

海域生态承载力评价指标体系研究

——以南通市为例

张 鹏¹, 张惠荣², 杨 红¹, 李 珺³

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海市海洋湖沼学会, 上海 200080; 3. 国家海洋局东海环境监测中心, 上海 200137)

摘 要: 本论文首先从海域生态承载力的概念和研究方法入手, 借鉴国内外相关研究成果, 通过指标的多重共线性分析剔除多余指标保留不重叠的指标, 构建了海域生态承载力评价指标体系。在计算承载力过程中对原始数据进行无量纲标准化处理。在指标权重确定的计算过程中运用层次分析法与熵值法相结合的组合权重方法来确定最终权重。在计算过程中, 借助 yaahp 软件来减小人为计算的误差, 保证指标权重的科学合理。最后运用状态空间评价模型对南通市所辖海域 2009~2014 年间的海域生态承载力进行综合评估。研究结果表明: 2009~2014 年南通市海域生态承载力总体呈现波动式下降趋势, 其中 2009~2010 年间南通市处于良好可载状态, 2011~2014 年间南通市海域承载力处于基本可载状态。

关键词: 海域生态承载力; 评价指标体系; 状态空间法

中图分类号: X826

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2017)01-0143-06

Research on marine ecological carrying capacity of indicator: a case in Nantong

ZHANG Peng¹, ZHANG Hui-rong², YANG Hong¹, LI Jun³

(1. School of Oceanography, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Society of Oceanology And Limnology, Shanghai 200080, China; 3. East China Sea Center of Environment Monitoring, State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China)

Abstract: This article focuses on the concept and research method of Marine ecological carrying capacity, builds the evaluation index system of ecological carrying capacity by analyzing the multicollinearity indicators, which was overlap of indicators of the standardization of dimensionless processing of raw data by eliminating redundant indicators. Then AHP, entropy and “yaahp” software were used to calculate the final weight to reduce the error of the artificial calculation to ensure scientific and reasonable index weight. Finally the state space model was used to analyze the marine ecological bearing capacity. The results show that the Nantong ecological carrying capacity showed a reduce trend of fluctuation change, have a good condition 2009–2010, the basic state 2011–2013, the bad condition 2014.

Key words: marine ecological carrying capacity; assessment indicator; state-space method

随着国际上两次“蓝色圈地”运动, 世界各国对海洋的开发利用强度日益加大, 各国纷纷趋向大力发展海洋经济, 以至于有专家称: “在未来, 海洋经济等于全球经济”。中国自改革开放以来, 也加大了对海洋的开发利用强度。多年来海洋生产总值一直平稳增加, 并对整个国民经济发

挥着举足轻重的作用。2015 年海洋经济占国民经济比重近 9.6%。伴随着我国海洋经济的高速发展, 大量人口集聚在沿海地区, 人口的集聚必然伴随产业集聚、伴随着对海洋资源开发利用的强度加大, 海洋资源被过度、无序的开发引起的海洋环境恶化等问题已经严重威胁到海洋经济的可持

收稿日期: 2016-09-07, 修订日期: 2016-09-30

基金项目: 启东市北部区域达标尾水排海工程海域生态承载力研究

作者简介: 张 鹏 (1992-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 硕士, 主要研究方向为生态承载力, E-mail: 1031477263@qq.com

通讯作者: 张惠荣, 博士生导师, 主要研究方向为流体力学, E-mail: zhr@eastsea.gov.cn

续发展。要想遵循海域承载力的范围和临界值来指导人类的海洋开发活动,首先必须对拟开发海域的承载力进行客观准确的评价,可以说正确的海域承载力评价是指导人类正确的海洋开发活动的基础和依据,是海洋经济可持续发展的根本保障,因此对拟开发海域进行海域承载力评价,从可持续发展的角度对具体的因子提出预警,指导人类开发活动,对保证海洋可持续发展意义重大。

生态承载力这一概念最早是由 Holling 于 20 世纪 70 年代首先提出,之后有学者在此概念基础上衍生出海洋生态承载力^[1]。海洋生态承载力的定义是指在满足一定生活水平和环境质量的要求下,在不超出海洋生态系统弹性限度条件下,海洋资源的最大供给和环境子系统的纳污能力,以及对沿海社会经济发展规模及相应人口数量的最大支撑能力^[2-3]。本文通过借鉴海洋生态承载力的国内外研究成果^[4-6],结合南通市的现状,以海域生态承载力概念为基础,探索建立评价指标体系并确定各指标权重,采用状态空间法评估南通市海域承载力状况及变化趋势,为相关部门制定海洋开发战略和临海产业发展提供决策依据。

1 海域生态承载力评价指标体系的建立

1.1 指标选取的原则

(1)科学性和综合性

海域生态承载力的评价结果是否客观可信主要取决于选取的评价指标是否科学、全面。指标应该与评价区域的实际情况相符,指标的选取要全面分析评价区域的海洋经济、环境和资源等因素,使指标能够综合反映区域海洋生态承载力的实际情况。

(2)层次性和独立性

海洋生态环境系统是由不同层级的子系统构成,每个分系统又能够用其他的指标进行表述。同时各个评价指标之间相互独立,避免繁琐重复。

(3)可获得性和动态性

建立评价指标体系应考虑到实际操作中相对应的数据可获取性,并易于量化。承载力指标体系建设应能综合反映并适应系统的未来发展趋势,以更好地进行预测与管理。

(4)定性与定量相结合

指标选取宜采用各方面代表性、综合性、关联性的定性指标。定性分析作为定量分析的前提,

定量分析使定性更加的科学、准确。在此基础上,可采用定性与定量结合的原则,将部分定性指标转化为定量指标。

1.2 指标选取

本文通过借鉴“PSR”概念模型(“压力—状态—响应”模型)^[7-8],遵循指标选取原则,从海域生态承载力的概念出发,运用专家咨询与层次分析法相结合的方法,初步设计了海域生态承载力评价指标体系共 3 个准则层 25 个指标。由于各个指标之间可能存在着密切的关联或同方向的变化趋势,采用 SPSS 对评价指标体系各层次的数据指标进行多重共线性分析。经筛选后确定 3 个准则层 8 个亚指标层以及 22 个指标构成海域承载力评价指标体系,包括了准则层:压力指标、状态指标、响应指标,指标层:人口压力指标、环境压力指标、经济压力指标、环境状态指标、经济状态指标、资源状态指标、环境响应指标、经济响应指标,详见表 1。

表 1 海域生态承载力评价指标体系

Tab. 1 Assessment index system of ocean ecological carrying capacity

目标层	准则层	指标层	要素层
海域生态承载力指标体系	压力指标	人口压力指标	人口密度
			人口自然增长率
			工业废水排放量
	生态环境压力指标		工业固体废弃物排放量
			二氧化硫排放量
			万元 GDP 入海废水量
			化学需氧量
			氨氮排放量
	经济压力指标		海洋产业产值占 GDP 比重
			海洋产业产值
			空气质量优良率
			海洋产品产量
			恩格尔系数
	资源状态指标		人均 GDP
			三类以上地表水比例
			自然保护区个数
			渔业资源
	生态环境响应指标		工业废水排放达标率
			工业固体废物综合利用率
			污水处理率
	经济响应指标		城市环境基础设施建设投资
			环境污染治理本年投资额

1.3 指标说明及计算方法

下面列举要素层的 22 个指标中的部分指标及计算方法可参照相关规定标准。

(1)人口自然增长率:指在一定时期内(通常为一年)人口自然增加数与该时期内平均人数之比,一般用千分率表示,单位(%)。计算公式为:人口自然增长率=人口出生率-人口死亡率

(2)工业废水排放总量:指经过工业企业厂区所有排放口排到企业外部的工业废水量,包括外排的直接冷却水、超标排放的矿井地下水和与工业废水混排的厂区生活污水,不包括外排的间接冷却水,单位亿 t。

(3)工业废水排放达标量:指全面达到国家、地方排放标准的外排工业废水量、包括经过处理后达标外排的和未经过处理达标外排的两部分工业废水,单位亿 t。国家排放标准见国标(GB8978-88)。

(4)海洋产品产量:海洋水产业的捕获资源的总重量,单位万 t。

(5)恩格尔系数:食品支出总额占个人消费支出总额的比重,单位(%)。计算公式:

食物支出对总支出的比率 =
$$\frac{\text{食物支出变动百分比}}{\text{总支出变动百分比}} \times 100\%$$

(6)渔业资源:指海洋中具有开发利用价值的鱼、贝、藻等经济动植物总的种类,单位种。

(7)工业固体废物综合利用率:指已用作农业肥料、造田、生产建筑材料、筑路以及其他方式综合利用的固体废物率,综合利用率由原产同体废物的单位统计,单位(%)。

1.4 指标权重确定

1.4.1 权重确定方法

各指标权重的确定是海洋生态承载力评价指标体系中最重要的一部分,目前权重的确定方法主要分为主观赋权法、客观赋权法和主客观综合赋权法。目前应用较为广泛的主观赋权法有二项系数法、层次分析法、最小平方法、专家调查法等^[9]。主观赋权法由于是决策者通过经验主观判断,因此存在很多个人局限性以及主观随意性,对于结果缺少一定的客观性。由于主观赋权的各种局限跟不足,又提出了客观赋权法。目前客观赋权法的主要应用成果有熵值法、主成分分析法、离差及均方差法。客观赋权法依赖完善的数学理论计算过程比较复杂。为了得到更为客观和合理的指标权重,提出了将主观赋权法和客观赋权发相结合的组合赋权法的概念。AHP-熵值法是层

次分析法和熵值法的有机结合,充分考虑了影响两种赋权方法的不利因素,此方法主要是利用层次分析法得出专家主观意志的主观权重,再运用熵值法的差异性系数对层次分析法的权重进行修正,最终得出优化后的权重组合。

1.4.2 层次分析法确定权重

20 世纪 90 年代美国学者萨蒂首先提出了层次分析法(analytic hierarchy process 简称 AHP)^[10]。层次分析法本质上是一种多目标群体决策思想和方法。在群体决策的应用方面,对群体两两判断矩阵有两种处理办法,一种是先根据个体判断矩阵确定个体权重,然后再合成个体权重,另外一种办法是先合成个体的判断矩阵,然后确定出群体的权重^[11]。应用层次分析法构建模型一般需要三个步骤(1)首先构建层次结构模型(2)建立各层次判断矩阵(3)计算单排序权向量并做一致性检验

采用上述构建过程,计算得出各指标层的权重,见表 2。

表 2 层次分析法确定的指标权重

Tab. 2 The weight of the index of Analytic hierarchy process				
准则层	指标层	要素层	指标权重	绝对权重
压力指标 0. 2297	人口压力指标	人口密度	0. 6753	0. 0387
		人口自然增长率	0. 3247	0. 0186
	环境压力指标	工业废水	0. 1500	0. 0205
		工业固废	0. 1890	0. 0258
		二氧化硫	0. 1850	0. 0252
		万元 GDP	0. 0133	0. 0018
		化学需氧量	0. 1191	0. 0162
		氨氮排放量	0. 3435	0. 0468
	经济压力指标	海洋产业产值	0. 3247	0. 0117
		占 GDP	0. 6753	0. 0244
状态指标 0. 6483	环境状态指标	空气质量优良率	0. 6135	0. 0421
		海洋产品产量	0. 3865	0. 0265
	经济状态指标	恩格尔系数	0. 6753	0. 0130
		人均 GDP	0. 3247	0. 0063
	资源状态指标	三类以上地表	0. 1365	0. 0425
		自然保护区个数	0. 6250	0. 1947
响应指标 0. 1220	环境响应指标	渔业资源	0. 2385	0. 0743
		工废排放达标	0. 2297	0. 0189
		固废合理利用量	0. 6483	0. 0534
	经济响应指标	污水处理率	0. 1220	0. 0101
		环境基础设施	0. 7159	0. 0284
		环境污染治理投 资	0. 2841	0. 0113

1.4.3 熵值法修正权重

在信息论中,信息熵是系统无序程度的度量,其表达式为:

$$H_x = - \sum_{i=1}^m P(x_i) \ln P(x_i)$$

其中: x_i 为第 i 个状态值(总共与 m 个状态);
 $P(x_i)$ 为出现第 i 个状态值的概率。

熵值法修正指标采用极值法消除原始指标数据的量纲和数量级影响,本文涉及到的指标类型为成本型指标和效益型指标,针对不同的指标类型选用不同的标准化处理方法,效益型指标是指标属性越大越好,成本型指标是指标属性越小越好。

成本型指标:
$$x_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

效益型指标:
$$x_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}$$

式中: $i = 1, 2, 3 \dots m$; $j = 1, 2, 3 \dots m$ 。
 $\max(x_j)$, $\min(x_j)$ 分别为第 j 个指标的最大值和最小值。

(1)求第 i 项指标的熵值 e_i

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln p_{ij}$$

其中: $k>0$; $\ln$ 为自然对数; $e_i \geq 0$ 。如果 x 对于给定的 i 全部相等,那么:

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} = \frac{1}{n}$$

此时 e_i 取极大值,即:

$$e_i = -k \sum_{j=1}^n \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n} = k \ln n$$

若设 $k = \frac{1}{\ln n}$, 于是 $0 \leq e_{ij} \leq 1$ 。

(2)计算第 i 项指标的差异性系数 g_i

当各种方案中某一项指标的差异性越大, e_i 越小;当某一项指标差异越小, e_i 越大;当 $e_i = 1$, 说明此时指标 i 对方案没有影响。因此定义差异性系数:

$$g_i = (1 - e_i) / \sum_{i=1}^m 1 - e_i$$

g_i 越大,说明指标越重要。

表 3 各指标的熵值和差异性因数

Tab. 3 The data after standardized processing

指标名称	e_j	g_i
人口密度	0.8495	0.1505
人口自然增长率	0.8318	0.1682
工业废水排放量	0.8626	0.1374
工业固体废物排放量	0.8160	0.1840
二氧化硫排放量	0.8783	0.1217
万元 GDP 入海废水量	0.8765	0.1235
化学需氧量排放量	0.6906	0.3094
氨氮排放量	0.8973	0.1027
海洋产业产值占 GDP 比重	0.8147	0.1853
海洋产业产值	0.7701	0.2299
空气质量优良率	0.8617	0.1383
海洋产品产量	0.8682	0.1318
恩格尔系数	0.8944	0.1056
人均 GDP	0.8317	0.1683
三类以上地表水比例	0.8951	0.1049
自然保护区个数	0.3869	0.6131
渔业资源	0.8106	0.1894
工业废水排放达标量	0.7839	0.2161
工业固体废物综合利用率	0.8353	0.1647
污水处理率	0.8542	0.1458
环境基础设施建设年投资额	0.7888	0.2112
环境污染治理本年投资额	0.4426	0.5574

1.4.4 组合权重计算

采用熵值法的差异性系数对层次分析法权重进行修正,得出优化权重组合,计算公式:

$$\omega_i = w_i g_i / \sum_{j=1}^n w_i g_i, i = 1, 2, \dots, n$$

其中: ω_i 为层次分析法和熵值法的组合权重;
 w_i 为 AHP 的权重; g_i 为熵值法的差异性系数。

表 4 层次分析法-熵值法组合权重

Tab. 4 The index of entropy and difference factor table

指标名称	层次分析法权重	熵值法权重	综合权重
人口密度	0.1013	0.1505	0.0273
人口自然增长率	0.0487	0.1682	0.0146
工业废水排放量	0.0098	0.1374	0.0132
工业固体废物排放量	0.0124	0.1840	0.0222
二氧化硫排放量	0.0121	0.1217	0.0144
万元 GDP 入海废水量	0.0009	0.1235	0.0010
化学需氧量排放量	0.0078	0.3094	0.0235
氨氮排放量	0.0225	0.1027	0.0225
海洋产业产值占 GDP 比重	0.0558	0.1853	0.0101
海洋产业产值	0.1160	0.2299	0.0262
空气质量优良率	0.0421	0.1383	0.0272
海洋产品产量	0.0265	0.1318	0.0163
恩格尔系数	0.0130	0.1056	0.0064
人均 GDP	0.0063	0.1683	0.0050
三类以上地表水比例	0.0111	0.1049	0.0209
自然保护区个数	0.0508	0.6131	0.5586
渔业资源	0.0194	0.1894	0.0659
工业废水排放达标量	0.0688	0.2161	0.0191
工业固体废物综合利用率	0.1941	0.1647	0.0412
污水处理率	0.0365	0.1458	0.0069
环境基础设施建设年投资额	0.0972	0.2112	0.0281
环境污染治理本年投资额	0.0467	0.5574	0.0295

2 南通管辖海域承载力评价

2.1 海域承载力评价过程

状态空间法是欧氏几何空间法的一种应用与拓展,在系统状态的定量描述和评价方面,状态空间法是一种非常有效的分析和设计方法。在此本文构建一个 n 维状态空间,以状态空间中的矢量模来表示海洋生态环境承载力,即空间中状态点与系统原点构成的矢量。

状态空间法概念为欧氏几何空间应用于定量描述系统状况的其中一种经验证的方法,一般组成要素有表示系统各要素状态向量的三维状态空间轴组成。区域承载力的大小可用状态空间的原点同系统状态点所构成的矢量模数来表示^[12-16]。

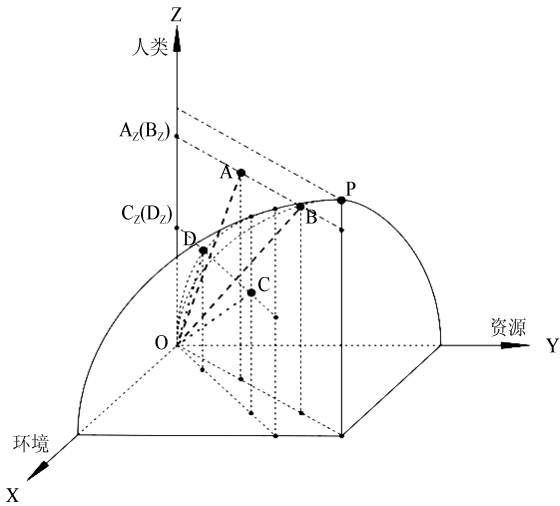


图 1 状态空间法评估模型

Fig. 1 Spatial-State analysis model

判断空间内一点同曲面 $X_{\max}OY_{\max}$ 间的位置关系,可以通过比较原点到该状态点和状态点在 $X_{\max}OY_{\max}$ 上的投影之间的矢量模的大小来得到;其中状态点与原点间的距离即代表了此状态下的区域综合承载力^[15]。基于状态空间法下的海域生态承载力计算公式如下:

$$MECC = \sqrt{\sum_{j=1}^m w_j x_j^2}$$

其中: x_j 表示第 j 个指标的值; w_j 表示第 j 个指标的权重; $MECC$ 表示海域承载力值。

在参考江苏南通市统计年鉴、实地调查资料的基础上进行计算,通过一定的归纳、整理,将南通市 2009~2014 年 6 a 时间的 22 个指标的理想值与原始数据代入状态空间法计算公式,得出南通市海域生态承载力,见表 6。

表 5 海域生态承载力等级标准

Tab. 5 Standard for ecological carrying capacity of sea area

MECC	承载力	基本特征
0.8~1.2	良好承载	海域生物资源丰富,海域污染较少,环境保护投入大,适宜大量开发
0.4~0.8	基本可载	海域生物资源一般,海域污染比较严重,环境保护投入不大,开发处于平衡状态
0~0.4	不可载	海域生物资源匮乏,海域污染非常严重,环境保护投入严重缺乏,开发强度太大,不宜开发

表 6 南通市海域生态承载力评价结果

Tab. 6 Evaluation results of ecological carrying capacity of sea in Nantong city

年份	2009	2010	2011	2012	2013	2014
MECC	0.8608	0.8796	0.4051	0.4406	0.5448	0.2631

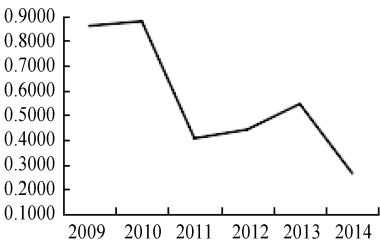


图 2 南通市海域生态承载力评价结果

Fig. 2 Assessment results of ecological carrying capacity of sea in Nantong City

2.2 结果与分析

通过江苏南通市统计年鉴等统计资料,运用层次分析法和熵值法确定评价指标体系中的各评价指标以及各指标的权重,将 2009~2014 年南通海域有关评价指标的数值进行标准化处理之后,运用空间状态模型对南通市的海域生态承载力进行分析评价。由图 2 评价结果显示,2009~2010 年南通市处于良好可载并有所增长,2011~2013 年南通市海域承载力处于基本可载状态,2014 年海域承载力处于不可载。2009~2010 年压力类和状态类指标变化都不大,处于平稳状态;由于 2010 年环境污染治理本年投资额相比 2009 年同比增加 251%,因此响应类指标有增长。2010~2011 年南通市海域承载力由 0.8796 减小到 0.4051 下降了 53.94%,呈明显下降趋势。其中压力类指标增幅较大,如工业废水排放量由 2010 年的 1.57 亿 t 增加到 1.96 亿 t,化学需氧量排放量增幅达 32.12%。状态类指标中其自然保护区个数骤减,响应类指标环保投资额 2011 年仅是

2010年的26.64%。2011~2014年海域生态承载力呈波浪式下降趋势,主要是由于近年来随着人口的快速增长和海洋资源持续的过度开发,对南通市海洋和资源环境造成严重负荷。同时环境治理的效率和环境保护方面的投入没有较大提高。

总体南通市海域生态承载力呈现波浪式下降。从压力准则层的相关指标方面反映南通市海域生态力承受的人口压力越来越大,如人口自然增长率由-1.51%增加到了-0.56%。随着近年来海洋经济的高速发展,南通市海洋产业产值2009~2012年由1341.19亿元增长到2037.04亿元,说明在这几年间南通大力开发海洋资源,导致南通市海域生态环境面临巨大压力,同时相应的响应机制包括工业固体废物综合利用率、环境污染治理本年投资额还处于前几年的水平,综合因素使得南通市海域生态承载力整体处于一个下降的趋势并在2014年达到不可载。

3 对策建议

(1)严格控制入海排放量,鼓励海洋低碳可持续发展经济

2009~2014年南通市的工业固体废物排放量由307.20增加到507.56万t,增长幅度达到65%;氨氮排放量由2200t增加到8400t,增幅达282%。南通市的海洋生态环境受到外界的压力持续增加,需要在今后的治理中严格控制南通市的人海排放量。必须严格控制排污企业的污染排放,完善坚决执行相关排放标准,对于超标单位加强处罚力度。鼓励企业节能减排,提倡低碳可持续发展海洋经济。

(2)优化南通市海洋产业结构,提高海洋产业科技含量

根据国内外相关经验,海洋经济的发达程度主要取决于海洋产业第二、第三产业的发达程度,目前南通市产业结构中,第一产业比重过大,第二、第三产业比重小,这种结构对产业的持续发展不利。优化海洋产业结构,促进海洋产业结构升级。目前南通市相较于其他沿海城市海洋经济总产值中科技含量较低,主要还是以滨海旅游、海洋渔业等为主,其中新兴产业少之又少。开展海洋资源利用技术研究,特别是加强对养殖容量与优化技术、海洋环境监测技术研究,进一步提高海域承载力。科学进步贡献率低下以及高科技人才储备的不足暴露了南通市海洋产业竞争力不足,因此要积极创建科技信息交流平台,加强产学研合作,以促进科技成

果转换及信息、技术等有利资源的共享。

(3)增加海洋环境保护的投资,完善基础设施建设

目前,南通市的海洋环境保护工作有很多的问题。比如2011年环境污染治理本年投资额由2010年的20.9亿元减少到5.6亿元,随着近几年南通市海洋环境的压力增加,政府及有关部门应充分认识到海域的可持续发展对南通市发展的极端重要性,要设立专项基金,重点支持南通市的基础设施建设,建设环境保护。积极开拓融资方向,调动社会各界参与南通市海域的开发当中,保证一个投资主体的多元性。加大扶持海洋产业发展中关键领域和重大项目,引导海洋产业向高科技方向发展。

参考文献:

- [1] SMAAL A C, PRINS T C, DANKERS N, et al. Minimum requirements for modelling bivalve carrying capacity[J]. Aquatic Ecology, 1997, 31(4): 423-428.
- [2] 高吉喜. 可持续发展理论探索——生态承载力理论、方法与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
- [3] 韩增林, 狄乾斌, 刘 锴. 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, 20(2): 52-57.
- [4] PETERSON G, ALLEN C R, HOLLING C S. Ecological resilience, biodiversity, and scale[J]. Ecosystems, 1998, 1(1): 6-18.
- [5] GUNDERSON L H. Ecological resilience—in theory and application[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 2000, 31: 425-439.
- [6] PETERSON G D. Estimating resilience across landscape[J]. Conservation Ecology, 2002, 6(1): 17.
- [7] HUGHEY K F D, CULLEN R, KERR G N, et al. Application of the pressure-state-response framework to perceptions reporting of the state of the New Zealand environment[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(1): 85-93.
- [8] 麦少芝, 徐颂军, 潘颖君. PSR模型在湿地生态系统健康评价中的应用[J]. 热带地理, 2005, 25(4): 317-321.
- [9] 李桥兴. 多属性决策中指标权重确定的理论研究与应用[D]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [10] 汪应洛. 系统工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2002: 130-140.
- [11] 冯俊文. 模糊德尔菲层次分析法及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2006, 36(9): 44-48.
- [12] 余丹林. 区域承载力的理论、方法与实证研究——以环海地区为例[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2000.
- [13] 余丹林, 毛汉英, 高 群. 状态空间衡量区域承载状况初探——以环渤海地区为例[J]. 地理研究, 2003, 22(2): 201-210.
- [14] 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.
- [15] 毛汉英, 余丹林. 环渤海地区区域承载力研究[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 363-371.
- [16] 邓 波. 草原区域草业生态系统承载力与可持续发展的研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2004: 35-37.