

## Ecopath with Ecosim 在水生生态系统研究中的应用

### An application of Ecopath with Ecosim to aquatic ecology

宋 兵<sup>1,2</sup>, 陈立侨<sup>1</sup>, Chen Yong<sup>3</sup>

(1. 华东师范大学 生命科学学院, 上海 200062; 2. 浙江海事局, 浙江 杭州 310014; 3. School of Marine Science, University of Maine, ME 04469 USA)

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096 (2007) 01-0083-04

地球上的水体为人类提供着无法计量的生态系统服务和相应的生态价值。然而,水生生态系统一直承受着巨大的捕捞和环境压力。为更好地分析人类以及自然扰动对水生生态系统的影响,并建立科学合理的管理机制,许多研究种群结构和动态的模型软件以及建模方法被开发出来。这些模型包括单种群模型、多物种虚拟种群分析模型 (Multispecies virtual population analyses, MSVPA)<sup>[1]</sup>以及基于食物网的生态系统模型等<sup>[2]</sup>。单种群模型难以全面地反映整个生态系统的结构和功能,也难以预测渔业和环境变迁在系统水平上的影响,从而无法实现宏观和科学的决策。MSVPA 的局限性则在于其所需参数过于复杂,非常难以获得。而 EwE (Ecopath with Ecosim) 则采用 Ecopath 先建立描述生态系统食物网关系的静态模型,然后将 Ecopath 的结果用于驱动 Ecosim 和 Ecospace,从而得以分析在系统背景下种群数量和生物量的动态变化,并简化了参数估计的过程<sup>[2]</sup>。

EwE 开发的历史将近 20 年,最初由 Polovina<sup>[3]</sup> 创建,以分析水生生态系统中不同物种的生物量和捕食关系。随后该软件结合了 Odum 和 Ulanowicz 等<sup>[3,4]</sup> 的理论生态学研究成果,用以分析生态系统各功能组间的物流以及系统的稳定性和成熟度等。此后 Ecopath 的功能逐渐得到扩展,并开发了用于模拟生态系统在时间和空间上动态变化的分析模块,也就是 Ecosim 和 Ecospace<sup>[6,7]</sup>。目前 EwE 主要由 Pauly、Walters (加拿大大不列颠哥伦比亚大学渔业中心) 以及 Christensen (国际水生生物资源管理中心, ICLARM) 等进行开发和推广工作。EwE 已在全世界

不同纬度地区、不同类型生态系统的研究中得到了验证,截至 2000 年 10 月,该软件已经在全世界 120 多个国家拥有超过 2 000 个注册用户,并且在各类期刊发表了 100 多篇有关 EwE 模型的文献<sup>[5]</sup>。然而,该软件在国内的应用仅见全龄等<sup>[8]</sup>对渤海湾生态系统的初步研究,对其组成、功能、建模步骤以及最新应用的研究仍未见报道。作者对 EwE 进行了详细的介绍,并回顾了其在水生生态系统研究和管理中的应用。希望能将这一科学、量化的自动分析工具引入到中国水生生态系统的研究中,并推广其“基于生态系统”的分析方法和决策思想。

## 1 EwE 的分析功能和建模步骤

### 1.1 EwE 的组成和分析功能

EwE 主要由 Ecopath、Ecosim 和 Ecospace 三大模块构成。除了这 3 个主要的模块之外,该软件还包括一些附加的组件和分析功能,具体组件和对应功能如下:

(1) Ecopath 用以输入生态系统各功能组生物学和捕捞的关键数据,并建立数量平衡模型,并提供基本分析功能。

---

收稿日期: 2004-08-08; 修回日期: 2004-12-10

基金项目: 国家自然科学基金海外青年学者合作研究基金资助项目 (30028018)

作者简介: 宋兵(1976-), 男, 湖南长沙人, 博士生, E-mail: bing\_song123@sina.com; 陈立侨, 通讯作者, lqchen@bio.ecnu.edu.cn

(2) Econet 运用理论生态学原理对生态系统的结构、功能、能流的分布、循环以及系统的稳定性等特征进行网络分析。

(3) Ecowrite 用于在建模过程中对数据的来源和引用情况进行备案。

(4) Pedigree 根据资料的来源和准确程度,按照一定的标准,对单个数据或者模型的整体质量进行评价。

(5) Ecoranger 采用贝叶斯统计方法进行参数估计,得出参数的合理分布,并对模型进行平衡。

(6) Sensitivity Analysis 评估参数的敏感性。

(7) Ecosim 动态模拟渔业政策和环境扰动在一定时间内对捕捞产量以及资源量的影响。

(8) Ecospace 由用户提供相关功能组的栖息地、捕捞和保护区域的信息,进行空间分析。

## 1.2 EwE 建模的具体步骤

与其他模型软件相比, Ecopath 建模所需的数据相对简单,并且可以非常方便地利用传统资源评估、生态调查和历史文献的数据。Pauly 等<sup>[9]</sup>, Walters 等<sup>[6]</sup>专门撰文介绍了如何使用 EwE 研究渔业对水生生态系统的影响以及鱼类种群在生态系统背景下的变动。Okey 和 Pauly<sup>[10]</sup>以威廉王子湾 (PWS) 生态系统模型的构建为例,探讨了在“基于生态系统”的架构下,如何联合众多生态、生物学家以及政府部门,进行 EwE 的建模和分析工作。一般来说,建立 EwE 模型的具体过程包括以下步骤。

### 1.2.1 前期调查

对所研究的生态系统进行初步的调查和研究,了解该系统的基本组分、已经进行过的研究和历史资料等。

### 1.2.2 准备会议

组织各方面的专家和相关部门进行讨论,确定研究的主题和系统的主要组分。对所需的数据进行细分,将数据测定和收集的任务划分到每个研究组,并确定研究时刻表以及联系和协调的方式。

### 1.2.3 数据的收集和测定

需要了解的数据包括:各种生物的生物量、生产力、消费量、食物组成、迁移、空间分布和相关渔业信息等。需要注意的是,研究者必须考虑到数据的时效性和位点特异性,即所有这些数据最好都采用研究位点当地的和在该研究时间段内的资料。如果项目需要着重了解某些生物的种群变动,那就还要深入研究

该物种的种群结构、繁殖特性和 von Bertalanffy 生长方程的相关参数等。

### 1.2.4 数据的提交

正如其他模型一样, EwE 模型建立的正确与否取决于数据的准确性和可靠性。因此,在数据的提交和汇总过程中,可以运用 Ecowrite 记录数据的来源和引用情况,用 Pedigree 评价数据和模型整体的质量。对于某些无法确定的参数,可以先给出其合理的范围和分布函数,再用 Ecoranger 进行参数估计。

### 1.2.5 模型的初步建立和平衡

将提交的数据输入 Ecopath 并进行平衡测试。根据模型平衡的结果对测得的参数进行检验,无法平衡的参数需要重新测定或修改,并详细说明修改的过程和理由。

### 1.2.6 基本分析和网络分析

采用 Ecopath 的基本分析和网络分析功能可以对生态系统的以下特征进行研究:系统的规模;各功能组间物质流动和循环的情况;各物种所处的营养级及其生态位重叠分析;生态系统的稳定性和成熟度;各有效营养级间能量流动的效率;以及生物间彼此互利或危害的程度等。

### 1.2.7 相关政策和扰动的模拟

根据实际情况,设置若干自然或者人类扰动的事件,将这些事件的直接影响量化并输入模型。在已经建立的 Ecopath 模型的基础上,采用 Ecosim 和 Ecopath 分析整个系统和相关种群的时间和空间变化。

## 2 EwE 在水生生态系统研究中的应用

### 2.1 研究生态系统的结构及其食物网营养动力学特征

生态系统中的生物和非生物组分以及其间复杂的物流、能流联系构成生态系统的结构。围绕着生态系统的组成要素与相互作用,生态系统内部的层级关系,生态系统结构与其稳定性的关系,外来物种对生态系统的影响,以及食物网营养动力学的研究一直都是生态学研究领域的热点问题。同时,上述研究的开展,也是渔业和环境管理所必需的基础工作以及后续研究得以进行的前提。EwE 可以对生态系统的结构和营养动力学特征进行量化、综合的分析。如 Arreguín-Sánchez 等<sup>[11]</sup>运用 Ecopath 评估了笛鲷科鱼类在墨西哥湾西部海湾和尤卡坦大陆架这两个生态系统中的所处的地位,并运用持久性 (persistence) 恢复时

间 (recovery time) 和弹性 (resilience) 等指标比较了上述两个生态系统的稳定性。结果表明,前者所受的捕捞压力较小,系统更复杂也更稳定。Vega-Cendejas 等<sup>[12]</sup>对墨西哥湾红树林生态系统的研究表明:碎屑在该系统中占有重要的地位,约有 60% 的能量由碎屑经过微型甲壳动物再传递到各种鱼类的幼体。同时,鱼类组较低的生态营养效率说明它们很少遭到捕食。红树林生态系统为许多经济鱼类的幼体提供了良好的栖息和觅食场所,维持该系统对渔业资源的保护具有重要的意义。此外, Jarre-Teichmann 等<sup>[13]</sup>运用 Ecopath 对南班加拉等 6 个上升流生态系统进行了比较研究。Heymans<sup>[14]</sup>以北班加拉上升流生态系统为对象比较了 Ecopath 和 NETWRK 这两个软件的网络分析功能。Bradford-Grieve 等<sup>[15]</sup>对新西兰东南部海底生态系统的生产力和能量传输效率进行了研究。

## 2.2 研究渔业对水生系统的影响

渔业是人类对水生生态系统最重要的影响之一,一些营养级比较高的肉食性鱼类,往往因其经济价值较高而被捕捞。由于渔业捕捞不断从水体选择性地移除顶级捕食者,造成捕食压力的减小,其下行 (top-down) 效应将对生态系统的结构造成显著影响,使得较低营养级的鱼虾类在系统和渔获物中占绝对优势。EwE 开发的初衷及其最主要的用途就是研究渔业对水生生态系统的影响,并为渔业管理和决策提供量化工具和科学依据。Pauly 等<sup>[16]</sup>根据已发布的 60 多个 Ecopath 模型,计算得到 220 多种鱼类和无脊椎动物的营养级。并分析了 1950~1994 年全球渔业捕捞营养级的变化及其原因。结果表明:全球捕捞营养级由 1950 年的 3.3 下降到了 1990 年的 3.1。其原因是随着渔业捕捞压力的增大,渔获物逐渐由肉食性、长寿的底层鱼类向浮游生物食性、短寿的上层鱼类转变。与全球渔业捕捞营养级下降趋势相呼应的是渔业捕捞产量的先升后降,说明当前全球渔业资源开发过度,其发展不具备可持续性。Stevens 等<sup>[17]</sup>研究了软骨鱼类捕捞业对委内瑞拉热带大陆架、夏威夷珊瑚礁以及北太平洋海洋生态系统的影响。由于软骨鱼类 (尤其是鲨鱼) 多为可选择型物种,并且分布区域具有较大的局限性,其资源量极易受到捕捞压力的影响,且很难恢复。同时,加强对鲨鱼的捕捞压力, Ecosim 的模拟结果往往与预期相反,即作为鲨鱼主要食物的一些生物,其生物量并不随着鲨鱼生物量的减少而增加。这提示,在渔业影响评估中,不能仅仅

考虑渔业对生态系统的短期、直接影响,还应该考虑该种渔业对整个生态系统物种之间捕食和竞争关系的间接和长期影响。Kitchell 等<sup>[18]</sup>研究了在休闲渔业和外来物种入侵的影响下,加拿大苏必利尔湖 (Lake Superior) 生态系统对管理政策的反应以及本地湖鲟种群的恢复策略。Christensen<sup>[19]</sup>研究了渔业对泰国湾海洋生态系统的影响,并用 Ecosim 模拟和分析了如何在减少渔业压力的条件下恢复生物资源。

## 2.3 研究环境干扰对生态系统的影响

水体污染往往造成水生生物敏感种类消失,耐污种类增加,物种多样性下降以及群落结构与功能的变化<sup>[20]</sup>,从而通过上行 (bottom-up) 效应由下而上地改变整个生态系统的结构。Ecopath 模型能够提供非常丰富的有关物种生物量、食物组成、生长和代谢参数等的信息。通过比较环境干扰前后生态系统的结构以及一些关键物种生物量的变化,可以量化评估环境干扰的影响。此外,将 Ecopath 模型与其他生态毒理模型结合,可以很好地分析毒物在生态系统中的分布、积累和转运。如 Career 等<sup>[21]</sup>建立了威尼斯泻湖北部浅水区域的一个 Ecopath 模型,将该模型的代谢率、食物组成和结构特征等结果作为另外一个生态毒理模型的输入参数,成功地评估了二恶英类 (Dioxins) 化合物在各种水生生物体内的生物积累。Okey 和 Pauly<sup>[9]</sup>研究了 1989 年 Exxon Valdez 原油泄漏事件 (EVOS) 对威廉王子湾 (PWS) 生态系统的影响。研究者合作建立了拥有 50 个生态功能组的 Ecopath 模型,用以代表原油泄漏事件后 PWS 生态系统的状况。通过将该模型与原油泄漏前的模型比较,结果表明,原油污染使得浮游动物和浮游植物生物量减少,并导致系统内的关键种,即鲱鱼的生物量从 8 107 t/km<sup>2</sup>降低到 4 866 t/km<sup>2</sup>,从而造成了整个生态系统结构的破坏和生产力的下降。

## 3 小结

中国海域辽阔,河湖众多,多年来对不同水体的生态系统进行了长时间的研究,积累了大量基础资料。然而由于缺乏基于生态系统的量化分析工具,研究层面多停留在种群、群落水平,对整个生态系统进行量化和综合的研究较少。同时研究成果、原始资料分散于个人或个别单位,缺乏交流、共享和积累,信息利用效率较为低下。EwE 的分析和模拟的功能比较强大,能够为生态系统的研究和管理提供理论、量化的分析工具,并且可以非常方便地利用传统资源评

估、生态调查和其他历史文献的数据。Okey 和 Pauly<sup>[9]</sup>指出,生态系统中各个组分之间存在千丝万缕的联系。人类以及自然扰动对生态系统的影响不仅仅在于其直接作用的某几个物种,而是通过系统内部的联系传递到其它的组成部分,进而影响到整个系统的稳定性和完整性。采用生态系统建模的方法可以全面地了解这些影响。然而,建模的精度要求越高,时间跨度越长,数据的测定、搜集和转换的工作量也就越大,单个研究者或者单位往往难以承担整个研究任务。因此,必须打破学科与部门间的界限,运用“基于生态系统”的研究和管理思想,针对重点研究对象,建立长期的数据监测和提交机制,如网络数据库等,实现研究成果的共享和有效积累。建立由生态学、生物学以及地学等多个学科专家和相关政府部门组成的协作群体,共同进行调查和研究。从整个系统的角度分析渔业和污染对水域生态系统的影响,从而建立量化、宏观和多目标的研究、管理和决策体系。

#### 参考文献:

- [1] Sparre P. Introduction to multispecies virtual population analysis [J]. *ICES Marine Science Symposium*, 1991, 193: 12-21.
- [2] Walters C, Pauly D, Christensen V. Representing density dependent consequences of life history strategies in aquatic ecosystems: EcoSim II [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 70-83.
- [3] Polvina J J. Model of a coral reef ecosystems 1. The ECOPATH model and its application to French Frigate Shoals [J]. *Coral Reefs*, 1984, 3 (1): 1-11.
- [4] Odum E P. The strategy of ecosystem development [J]. *Science*, 1969, 104: 262-270.
- [5] Christensen V, Walters C J, Pauly D. Ecopath with Ecosim: a user's guide [R]. Vancouver: Fisheries Centre, University of British Columbia, Canada and Penang: ICLARM, Malaysia, 2000, 7-16.
- [6] Walters C, Christensen V, Pauly D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments [J]. *Review in Fish Biology and Fisheries*, 1997, 7(2): 139-172.
- [7] Walters C, Pauly D, Christensen V. Ecospace: prediction of mesoscale spatial patterns in trophic relationships of exploited ecosystems, with emphasis on the impacts of marine protected areas [J]. *Ecosystems*, 2000, 2: 539-554.
- [8] 全龄, 唐启升, Pauly D. 渤海生态通道模型初探[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 435-440.
- [9] Pauly D, Christensen V, Walters C. Ecopath, Ecosim, and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries [J]. *Journal of Marine Science*, 2000, 57: 697-706.
- [10] Okey T A, Pauly D. A mass-balanced model of trophic flows in Prince William Sound [R]. Alaska: The 16th Lowell Wakefield Fisheries Symposium, 1998, 621-635.
- [11] Arreguin-Sánchez F, Manickchand-Heileman S. The trophic role of lutjanid fish and impacts of their fisheries in two ecosystems in the Gulf of Mexico [J]. *Journal of Fish Biology*, 1998, 53 (Supplement A): 143-153.
- [12] Vega-Cendejas M E, Arreguin-Sanchez E. Energy fluxes in a mangrove ecosystem from a coastal lagoon in Yucatan Peninsula, Mexico [J]. *Ecology Modelling*, 2001, 137: 119-133.
- [13] Jarre-Teichmann A, Shannon L J, Moloney C L, et al. Comparing trophic flows in the southern Benguela to those in other upwelling ecosystem [J]. *South African Journal of Marine Science*, 1998, 19: 391-414.
- [14] Heymans J J, Baird D. Network analysis of the northern Benguela ecosystem by means of NETWRK and ECOPATH [J]. *Ecology Modelling*, 2000, 131: 97-119.
- [15] Bradford-Grieve J M. Pilot trophic model for subantarctic water over the Southern Plateau, New Zealand: a low biomass, high transfer efficiency system [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2003, 289: 223-262.
- [16] Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J. Fishing down marine food webs [J]. *Science*, 1998, 279 (6): 860-863.
- [17] Stevens J D, Bonfil R, Dulvy N K, et al. The effects of fishing on sharks, rays and chimaeras (chondrichthyans), and the implications for marine ecosystems [J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2000, 57: 476-494.
- [18] Kitchell J F, Cox S P, Harvey C J, et al. Sustainability of the lake superior fish community: interactions in a food web context [J]. *Ecosystems*, 2000, 3: 545-560.
- [19] Christensen V. Fishery-induced changes in a marine ecosystem: insight from models of the Gulf of Thailand [J]. *Journal of Fish Biology*, 1998, 53 (Supplement A): 128-142.
- [20] 黄玉瑶. 内陆水域污染生态学原理与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 135-168.
- [21] Carrer S, Halling-Sørensen B, Bendoricchio G. Modelling the fate of dioxins in a trophic network by coupling an ecotoxicological and an Ecopath model [J]. *Ecology Modelling*, 2000, 126: 201-223.

( 本文编辑: 张培新 )