05): 12-14.
- [14] 吕永龙, 苑晶晶, 李奇锋, 张悦清, 吕笑天, 苏超. 陆源人类活动对近海生态系统的影响. 生态学报, 2016, 36(5): 1183-1191.
- [15] Song D M, Zang L, Liu C X, Shi X F, Wu H S. Evaluation of geologic bearing capacity of coastal zones taking coastal area of Laizhou Bay as an example. Ocean & Coastal Management, 2016, 134: 129-139.
- [16] 韩立民, 罗青霞. 海域环境承载力的评价指标体系及评价方法初探. 海洋环境科学, 2010, 29(3): 446-450.
- [17] 崔力拓, 李志伟. 河北省海域承载力多层次模糊综合评价. 中国环境管理干部学院学报, 2010, 20(2): 26-30, 47-47.
- [18] 于谨凯, 杨志坤. 基于模糊综合评价的渤海近海海域生态环境承载力研究. 经济与管理评论, 2012, 28(3): 54-60.
- [19] 宁立新, 马兰, 周云凯, 白秀玲. 基于 PSR 模型的江苏海岸带生态系统健康时空变化研究. 中国环境科学, 2016, 36(2): 534-543.
- [20] Newton A, Weichselgartner J. Hotspots of coastal vulnerability: a DPSIR analysis to find societal pathways and responses. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, 140: 123-133.
- [21] 魏超, 叶属峰, 过仲阳, 刘汉奇, 邓邦平, 刘星. 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. 生态学报, 2013, 33(18): 5893-5904.
- [22] 李延峰, 宋秀贤, 李虎, 吴在兴, 俞志明. 山东半岛蓝色经济区海域生态环境综合评价. 环境科学研究, 2014, 27(5): 560-566.
- [23] 张鹏, 张惠荣, 杨红, 李珺. 海域生态承载力评价指标体系研究——以南通市为例. 海洋环境科学, 2017, 36(1): 143-148.
- [24] Gari S R, Newton A, Icely J D. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. Ocean & Coastal Management, 2015, 103: 63-77.
- [25] 赵景柱. 社会—经济—自然复合生态系统持续发展评价指标的理论研究. 生态学报, 1995, 15(3): 327-330.
- [26] 连云港市 2015 年国民经济和社会发展统计公报. [2016-03-14]. http://www.lyg.gov.cn/zglyzfmhzw/gsgg/content/5BC1F1BF86E3409080A19E83A8D49725_1479881215214.temp.
- [27] 连云港市人民政府. 自然地理. (2019-03-11). <http://www.lyg.gov.cn/zglyzfmhzw/zrdl1/zrdl1.html>.
- [28] 江苏省环境状况公报(2015). (2016-05-30). http://hbt.jiangsu.gov.cn/art/2016/5/30/art_1649_3939934.html.
- [29] 吴向阳, 韦雪娇. 我国民营企业研发投入与产出质量的现状分析. 中国统计, 2014, (7): 21-23.
- [30] 樊杰, 王亚飞, 汤青, 周侃. 全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程. 地理科学, 2015, 35(01): 1-10.
- [31] 向芸芸, 蒙古军. 生态承载力研究和应用进展. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2958-2965.
- [32] 毛汉英, 余丹林. 区域承载力定量研究方法探讨. 地球科学进展, 2001, 16(4): 549-555.
- [33] 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.
- [34] 山成菊, 董增川, 樊孔明, 杨江浩, 刘晨, 方庆. 组合赋权法在河流健康评价权重计算中的应用. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(6): 622-628.
- [35] 迟国泰, 祝志川, 张玉玲. 基于熵权-G1 法的科技评价模型及实证研究. 科学学研究, 2008, 26(6): 1210-1220.
- [36] 陈东景, 马安青, 徐中民, 程国栋. 因子分析法在水质评价中的应用. 水文, 2002, 22(3): 29-31.
- [37] Button K. City management and urban environmental indicators. Ecological Economics, 2002, 40(2): 217-233.