

# 海洋生态环境承载力研究——以深圳东部海域为例

刘锦怡<sup>1</sup>, 陈斯典<sup>2</sup>, 江天久<sup>1</sup>

(1. 暨南大学 赤潮与海洋生物学研究中心, 水体富营养化与赤潮防治广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632; 2. 北京大学 深圳研究生院环境与能源学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:**随着沿海城市经济快速发展, 海洋资源消耗、海洋环境污染和海洋生态破坏等问题日益突出。作为衡量海洋可持续发展的主要手段之一, 承载力的量化研究至关重要。本研究基于“压力-状态-响应”(P-S-R)概念模型, 构建了海洋生态环境承载力评价指标体系; 运用主成分分析法(PCA)、熵值法和等权重法对评价指标分别赋权, 建立了状态空间评价模型, 并以深圳东部海域为例对生态环境承载状况进行实证分析, 得出深圳东部海域超载的主要原因, 为海洋资源的可持续利用提供科学依据。

**关键词:**海洋生态环境承载力; 量化; 主成分分析法; 状态空间模型

中图分类号: X171.4 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2017)04-0560-06

## Research on marine eco-environmental carrying capacity —a case study in eastern coast ocean of Shenzhen

LIU Jin-yi<sup>1</sup>, CHEN Si-dian<sup>2</sup>, JIANG Tian-jiu<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Aquatic Eutrophication and Control of Harmful Algal Blooms of Guangdong Higher Education Institute, Research Center for Harmful Algae Blooms and Marine Biology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory for Urban Habitant Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University at Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** With the rapid economic development in coastal cities, problems such as marine resource consumption, environmental pollution, ecological damage have become increasingly serious. As one of the main means to evaluate the sustainable development of oceans, quantitative research of the eco-environmental carrying capacity is essential. Based on the “Pressure-State-Response” (P-S-R) conceptual model, this research established an evaluation indicator system of the marine eco-environmental carrying capacity. A State-Space evaluation model was constructed using the indicators which were empowered by the principal component analysis (PCA), entropy method and evaluation method in sequence. An empirical analysis of evaluating the eco-environmental carrying capacity of Shenzhen eastern coast ocean was conducted with the State-Space model with the main reasons for the state of overloading identified, which will provide a scientific basis for the sustainable use of marine resources.

**Key words:** marine eco-environmental carrying capacity; quantification; principal component analysis; State-Space evaluation model

深圳东部海域主要包括大鹏湾与大亚湾海域, 滨海旅游和物种资源丰富, 是深圳市面积最大

和保存最完好的滨海资源区, 自然生态景观价值高。自2012年以来, 由大鹏新区政府管制, 下辖

收稿日期: 2016-07-12, 修订日期: 2016-09-24

作者简介: 刘锦怡(1991-), 女, 湖南益阳人, 硕士生, 主要从事海洋生态、环境、资源评价研究, E-mail: jy2101@sina.com

通讯作者: 江天久, 研究员, 博士生导师, E-mail: tjiangtj@jnu.edu.cn

大鹏、南澳、葵涌三个街道办事处。海岸线长 133.22 km,拥有 21 个黄金沙滩;地理位置优越,大亚湾与惠州接壤,大鹏湾与香港新界隔海相望。随着海洋经济的快速发展,深圳东部海域在深港惠经济合作体系中逐渐发挥重大作用。然而,海洋资源的不断开发利用,使得海水入侵、资源锐减和污染加重等问题日益突出,海洋生态环境逐渐处于超载状态<sup>[14]</sup>。

承载力概念初现于 18 世纪末期,主要用来研究资源、环境、人口的可持续发展。1798 年, Malthus 提出资源环境对人口增长起限制作用<sup>[5-6]</sup>。Brush 等人根据土地承载力的内涵,开展了土地资源承载力研究<sup>[7]</sup>。目前承载力的研究领域主要集中在资源、生态、人口等陆地领域,对于海洋生态环境承载力的量化研究较少。海洋生态环境承载力是指在一定的时间范围内,不对海洋资源和生态环境造成重大危害,以可持续发展为原则,海洋生态系统所能承受的最大纳污限度和自我修复能力<sup>[8-9]</sup>。本文以承载力理论为基础,通过构建多层次指标体系和状态空间评价模型,对深圳东部海域生态环境承载力进行量化评价。

### 1 材料与方法

#### 1.1 指标构建原则

本研究以海洋生态环境承载力概念内涵为依据,按以下基本原则构建指标体系<sup>[10-12]</sup>。

①独立性原则:指标间相互独立,并充分反映海洋生态、环境、资源、经济与社会现状之间的关系。

②代表性原则:选择代表性指标,综合反映承载力的状况,突出研究重点。

③可操作性原则:考虑数据获得以及量化的难易程度,尽量选择易于统计计算的相关指标。

④可比性原则:兼顾指标的可比性特点,方便与沿海不同省市进行适当的比较。

#### 1.2 评价指标体系

本研究以 P-S-R 概念模型(图 1)为理论依据,运用 SPSS 统计分析软件,采用线性回归法分析指标间的多重共线性,建立了以“压力”、“状态”、“响应”三个层面的评价指标体系(表 1)。其中压力层包含 12 个指标,状态层包含 9 个指标,响应层包含 7 个指标。压力指标主要指外界条件给生态环境带来的影响,分为正压和负压;状

态指标主要指区域环境的实际状况,例如人均可利用面积、环境现状等;响应指标主要指生态系统在遭受外界压力时所产生的可持续发展的应对措施<sup>[13-14]</sup>。

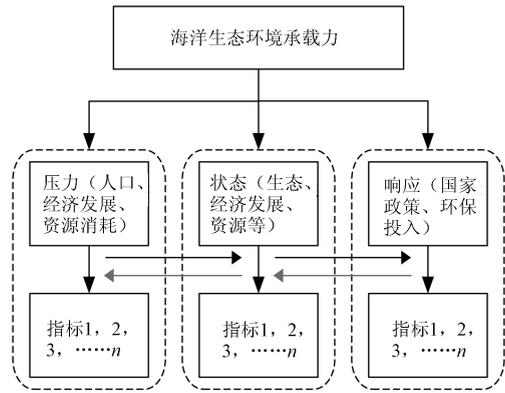


图 1 海洋生态环境承载力 P-S-R 指标体系概念模型  
Fig. 1 The P-S-R concept model for carrying capacity of marine ecology and environment

#### 1.3 承载力量化模型研究

本研究不同于传统的承载力研究方法,采用量化评价模型对承载力定量研究。状态空间法是欧氏几何空间用于定量描述系统状态的一种有效方法,通常由代表系统各要素状态向量的三维状态空间轴组成<sup>[15-16]</sup>,本研究的三维状态空间轴分别为人类活动轴、环境轴和海洋资源轴(状态空间模型如图 2 所示)。状态空间中的原点与系统状态点所构成的矢量模用来定量描述海洋生态系统的承载状况。

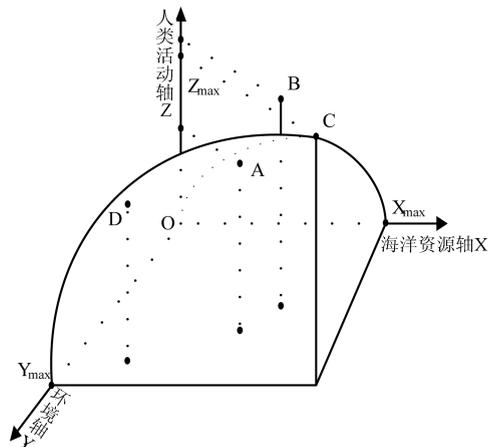


图 2 状态空间评价模型

Fig. 2 The state-space evaluation model

在图 2 状态空间模型中,空间的任何一点均能代表海洋生态系统承载力状况。图 2 中 C 点代表人类活动与海洋生态系统达到理想状态的承载

点, A、B、D 点分别代表不同的人类活动强度下海洋生态环境的承载状况。任何高于该曲面的点代表海洋生态环境系统处于超载状态(例如 B 点), 任何低于该曲面的点代表系统处于可载状态(例如 A、D 点)。因此, 本文以原点与状态点的矢量模代表海洋生态环境承载力大小, 其数学公式如下:

$$CCMEE = |M| = \sqrt{\sum_{i=1}^n w_i x_{ir}^2} \quad (1)$$

式中:  $CCMEE$  为海洋生态环境承载力值 (carrying capacity of marine ecology and environment) 的大小;  $|M|$  代表原点与状态点的矢量模;  $x_{ir}$  为海洋系统中各指标理想状态下的空间坐标值 ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ );  $w_i$  为指标权重;  $n$  为指标数量<sup>[17-18]</sup>。

现实中与理想状态下的海洋生态环境承载力

仍有相当差距, 本研究将现实的海洋生态环境承载力定为  $CSMEE$  (carrying state of marine ecology and environment), 根据模型分析可知:

当  $|CSMEE| > |CCMEE|$  时, 即现实承载力大于理想承载力, 可载;

当  $|CSMEE| = |CCMEE|$  时, 即现实承载力等于理想承载力, 满载;

当  $|CSMEE| < |CCMEE|$  时, 即现实承载力小于理想承载力, 超载;

通过各指标的标准化处理, 假定处理后的指标理想值为:  $1, 1, 1, \dots, 1$  ( $n$  个), 即状态空间中承载力曲面  $X_{\max}OY_{\max}$  ( $O$  为坐标原点) 上任意一点与原点构成的矢量模为 1, 故海洋生态环境承载力理想值为 1, 即  $CCMEE = 1$ ; 当  $|CSMEE| > 1$  时, 可载;  $|CSMEE| = 1$  时, 满载;  $|CSMEE| < 1$  时, 超载。

表 1 深圳东部海域生态环境承载力评价指标体系

Tab. 1 The carrying capacity evaluation indicator system in Shenzhen eastern coast

目标层	准则层面	序号	指标层	单位	指标属性
海洋生态环境承载力	压力(P)	1	人口总数	$10^4$ 人	负
		2	人口密度	人· $km^{-2}$	负
		3	人口自然增长率	%	负
		4	海水养殖面积	$hm^2$	正
		5	GDP 产值	$10^4$ 元	正
		6	海洋水产品产量	t	正
		7	港口货物吞吐量	$10^4$ t	正
		8	旅游景点接纳人数	$10^4$ 人	正
		9	第三产业占 GDP 比例	%	正
		10	COD 浓度	$mg \cdot L^{-1}$	负
		11	万元 GDP 水耗	$m^3 \cdot 万元^{-1}$	负
		12	万元 GDP 电耗	$kW \cdot h \cdot 万元^{-1}$	负
	状态(S)	13	人均用海面积	$km^2 \cdot 万人^{-1}$	正
		14	人均海岸线长度	$km \cdot 万人^{-1}$	正
		15	人均海洋水产品产量	$kg \cdot 人^{-1}$	正
		16	平均气温	$^{\circ}C$	负
		17	平均降水量	mm	正
		18	人均绿化面积	$m^2$	正
		19	人均收入	$10^4$ 元· $人^{-1}$	正
		20	赤潮发生频次	次· $年^{-1}$	负
	响应(R)	21	赤潮发生累计面积	$km^2$	负
		22	环保投入额	$10^4$ 元	正
		23	在校学生数	人	正
		24	科研技术投资额	$10^4$ 元	正
		25	污水处理达标率	%	正
		26	城市污水集中处理率	%	正
		27	生活垃圾年处理量	$10^4$ t	正
		28	污水年处理量	$10^4$ t	正

1.4 指标数据来源及预处理

1.4.1 数据来源

本研究共选取了 28 个评价指标,原始数据主要来源于 2011 ~2015 年《深圳市统计年鉴》、2012 ~2015 年《大鹏国民经济和社会发展统计公报》、《大鹏监测季报》、2011 年《龙岗区统计年鉴》、2013 年《大鹏统计年鉴》等统计数据<sup>[19-23]</sup>,其中 2011 年数据主要取自深圳市龙岗区葵涌、大鹏、南澳三个街道相关数据。

1.4.2 理想值的确定

评价指标理想状态值直接影响承载力的定量计算。因此在确定评价指标理想值时主要考虑以下两点:(1)以区域海洋的可持续发展为准则,兼顾海洋经济、资源与人类生活质量的协调发展;(2)从政府决策着手,考虑区域时间内环境保护与经济持续健康发展。实际操作过程中,本文采取实地调研、专家咨询法,并参照国内外相关标准综合确定各指标理想状态值。

表 2 深圳东部海域生态环境承载力指标权重

Tab.2 The weight of carrying capacity evaluation indicators in Shenzhen eastern coast

指标层	属性	权重值		
		主成分分析法	熵值法	等权重法
人口总数 X1	负	0.0455	0.0274	0.0357
人口密度 X2	负	0.0454	0.0274	0.0357
人口自然增长率 X3	负	0.0274	0.0415	0.0357
海水养殖面积 X4	正	0.0187	0.0579	0.0357
GDP 产值 X5	正	0.0465	0.0349	0.0357
海洋水产品产量 X6	正	0.0104	0.0283	0.0357
港口货物吞吐量 X7	正	0.0117	0.0468	0.0357
旅游景点接纳人数 X8	正	0.0335	0.0378	0.0357
第三产业占 GDP 比例 X9	正	0.0326	0.0321	0.0357
COD 浓度 X10	负	0.0479	0.0262	0.0357
万元 GDP 水耗 X11	负	0.0003	0.0226	0.0357
万元 GDP 电耗 X12	负	0.0101	0.0270	0.0357
人均用海面积 X13	正	0.0461	0.0276	0.0357
人均海岸线长度 X14	正	0.0457	0.0279	0.0357
人均海洋水产品产量 X15	正	0.0188	0.0252	0.0357
平均气温 X16	负	0.0381	0.0258	0.0357
平均降水量 X17	正	0.0300	0.0700	0.0357
人均绿化面积 X18	正	0.0607	0.0358	0.0357
人均收入 X19	正	0.0465	0.0338	0.0357
赤潮发生频次 X20	负	0.0591	0.0348	0.0357
赤潮发生累计面积 X21	负	0.0699	0.0230	0.0357
环保投入额 X22	正	0.0329	0.0392	0.0357
在校学生数 X23	正	0.0332	0.0411	0.0357
科研技术投资额 X24	正	0.0440	0.0432	0.0357
污水处理达标率 X25	正	0.0505	0.0308	0.0357
城市污水集中处理率 X26	正	0.0356	0.0676	0.0357
生活垃圾年处理量 X27	正	0.0195	0.0297	0.0357
污水年处理量 X28	正	0.0394	0.0345	0.0357

1.4.3 数据标准化

评价指标有正负两种类型,属性值越大越好的为正向型指标,属性值越小越好的为负向型指标;由于各因子间的量纲不统一,无可比性,因此需要对评价指标进行标准化处理。不同类型的指

标有不同的标准化计算公式<sup>[24-25]</sup>。

其中正向型指标按下式计算:

$$Z_{ij} = (y_{ij} - y_{jmin}) / (y_{jmax} - y_{jmin}), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \tag{2}$$

式中:  $Z_{ij}$  为标准化指标值;  $y_{jmax}$  为指标  $y_j$  的最

大值; $y_{j\min}$ 为指标 $y_j$ 的最小值。

负向型指标计算公式如下:

$$Z_{ij} = (y_{j\max} - y_{ij}) / (y_{j\max} - y_{j\min}), i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

式中各符号含义同式(2)。

#### 1.4.4 评价指标赋权

不同指标对承载力的影响程度不同,因此指标权重至关重要,直接影响海洋生态环境承载力的评价结果。鉴于专家打分法及经验法的主观性,本文选择主成分分析法(PCA)、熵值法和等权重法这三种客观赋权法对各指标分别赋权,作纵向分析,得到的赋权结果如表2所示。

## 2 结果与讨论

### 2.1 承载力结果

根据表2各指标权重,将标准化后的各指标值代入承载力公式(1)中,计算得到3种不同赋权法下的海洋生态环境承载力量化值,结果见表3。

表3 深圳东部海域承载力量化值

Tab. 3 The carrying capacity in Shenzhen eastern coast

年份	海洋生态环境承载力(CSMEE)			承载力状况
	主成分分析法	熵值法	等权重法	
2011	1.0664	1.0429	1.0464	可载
2012	0.8717	0.8449	0.9151	超载
2013	1.1223	1.0584	1.0377	可载
2014	1.1723	1.2500	1.2212	可载
2015	1.4033	1.4511	1.3725	可载

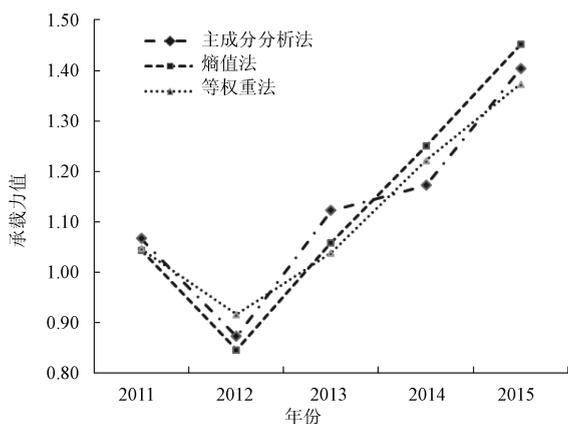


图3 三种赋权法下承载力趋势与对比值

Fig. 3 Trend and comparison of capacity under three weight methods

从图3可见,这3种指标赋权法在对深圳东部海洋生态环境承载力的定量评价中虽然存在部

分差异,但反映的承载状况和趋势相对一致,承载力值均介于0.5~2之间,结果较客观。根据表3中结果可知,2011~2015年期间,深圳东部海域承载状况较理想,仅2012年超载,其他4a海洋生态环境承载力量化值均大于1,处于可载状态,但2011年和2013年承载力值均接近1,处于临界超载状态,2014~2015年海洋生态环境承载力值逐步递增,承载状况得到较大改善。

### 2.2 实证分析

大鹏半岛作为深圳市面积最大,保护最完好的滨海新区,其本身的环境纳污能力和修复功能较强。近年来随着国家生态文明建设政策的提出,深圳市政府加大环保支持力度,调整海洋产业结构,实现资源、人口、生态环境协调发展。这些举措对缓解海洋生态环境压力作用较大,因此,2014~2015年深圳东部海域承载状况趋于好转。

以各指标承载结果为依据,可对深圳东部海域超载和临界超载情况进行比较全面的分析。2012年深圳东部海洋生态环境承载力评价指标中有14个指标值超载,指标超载率高达50%,其中COD浓度、赤潮发生频次和赤潮发生累计面积这3个负指标值远高于理想状态值,科研技术投资额和城市污水集中处理率这2个正指标值远低于理想状态值。2011年和2013年,深圳东部海洋生态环境承载力值均接近1,处于临界超载状态,两年均有11个指标值超载,承载状况较好的2014年和2015年,指标超载量分别为9个和7个。综合2011~2015年各指标情况和权重分析,连续5a超载的负指标主要为:人口自然增长率、COD浓度、万元GDP水耗、万元GDP电耗、平均气温、赤潮发生频次和赤潮发生累计面积等7项,该7项指标均对深圳东部海洋生态环境承载状况产生较大影响,各指标承载力值均低于理想值,其中2012年深圳东部海域发生赤潮6次,累计面积达52.5 km<sup>2</sup>,此两项指标值与其他4a该指标值存在明显差异,可能是导致2012年深圳东部海洋生态环境呈现超载状态的较大因素。赤潮的发生受多种环境因素的影响,水体中营养盐是其发生的物质基础,因而其发生频率和规模可以表征水体中富营养化水平及环境承压的程度。2012年深圳全年降水偏少,局部暴雨较多,水体纳污自净能力降低,加之污水处理设施不足,COD和营养盐水平急剧上升,因而2012年深圳东部海域赤潮

发生较频繁,海域生态环境超载现象突出。2011~2013年,环保投入额、科研技术投资额、城市污水集中处理率、生活垃圾年处理量、污水年处理量等5项正指标值均低于理想值,东部海域承压能力较弱,可能缘于大鹏新区始建于2011年底,各项基础配套设施尚未完善,不足以承受生态环境的巨大压力;2014~2015年,各项正指标值逐步增大,基本达到理想状态,生态环境承载力状况趋于好转;由此可见环保、科研等投入及污水、垃圾等妥善处理对提高海洋生态环境的承载能力起着一定作用。

### 3 结论

(1)2011~2015年造成深圳东部海洋生态环境超载的负指标主要有7项,分别为:人口自然增长率、COD浓度、万元GDP水耗、万元GDP电耗、平均气温、赤潮发生频次和赤潮发生累计面积;其中赤潮发生频次过高和赤潮发生累计面积过大可能导致海域超载现象突出。

(2)2011~2013年,深圳东部海洋生态环境指标体系中环保投入额、科研技术投资额、城市污水集中处理率、生活垃圾年处理量、污水年处理量等5项正指标低于理想值,深圳东部海域生态环境处于超载或临界超载状态;2014~2015年各项正指标承载力值均达到理想值,深圳东部海域生态环境处于可载状态,承载状况趋于好转,故正指标是否达到理想值对海域承载状况有一定影响。

### 参考文献:

[1] 曹英志. 海洋经济学理论对海域资源配置的指导价值研究分析——以资源与环境经济学基础理论为视角[J]. 环境与可持续发展, 2014, 39(5): 45-47.

[2] SALOMONS W. European catchments: catchment changes and their impact on the coast[R]. Amsterdam, the Netherlands: Vrije Universiteit, Institute for Environmental Studies, 2004: 61-64.

[3] SUN J, TAO J H. Relation matrix of water exchange for sea bays and its application[J]. China Ocean Engineering, 2006, 20(4): 529-544.

[4] CHEN J Y, CHEN S L. Estuarine and coastal challenges in china [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2002, 20(2): 174-181.

[5] CAREY D I. Development based on carrying capacity: a strategy for environmental protection[J]. Global Environmental Change, 1993, 3(2): 140-148.

[6] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying capacity reconsidered: from

Malthus' population theory to cultural capacity[J]. Ecological Economics, 1999, 31(3): 395-408.

[7] BRUSH S B. The concept of carrying capacity for systems of shifting cultivation [J]. American Anthropologist, 1975, 77(4): 799-811.

[8] 韩增林, 狄乾斌, 刘 轶. 辽宁省海洋水产资源承载力与可持续发展探讨[J]. 海洋开发与管理, 2003(2): 52-57.

[9] LANE M. The carrying capacity imperative: assessing regional carrying capacity methodologies for sustainable land-use planning [J]. Land Use Policy, 2010, 27(4): 1038-1045.

[10] 苗丽娟, 王玉广, 张永华, 等. 海洋生态环境承载力评价指标体系研究[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(3): 75-77.

[11] 刘大海, 陈 烨, 陈小英, 等. 基于细化单元整合的海岸带区域发展潜力多重复合评估模型研究——以东营市沿海四区县发展潜力为例[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 83-86, 110.

[12] 冯筱婧, 李悦铮, 江海旭. 海洋旅游资源评价指标体系构建研究[J]. 海洋经济, 2014, 4(1): 12-17.

[13] 蒋依依, 张 敏. 基于 PSR 模型的旅游地生态持续性空间差异评价——以云南省玉龙纳西族自治县为例[J]. 资源科学, 2013, 35(2): 332-340.

[14] 刘雅爱, 葛京凤, 梁彦庆, 等. 基于 PSR 模型的张家口地区生态安全综合评价[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3): 270-274.

[15] 叶 文, 王会肖, 许新宜, 等. 资源环境承载力定量分析——以秦巴山水源涵养区为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(8): 1061-1072.

[16] 谭映宇. 海洋资源、生态和环境承载力研究及其在渤海湾的应用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010: 68-70.

[17] 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[J]. 经济地理, 2012, 32(11): 138-142.

[18] 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.

[19] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴 2015[EB/OL]. (2016-06-07). [http://www.szjt.gov.cn/xxgk/tjsj/tjnj/201606/t20160607\\_3686823.htm](http://www.szjt.gov.cn/xxgk/tjsj/tjnj/201606/t20160607_3686823.htm).

[20] 大鹏新区政府. 大鹏新区 2015 年国民经济社会发展统计公报[EB/OL]. (2016-03-16). <http://www.dpxq.gov.cn/tjgb/21036.htm>.

[21] 大鹏新区政府. 2015 年第四季度大鹏新区社会发展统计监测季报[EB/OL]. (2016-03-25). <http://www.dpxq.gov.cn/tjsjtj/21141.htm>.

[22] 深圳市龙岗区政府. 2011 年龙岗区统计年鉴[EB/OL]. (2013-05-27). [http://www.lgtj.gov.cn/szslgtjxxw/tjnj2011/list\\_tjnj.shtml](http://www.lgtj.gov.cn/szslgtjxxw/tjnj2011/list_tjnj.shtml).

[23] 大鹏新区统计局. 大鹏新区 2013 年统计年鉴[EB/OL]. (2015-01-09). <http://www.dpxq.gov.cn/tjfc/7857.htm>.

[24] 杨 静, 张仁铎, 翁士创, 等. 海岸带环境承载力评价方法研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(S1): 178-185.

[25] 臧 正, 郑德凤, 孙才志. 区域资源承载力与资源负荷的动态测度方法初探——基于辽宁省水资源评价的实证[J]. 资源科学, 2015, 37(1): 52-60.