

人类最大可持续海洋足迹的模拟

陈成忠^{1,2}, 林振山¹, 王 晖³

(1. 南京师范大学地理科学学院, 南京 210046; 2. 临沂师范学院地理与旅游学院, 山东 临沂 276005;

3. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875)

摘要:在 William Rees & Mathis Wackernagel 最初提出的生态足迹模型理论所划分的六类基本生态生产性土地面积中, 海洋以其能为人类提供鱼类等海产品而被单独列为水域一项。海洋生物资源是一种典型的可再生资源, 人类只有采取合理的开发策略方可保证海洋生物资源最大的可持续生产量。借用生态足迹、生物承载力概念的内涵, 提出海洋足迹、海洋承载力两个新概念; 运用非线性科学理论在海洋足迹与海洋承载力呈二次非线性关系的假设下, 建立海洋承载力二次非线性开发的动力模式, 并运用稳定性分析理论对其求解、分析。结果表明: (1) 海洋承载力与其增长率呈正相关关系, 与海洋足迹增长率呈负相关关系; (2) 为保证海洋生物资源的可持续利用, 人类必须控制最大海洋足迹增长率为 r/x_m (r 为海洋承载力增长率, x_m 为最大海洋承载力), 方可获得可持续的最大海洋足迹为 $rx_m/4$, 此时海洋承载力可以维持在稳定的平衡态(为其最大承载力的一半)。

关键词:海洋足迹; 海洋承载力; 非线性动力模式; 最大海洋足迹

文章编号: 1000-0933(2008)02-0656-05 中图分类号: P46, P735, Q149, Q178.53 文献标识码: A

The simulation of human maximum sustainable marine footprint

CHEN Cheng-Zhong^{1,2}, LIN Zhen-Shan¹, WANG Hui³

1 Geographical Science College, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China

2 Department of Geography and Tourism, Linyi Teachers College, Linyi 276005, China

3 College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(2): 0656 ~ 0660.

Abstract: Oceans, from which people could gain marine biologic resources, are considered as one of six types of basic ecological productive land areas of Ecological Footprint Model proposed by William Rees & Mathis Wackernagel. As a result, it is safe to draw a conclusion that marine biologic resources are very important. Because marine biologic resources are typical renewable resources, the maximum sustainable yield of marine biologic resources will be accessible if rational empolder strategy is adopted. Based on the conceptions of ecological footprint and biocapacity, we put forward new conceptions of marine footprint and marine biocapacity. According to their nonlinear dynamic relationship, a quadratic nonlinear dynamic model for marine footprint and marine biocapacity in this paper. Moreover, the value of the model is calculated and the results are analyzed in terms of the theory of stability analysis. The results show that: (1) The marine biocapacity is positively correlated to its growth ratio and negatively correlated to marine footprint's growth. (2) For the sake of the sustainable empolder of the marine biologic resources, the maximum growth ratio of marine footprint should not be overrun r/x_m (r refers to marine biocapacity growth ratio, and x_m refers to maximum marine biocapacity). Only in this way,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40371044); 国家“211”二期工程重大资助项目

收稿日期: 2006-12-02; 修订日期: 2007-05-09

作者简介: 陈成忠(1970~)男, 山东平邑人, 博士生, 副教授, 主要从事生态资源研究. E-mail: chenchengzhongbu@163.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China(No. 40371044) and National “211” Key Project of China

Received date: 2006-12-02; **Accepted date:** 2007-05-09

Biography: CHEN Cheng-Zhong, Ph. D. candidate, Associate professor, mainly engaged in ecology and resources. E-mail: chenchengzhongbu@163.com

can the maximum sustainable marine footprint be equal to $rm_x/4$, and the marine biocapacity will hold out steady equilibrium, the half of the maximum marine biocapacity.

Key Words: marine footprint; marine biocapacity; nonlinear dynamic model; maximum marine footprint

在 William Rees & Mathis Wackernagel 最初提出的生态足迹模型理论^[1~6]所划分的六类基本生态生产性土地面积中,海洋以其能为人类提供鱼类等海产品而被单独列为水域一项,足以见证海洋生物资源的重要性。海洋生物资源(海产品)是一种典型的可再生资源,在人类有限度的开发下,一般具有自我恢复即再生能力^[7,8]。但资源开发与资源管理是一对矛盾,所谓管理,就是开发策略。在陆地资源日益匮乏的今天,人类应该在海洋生物资源持续稳产的大前提下,研究如何控制开发使持续产量最大,不能为一时的高产去“竭泽而渔”^[9,10]。借用生态足迹、生物承载力概念^[1~5,11]的内涵,提出海洋足迹(marine footprint, MF)、海洋生物承载力(marine biocapacity, MC)两个新概念:海洋生物承载力指海洋单位水域供给人类生物资源的能力,即海洋单位水域生物资源密度(密度大,海洋生物承载力大;密度小,海洋生物承载力小;密度为0,表明海洋生物资源枯竭,海洋生物承载力为0);假如不考虑海产品是否在捕捞地本区域消费,只要在本海域捕捞肯定是对本海域造成影响,而且只要捕捞上来最终被人类消费掉了,海洋足迹就是指人类单位水域海洋生物资源的捕捞量,也就是消费量,即人类踏在海洋上的大脚。

全球的海洋生物承载力是否具有相应的增长潜力满足未来人口的海洋足迹增长需要?海洋足迹增长率保持多大可保证海洋可持续利用并最大限度满足人类对海产品的需求,使人类海洋足迹能够达到最大?本文尝试运用非线性科学理论^[12~15]研究人类海洋足迹与海洋生物承载力呈二次非线性关系的开发管理策略,以期对上述问题的解决提供一个新思路,为海洋生物资源开发和管理部门提供一定的理论参考,为生态足迹模型理论寻找可持续发展的阈值问题提供借鉴。

1 模型建立

如果用 x 表示海洋生物承载力,并假设海洋生物承载力增长率 r 是海洋生物承载力 $x(t)$ 的函数 $r(t)$,即不同海洋生物承载力的净增长率不同;设 x_m 为海洋最大生物承载力,即自然资源和环境条件所能容纳的最大海洋生物资源量,如果生物种群过于拥挤,就会死亡,导致承载力减小。根据 Logistic 模型,建立海洋生物承载力模型如下:

$$\frac{dx}{dt} = r(1 - \frac{x}{x_m})x = f(x, r), x(0) = x_0 \quad (1)$$

式中, r, x_m 是根据统计资料或经验确定的常数, $(1 - x/x_m)$ 体现了环境和资源对海洋生物承载力增长的阻滞作用。这是在没有人类捕捞干扰的自然条件下海洋生物承载力的增长模式。

下面研究在人类海洋足迹持续增加情况下海洋生物承载力的增长模式。不仅海洋生物资源分布存在着不均匀性和不平衡性,捕捞开发方式也各种各样,实际的开发策略受很多因素制约,往往不是线性的。假设人类海洋足迹 MF 与海洋生物承载力 x 呈二次非线性关系,即:

$$MF(x) = Rx^2(t) \quad (2)$$

式中,系数 R 为人类海洋足迹增长率,也可理解为人类海洋生物资源的开发强度或开发策略。

对海洋生物承载力的自然增长来说,人类的捕捞开发相当于一个阻力。根据(1)、(2),建立如下海洋生物承载力二次非线性开发的动力模式:

$$\frac{dx}{dt} = r(1 - \frac{x}{x_m})x - Rx^2 = f(x, r), x(0) = x_0 \quad (3)$$

2 平衡态特征分析

由于非线性动力系统的复杂性,人们往往无法求解任意(某)时刻系统的解。平衡态的物理意义是系统演化(发展)的最终态。所以,知道了平衡态及其性质就知道了系统的演化方向、特点和最终结局,从而也

就揭示了制约平衡态诸物理量之间的动力学关系。

(3) 式是一个一元二次非线性方程, 由平衡态(点)条件 $\frac{dx}{dt} = 0$, 不难求得系统(3)的定态解:

$$A \quad x_{01} = 0; \quad B \quad x_{02} = \frac{rx_m}{r + Rx_m} \quad (4)$$

对于一元动力系统, 其 Jacobi 矩阵^[14]为:

$$J = a_{11} = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{0i} \quad (5)$$

对平衡态的性质与稳定性讨论如下:

(1) 平衡态 A $x_{01} = 0$ (以下简称平衡态 A)

对于平衡态 A, 动力系统特征方程的根为:

$$\omega = a_{11} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_{01}} = r - 2 \left[\frac{r}{x_m} + R \right] x \Big|_{x=x_{01}} = r \quad (6)$$

由稳定性分析理论^[16]可知: 当 $r > 0$ 时, A 为不稳定的结点(海洋生物承载力增长率大于 0, 适度捕捞, 系统将离开 0 而增长); 当 $r < 0$ 时, A 为稳定的结点(海洋生物承载力增长率小于 0, 过度捕捞, 系统趋向于 0, 最终灭绝)。

(2) 平衡态 B $x_{02} = \frac{rx_m}{r + Rx_m}$ (以下简称平衡态 B)

对于平衡态 B, 动力系统特征方程的根为:

$$\omega = a_{11} = \left. \frac{df}{dx} \right|_{x=x_{00}} = r - 2 \left[\frac{r}{x_m} + R \right] x \Big|_{x=x_{00}} = -r \quad (7)$$

由稳定性分析理论可知: 当 $r > 0$ 时, B 为稳定的结点, 采取适度的开发策略, 海洋生物承载力就会稳定增长; 当 $r < 0$ 时, B 为不稳定的结点, 意味着过度开发将使人类—海洋生物资源系统向毁灭方向发展。

综上所述, 当 $r > 0$ 时, 海洋生物资源将从不稳定的 A 态向稳定的 B 态发展, 这时海洋生物资源永远捕捞不完, 人类方可获得最大可持续海洋足迹。

3 讨论

从以上分析不难看出, 平衡态 B 对整个人类—海洋生物资源系统非常重要。为此, 有必要对平衡态 B 做进一步分析和讨论。

3.1 海洋生物承载力变化与其增长率变化之间的关系

为了研究海洋生物承载力变化与其增长率变化之间的关系, 对于平衡态 B, $x_{02} = \frac{rx_m}{r + Rx_m}$ 中假设 $x_m = 1$, 分别取 $R = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$, 并进行数值模拟, 结果如图 1 所示。

图 1 表示当 $x_m = 1$ 时, 海洋生物承载力变化与其增长率之间的关系。其中横坐标代表海洋生物承载力增长率(r_i)的变化, 取值范围是 0 ~ 0.2, 纵坐标表示海洋生物承载力的变化。从图 1 可以看出: (1) 海洋生物承载力与其增长率之间呈正相关关系。(2) 不同的线段类型斜率取值不一样, 对于给定的海洋生物承载力增长率, 海洋足迹增长率越大, 海洋生物承载力就越小; 在相同海洋生物承载力下, 海洋足迹增长率越大, 所要求的

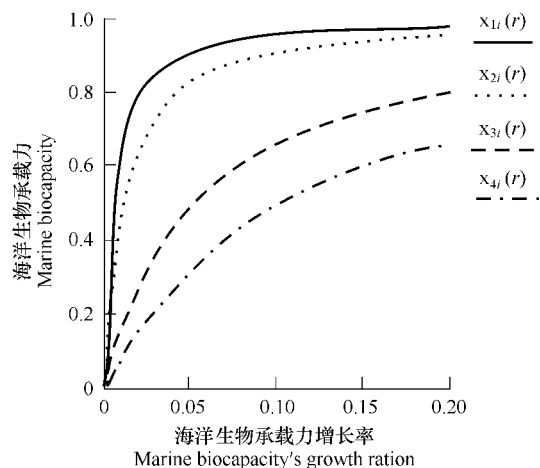


图 1 海洋生物承载力变化与其增长率之间的关系

Fig. 1 The relationship between marine biocapacity and its growth ratio

横坐标表示海洋生物承载力增长率的取值, 纵坐标表示由于其增长率变化所导致的海洋生物承载力的变化, 其中, 实线(x_1)、虚线(x_2)、断线(x_3)、点划线(x_4)分别对应于海洋足迹增长率 R 取 0.005, 0.01, 0.05, 0.1 等 4 种情况

海洋生物承载力增长率就越大。(3)当海洋生物承载力增长率小于 0.05 时,曲线变化十分剧烈,说明海洋生物承载力增长率小于 0.05 时,海洋生物承载力对其增长率变化十分敏感;当海洋生物承载力很小时,其增长量也很低;如果此时继续开发,海洋生物资源数量就会继续减少以致最终灭绝,海洋生物承载力变为 0,海洋不再为人类提供服务。

3.2 海洋生物承载力变化与海洋足迹增长率之间的关系

为研究海洋生物承载力变化与海洋足迹增长率之间的关系,在平衡态 B 中假设 $x_m = 1$,分别取 $r = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$,并进行数值模拟,结果如图 2 所示。

图 2 表示当 $x_m = 1$ 时,海洋生物承载力变化与海洋足迹增长率之间的关系。其中横坐标代表海洋足迹增长率 R 的变化,取值范围是 0.001 ~ 0.03,纵坐标表示海洋生物承载力的变化。从图 2 可以看出:(1)与图 1 明显不同的是,海洋生物承载力与海洋足迹增长率之间呈负相关关系。(2)对于给定的海洋足迹增长率,海洋生物承载力增长率越大,海洋生物承载力就越大;在相同海洋生物承载力下,海洋生物承载力增长率越大,海洋足迹增长率可以随之增大。(3)海洋足迹增长率越大,海洋生物承载力越小;对于不同承载力增长率,随着海洋足迹增长率变大,海洋生物承载力降低。海洋生物承载力增长率越小,随着海洋足迹增长率变大,海洋生物承载力变化很剧烈。当海洋生物承载力增长率很小时,尽量不要开发利用海洋生物资源。

4 海洋足迹的最大可持续值——最大海洋足迹

以上研究了海洋生物承载力的可持续性增长问题,为了保证海洋生物资源的可持续利用,还要考虑海洋足迹最大值问题,为此进行如下分析:

海洋足迹最大值问题就是海产品最大可持续消费量问题。从数学上看,最大可持续消费量策略就是取某一特定海洋足迹增长率 R 使得可持续海洋足迹(稳定的平衡态) $MF(A) = RA^2$ (因为是 0,没有意义)或 $MF(B) = RB^2$ 为极值(最大捕捞而不会导致人类—海洋生物资源系统的毁灭)。即:

$$\frac{dMF}{dR} = 0$$

通过对海洋足迹增长率 R 进行求导,可以得到最大可持续海洋足迹增长率为:

$$R_{\max} = \frac{r}{x_m}$$

从而得到最大可持续海洋足迹:

$$MF_{\max} = R_{\max} \left| \frac{rx_m}{r + R_{\max}x_m} \right| = \frac{rx_m}{4}$$

而稳定的海洋生物承载力,即平衡态 B 的值为:

$$x_{02} = \frac{rx_m}{r + R_{\max}x_m} = \frac{rx_m}{r + R_{\max}x_m} = \frac{x_m}{2}$$

从以上讨论可知, $R_m = \frac{r}{x_m}$ 是最大可持续海洋足迹增长率,此时获得的最大可持续海洋足迹为 $\frac{rx_m}{4}$ 。

5 结论

本文运用非线性科学理论,建立了海洋生物承载力二次非线性开发的动力模式。结果表明:(1)海洋生

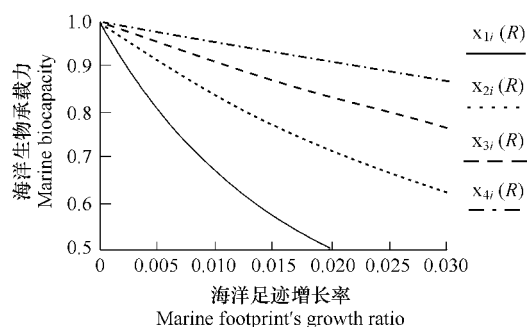


图 2 海洋生物承载力变化与海洋足迹增长率之间的关系
Fig. 2 The relationship between marine biocapacity and marine footprint's growth ratio
注:横坐标表示海洋足迹增长率的变化,纵坐标表示由于海洋足迹增长率变化所导致的海洋生物承载力的变化。其中,实线(x_1)、虚线(x_2)、断线(x_3)、点划线(x_4)分别对应于海洋生物承载力增长率 r 取 0.02, 0.05, 0.10, 0.20 四种情况

物承载力与其增长率呈正相关关系,与海洋足迹增长率呈负相关关系;(2)在相同海洋生物承载力下,海洋足迹增长率越大,所要求的海洋生物承载力增长率就越大;海洋生物承载力增长率越小,随着海洋足迹增长率变大,海洋生物承载力变化很剧烈;(3)为了保证海洋生物承载力可持续增长,必须控制最大海洋足迹增长率为

$R_{\max} = \frac{r}{x_m}$,此时人类可以获得持续的最大海洋足迹为 $MF_m = \frac{rx_m}{4}$,而此时的海洋生物承载力可以维持在稳定的

平衡态 $B: x_{02} = \frac{x_m}{2}$,即当人类海洋足迹增长率等于海洋生物承载力增长率与最大海洋生物承载力之比时,人类方可获得持续的最大海洋足迹(海洋生物承载力增长率与最大海洋生物承载力乘积的四分之一),此时海洋生物承载力可以维持在稳定的状态(其值等于最大海洋生物承载力的二分之一),不会导致海洋生物资源减少以至灭绝。

目前,由于陆地资源的开发利用日趋极限及陆地生存环境的日益恶化,人类的生存和发展受到严重威胁。于是,人们将可持续发展的希望寄托于海洋,而海洋生物资源捕捞量大大超过其再生量又是当前我国海洋生物资源开发中存在的主要问题^[17]。因此,必须采取合理的开发策略,正确处理好经济发展与海洋生物资源保护之间的关系,保护好我国珍贵的海洋生物资源对于我国的现代化建设、可持续发展和环境保护都具有重大的现实意义。

References:

- [1] Rees W E. Ecological footprint and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, 1992, 4(2): 121—130.
- [2] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [3] Rees W E, Wackernagel M. Urban ecological footprints: Why Cities cannot be sustainable and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16: 223—248.
- [4] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29: 375—390.
- [5] Wackernagel M, Onisto L, Callejas L, et al. Ecological footprints of nations: How much nature do they use? How much nature do they have? Commissioned by the Earth Council for the Rio + 5 Forum. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997. 4—12.
- [6] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective. *Ecological Economics*, 1997, 20: 3—24.
- [7] Fu X M, Wang C Y, Wang Y N, et al. Marine biologic resources and its sustainable utilization strategy. *China Bioengineering Magazine*, 2006, 26(7): 105—111.
- [8] Lu B, Yang R Z, Chen Y J, et al. The growth, problem and foreground of marine fishery of China. *China Agricultural Information*, 2006, 9: 10—11.
- [9] Murray J D. *Mathematical biology*. USA: Springer, 1993.
- [10] Ma Z E. Building mathematics model and research metapopulation ecology. He Fei: Anhui Education Press, 1994.
- [11] Song X G. Study on the measurement of ecological footprint. *Statistics Research*, 2003, 2: 44—47.
- [12] Lin Z S. The dynamic relation of human activities and renewable resources. *China Population, Resources and Environment*, 2003, 13(1): 8—21.
- [13] Lin Z S, Shi F B, Wang H. The retrieved model of Tianjin local climate. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(1): 115—120.
- [14] Lin Z S. *Nonlinear science and its application to earth science*. Beijing: Meteorology Press, 2003.
- [15] Lin Z S. A regional growth model of ternary variables binding by resource. *Geographical Research*, 2005, 24(5): 767—773.
- [16] Lin Z S. *Nonlinear dynamics in the atmospheric science*. Nanjing: Nanjing University Press, 1993.
- [17] Liu R Y. The sustainable utilization of Chinese marine biologic resources. *Science and Technology Review*, 2004, 11: 24—31.

参考文献:

- [7] 傅秀梅,王长云,王亚楠,等.海洋生物资源与可持续利用对策研究. *中国生物工程杂志*, 2006, 26(7): 105—111.
- [8] 卢布,杨瑞珍,陈印军,等.我国海洋渔业的发展、问题与前景. *中国农业信息*, 2006, 9: 10—11.
- [10] 马知恩.种群生态学的数学建模与研究.合肥:安徽教育出版社, 1994.
- [11] 宋旭光.生态占用测度问题研究. *统计研究*, 2003, 2: 44—47.
- [12] 林振山.人类活动与可再生资源关系的动力学方法分析. *中国人口·资源与环境*, 2003, 13(1): 18—21.
- [13] 林振山,史芳斌,王辉.天津局地气候的反演建模及其研究. *气象学报*, 1995, 53(1): 115—120.
- [14] 林振山.非线性科学及其在地学中的应用.北京:气象出版社, 2003.
- [15] 林振山.资源约束下的三元函数区域增长模式. *地理研究*, 2005, 24(5): 767—773.
- [16] 林振山.非线性力学与大气科学.南京:南京大学出版社, 1993.
- [17] 刘瑞玉.关于我国海洋生物资源的可持续利用. *科技导报*, 2004, 11: 24—31.