

无居民海岛资源环境承载力多目标规划模型初探

涂振顺^{1,2}, 杨顺良^{1,2}, 姬厚德^{1,2}

(1. 福建海洋研究所 厦门 361013; 2. 福建省海岛与海岸带管理技术研究重点实验室 厦门 361013)

摘要: 资源环境承载力是衡量无居民海岛发展是否可持续的重要标尺, 在现有的承载力条件下如何设计合理的海岛规划方案, 如何分配各资源环境成为海岛健康发展的关键。文章构建资源环境承载力多目标规划方法, 以海岛旅游人口和经济总量最大化为目标, 从资源、生态、环境的有限性或限制性作为模型约束条件, 以期在海岛规划提供技术方法。

关键词: 无居民海岛; 可持续发展; 资源环境承载力; 多目标规划; 海岛规划

中图分类号: X21; P76

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2018)03-0081-06

Multi-objective Programming Model of the Resource and Environmental Carrying Capacity of Inhabited-island

TU Zhenshun^{1,2}, YANG Shunliang^{1,2}, JI Houde^{1,2}

(1. Fujian Institute of Oceanography, Coastal and Island Research Center, Xiamen 361013, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Coast and Island Management Technology Study, Xiamen 361013, China)

Abstract: The carrying capacity of resources and environment is basic rule of island sustainable development, it is key to make a suitable planning for guiding island healthy development. The study set population and economic aggregate maximization as objection function, the limitation of resources and environmental capacity as constraint conditions, to construct resource and environmental carrying capacity multi-objective programming model, aimed at providing a technology supporting inhabited-island development planning.

Key words: Inhabited-island, Sustainable development, Resource and environmental carrying capacity, Multi-objective programming model, Island planning

无居民海岛是指无户籍所在的海岛, 其重要地位不仅是国民经济发展空间载体, 还关系国家可持续发展和海洋权益的重要国土空间。由于无居民海岛的生态脆弱性和弱恢复性, 决定海岛开发应坚

持“开发与保护并重”的原则。海岛开发应规划先行, 如何科学合理地确定发展模式、布局、目标等是决策者最关心的问题, 也是关系海岛可持续发展的核心问题。海岛发展目标受到自然条件、资源和生

收稿日期: 2017-05-24; 修订日期: 2017-12-29

基金项目: 福建省省属公益类科研院所基本科研专项(2014R1006-2, 2015R1006-9)。

作者简介: 涂振顺, 助理研究员, 硕士, 研究方向为海洋资源与环境保护规划与评价

态环境等多方面的制约,在寻求海岛经济最大化,满足人类发展需求的最大化,生态环境效益最大化的前提下,如何合理地配置海岛资源与环境是一个多目标协调问题,需从经济目标、社会需求目标和生态目标等多目标对各种规划方案加以权衡。多目标规划模型(Multi-objective Programming, MOP)为解决这类决策问题提供了有效的途径。近年来,MOP在水环境承载力^[1]、海洋生态承载力^[2]、土地承载力^[3]等研究被广泛地应用。本研究从资源、生态和环境3个方面建立多目标约束模型,以旅游人口和旅游经济总量最大化为目标,构建无居民海岛旅游资源环境承载力多目标规划模型,以为无居民海岛旅游规划方案的优化提供技术方法。

1 模型基本架构

1.1 目标设定

对于海岛今后发展尚未有明确的目标,可以在一个合理的范围内设置多个目标,为之后方案的选择奠定基础。规划可以用多种指标进行描述,但为避免模型过大,一般选取2~3个目标较为合适。将海岛生态承载力的大小界定在某一合理的值域内,作为目标函数。根据海岛生态承载力(IECC)的含义,可以确定目标函数为海岛人口数量、海岛产业总产值。

海岛人口数最大:

$$T_{\max} = f_1(p_1 + p_2)$$

式中: T_{\max} 为海岛最大承载人口总数; p_1 为海岛常住人口数; p_2 为海岛旅游人口数; f_1 为海岛总人口函数。

海岛产业总量最大:

$$G_{\max} = f_2(\text{GDPI}_1, \text{GDPI}_2, \text{GDPI}_3)$$

式中: G_{\max} 为海岛承载最大GDP; GDPI_1 、 GDPI_2 、 GDPI_3 分别为海岛第一产业产值、海岛第二产业产值、海岛第三产业产值; f_2 为海岛GDP函数。

1.2 约束条件设定

约束条件旨在保证海岛生态系统功能的持续发挥和生态环境的良性循环,从海岛环境容量、资源约束角度构建模型,并充分考虑从资源、环境和社会经济之间相互联系和作用的关系。从海岛的

独特生态特征,淡水、土地等资源相对匮乏,物种单一自然生态系统较为脆弱,环境容量有限。因此,约束条件从环境容量和资源总量建立约束函数关系式。根据不同海岛的资源环境特征和开发利用规划,确定海岛特定约束关系,如水资源人口与经济承载力、土地资源人口与经济承载力、旅游资源人口容量、森林资源人口与经济承载力、海域水环境容量等。

环境容量约束: $PD_i \leq P_i$,包括海域水环境容量和森林资源景观生态与游憩承载力。

海岛资源约束: $CIR_j \leq SIR_j$,包括水资源、土地资源和旅游资源。

式中: PD_i 和 P_i 为第*i*种污染的排放总量和海岛环境容量; CIR_j 和 SIR_j 分别为第*j*阶段海岛资源消耗量和供给量。

2 约束条件分析与模型构建

2.1 资源承载力约束模型

2.1.1 水资源承载力

由于海岛的特殊地理位置和生态特征,多数海岛淡水资源极为匮乏。因此海岛的水资源承载力关系到海岛发展方向的确和海岛开发利用程度。水资源承载力计算是通过水资源主体和客体进行耦合量化得出水资源对经济总量和人口的支撑能力。将水资源可利用量分为产业发展可利用量、生活用水量。

$$W_n = W_i + W_j$$

式中: W_n 为海岛可利用水资源总量,包括地表水、地下水 and 外调可利用水总量; W_i 为产业发展用水量; W_j 为生活用水量。 W_n 海岛可利用水资源总量可根据《水资源可利用量估算方法(试行)》(水总研[2004]8号)进行计算。

根据不同承载水平下行业发展规模、产业结构和用水定额指标可以计算出单位GDP综合用水量 C_i 为

$$C_i = \frac{\sum K_i \text{GDP} \cdot E_i}{\text{GDP}}$$

式中: C_i 为某一承载水平下单位GDP用水量; K_i 为各行业增加值占GDP比例; E_i 为用水定额(查询海岛所在区域出台的各行业用水定额标准)。

因此,可承载的经济规模计算如下:

$$E = \frac{W_i}{C_i}$$

式中: E 为可承载的经济规模; W_i 为用于产业发展的水资源可利用量。

根据总经济规模和人均GDP水平,可计算相应的人口承载力:

$$P = \frac{E}{V_p}$$

式中: P 为可承载人口规模; V_p 为某一承载水平下的人均GDP。

根据海岛规划确定的规划指标与水资源承载力预测值进行比较,调整规划指标,以满足水资源的承载力。

反之,产业发展用水量计算方法:

$$W_i = E \times C_i$$

式中: E 为海岛经济规模(GDP)。

生活用水量计算:

$$W_j = P_j \times \eta \times 365$$

式中: P_j 为海岛上生活的人总口数; η 为人均生活用水量(取 $0.089 \text{ m}^3/\text{d}$)。

2.1.2 空间资源承载力

土地资源承载力是指在保护土地资源生态系统健康的情况下,一定时期、一定区域的土地资源能够承载的人口和经济规模。由于海岛面积较小,特别是无居民海岛资源量少,水、食物等均需依靠外来供给,海岛土地资源食物供给本研究未考虑。因此,海岛土地资源承载力主要以可容纳生存发展和享受的人口数量和GDP来衡量。

生活空间容纳人口数可根据以下公式计算:

$$P_l = U_l / \mu$$

式中: P_l 为生活空间可容纳人口数; U_l 为海岛规划为交通、居住、绿化及日常生活等的用地面积; μ 为城市满足人类生存发展和享受的土地需求面积,取 $120 \text{ m}^2/\text{人}$ (国际标准为 $140 \sim 200 \text{ m}^2/\text{人}$,国内要求城镇建设人均用地面积 $60 \sim 120 \text{ m}^2$)。

土地资源经济承载力计算采用相对承载力计算方法:

$$C_e = I_e \times Q_p$$

式中: C_e 为相对土地资源经济承载力; I_e 为土地资

源经济承载力指数($I_e = L_s / L_p$, L_s 为研究海岛产业发展可利用和已利用土地面积; L_p 为参照海岛产业发展可利用和已利用土地面积); Q_p 为参照海岛生产总值。参照海岛可根据具体评价海岛功能定位,选择评价期发展最好的同类型海岛作为参考。

2.1.3 旅游资源承载力

一个旅游区所能容纳的游客人数是一定的,若游人的过度密集会引发许多环境、经济问题和社会矛盾,以致影响区域旅游的可持续发展,因此,旅游区客观上存在着一个容量的极限值和一个最适值,这便是旅游承载力,一般教科书称之为旅游环境容量。关于旅游环境承载力的计算主要有旅游资源容量测算法、旅游感知容量测算法、旅游生态容量测算法、旅游经济发展容量测算法等,根据海岛旅游资源的差异和数据的获取情况,选取不同的测算方法。以下介绍旅游资源容量和旅游生态容量的测算方法。

(1)旅游资源容量测算。旅游资源容量测算法是根据旅游资源量和人均资源标准需求量进行计算:

$$C = (T \times A) / (T^i \times A^i)$$

式中: C 为极限容量; T 为每日开放时间; A 为旅游资源的空间规模; T^i 为人均每次利用时间; A^i 为每人最低空间标准。

(2)旅游生态容量测算。旅游生态容量为特定的海岛生态条件所能容纳的旅游人口数,从生态环境所能忍受人类干扰的程度计算容纳量。计算公式如下:

$$F_o = \sum_{i=1}^n S_i T_i + \sum_{i=1}^n Q_i / \sum_{i=1}^n P_i$$

式中: F_o 为旅游生态容量(人/d); S_i 为自然生态环境净化吸收第 i 种污染物的数量(每天); T_i 为各种污染物的自然净化时间; Q_i 为每天人工处理第 i 种污染物的量; P_i 为每位游客一天内产生的第 i 种污染物的量; n 为旅游污染物的种类数。

2.2 环境容量约束

2.2.1 森林资源承载力

森林资源承载力可分为森林经济承载力、森林景观生态承载力和森林景观游憩承载力3部分。根据《中华人民共和国海岛保护法》,海岛植被资源应

严格保护,岛上自然森林不应作为经济林开发利用。因此,海岛森林资源承载力从森林景观生态承载力和景观游憩承载力角度进行计算。

(1)森林景观生态承载力计算。海岛森林生态承载力考虑森林吸收 CO_2 、 SO_2 、 NO 及粉尘等气体而净化空气,以保持区域空气质量。据相关测定,每公顷森林平均(阔叶林、松林、杉木林和针叶阔叶混交林的平均值)每年吸收 CO_2 约14.55 t^[4],每公顷森林每年吸收 SO_2 约0.7 t^[5],吸收 NO_x 约0.38 t,森林可截流过滤空气粉尘、烟尘、悬浮物量的能力为21 t/(hm²·a⁻¹)^[6]。

根据上述系数,可计算海岛森林景观的生态承载力,并通过海岛常年监测的空气污染指标本底值、规划海岛空气环境等级标准及森林吸收气体污染物的量,来调整海岛规划排放废气的量。

(2)森林景观游憩承载力计算。森林景观游憩承载力是指森林景观区所能承受的最大人口数。根据胡忠行和朱爱珍的研究结果^[7],每人平均须拥有30~40 m²的森林绿地,才能维持空气中的 O_2 和 CO_2 的正常比例,使空气保持清新。据此,获得海岛森林面积后可计算海岛森林景观游憩容量。

2.2.2 海域水环境容量

海洋环境容量在数值上等于标准自净容量与相应海域海水浓度本底值所确定的污染物储存量之和。对于以受污染的海域,为能达到一定等级国家海水水质的标准所需去除的排海污染物数量为剩余环境容量。剩余环境容量在树枝上等于海洋环境容量与污染物排海总量和本底值污染物的两之差。污染物排海后将被稀释、吸收、沉降或转化,这些过程即为海水自净过程,影响海水自净能力的因素有海洋水文条件、水中微生物的种类和数量、海域地形地貌等。因此,海域自净能力的计算需要多年的水动力、水化学和水生物学方面的研究才能进行准确的计算。在区域规划中往往需要通过类比分析的方法获得海域的标准自净容量,在通过规划海域污染物本地数量获得海洋环境容量。

根据海岛所在位置和海域的特征,可选取不同的污染因子进行计算。计算公式如下^[8]:

$$\text{目标函数: } \max L = \sum_{j=1}^n x_j$$

$$\text{约束条件: } \sum_{j=1}^n U_{ij}x_j + C_i \leq \overline{C}_i \quad (i=1, \dots, n; \\ x_j \geq 0, j=1, \dots, n)$$

式中: i 为水质控制点编号; n 为水质控制点数目; j 为排污口编号; n 为排污口数目; x 为负荷量; L 为总负荷量; U_{ij} 为第 j 个排污点的单位负荷量对第 i 个水质控制点的污染贡献度系数; C_i 为水质控制点的污染现状浓度; \overline{C}_i 为水质控制点处的环境标准控制水质浓度值。 U_{ij} 由海域环境影响预测部分二维浅水潮波方程和污染物二维平流扩散方程的模拟结果得到。

2.2.3 污染负荷量估算

(1)人口污染负荷量估算。海岛人口生活污染排放量估算方法有两种,一是排污系数法,即由实验研究得到的人均排污系数乘以人口得到;二是综合污水法,即根据调查得到的人均综合用水量,乘以人口和多年平均生活污水水质得到。本研究采用第一种方法。生活污水入海量的计算应考虑到其产生量的处理率和净化率。考虑污水处理厂建设成本高,尤其是无居民海岛污水处理考虑采用化粪池或沼气集中处理为主,因此处理率主要指化粪池的处理率;净化率是指污染物在入海前发生的复杂的物理、化学和生物的自然净化作用。参照文献中参数的确定和研究的经验,人粪尿以10%进入水环境计算^[9]。生活污水的化粪池处理率和自然净化率分别以25%和30%计^[10]。

$$P_h = \omega \times A_h$$

式中: P_h 为海岛人口年排污染量; ω 为人口污染排放系数; A_h 为人口数量。

(2)工业污染排放量。本研究采用产业单位产值平均污染排放量计算污染排放,可根据全国各行业单位工业产值污染物排放量统计的平均值估算海岛工业污染排放量,或海岛所在区域各行业单位工业产值排放污染物量统计情况计算。依据海岛现有或规划引进的产业所属行业,计算污染排放量。计算公式如下:

$$P_l = \sum V_i \times X_i$$

式中: P_l 为某一种污染物排放量; V_i 某一行行业产值(万元); X_i 某一行行业某一种污染物的单位产值污染排放量。

(3)非点源污染负荷计算。

①农业化肥污染。化学肥料施入土壤后,通过淋溶、挥发、地表径流和冲刷等方式损失,进入土壤、水体或大气中,只有小部分被作物吸收。因此,农业化肥污染也是农业地区面源污染之一。

在计算时,应在折纯后计算其入海量。氮肥平均折纯率以30%计,磷肥折纯率以20%计,流失率分别取20%和5%^[11-12]。计算时认为流失即进入水体。计算公式如下:

$$C_N = F_n \times 30\% \times 20\%$$

$$C_P = F_p \times 20\% \times 5\%$$

式中: C_N 为氮流失量; F_n 为氮肥施用量; C_P 为磷流失量; F_p 为磷肥施用量。

②畜禽养殖污染。据统计,1头牛、1头猪和1只鸡所排粪尿的BOD₅分别相当于10个、30个和0.7个人所排粪尿的BOD₅^[13],因此畜禽粪尿污染不容忽视。与生活污染计算类似,畜禽养殖污染也采用排污系数法。综合参考文献中的畜禽污染物排放系数^[9,11-12],确定各类畜禽的污染物排放系数(ζ),如表1所示。

表1 各类畜禽每只(头)污染物排放系数

畜禽类	COD _{Cr}	BOD ₅	总氮	总磷
牛	76.91	193.67	29.08	7.23
羊	4.4	2.7	4.23	1.43
猪	3.78	25.98	0.94	0.16
家禽	0.233	0.559	0.138	0.026
兔			1.07	

注:①表中排放系数除BOD₅外,均为进入水体量;BOD₅考虑60%进入水体。②部分汇水区家禽的调查资料中,有鸡鸭及蛋禽肉禽的分类统计。这里为简化计算,按照鸡和鸭各占80%和20%、蛋禽和肉禽各占50%计算得到家禽的各污染物排放系数。

因此,畜禽养殖污染计算公式如下:

$$P_d = \zeta \times A_d$$

式中: P_d 为海岛畜禽年排放污染量; ζ 为畜禽污染排放系数; A_d 为畜禽数量。

3 多目标规划模型的确定

3.1 目标函数

海岛人口数量包括常住人口数和旅游人口

数量。

海岛人口目标函数:

$$T_{\max} = P_a + P_t \times 365$$

式中: P_a 为海岛年常住人口数(人); P_t 为旅游人口(人/d)。

GDP目标函数:

$$G_{\max} = GDP_1 + GDP_2 + GDP_3$$

式中: GDP_1 、 GDP_2 、 GDP_3 分别为海岛第一产业、第二产业、第三产业生产总值。

3.2 约束条件模型

(1)水资源约束模型:

$$(GDP_1 + GDP_2 + GDP_3) \times C_i + (P_a + P_t \times 365) \times \eta \times 365 \leq W_n$$

(2)空间资源约束模型:

$$(P_a + P_t \times 365) \times \mu \leq P_i$$

$$(GDP_1 + GDP_2 + GDP) \times Q_p / L_p \leq L_s$$

(3)旅游资源承载力约束模型:

$$P_t \times T^i \times A^i / T \leq A$$

(4)森林景观游憩承载力约束模型:

$$30 \times (P_a / 365 + P_t) \leq S_w$$

式中: S_w 为评估海岛的森林面积。

(5)海域水环境容量约束模型

据研究,进入海洋的全部污染物中有80%以上来自陆地污染源^[14],丹麦270条河流94%的氮负荷、52%的磷负荷是由非点源污染引起的^[15],荷兰农业非点源提供的总氮、总磷分别占水环境污染总量的60%和40%~50%^[16]。因此,陆源氮、磷污染相应调整系数取77%和49%,其他污染物取80%。

$$P_h + P_l + P_c + P_d \leq (80\% \text{ or } 77\% \text{ or } 49\%) \times L$$

式中: P_h 为海岛人口某一污染物排放量, P_l 为工业某一污染物排放量, P_c 为海岛农业化肥流失导致某一污染物排放量, P_d 为海岛畜禽某一污染物排放量, L 为海域水环境容量。(变量解释见约束条件模型构建)。

4 结语

限于无居民海岛的数据稀缺性,其资源环境承载力评价方法处于初级阶段,本研究基于多目标算法,以海岛人口容量和经济总量最大化为目标,以资源环境承载力有限性为约束条件,初步构建无居

民海岛资源与环境多目标规划模型,可应用于无居民海岛资源与环境配置研究,为无居民海岛开发规划、管理决策等提供技术支撑。构建的多目标模型仍处于初探阶段,多以经验公式进行计算,具较好的操作性,但模型的完整性有待进一步研究,以更好地指导无居民海岛开发的可持续发展。

参考文献

- [1] 张雪花,郭怀成,张宝安.系统动力学:多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用[J].水科学进展,2002,13(3):351-357.
- [2] 许刚,吴豪.土地承载力研究中多目标规划模型的设计与应用[J],农业系统科学与综合研究,1993,9(4):285-288.
- [3] 付会.海洋生态承载力研究:以青岛市为例[D].青岛:中国海洋大学,2009.
- [4] 宛志沪,严平,吴烽,等.森林对二氧化碳循环的影响[J].安徽农业大学学报,1997,24(1):8-13.
- [5] 张守攻,朱春全,肖文发.森林可持续经营导论[M].北京:中国林业出版社,2001:65-87.
- [6] 姜东涛.城市森林与绿地面积的研究[J].东北林业大学学报,2001,29(1):70-73.
- [7] 胡忠行,朱爱珍.天台山国家风景名胜区旅游环境容量分析[J].海南师范学院报(自然科学版),2002,15(3):76-80.
- [8] 郑洪波,刘素玲,陈郁,等.区域规划中纳污海域海洋环境容量计算方法研究[J].海洋环境科学,2010,29(1):145-164.
- [9] 张大弟.上海市郊区非点源污染综合调查评价[J].上海农业学报.1997,13(1):31-36.
- [10] 水利部太湖流域管理局.太湖流域河网水质研究[R].上海:水利部太湖流域管理局,1997.
- [11] 司友斌,王慎强,陈怀满.农田氮、磷的流失与水体富营养化[J].土壤,2000(4):188-193.
- [12] 杨斌,程巨元.农业非点源氮磷污染对水环境的影响研究[J].江苏环境科技.1999,12(3):19-21.
- [13] 黄秀珠,叶长兴.持续畜牧业的发展与环境保护[J].福建畜牧兽医,1998(5):27-29.
- [14] 付青,吴险峰.我国陆源污染入海量及污染防治策略[J].中央民族大学学报(自然科学版),2006,15(3):213-217.
- [15] KRONVANG B. Diffuse nutrient losses in denmark[J]. Water Science Technology, 1996, 133(1): 81-88.
- [16] BOERSP C M. Nutrient emissions from agriculture in the Netherland: causes and remedies[J]. Water Science Technology, 1996, 33(1): 183-190.