

福田红树林湿地生态系统 EWE 模型构建*

丑庆川¹ 徐华林² 刘 军³ 史秀华^{4**}

(¹深圳大学生命科学学院, 广东深圳 518060; ²广东内伶仃福田国家级自然保护区, 广东深圳 518048; ³内蒙古农业大学生态与环境学院, 呼和浩特 010019; ⁴深圳大学高尔夫学院, 广东深圳 518060)

摘 要 以福田红树林湿地生态系统为研究对象, 将其生物组成分为红树植物、底栖动物、浮游植物、浮游动物、鸟类和碎屑等 15 个功能组, 运用 Ecopath with Ecosim (EWE) 软件, 构建了福田红树林湿地生态系统的 EWE 模型, 探讨了红树林湿地生态系统的状态、特征及不同物种之间的营养关系, 并评价红树林湿地生态系统当前的健康状况。分析表明, 福田红树林湿地生态系统能流的最主要来源是碎屑, 能流主要在营养级 I 到 IV 之间流动, 转化效率最高发生在第 I 和第 II 营养级之间 (28.8%), 总体转化效率为 11.2%, 且系统对营养级 II 的利用最为充分。处于低营养级的功能组在系统能量传递的过程中起着非常关键的作用, 并且对整个系统的影响强烈。生态系统总体特征参数生物量/总流量 (TB/TT)、连接指数 (CI) 和系统杂食性指数 (SOI) 分别为 0.163、0.123 和 0.018, 综合分析表明, 福田红树林湿地生态系统目前有退化的趋势。

关键词 红树林; 湿地; 生态通道; 能量流动

中图分类号 Q148 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)5-1413-07

Construction of the EWE model of Futian mangrove wetland ecosystem. CHOU Qingchuan¹, XU Hua-lin², LIU Jun³, SHI Xiu-hua^{4**} (¹ College of Life Science, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China; ² Neilingding Futian State Nature Reserve, Shenzhen 518048, Guangdong, China; ³ College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; ⁴ Golf College, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(5): 1413–1419.

Abstract: In the present study, the biological composition of Futian mangrove wetland ecosystem was divided into 15 functional groups and covers almost the whole process of energy flow in the ecosystem, including mangrove plants, zoobenthos, phytoplankton, zooplankton, birds and detritus. Ecopath with Ecosim (EWE) software was used to construct the EWE model of the Futian mangrove wetland ecosystem. Furthermore, we also analyzed the state, characteristics and nutritional relationships among different species, and evaluated the current health state of the mangrove wetland ecosystem. The analysis showed that detritus was the most important source of energy flow of Futian mangrove wetland ecosystem. Energy flow occurred mainly at the trophic levels I → IV. The highest conversion efficiency occurred between the trophic levels I and II (28.8%), and the overall conversion efficiency was 11.2%, which is in line with the flow efficiency value (about 10%) quantified by Lindemann. The system took the most abundant advantage of the trophic level II. The functional groups at the lower trophic levels played a key role in the process of energy transfer, and their impacts on the whole system were very strong. The ecosystem overall characteristic parameters—total biomass/total through (TB/TT), connectance index (CI) and system omnivory index (SOI)—were 0.163, 0.123 and 0.018, respectively. Therefore, it could be concluded that Futian mangrove wetland ecosystem is currently in a trend of degradation.

Key words: mangrove; wetland; ecopath; energy flow.

* 红树林湿地退化监测预警技术的引进项目 (2008-4-38) 和深圳湾红树林结构调控及修复技术研究与示范项目 (2013KJCX011-04) 资助。

** 通讯作者 E-mail: shxh100@163.com

收稿日期: 2013-10-04 接受日期: 2014-01-12

红树林是生长在 32°N—38°S 的热带亚热带沿海潮间带的木本植物群(罗忠奎等,2007),它是处于陆地生态系统与海洋生态系统过渡带的一类特殊湿地生态系统,其生境具有高温、高湿、风浪大、辐射强、土壤含氧量低和盐度高等特点,兼有陆地生态系统和海洋生态系统的特征,是热带亚热带海岸带的生态关键区(王伯荪等,2002)。全球红树林面积约为 1500 万 hm^2 ,这些红树林对维持海岸带生态系统功能起着重要的作用(罗忠奎等,2007)。

福田红树林保护区是世界上唯一位于市区中心的自然保护区,被都市的快速干道所包围,与城市的商务中心区仅相距 2 km。由于城市建设和环境保护的矛盾日益突出,在周边高强度开发建设影响下,福田保护区的生态承载力急剧下降(杜雁和郭德英,2000)。近年来,国内外对红树林的研究大多集中在对红树林生态系统现状的描述和受损生态系统的修复方面(孟宪民,1999),从整个生态系统角度研究其变化趋势的尚不多见,本研究将尝试从全新的角度对红树林的现状进行描述,并对其未来发展方向做出预测。

生态通道 Ecopath With Ecosim(EWE)模型是一种利用营养动力学原理直接构造生态系统结构,描述生态系统能量流动的平衡模式(全龄,1999)。最初由 Polvina(1984)创建,随后该软件结合了 Odum(1969)等的生态学理论研究成果,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。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,UBCFC)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(宋兵等,2007)。EWE 模型是特定生态系统在某一时期的快照,可以快速反应该生态系统的状态、特征及营养关系等(陈作志等,2008)。

生态通道模型自开发至今,主要用于海洋和淡水生态系统,用以评估渔业资源,但该模型也可用于陆地生态系统(例如:农田、森林、湿地等生态系统)(Dalsgaard *et al.*, 1995)。目前国内外学者利用该模型对各类生态系统做了大量研究,并取得了许多成果。本研究以生态调查获得的大量数据为基础,利用 EWE 生态通道模型软件建立福田红树林湿地生态系统的生态通道模型,然后利用该模型的输出数据对福田红树林湿地生态系统的结构和功能现状进行初步评价,以期对福田红树林生态系统的未来发展方向作

出预测,并为保护区的管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

福田红树林保护区位于深圳湾东北岸(113°56'E, 22°29'N)。东起深圳河口,西至车公庙西端,面积达 367.64 hm^2 (图 1)。该区域属东亚季风区,南亚热带季风海洋性气候区;全年平均气温为 22.4 $^{\circ}\text{C}$,1 月气温最低,最低极温为 0.2 $^{\circ}\text{C}$,7 月气温最高,最高极温为 38.7 $^{\circ}\text{C}$;年平均降雨量 1700 ~ 1900 mm,主要集中在 4—9 月;年蒸发量 1500 ~ 1800 mm;年平均相对湿度 80%;全年日照时数约 2000 h(王勇军等,1999;周福芳等,2012)。福田红树林保护区是世界上唯一位于城市中心区的红树林生态湿地,是东半球国际候鸟通道上重要的“中转站”和“加油站”(何奋琳,2004),是国际上生物多样性和湿地生态保护的重要对象(罗澍等,2000;张乔民和隋淑珍,2001)。

福田自然保护区主要由红树林、基围鱼塘、滩涂、河流、陆地和海域等类型构成。红树林大多呈带状分部,群落结构比较简单,为灌木或小乔木林,林冠较为整齐,一般高 4 ~ 6 m。红树植物主要有秋茄(*Kandelia candel*)、木榄(*Bruigiera gymnorhiza*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、白骨壤(*Avicennia marina*)和老鼠簕(*Acanthus ilicifolius*)等(梁素娟等,2009)。浮游植物和浮游动物主要集中在基围鱼塘,浮游植物中硅藻门和绿藻门的藻类占比例较高,浮游动物主要以原生动物、轮虫、枝角类和桡足类为主(刘玉等,2006)。底栖动物主要生活在红树林下碎屑和滩涂中,主要为甲壳动物、软体动物和弹涂鱼类(吴振斌等,2002)。鸟类中以陆鸟为主,最常见的陆鸟有 5 目 19 科 55 种(陈桂珠等,1995)。

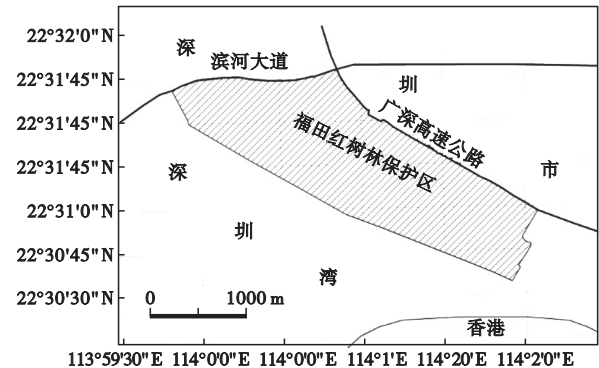


图 1 福田保护区位置示意图
Fig. 1 Geographical location of Futian Reserve

1.2 研究方法

本研究采用加拿大大不列颠哥伦比亚大学渔业中心 (UBCFC) 和国际水生生物资源管理中心 (ICLARM) 所开发的 EWE 软件 (宋兵等, 2007), 构建深圳湾红树林湿地生态系统的 EWE 模型。利用所建立模型的输出数据来分析该生态系统的状态、特征及不同物种之间的营养关系等, 从而对深圳湾红树林湿地生态系统的现状进行评价, 并为保护区的管理提供相关的科学依据。

2 模型的构建

2.1 EWE 模型的基本原理

EWE 模型定义的生态系统是由一系列有生态关联的功能组 (group 或 box) 组成, 这些功能组包括有机碎屑、浮游生物、一种鱼类、一种鱼类的某一年龄组成或一类生态特性 (如摄食) 相同的鱼种、一种植物或一种植物的某一年龄组等, 所有功能组要能够覆盖该生态系统能量流动的全部过程。在建模过程中假设生态系统中的功能组全部是相对稳定的, 即表示该生态系统的总输入与总输出是相等的。可以用公式表示如下:

$$Q = P + R + U \quad (1)$$

式中, Q 为消耗量, P 为生产量, R 为呼吸量, U 为未消化的食物量。

根据热动力学原理, EWE 模型定义的生态系统中每个功能组的能量输入与输出保持平衡。用一组联立的线性方程定义生态系统, 每一个线性方程表示生态系统中的一个功能组, 用数学公式表示为:

$$P_i = Y_i + B_i \cdot M_{2i} + E_i + BA_i + P_i(1 - EE_i) \quad (2)$$

式中, P_i 为功能组 i 的总生产率, Y_i 为功能组 i 的总渔获捕捞率, M_{2i} 为功能组 i 总的被捕食死亡率, E_i 为功能组 i 的净迁移率 (迁出率 - 迁入率), BA_i 为功能组 i 的生物量累积率, EE_i 为功能组 i 的生态营养转化效率, 然而 $M_{0i} = P_i(1 - EE_i)$ 代表功能组 i 的其他死亡率。

方程 (2) 可以进一步表示为:

$$B_i \cdot (P/B)_i - \sum_{j=1}^n B_j \cdot (Q/B)_j \cdot DC_{ji} - (P/B)_i \cdot B_i \cdot (1 - EE_i) - Y_i - E_i - BA_i = 0 \quad (3)$$

$$B_i \cdot (P/B)_i \cdot EE_i - \sum_{j=1}^n B_j \cdot (Q/B)_j \cdot DC_{ji} - Y_i - E_i - BA_i = 0 \quad (4)$$

式中, P/B_i 为功能组 i 的生产量与生物量比值, Q/B_i

为功能组 i 的消耗量与生物量比值, DC_{ji} 为被捕食生物 i 在捕食生物 j 的食物组成中所占的比例。

建立 EWE 模型需要输入的基本参数有 B_i 、 P/B_i 、 Q/B_i 、 EE_i 、 DC_{ji} 和 E_i 。前 4 个参数中至少要有 3 个被输入, DC_{ji} 则是要求必须输入的项, 其他未知项可通过已输入参数在模型中自行运算得出 (全龄, 1999)。

通过对上述线性方程求解, 就能定量能量在生态系统各个功能组之间的流动以及各个功能组的生物学参数。进而对生物量在食物网中的流动进行定量描述, 并对生态系统中各个营养级之间的相互作用进行分析 (Mohamed *et al.*, 2005)。

2.2 功能组划分

EWE 模型中功能组的划分, 主要是根据整个系统的要求和相关生态学理论 (李岚, 2008), 将生态位 (食物组成、摄食方式、个体大小、年龄组成等) 重叠度高的种类进行合并以简化食物网。EWE 模型功能组的划分可以依据以下原则 (张宏达等, 1998; Christensen *et al.*, 2005): 1) 在每个 EWE 模型功能组的划分过程中, 至少需要一个碎屑组; 2) 从生态学的角度将生态位相同或相似的种群划分到同一功能组, 而不是用传统的生物分类学的方法来划分; 3) 所划分的功能组要能基本覆盖所研究生态系统中能量流动的全部过程, 尤其是优势种和关键种所在功能组不能缺少。

根据以上原则, 并考虑到数据的可获得性, 将福田红树林湿地生态系统划分为 15 个功能组 (王伯荪等, 2002; 梁素娟等, 2009; <http://www.ecopath.org/>), 分别为桐花树、秋茄 (6 年生)、秋茄 (20 年生)、海榄雌、无瓣海桑、海桑、甲壳动物、软体动物、弹涂鱼类、多毛类、其他底栖动物、浮游动物、浮游植物、鸟类和碎屑。

2.3 功能组生物学参数来源

在本研究所建立的 EWE 模型中, 能量的流动用能量形式生物湿重 ($t \cdot km^{-2}$) 来表示, 时间为 1 a。所有功能组的参数主要来源于实地调查和实验数据, 同时主要参考《深圳湾红树林生态系统及其持续发展》(王伯荪等, 2002) 和《深圳福田红树林湿地生态系统研究》(张宏达等, 1998) 等文献资料, 并根据深圳湾红树林湿地生态系统的特殊性对调查和实验数据进行相应的调整。

2.4 模型调试

本研究建立的 EWE 模型是静态的模型, 模型

所包含的每个功能组的能量和物质流都必须保持平衡(隋丽杰,2007)。要使模型达到平衡首先需要保证 $0 < EE < 1$,在任何生态系统内对生物利用都不可能大于生物体本身的能量。在初次建立的 EWE 模型中,一般都会出现一个或多个功能组的 $EE > 1$,这就需要通过模型的调试使 $EE < 1$ (王晓红,2005)。模型的调试过程是使系统的输入和输出保持平衡的过程(徐珊楠等,2010),当输入原始数据进行初始参数估计后不可避免地得到一些功能组的 $EE > 1$,这时可利用模型中的自动平衡函数设置置信区间(通常为 20%),反复调整直至所有的 $0 < EE < 1$ (Christensen & Wahers,2004);或可通过设定 Ecoranger 标准进行相应模拟,由系统自动调整被输入的参数,使所输入的参数达到所设定的标准之下的最优组合(Kavanagh *et al.*,2004;隋丽杰,2007)。调试平衡后福田红树林湿地生态系统的 EWE 模型输入和输出结果见表 1。

3 结果与分析

3.1 各营养级之间的能量流动

为简化复杂的食物网关系,用聚合营养级的方法将来自深圳湾红树林湿地生态系统的 15 个不同功能组的营养流合并为 6 个整合营养级(陈作志和邱永松,2010),其中营养级 V 和 VI 的生物量、生产

表 1 福田红树林湿地生态系统 EWE 模型基本参数
Table 1 Basic parameters of EWE model for Futian mangrove wetland ecosystem

编号	功能组	B (t · km ⁻²)	P/B (a ⁻¹)	Q/B (a ⁻¹)	EE
1	桐花树 <i>Aegicerag corniculatum</i>	300.1	0.400	0.750	0.220
2	秋茄(6年生) <i>Kandelia candelila</i>	433.1	0.500	0.800	0.350
3	秋茄(20年生)	347.8	0.250	0.400	0.325
4	海欖雌 <i>Avicennia marina</i>	11.07	0.400	0.700	0.120
5	无瓣海桑 <i>Sonneratia apetala</i>	638.2	0.700	0.900	0.262
6	海桑 <i>Sonneratia caseolaris</i>	345.4	0.700	0.900	0.420
7	甲壳动物	7.834	4.000	5.200	0.601
8	软体动物	7.785	4.320	5.000	0.829
9	弹涂鱼类	1.238	9.265	12.71	0.818
10	多毛类	0.770	7.000	22.81	0.697
11	其他底栖动物	0.0493	143.0	150.0	0.499
12	浮游动物	0.682	40.00	192.0	0.214
13	浮游植物	2.059	252.0	400.0	0.270
14	鸟类	0.478	1.000	99.00	1.000
15	碎屑	2147	-	-	0.026

B. 生物量;P. 生产量;Q. 消耗量;EE. 生态营养转换效率。EE 值为模型估算的参数。

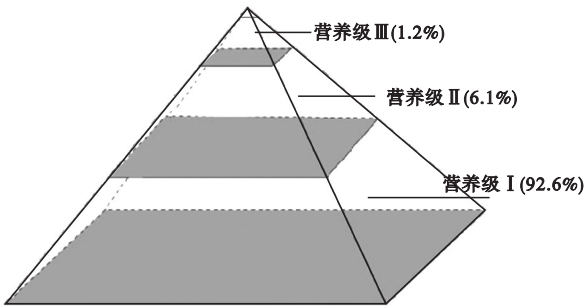


图 2 福田红树林湿地生态系统不同营养级的能流金字塔
Fig.2 Energy flow pyramid of different trophic levels in the Futian mangrove wetland ecosystem
其中 IV、V 和 VI 营养级能量太小,在能量金字塔中无法体现。

量和流量都较低,整个系统呈低营养级值大高营养级值小的典型金字塔型,基本符合能量金字塔规律(图 2)。

从表 2 可见,深圳湾红树林湿地生态系统的总流量为 $4158 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其中总摄食消耗量为 $160.5 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,总输出量为 $3768 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,总流入碎屑量为 $123.6 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,总呼吸量为 $105.4 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 各营养级之间能流的转化效率

由于系统中的初级生产者主要是红树植物,但在系统中没有被任何生物摄食,只能以碎屑的形式重新进入循环。所以能量流动中,直接来源于碎屑的占总能流的几乎全部,这说明系统的能流以碎屑食物链为主导。

除第一营养级之外,营养级 II、III、IV、V、VI 的总流量都随营养级的增加而有非常显著的降低,分别为 253.5、50.14、2.627、0.0962 和 0.00329 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (表 2),转化效率分别为 28.8%、8.4%、5.8%、5.5% 和 4.4%,总体转化效率为 11.2%(表 3)。

表 2 福田红树林湿地生态系统总能流($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)
Table 2 Total energy flows of the Futian mangrove wetland ecosystem

营养级	摄食消耗	输出	流入碎屑	呼吸	总流量
VI	0.000083	0.000060	0.000665	0.00249	0.00329
V	0.00345	0.00184	0.0195	0.0714	0.0962
IV	0.1000	0.0513	0.532	1.943	2.627
III	2.798	1.402	10.98	34.95	50.14
II	55.63	17.38	112.1	68.42	253.5
I	101.9	3749	0.000	0.000	3851
合计	160.5	3768	123.6	105.4	4158

表 3 深圳湾红树林湿地生态系统各营养级之间能流转化效率(%)

Table 3 Transfer efficiencies of discrete trophic levels in Futian mangrove wetland ecosystem

能量来源	营养级				
	II	III	IV	V	VI
生产者	-	-	-	-	-
碎屑	28.8	8.4	5.8	5.5	4.4
总能流	28.8	8.4	5.8	5.5	4.4

3.3 各功能组之间的相互关系

在 EWE 模型中,特地添加了 MIT(Mixed Impact Trophic)模块来研究各个功能组之间的营养关系。图 3 为红树林湿地生态系统中各功能组之间的营养关系。椭圆中的白色代表积极效应,黑色代表消极效应,椭圆的大小表示不同功能组之间影响的强弱,椭圆越大表示影响越大,椭圆越小表示影响越小。

甲壳动物、软体动物、弹涂鱼类、多毛类、其他底栖动物和浮游动物对大部分功能组产生积极影响。由于捕食和被捕食的关系,甲壳动物、软体动物、弹涂鱼类和多毛类对鸟类有非常明显的积极影响,浮游动物对甲壳动物有明显的积极影响;其他底栖动物和浮游动物对浮游植物,鸟类对甲壳动物都有明显的消极影响;大多功能组对碎屑都产生消极影响,其中弹涂鱼类和多毛类对碎屑产生的消极影响特别明显。

3.4 生态系统总体特征

EWE 模型可以导出一系列参数,可以在一定程度上表征所研究系统的规模、稳定性和成熟度等特征。深圳湾红树林湿地生态系统的总体特征参数见表 4。

系统总流量是表征系统规模的参数,它是总消

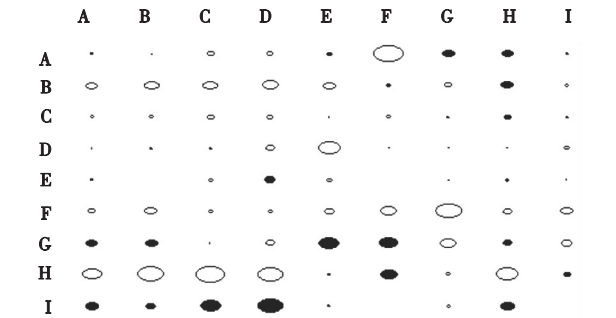


图 3 深圳湾红树林湿地生态系统营养关系
Fig.3 Mixed trophic impacts of the functional groups in Futian mangrove wetland ecosystem

白圈为积极影响,黑圈为消极影响;A. 甲壳动物;B. 软体动物;C. 弹涂鱼类;D. 多毛类;E. 其他底栖动物;F. 浮游动物;G. 浮游植物;H. 鸟类;I. 碎屑。

表 4 深圳湾红树林湿地生态系统总体特征

Table 4 Systematic statistics of the Futian mangrove wetland ecosystem

参数	数值
总消耗量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	160.5
总输出量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	3768.0
总呼吸量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	105.4
总流向碎屑量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	123.6
系统总流量($t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$)	4158.0
总生物量/总流量	0.163
连接指数	0.123
系统杂食性指数	0.018

耗量、总输出量、总呼吸量和总流向碎屑量的总和。深圳湾红树林湿地生态系统的总流量为 4158.0 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,其中有 123.6 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$ 流向碎屑,这说明有相当多的物质没有被生物利用,而是转化为碎屑重新进入循环;此外,系统的总输出量为 3768 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,占整个系统流量的 90% 以上,这表明每年有非常大的一部分物质离开深圳湾红树林湿地生态系统,这主要是因为深圳湾红树林湿地处于陆地和海洋的过渡带上,每年有相当多的物质被潮汐带入海洋,从而造成了非常高的系统输出量。

4 讨论

4.1 模型结果

由初级生产者和碎屑组成的营养级 I 是系统能量的主要来源,从被摄食消耗量来看,营养级 I 的被摄食消耗量为 101.9 $t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1}$,几乎全部来源于碎屑,占系统总被摄食消耗量的 63.5%;从营养级的能流分布来看,营养级 I 和 II 的能流在系统中所占比例最大,分别占据系统总能流的 92.6% 和 6.1%。可见,深圳湾红树林湿地生态系统能流的最主要来源是碎屑,能流主要在营养级 I → IV 之间流动,且系统对营养级 II 的利用最为充分。相比较而言,整个系统的能流中高营养级所占比例很少,营养级 IV 以上的几乎可以忽略。

深圳湾红树林湿地生态系统中高营养级能流转化效率较低,大部分流入碎屑,总体转化效率(11.2%)符合林德曼对生态系统能流效率的量化值(10%左右)。能流效率最高发生在第 I 和第 II 营养级之间,食碎屑生物在此过程中起到了非常关键的最用,这也是整个系统的转化效率高于平均转化效率的原因。每年大量的能量流向碎屑,表明红树林湿地生态系统仍有大量的剩余营养物质,使很

大一部分的能量在系统中沉积,从而增大了系统整体内源性污染的可能性(陈作志等,2010)。

捕食者会对其他功能组产生消极影响,被捕食者会对其捕食功能组产生积极影响。处于低营养级的功能组在系统能量传递的过程中起着非常关键的作用,他们对整个系统的影响非常强烈。

生态系统中的总生物量主要由可利用的能流构成,总生物量/总流量可以反映出系统的成熟度,在成熟的生态系统中,总生物量/总流量的值一般比较大(隋丽杰,2007;李岚,2008)。连接指数和系统杂食性指数反映的是系统内各功能组之间联系的复杂程度,成熟度越高系统中各个功能组之间的联系就越复杂,连接指数和系统杂食性指数就越接近于1(Christensen,1995)。深圳湾红树林湿地生态系统的总生物量/总流量仅为0.163,连接指数和系统杂食性指数分别为0.123和0.018,表明深圳湾红树林湿地生态系统目前有退化的趋势。

4.2 福田红树林生态系统现状及主要成因

将福田红树林模型和其他相似生态系统模型相比较,发现福田红树林的总生物量/总流量(TB/TT)远低于巴西北部河口红树林(Wolff *et al.*, 2000),系统连接指数(CI)和系统杂食性指数(SOI)都明显低于其他湿地生态系统(Suzuki & Tagawa, 1983; Pitcher *et al.*, 1998; Wolff *et al.*, 2000; Pitcher *et al.*, 2002; 李岚, 2008; 陈作志和邱永松, 2010),表明福田红树林湿地生态系统的结构不平衡,系统中除红树植物外可利用的生物资源较少,食物链之间的联系松散,食物网相对简单,系统的自我恢复能力较差。

从参数所反映的情况可以看出,整个福田红树林湿地生态系统中除红树植物之外的其他生物资源匮乏,食物网之间有很大的重叠,主要由以下原因造成。首先,城市化的不断加速使红树林的面积逐年减少。其次,周边生活及工业污水的不断排入导致保护区长期受到不同程度的污染。最后,保护区内红树植物多样性低,红树林结构单一。在这些因素的综合作用下该系统启动了从“成熟期”向“幼期”的逆行演替机制(张宏达等,1998;王伯荪等,2002;曾姝娜,2012),从而使深圳湾红树林湿地生态系统的稳定性下降。如不尽早采取措施,将会使深圳湾红树林湿地生态系统结构进一步紊乱,生态系统的功能进一步被削弱,最终将导致整个湿地生态系统不断退化(曾姝娜,2012)。

4.3 研究不足与展望

本研究构建了福田红树林湿地生态系统的EWE模型,不仅对该生态系统的状态、特征及不同物种之间的营养关系等进行了分析,并对生态系统的现状进行了相应评价,而且为保护区的科学管理提供了一定的科学依据,同时也对深圳湾红树林湿地的退化做了一定的预警提示。所建模型虽基本覆盖了该生态系统能量流动的全过程,但在建模过程中由于条件限制未能将保护区内所有物种考虑在内(例如:系统中的初级生产者有红树植物和浮游植物,其中红树植物的生物量占绝对优势,但在整个模型的建立过程中未能将红树植物的主要摄食者昆虫和哺乳动物等考虑进来,所以系统中的红树植物不能直接被其他生物直接利用,只能以碎屑的形式重新进入循环,因而在能流中直接来源于碎屑的能量几乎占总能流的全部;红树林湿地生态系统中土壤微生物也是很重要的,但本研究中未能将其体现出来,故对模型的准确性产生了一定的影响),从而对所得结果造成一定的偏差。因此,在以后的工作中要不断提高数据收集及利用能力,以更好地提高所建模型的准确度。

致谢 感谢深圳湾红树林自然保护区管理处给予的支持与帮助,感谢上海海洋大学霍元子与方淑波教授在研究过程中的指导!

参考文献

- 陈桂珠,王勇军,黄乔兰. 1995. 深圳福田红树林鸟类自然保护区陆鸟生物多样性. 生态科学, (2): 105-108.
- 陈作志,邱永松,贾晓平,等. 2008. 基于Ecopath模型的北部湾生态系统结构和功能. 中国水产科学, 15(3): 460-466.
- 陈作志,邱永松. 2010. 南海北部生态系统食物网结构、能量流动及系统特征. 生态学报, 30(18): 4855-4865.
- 杜雁,郭德英. 2000. 都市绿洲——深圳市红树林生态保护区规划. 规划师, (4): 52-58.
- 何奋琳. 2004. 深圳福田红树林生态系统生态恢复对策研究. 环境科学与技术, 27(4): 81-83.
- 李岚. 2008. 大亚湾海域Ecopath生态系统模型的建立和动态模拟(硕士学位论文). 广州: 中山大学.
- 梁素娟,史秀华,张信文. 2009. 福田红树林保护区土地类型的动态分析. 林业资源管理, (4): 74-78.
- 刘玉,路宁宁,张俊帆,等. 2006. 深圳湾福田红树林区藻类、纤毛虫等生物群落及其与环境的关系. 热带海洋学报, 25(5): 56-62.
- 罗澍,黄远峰,黄毅华,等. 2000. 深圳湾滨海道路的建设. 环境与开发, 15(2): 9-11.
- 罗忠奎,黄建辉,孙建新. 2007. 红树林的生态学功能及其

- 资源保护. 亚热带资源与环境学报, **2**(2): 37-47.
- 孟宪民. 1999. 湿地与全球环境变化. 地理科学, **19**(5): 385-391.
- 宋 兵, 陈立侨, Chen Y. 2007. Ecopath with Ecosim 在水生生态系统研究中的应用. 海洋科学, **31**(1): 83-86.
- 隋丽杰. 2007. 珠江口渔业和环境的 Ecopath 模型研究(硕士学位论文). 广州: 中山大学.
- 全 龄. 1999. Ecopath: 一种生态系统能量平衡评估模式. 海洋水产研究, **20**(2): 103-107.
- 王伯荪, 廖宝文, 王勇军, 等. 2002. 深圳湾红树林生态系统及其持续发展. 北京: 科学出版社.
- 王晓红. 2005. 南海北部大陆架海洋生态系统 EWE 模型研究(硕士学位论文). 广州: 中山大学.
- 王勇军, 咎启杰, 林 鹏. 1999. 深圳福田红树林陆鸟类变迁及保护. 厦门大学学报: 自然科学版, **38**(1): 137-144.
- 吴振斌, 贺 锋, 付贵萍, 等. 2002. 深圳湾浮游生物和底栖动物现状调查研究. 海洋科学, **26**(8): 58-64.
- 徐珊珊, 陈作志, 郑杏雯, 等. 2010. 红树林种植-养殖耦合系统的养殖生态容量. 中国水产科学, **17**(3): 392-403.
- 曾妹娜. 2012. 基于 PSR 模型的深圳福田红树林湿地生态系统健康评价研究(硕士学位论文). 广州: 华南师范大学.
- 张宏达, 陈桂珠, 刘治平, 等. 1998. 深圳福田红树林湿地生态系统研究. 广州: 广东科技出版社.
- 张乔民, 隋淑珍. 2001. 中国红树林湿地资源及其保护. 自然资源学报, **16**(1): 28-36.
- 周福芳, 史秀华, 邱国玉, 等. 2012. 深圳湾不同生境湿地大型底栖动物次级生产力的对比研究. 生态学报, **32**(20): 6511-6519.
- Christensen V, Walters CJ, Pauly D. 2005. Ecopath with Ecosim: A User's Guide. Fisheries Centre, University of British Columbia, Canada.
- Christensen V, Walters CJ. 2004. Ecopath with Ecosim: Methods, capabilities, and limitations. *Ecological Modelling*, **172**: 109-139.
- Christensen V. 1995. Ecosystem maturity: Towards quantification. *Ecological Modelling*, **77**: 3-32.
- Dalsgaard JPT, Lightfoot C, Christensen V. 1995. Towards quantification of ecological sustainability in farming systems analysis. *Ecological Engineering*, **4**: 181-189.
- Kavanagh P, Newlands N, Christensen V, et al. 2004. Automated parameter optimization for ecopath ecosystem models. *Ecological Modelling*, **172**: 141-149.
- Mohamed KS, Zacharia PU, Muthiah C, et al. 2005. A trophic model of the Arabian sea ecosystem off Karnataka and simulation of fishery yields for its multigear marine fisheries. Central Marine Fisheries Research Institute. Kerala, India: CMFRI Publication: 1-83.
- Odum EP. 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, **104**: 262-270.
- Pitcher T, Buchary E, Trujillo P. 2002. Spatial simulations of Hong Kong's marine ecosystem: Forecasting with MPAs and human-made reefs [EB/OL]. (2012-09-21) [2013-11-10]. <https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5057953ee4b01ad7e02841fb>.
- Pitcher TJ, Watson WJ, Courtney A, et al. 1998. Assessment of Hong Kong's Inshore Fishery Resources. Fisheries Centre, University of British Columbia.
- Polvina JJ. 1984. Model of a coral reef ecosystems. I. The Ecopath model and its application to French frigate shoals. *Coral Reefs*, **3**: 1-11.
- Suzuki E, Tagawa H. 1983. Biomass of a mangrove forest and a sedge marsh on Ishigaki Island, south Japan. *Journal of Ecology (in Japanese)*, **33**: 231-234.
- Wolff M, Koch V, Isaac V. 2000. A trophic flow model of the Caete' mangrove estuary (North Brazil) with considerations for the sustainable use of its resources. *Coastal and Shelf Science*, **50**: 789-803.

作者简介 丑庆川,男,1988 年生,硕士研究生,主要研究方向为景观与湿地资源。E-mail: chouqc@163.com
责任编辑 魏中青
