

石展耀,张靖天,霍守亮.EwE模型在水生态系统中的应用研究及长潭水库案例分析[J].环境工程技术学报,2023,13(2):567-577.

SHI Z Y,ZHANG J T,HUO S L.Research on the application of EwE model in aquatic ecosystems and a case study of Changtan Reservoir[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(2): 567-577.

# EwE模型在水生态系统中的应用研究及 长潭水库案例分析

石展耀,张靖天\*,霍守亮

环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

**摘要** EwE(Ecopath with Ecosim)模型是一种用于定量研究水生态系统食物网结构和能量流动特征的模型。总结了 EwE 模型中 Ecopath、Ecosim、Ecospace 和 EcoTracer 模块的原理,综述了该模型在不同类型水生态系统中的应用研究进展,发现 Ecopath 可用于评估海洋和淡水生态系统的成熟度并确定关键种和生态容量,明确浮游植物生产量( $P$ )对生态系统总通量(TST)的重要贡献;Ecosim 用于在时间尺度上揭示关键种捕捞、港口建设等人类活动对生态系统结构和功能的影响机制;Ecospace 可用于阐明海上平台建设、发电厂运行、火山爆发等外部因素影响下渔业经济和生态系统结构的时空差异性;EcoTracer 可用于追踪同位素、重金属和新型污染物等物质在食物网中的迁移过程。采用 Ecopath 分析了长潭水库的营养结构和能量流动,结果表明,长潭水库营养级介于 1.000~3.093,食物网结构简单,TPP/TR 为 2.445,是一个相对成熟的生态系统,能量传递效率较低。未来应加强气候变化和人类活动对水生态系统结构演替的影响研究,推进新污染物在食物网中富集特征研究,为水域生态系统健康状态评估和渔业经济发展政策的调整提供支撑。

**关键词** EwE 模型;水生态系统;气候变化;新污染物;长潭水库

中图分类号: X171 文章编号: 1674-991X(2023)02-0567-11 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220131

## Research on the application of EwE model in aquatic ecosystems and a case study of Changtan Reservoir

SHI Zhanyao, ZHANG Jingtian\*, HUO Shouliang

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** Ecopath with Ecosim (EwE) model is commonly used to quantitatively study the food web structure and energy flow characteristics in the aquatic ecosystem. The principles and progress of Ecopath, Ecosim, Ecospace, and EcoTracer modules of EwE model and its application in different types of aquatic ecosystems were summarized. The results indicated that Ecopath could be used to estimate the maturity of the ocean and freshwater ecosystems, to determine key species and ecological capacity, and to clarify the important contribution of phytoplankton production ( $P$ ) to total system throughput (TST) in the aquatic ecosystem. Ecosim was used to reveal the impact mechanisms of human activities (e.g. keystone species catching, port construction) on ecosystem structure and function on a time scale. Ecospace was used to clarify spatial variability of fishing activity and ecosystem structure under external factor effects (e.g. offshore platform construction, power plant operation, and volcanic eruption). EcoTracer was used to trace the immigration progress of isotopes, heavy metal, new pollutant, and other matters in the food web. Combined with Ecopath, the nutrient structure and energy flow of Changtan Reservoir were analyzed. The results showed that the trophic level was in the range of 1.000-3.093, indicating a simple food web structure. The total primary production/total respiration (TPP/TR) value was 2.445, indicating Changtan Reservoir was a relatively mature ecosystem, and it had a low energy transfer efficiency. In the future, studies on the impacts of climate change and human activities on the structural succession of aquatic ecosystems, and the enrichment characteristics of new pollutants in the food web should be strengthened to provide a scientific basis for the assessment of aquatic ecosystem health and the adjustment of fishery economic development policies.

收稿日期:2022-02-11

基金项目:国家自然科学基金项目(51922010)

作者简介:石展耀(1998—),男,硕士研究生,主要从事水生态环境保护研究, zhany0115@gmail.com

\* 责任作者:张靖天(1985—),男,高级工程师,硕士,主要从事流域水污染防治研究, wuxiang1998@163.com

**Key words** EwE model; aquatic ecosystems; climate change; new pollutants; Changtan Reservoir

食物网反映了生态系统中生物间错综复杂的能量传递关系,研究食物网的关键种、能量流动效率和物种营养级等对于量化生态系统中群落结构变化具有重要意义,也是近年来评价生态系统的重要参考依据<sup>[1]</sup>。与通过水质理化指标来研究水生态环境不同<sup>[2-4]</sup>,食物网是在功能群分类的基础上通过对能量流动路径的模拟,定量阐述食物网内营养物的输入—输出效应、物种间相互关系,从而为生态系统群落演替研究和流域渔业资源的科学管理提供依据<sup>[5]</sup>。模型模拟是研究食物网结构的重要方法,现有的一些生态模型主要用于研究营养盐的输入响应关系和底层营养级生物之间的相互作用<sup>[6-7]</sup>,往往只能反映食物网中少数生物之间的相互作用,不能深入研究多物种间的食物网关系,而 EwE(Ecopath with Ecosim)模型可以尽可能地模拟全部生物间相互作用从而建立水生态系统的食物网,反映生态系统的时空静态和时空动态营养级结构与能量传递效率,科学评估人类活动对生态系统结构的影响<sup>[8]</sup>。EwE 模型能够量化食物网的营养动力学特征,在食物网构建、渔业管理和生态系统预测、分区域研究食物网结构以及追踪污染物的浓度等领域得到了广泛的应用<sup>[9]</sup>。

### 1 EwE 模型的发展历史和各模块原理

#### 1.1 EwE 模型的发展历史及结构简示

EwE 模型是一个包括 4 个核心模块的复合模型,其原理见图 1。Ecopath 模块最早由 Polovina<sup>[10]</sup>在 1984 年提出,用来分析水域的食物网结构、能量流动等<sup>[11]</sup>。为了在时间动态上探究 Ecopath 的结果,1995 年 Walters 等<sup>[12]</sup>构建了 Ecosim 模块,1998 年 Christensen 等<sup>[13]</sup>在 Ecosim 模块的基础上增加了空

间模拟功能,构建了 Ecospace 模块,用于模拟和预测不同区域食物网的空间差异和变动。污染物在水生生物中的放大效应是环境生物学中一个不可忽视的问题,为了定量分析污染物在不同营养级中的迁移和积累情况,Christensen 等<sup>[13]</sup>在 2004 年构建了 Ecotracer 模块。随着 EwE 模型的不断完善与发展,其得以更广泛地应用于水生态系统的研究之中。

#### 1.2 Ecopath 主要参数及原理

表 1 列出了 Ecopath 的主要参数、参数含义、参数的获取来源和参数的取值范围,为构建 Ecopath 食物网模型提供参考。

在 Ecopath 中,以 2 个方程[式(1)、式(2)]为基础来计算各功能组的能量流动、功能组间的相互作用等结果。将功能组  $i$  的生产量 [ $P_i, t/(km^2 \cdot a)$ ] 分解为不同的去向,公式如下:

$$P_i = Y_i + B_i \times M2_i + E_i + BA_i + P_i \times (1 - EE_i) \quad (1)$$

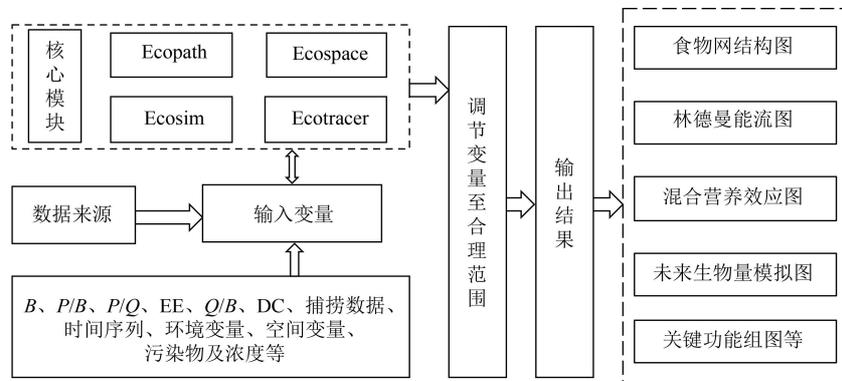
式中:  $Y_i$  为捕捞量,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $M2_i$  为捕食死亡率,  $a^{-1}$ ;  $B_i$  为生物量,  $t/km^2$ ;  $E_i$  为净迁移量(迁出—迁入),  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $BA_i$  为同化量,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $EE_i$  为功能组  $i$  的生态营养效率。

通过分解消费量 [ $Q_i, t/(km^2 \cdot a)$ ] 来表示功能组  $i$  的能量平衡,公式如下:

$$Q_i = P_i + R_i + U_i \quad (2)$$

式中:  $R_i$  为呼吸量,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $U_i$  为未同化的量,  $t/(km^2 \cdot a)$ 。

在 Ecopath 中,采用 2 种方法计算食物网结构和能量传递中功能组的营养级: 1) 描述食物网中每个功能组营养级时,将生产者和碎屑功能组的营养级定为 1,消费者等功能组的营养级根据其饮食结构(DC)的营养级加权平均值进行计算,取值可以是小数; 2) 描述生态系统能量传递时,生产者和碎屑在第



注:  $B$ 、 $P/B$ 、 $Q/B$ 、 $P/Q$ 、 $EE$ 、 $DC$  涵义见表 1。

图 1 EwE 模型结构原理

Fig.1 Diagram for the principle of EwE model

表 1 Ecopath 主要参数及参数来源  
Table 1 Main parameters and their resources of Ecopath

主要参数	参数含义	获取来源	取值范围
生物量(B)	各功能组在某个时间段内的平均生物量	来自实测值或者调查资料	无
生产量/生物量(P/B)	各功能组在某个时间段内的生产力	P/B为捕捞死亡率(F)和自然死亡率(M)之和,其中F根据实际捕捞量进行计算,M根据Pauly <sup>[14]</sup> 的经验公式进行计算。鱼类P/B根据fishbase等网站计算得到	无
消费量/生物量(Q/B)	各功能组在某个时间段内的消费能力	采用实测值或参考临近水域或通过日消费比值进行估计或使用fishbase等网站估计。其中鱼类Q/B可通过Palomares等 <sup>[15]</sup> 的经验公式估计,无脊椎动物Q/B使用P/Q来代替	无
生产量/消费量(P/Q)	各功能组生产量和消费量的比值	Ecopath根据P/B和Q/B来计算或参考相关研究的取值	通常为0.05~0.30,根据体重变化调整
生态营养效率(EE)	各功能组生产量被利用的效率	Ecopath根据B、P/B和Q/B计算或根据相关研究估计	0~1,其取值通常接近1
饮食结构(DC)	各功能组营养级数值的确定	采用胃含物分析法和稳定同位素法测定。鱼类DC可通过fishbase等网站获取,浮游生物和底栖动物DC参考其他研究	各功能组DC比例之和为1

I 营养级,每个营养级为在该营养级上所有功能组的集合,消费者在第 II、III、IV 等整数营养级。

### 1.3 Ecosim 原理

在 Ecopath 的基础上,对 Ecosim 构建不同功能组的 B 的动力学微分方程,公式如下:

$$\frac{dB_i}{dt} = g_i \sum_j Q_{ji} - \sum_j Q_{ij} + I_i - (M_i + F_i + e_i) B_i \quad (3)$$

式中:  $\frac{dB_i}{dt}$  为时间 t 内的生长速率,  $t/(km^2 \cdot a)$ ; j 为功能组 i 以外与 i 有捕食关系的其他生物;  $g_i$  为净生长效率;  $M_i$  为自然死亡率,  $a^{-1}$ ;  $F_i$  为捕捞死亡率,  $a^{-1}$ ;  $e_i$  为净迁出率,  $a^{-1}$ ;  $I_i$  为 B 净迁入率,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $\sum_j Q_{ji}$  为功能组 i 作为捕食者的净消费率,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $\sum_j Q_{ij}$  为功能组 i 作为被捕食者的被捕食率,  $t/(km^2 \cdot a)$ 。

### 1.4 Ecospace 原理

在 Ecosim 的基础上,使用 Ecospace 将不同功能组的 B 分布在不同的栅格地图中,能够分区域阐述不同功能组间的能量流动过程,公式如下:

$$\frac{dB_{ik}}{dt} = n_i Q_{ik} - Z_{ik} B_{ik} - \sum_k m_{ikk'} B_{ik} + \sum_{k'} m_{ik'k} B_{ik'} \quad (4)$$

式中: k 和 k' 分别为栅格;  $B_{ik}$  为栅格 k 中功能组 i 的 B,  $t/km^2$ ;  $n_i$  为摄食量转化成净生产量的效率;  $Q_{ik}$  为栅格 k 中功能组 i 的消费率,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $Z_{ik}$  为栅格 k 中功能组 i 的瞬时死亡率,  $a^{-1}$ ;  $\sum_k m_{ikk'} B_{ik}$  为功能组 i 从栅格 k 向外的移动率,  $t/(km^2 \cdot a)$ ;  $\sum_{k'} m_{ik'k} B_{ik'}$  为功能组 i 从 4 个相邻的栅格 k' 向栅格 k 的移动率,  $t/(km^2 \cdot a)$ 。

### 1.5 Ecotracer 原理

在 Ecospace 的基础上,用 Ecotracer 来追踪污染物在物种和区间中的迁移过程,公式如下:

$$dC_i/dt = V_{intake} - V_{loss} \quad (5)$$

式中:  $C_i$  为一个区间 i 内的总污染量,  $t/km^2$ ;  $V_{intake}$  为区间 i 污染物瞬时吸收速率,  $t/(km^2 \cdot a)$ , 包括从食物中获取、从环境中直接摄取、迁入物种携带等作用的输入速率;  $V_{loss}$  为区间 i 中污染物瞬时损失速率,  $t/(km^2 \cdot a)$ , 包括被捕食、通过排泄和死亡流向碎屑、迁出物种带出、生物代谢和自然衰减等作用的输出速率。

## 2 EwE 模型各模块在水生态中应用研究

### 2.1 Ecopath 的应用研究

Ecopath 在国外被广泛应用于水生态系统营养结构和能量流动模拟,为分析生态系统的成熟度等特征以及生态系统间的对比分析提供参考<sup>[16]</sup>。如 Papapanagiotou 等<sup>[17]</sup>利用 Ecopath 来研究不同情景下北爱琴海食物网的基本特征; Geers 等<sup>[18]</sup>利用 Ecopath 检验墨西哥湾渔业对生态系统成熟度的影响,其总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR)为 8.5,表明墨西哥湾是一个处于发展阶段且不成熟的生态系统; Webber 等<sup>[19]</sup>构建了 2007—2008 年莫朗湿地湾的 Ecopath 食物网,并与具有相似生态环境的愉景湾食物网进行比较,发现莫朗湿地湾浮游植物的 B(0.14~0.34  $mg/m^3$ )显著低于愉景湾浮游植物(0.4~0.8  $mg/m^3$ ),表明莫朗湿地湾生态系统更原始、可恢复力更强。Ecopath 模型也可用于关键种的确定, Hossain 等<sup>[20]</sup>利用 Ecopath 模拟洞谷湖鱼类功能组,发现以大马哈鱼为食的日本胡瓜鱼是洞谷湖的关键种,日本胡瓜鱼的捕捞量减少 50% 以上才能有效恢复湖中大马哈鱼种群数量。近些年来 Ecopath 在我国得到了越来越广泛的应用,表 2 列举了近 30 年来 Ecopath 在我国湖泊、河流、水库、海洋中的应用案例。

表 2 中浮游植物的 P/B 介于 71~410,不同水域

表 2 Ecopath 在中国的应用实例  
Table 2 Application examples of Ecopath in China

水体名称	模型应用年份	系统总流量(TST)/[t/(km <sup>2</sup> ·a)]	TPP/TR	浮游植物的(P/B)/a <sup>-1</sup>	系统连接指数(CI)
太湖 <sup>[21]</sup>	1991—1995	13 386	3.85	185	0.21
太湖 <sup>[22]</sup>	2008—2009	66 245	4.22	410	0.19
太湖 <sup>[23]</sup>	2017—2018	7 388	2.55	410	0.21
太湖竺山湾 <sup>[24]</sup>	2015	10 145	2.37	185	0.24
五里湖 <sup>[25]</sup>	2009	9 132	1.34	262	0.28
淀山湖 <sup>[26]</sup>	2008—2009	4 099	2.80	185	0.19
巢湖 <sup>[27]</sup>	2007—2010	41 003	13.53	185	0.20
千岛湖 <sup>[28]</sup>	2000	24 271	1.99	201	0.23
千岛湖 <sup>[29]</sup>	2016	24 698	6.51	180	0.26
南海北部湾 <sup>[30]</sup>	1997—1999	11 006	3.18	231	0.33
杭州湾 <sup>[31]</sup>	2006	18 958	2.67	476	0.31
长江口 <sup>[32]</sup>	2004	6 342	2.53	200	0.54
长江口 <sup>[33]</sup>	2016—2017	1 329	1.25	119	0.35
长江口及毗邻水域 <sup>[34]</sup>	2000—2006	1 959~6 554	1.82~5.29	180~200	0.41~0.45
象山港 <sup>[35]</sup>	2011—2014	2 227~2 229	1.52	180	0.34
渤海 <sup>[36]</sup>	1982—1992	3 316~5 362	8.40~9.75	380~398	
渤海 <sup>[37]</sup>	2014—2015	10 499	5.38	250	0.33
俚岛人工礁区 <sup>[38]</sup>	2009	10 787	1.84	71	0.20
獐子岛人工鱼礁区 <sup>[39]</sup>	2010—2012	28 691~40 486	2.05~2.29	105~132	0.20~0.23
獐子岛海域 <sup>[40]</sup>	2017—2018	17 007-17 738	1.79~2.05	140	0.22
海州湾 <sup>[41]</sup>	2013	9 335	1.33	107	0.42
庙岛 <sup>[42]</sup>	1998	3 172	2.47	100	0.44
枸杞岛海藻场 <sup>[43]</sup>	2004—2008	28 019	1.25	119	0.33
三沙湾 <sup>[44]</sup>	2012	2 344	2.77	105	0.40

之间存在较大的差异,同一水域在不同时间段也会有很大差异,如太湖浮游植物的  $P/B$  在 1991—1995 年和 2017—2018 年分别为 185 和 410; TST 介于 1 329~66 245 t/(km<sup>2</sup>·a),以长江口<sup>[33]</sup>的 TST 最低,太湖<sup>[22]</sup>的 TST 最高。结合浮游植物  $P/B$  和  $B$  可以得到浮游植物  $P$ ,对表 2 实例中浮游植物  $P$  与

TST 进行拟合[图 2(a)],发现二者高度相关( $R^2$  为 0.917 8),说明浮游植物的  $P$  对 TST 有显著的正向影响,即  $P$  越大,生态系统 TST 越大。浮游植物  $B$  是评价水生态系统是否健康的一个重要指标,拟合发现浮游植物  $B$  占水生态系统总  $B$  的比例和 TST 之间没有相关性[图 2(b)],如千岛湖 2000 年<sup>[28]</sup>和

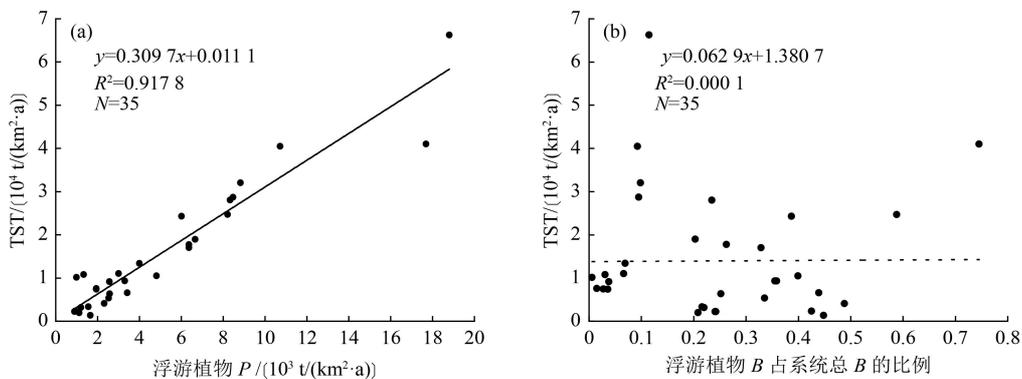


图 2 TST 与生态系统中浮游植物  $P$  和浮游植物  $B$  的关系

Fig.2 Relationship of TST with the  $P$  and  $B$  of phytoplankton in ecosystem

2016 年<sup>[29]</sup>的 TST 差别较小,分别为 24 271 和 24 698 t/(km<sup>2</sup>·a),但是其 *B* 占比却相差较大,分别为 38.7% 和 58.8%。影响水生态系统 TST 的更重要因素是浮游植物 *P*,而非浮游植物 *B* 占比,如许祯行<sup>[39]</sup>对獐子岛人工鱼礁区研究中浮游植物 *B* 占比只有 9.3%,浮游植物 *P* 达 10 710 t/(km<sup>2</sup>·a),使得 TST 高达 40 486 t/(km<sup>2</sup>·a)。

CI 反映了系统功能组间彼此连接程度,数值越大表示生态系统越复杂。表 2 中 CI 介于 0.19~0.54,均值为 0.31,其中大部分水域 CI 小于该均值,说明这些水域生态系统结构相对简单。TPP/TR 反映了生态系统的成熟度,表 2 中 TPP/TR 均大于 1,说明生产的能量大于消耗的能量,水体处在能量累积的状态。林德曼效率<sup>[45]</sup>是一条重要的生态学规律,其表明生态系统的能量传递效率(transfer efficiency, TE)为 10%,而表 2 中各水生态系统的 TE 多低于 10% (图 3),TE 大于 10% 的水域仅占 37%,这可能与生态系统本身结构简单并且食物网级别较低有关。

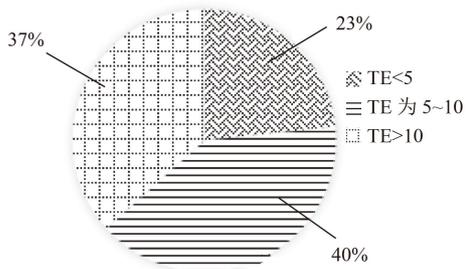


图 3 表 2 应用实例中不同 TE 占比

Fig.3 Occupancy of different TE values across application examples in table 2

除了利用 Ecopath 主要输出指标对水域生态系统成熟度、关键种、能量传递等方面进行研究之外,近年来利用 Ecopath 对水域中主要水产品的生态容量和放养种类的探索成为其重要发展方向之一。王腾等<sup>[41]</sup>研究发现,当中国明对虾的 *B* 增加到当前 *B* 的 21.15 倍时,达到最大生态容纳量;杨彬彬<sup>[44]</sup>研究发现,三沙湾适宜增殖放流的种类为大黄鱼、棘头梅童鱼等,并估算出大黄鱼的增殖放流量为 552 万尾。

## 2.2 Ecosim 的应用研究

通过使用 Ecosim 可以在时间尺度上研究人类渔业活动对水域生态系统的影响,探究关键种对水生态系统的影响,为渔业经济可持续发展模式的确定提供科学依据。Natugonza 等<sup>[46]</sup>利用 Ecosim 研究东非维多利亚湖的生态系统和渔业经济之间的平衡关系,发现利润最大化的渔业发展模式比捕捞量最

大化的渔业发展模式更符合维持生态系统的平衡要求。使用 Ecosim 确定了水生态系统的关键种之后,可以采用 Ecosim 进一步确定关键种的作用,Menge 等<sup>[47]</sup>发现关键种能够独立影响水域生态系统中被捕食鱼类的格局,该结果在维护水域渔业经济可持续发展方面起到关键作用。Geers 等<sup>[18]</sup>利用 Ecosim 研究关键种的捕捞量对水域生态系统的影响,发现墨西哥湾鲱鱼的捕捞量增加会导致整个生态系统的成熟度随着时间的推移增加。Montero 等<sup>[48]</sup>利用 Ecosim 研究发现,鲨鱼是特内里费岛和加那利群岛的关键种,捕捞量不变、减少和增加这 3 种管理情景均会导致位于中上层营养级的鲨鱼群体减少,需要严格控制对鲨鱼食物来源鱼种的过度捕捞。

近年来 Ecosim 还被用来探究环境条件变化对水域生态系统结构的影响。Szalaj 等<sup>[49]</sup>发现除了捕捞量外,水温和捕捞死亡率(*F*)也是影响渔业经济的重要因素,水温升高使沙丁鱼的产卵量下降,这有利于以沙丁鱼为食的鱼类的繁殖,过高的 *F*(0.2~0.4)造成了沙丁鱼的 *B* 显著减少。Angelini 等<sup>[50]</sup>对巴西 Araçá 湾进行的 Ecosim 模拟结果显示,港口扩张侵蚀了底栖生物群落,导致以碎屑岩为基础的港口生态系统中所有生物均受到了负面影响。

## 2.3 Ecospace 和 Ecotracer 的应用研究

Ecospace 被广泛应用于在空间尺度研究渔业保护区划分和海域开发活动对水生态系统的影响,其模拟结果给管理者提供了合适的建议。Püts 等<sup>[51]</sup>将 Ecospace 应用于大西洋北海南部,清楚地展示了该区域物种时空分布特征。Serpetti 等<sup>[52]</sup>利用 Ecospace 评估了苏格兰西部一个海上工作平台对生态系统的影响,发现海洋养殖场以及海上风力发电厂运行会干扰顶层捕食者的分布范围,而对底层生物的影响较小。Halouani 等<sup>[53]</sup>使用 Ecospace 研究了塞纳湾近海风电厂建设对渔业经济的影响,发现在风电场开发阶段会形成的一个类似于保护区的封闭空间,通过缓解发电厂周围海域渔业活动的影响会使接近发电厂的区域渔获量提高 7%,且高营养级鱼类的比例会更高。Mendoza 等<sup>[54]</sup>利用 Ecospace 研究火山爆发区域海洋保护区生态系统的恢复情况,通过对完全保护区、部分保护区和未保护区的不同功能组恢复状况进行模拟,发现与未保护区相比,保护区的鱼类、大型无脊椎动物和以大型无脊椎动物为食的动物需要更长的恢复期,火山爆发后应严禁开展捕鱼活动。

通过 Ecotracer 确定水生生物中污染物的累积浓度,有利于了解污染物对人体的潜在危害,做好相应

的预防措施。Booth 等<sup>[55]</sup>利用 Ecotracer 研究发现, 2011 年日本东部大地震导致<sup>137</sup>Cs 浓度在食物网中出现生物累积的趋势, 模拟结果显示间接或直接向市场供应的渔产品中<sup>137</sup>Cs 浓度为 46.1 MBq, 与现场测定的数据具有高度一致性, 表明了 Ecotracer 模拟结果的准确性。近些年来海洋微塑料成为研究的热点<sup>[56-57]</sup>, Boyer 等<sup>[58]</sup>利用 Ecotracer 评估微塑料流入速率对马里兰海岸湾生态系统的影响, 发现当微塑料的流入速率每 30 年增加 3 倍时, 成年青蟹和夏比目鱼中微塑料的浓度会分别增加 1 132% 和 384%, 进而对人类健康产生威胁。近年来 Ecotracer 也被用于食物网中<sup>14</sup>C<sup>[59]</sup>、Hg<sup>[60-62]</sup>和 PCBs<sup>[60-63]</sup>、PAHs<sup>[64]</sup>的迁移过程研究, 为研究新型污染物在水体生物中放大作用提供了有效的方法。

#### 2.4 EwE 建模过程存在的主要问题

(1) 功能组参数数据来源的真实性不足是限制 EwE 模型应用的主要因素之一。在缺乏实地调研数据的情况下,  $P/B$ 、 $Q/B$ 、 $EE$  等参数往往需要参考类似生态系统结构区域的已知数据, 并根据实际情况进行适当调整, 一些特定的参数如  $DC$  还需要根据渔民的知识 and 经验<sup>[65]</sup> 来确定, 难以真实地反映生态系统内各功能组的状态, 导致模型的输出结果产生偏差。

(2) 功能组参数数据的准确性和精密性缺乏有效的验证手段。使用 Ecosim 模拟不同时期生态系统时, 需要用历史数据进行检验, 很多研究由于历史数据缺乏不能对模拟结果进行检验, 使得模型的准确性降低。模型的验证、敏感性分析和情景预测也需要对各功能组生物量数据进行持续跟踪, 但在实际应用中缺乏必要的行动。

(3) 环境条件的复杂性限制了 Ecotracer 的应用。应用 Ecotracer 对污染物进行示踪研究时, 需要对污染物在生态系统中的本底浓度以及流进、流出速率进行准确测量, 实际水域环境复杂多变, 很难有效实施。

### 3 Ecopath 在长潭水库的应用

#### 3.1 研究区概况

长潭水库位于浙江省东部, 属亚热带季风性气候, 受海洋性暖湿气团和台风影响强烈, 气候温暖湿润, 雨量充沛。长潭水库以城市供水为主, 集防洪、灌溉、发电等综合利用为一体, 水库正常运行水位为 33 m, 库容为 3.3 亿  $m^3$ , 水域面积为 31.5  $km^2$ 。水库年平均气温为 17  $^{\circ}C$ , 夏季极端最高气温为 38.1  $^{\circ}C$ , 冬季极端最低气温为 -6.8  $^{\circ}C$ 。水库中常年放养

以鲢鱼、鳙鱼为主的鱼类, 水质保持在地表水 II 类以上, 大型水生植物覆盖度较低, 近年来水环境质量有下降的趋势<sup>[66]</sup>。

#### 3.2 Ecopath 食物网模型构建与结果分析

##### 3.2.1 Ecopath 食物网模型构建

为深入分析长潭水库水生态系统营养结构和能量流动过程, 利用 Ecopath 来模拟 2016—2017 年水库水生态系统能量流动和食物网结构。根据 2016 年 6 月—2017 年 6 月在长潭水库设置的 10 个库区采样点的采样数据获取各功能组  $B$ , 参照表 1 的方法获取  $P/B$ 、 $Q/B$ 、 $EE$ 、 $DC$  参数值。根据地理相近水生态系统文献<sup>[21,25]</sup> 的分类, 将长潭水库水生态系统按照生态位分为碎屑、浮游植物、水生植物、轮虫、枝角类、桡足类、底栖动物及 8 个鱼类功能组共 15 个功能组, 表 3 给出了各功能组的基础参数值和由  $DC$  计算的营养级数值。

表 3 长潭水库 Ecopath 食物网模型的输入与输出参数  
Table 3 Input and output parameters of Ecopath food web model of Changtan Reservoir

功能组	营养级	$B/(t/km^2)$	$(P/B)/a^{-1}$	$(Q/B)/a^{-1}$	$EE$	$(Q/P)/a^{-1}$
其他鱼类	<b>2.547</b>	<b>9.021</b>	1.200	13.000	0.500	<b>0.092</b>
鲃鱼	<b>3.093</b>	0.050	1.090	9.140	<b>0.418</b>	<b>0.124</b>
鲢鱼	<b>2.000</b>	<b>0.351</b>	2.011	16.270	0.950	<b>0.124</b>
鲤鱼	<b>2.652</b>	<b>0.019</b>	1.210	7.270	0.950	<b>0.166</b>
鲫鱼	<b>2.247</b>	<b>5.931</b>	1.150	8.370	0.950	<b>0.137</b>
鳙鱼	<b>2.827</b>	6.840	1.300	7.200	<b>0.808</b>	<b>0.181</b>
鲢鱼	<b>2.248</b>	9.290	1.500	8.450	<b>0.800</b>	<b>0.178</b>
草鱼	<b>2.454</b>	<b>2.737</b>	1.730	9.660	0.950	<b>0.179</b>
底栖动物	<b>2.111</b>	3.141	11.000	15.000	<b>0.964</b>	<b>0.733</b>
桡足类	<b>2.170</b>	5.270	6.000	100.000	<b>0.935</b>	<b>0.060</b>
枝角类	<b>2.012</b>	1.410	16.000	100.000	<b>0.949</b>	<b>0.160</b>
轮虫	<b>2.050</b>	3.350	40.000	150.000	<b>0.950</b>	<b>0.267</b>
大型植物	<b>1.000</b>	<b>10.357</b>	10.000	—	0.900	—
浮游植物	<b>1.000</b>	25.130	90.000	—	<b>0.412</b>	—
碎屑	<b>1.000</b>	50.000	—	—	<b>0.167</b>	—

注: 数据中加粗字体为模型输出值; —表示无须输入或输出, 其余为输入值。

##### 3.2.2 长潭水库食物网结构分析

根据食物网中各功能组的  $DC$  计算得出每个功能组的营养级, 鲃鱼处于长潭水库食物网顶端, 营养级为 3.093, 主要放养鱼类——鲢鱼和鳙鱼营养级分别为 2.248 和 2.827, 整个水库的营养级偏低。图 4 展示了长潭水库的食物网模型, 图中灰线代表营养级为 1、2、3 时的位置, 功能组之间的线条颜色代表捕食者捕食生物所占比例, 蓝色圆形的大小代表不

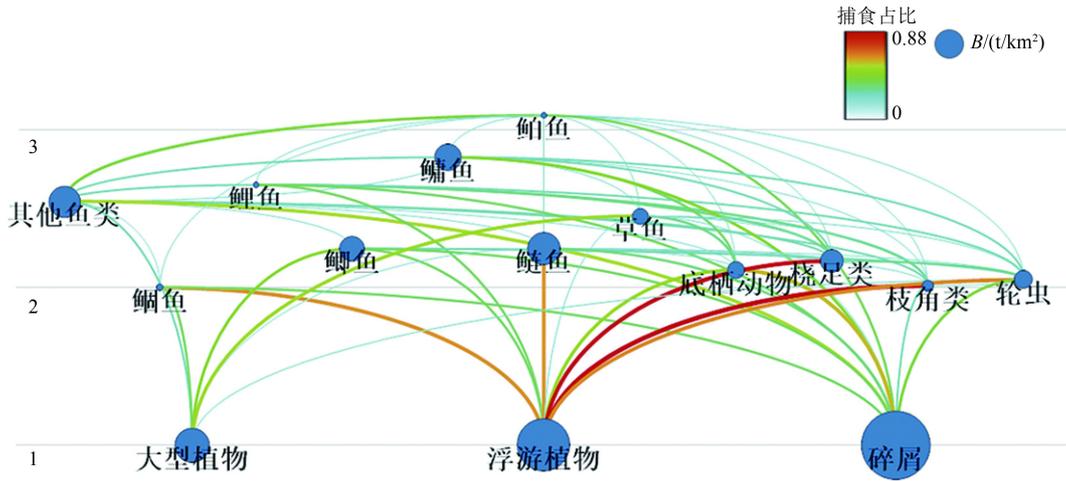


图 4 长潭水库 Ecopath 食物网模型

Fig.4 Ecopath flow diagram of Changtan Reservoir

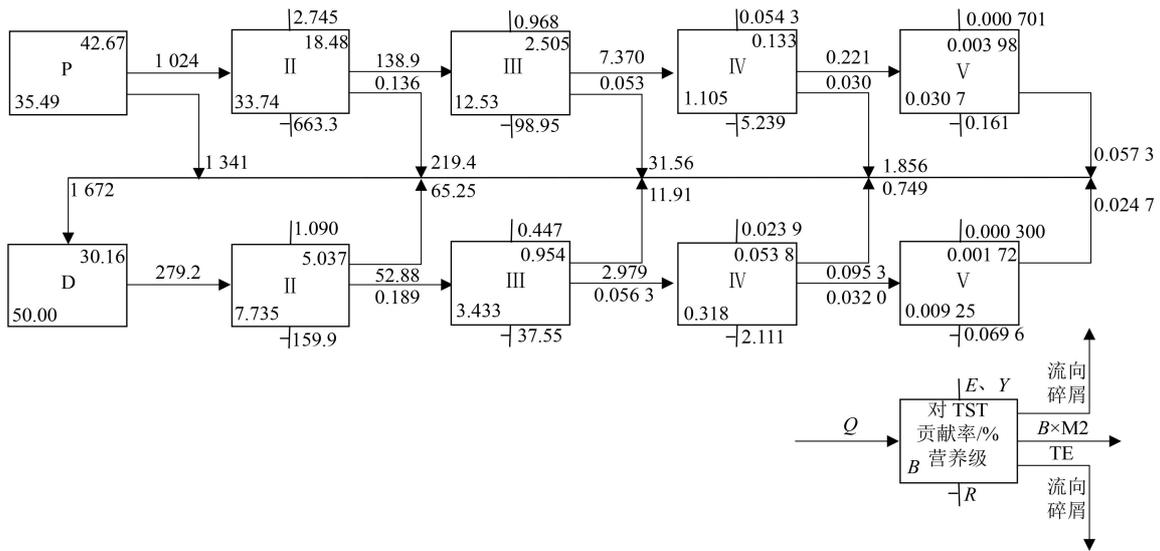
同功能组  $B$  的大小,具体值见表 3。除有机碎屑外,浮游植物是最主要的初级生产者。长潭水库水生态系统的 TST 为  $5582.117 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,净生产量为  $2365.673 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ; CI 为 0.349,高于太湖<sup>[23]</sup>(0.21)和五里湖<sup>[27]</sup>(0.28),说明长潭水库水生态系统中生物之间相互作用比太湖和五里湖复杂,生态系统的稳定性也更强<sup>[67]</sup>,遇到干扰时恢复能力较强。长潭水库的 TPP/TR 为 2.445,是一个较为成熟的生态系统,进一步说明长潭水库具有稳定的食物网结构。

鲢鱼和鳙鱼的放养增加了长潭水库食物网结构的稳定性。长潭水库水域面积小、营养水平低,水质常年为 I、II 类,生物之间的相互作用简单。鲢鱼和鳙鱼的放养促使更多的浮游生物能量向上传递,为

顶级肉食鱼提供了充足的饵料,减少肉食性鱼类之间恶性竞争。鳙鱼通过扰动底泥能够促进底层碎屑和底栖动物数量增加,间接使得以底栖动物和碎屑为食的鱼类生物量增加,进而促使食物网内部不同功能组间的相互作用增强,使 CI 显著提升,有利于物质循环和水体净化<sup>[68]</sup>,从而维持稳定的生态结构。

### 3.2.3 长潭水库能量流动分析

利用 Ecopath 计算 TE 时,按照长潭水库中各功能组在食物网中所处营养级汇总为 5 个营养级。由图 5 可知,长潭水库营养级 I 由初级生产者和碎屑 2 个部分组成,其 TE 占比分别为 64% 和 36%。初级生产者包括浮游植物和大型植物,2016—2017 年的现场调查结果显示,长潭水库中大型植物较少,说



注: P 代表初级生产者, D 代表碎屑,均为第 I 营养级; I、II、III、IV、V 为营养级。Q 为消费量; E 为净迁移量; Y 为捕捞量; B 为生物量; TST 为系统总流量; R 为呼吸量; TE 为能量传递效率; M2 为捕食死亡率。

图 5 长潭水库林德曼能量流动图

Fig.5 Lindeman spine of Changtan Reservoir's energy flow

明初级生产者的能量主要来自浮游植物。经计算发现长潭水库生态系统总体 TE 为 6.237%，低于林德曼传递效率(10%)，初级生产者和碎屑的 TE 分别为 5.996% 和 6.990%，说明来自碎屑的能量更容易被生物所利用。随着营养级的升高 TE 下降，营养级 II、III 和 IV 的 TE 分别为 13.6%、5.3% 和 3.0%，说明大部分能量流动集中在营养级 I ~ III。随着营养级的增高，功能组生物量逐渐下降，营养级能量符合金字塔分布，说明长潭水库生态系统在生物分布格局方面比较健康。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

(1) Ecopath 被应用于分析食物网结构、能量流动效率、水生态系统关键种、不同生态系统的差别、生态系统的成熟度等，近年来利用其研究鱼类的生态容量及放养种类成为热点；Ecosim 可用于对水域进行时间尺度分析，探究渔业和经济之间的平衡关系、环境变化对生态系统的影响和关键种的功能，进而为水域管理提出合适的建议；Ecospace 可用于研究同一水域中不同区域水体的能量流动及食物网结构、环境变化在水域中的影响及范围；利用 Ecotracer 可以探究环境中污染物在水域食物网中不同生物中的迁移和积累，为新型污染物在生态系统中放大作用的研究提供了有效手段。

(2) 对长潭水库构建 2016—2017 年 Ecopath 食物网模型，分析结果表明：长潭水库整体营养级偏低，大部分功能组的营养级介于 II ~ III，鲃鱼处于食物网顶端，营养级为 3.093；长潭水库是一个相对成熟的生态系统，TPP/TR 为 2.445，CI 为 0.349；长潭水库能量流动主要集中在 I ~ III 营养级，营养级能量结构服从金字塔分布，能量主要来自初级生产者，占比为 64%；放养的鲢鱼和鳙鱼对浮游生物的摄食作用增强了能量向高营养级的流动，促进了食底栖动物和食碎屑的鱼类种群增加，增强了长潭水库生态系统的稳定性。

### 4.2 展望

EwE 模型已被普遍应用在水生态系统中，但仍然存在一些不足，为了更好地使用 EwE 模型，未来可以加强以下方面的应用研究：1) 加强多源数据和融合数据的获得是保证模型输出准确的重要手段。P/B、EE、Q/B 和 DC 等数据的获取需要结合水域自然地理条件进行详尽的调查和计算，并参考相关文献进行调整。2) 开展生态系统演化趋势的分析和预测，利用时间情景分析功能预估生态系统演替

规律，探索水生态系统与经济发展之间的平衡关系等是 EwE 模型未来主要的研究方向。未来可深化 EwE 模型与水质模型耦合，引入温度和营养盐等水质参数，重点开展气候变化对水域生态系统的能量流动和营养结构的影响研究，明确人类活动对特定功能组演化趋势的影响机制，合理预估未来气候情景下渔业经济的发展趋势和调控措施。3) 强化新污染物在食物网中生物放大效应的研究。PCBs、PAHs、微塑料等新污染物能够附着在浮游植物表面，并通过浮游动物的摄食作用进入食物网中。结合稳定同位素示踪法、胃含物分析法确定污染物在食物网内的累积速率，利用 Ecotracer 追踪污染物在食物网各营养级的分布和能量流动状况，科学评估水域生态系统的健康状态和新型污染物的毒性效应，从而为新污染物环境管理政策的制定提供支持。

## 参考文献

- [1] PASQUAUD S, LOBRY J, ELIE P. Facing the necessity of describing estuarine ecosystems: a review of food web ecology study techniques[J]. *Hydrobiologia*, 2007, 588(1): 159-172.
- [2] 车霏霏, 陈俊伊, 王书航, 等. 南湖水系水-沉积物磷时空分布、影响因素及控制对策[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(6): 928-935.  
CHE F F, CHEN J Y, WANG S H, et al. Spatio-temporal distribution, influencing factors and control strategies of phosphorus in water-sediment of Nanhu Lake water system[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(6): 928-935.
- [3] 王子为, 林佳宁, 张远, 等. 鄱阳湖入湖河流氮磷水质控制限值研究[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(5): 1163-1169.  
WANG Z W, LIN J N, ZHANG Y, et al. Water quality limits of nitrogen and phosphorus in the inflow rivers of Poyang Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(5): 1163-1169.
- [4] 金相灿, 朱莹. 我国主要湖泊和水库水体的营养特征及其变化[J]. *环境科学研究*, 1991, 4(1): 11-20.  
JIN X C, ZHU X. Tropic characteristics and changes of water bodies of the main lakes and reservoirs in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1991, 4(1): 11-20.
- [5] 徐从军, 隋昊志, 徐宾铎, 等. 基于 LIM-MCMC 模型研究海州湾食物网能量流动特征[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(1): 66-78.  
XU C J, SUI H Z, XU B D, et al. Energy flows in the Haizhou Bay food web based on the LIM-MCMC model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(1): 66-78.
- [6] 胡文, 王济, 李春华, 等. 浅水湖泊模型 PCLake 及其应用进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(6): 681-688.  
HU W, WANG J, LI C H, et al. The application and review of shallow lake model: PCLake[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 681-688.
- [7] HÅKANSON L. Consequences and correctives related to lake

- acidification, Liming and mercury in fish :a case-study for Lake Huljesjön, Sweden, using the LakeWeb-model[J]. *Environmental Modeling & Assessment*, 2003, 8(4): 275-283.
- [ 8 ] JANSSEN A B G, de JAGER V C L, JANSE J H, et al. Spatial identification of critical nutrient loads of large shallow lakes: implications for Lake Taihu (China)[J]. *Water Research*, 2017, 119: 276-287.
- [ 9 ] HEYMANS J J, COLL M, LINK J S, et al. Best practice in Ecopath with Ecosim food-web models for ecosystem-based management[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 331: 173-184.
- [ 10 ] POLOVINA J J. Model of a coral reef ecosystem[J]. *Coral Reefs*, 1984, 3(1): 1-11.
- [ 11 ] CHRISTENSEN V, PAULY D. Ecopath II: a software for balancing steady-state ecosystem models and calculating network characteristics[J]. *Ecological Modelling*, 1992, 61(3/4): 169-185.
- [ 12 ] WALTERS C, CHRISTENSEN V, PAULY D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 1997, 7(2): 139-172.
- [ 13 ] CHRISTENSEN V, WALTERS C. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations[J]. *Ecological Modelling*, 2004, 172(2): 109-139.
- [ 14 ] PAULY D. On the interrelationships between natural mortality, growth parameters, and mean environmental temperature in 175 fish stocks[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 1980, 39( 2 ): 175-192.
- [ 15 ] PALOMARES M L D, PAULY D. Predicting food consumption of fish populations as functions of mortality, food type, morphometrics, temperature and salinity[J]. *Marine and Freshwater Research*, 1998, 49(5): 447.
- [ 16 ] 全龄. Ecopath: 一种生态系统能量平衡评估模式[J]. *海洋水产研究*, 1999, 20(2): 103-107.
- TONG L. Ecopath model: a mass-balance modeling for ecosystem estimation[J]. *Marine Fisheries Research*, 1999, 20(2): 103-107.
- [ 17 ] PAPAPANAGIOTOU G, TSAGARAKIS K, KOUTSIDIS M, et al. Using traits to build and explain an ecosystem model: Ecopath with Ecosim modelling of the North Aegean Sea (Eastern Mediterranean)[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 236: 106614.
- [ 18 ] GEERS T M, PIKITCH E K, FRISK M G. An original model of the northern Gulf of Mexico using Ecopath with Ecosim and its implications for the effects of fishing on ecosystem structure and maturity[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2016, 129: 319-331.
- [ 19 ] WEBBER M, PERSAD G, HARRIS N, et al. An ecological assessment of Foul and Folly Bays, Morant wetlands area, Jamaica using Ecopath with Ecosim[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 105: 127-137.
- [ 20 ] HOSSAIN M M, MATSUSHI T, ARHONDITSIS G. Elucidation of ecosystem attributes of an oligotrophic lake in Hokkaido, Japan, using Ecopath with Ecosim (EwE)[J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(13/14): 1717-1730.
- [ 21 ] 宋兵. 太湖渔业和环境的生态系统模型研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2004.
- [ 22 ] 李云凯, 刘恩生, 王辉, 等. 基于Ecopath模型的太湖生态系统结构与功能分析[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7): 2033-2040.
- LI Y K, LIU E S, WANG H, et al. Analysis on the ecosystem structure and function of Lake Taihu based on Ecopath model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 2033-2040.
- [ 23 ] 赵旭昊, 徐东坡, 任沈, 等. 基于Ecopath模型的太湖鲢鳙生态容量评估[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(6): 785-795.
- ZHAO X H, XU D P, REN L, et al. Assessment of the ecological carrying capacity of silver and bighead carp in the Taihu Lake based on Ecopath model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(6): 785-795.
- [ 24 ] LI C H, XIAN Y, YE C, et al. Wetland ecosystem status and restoration using the Ecopath with Ecosim (EWE) model[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 305-314.
- [ 25 ] 黄孝锋. 五里湖生态系统ECOPATH模型的构建与评估[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- [ 26 ] 冯德祥, 陈亮, 李云凯, 等. 基于营养通道模型的淀山湖生态系统结构与能量流动特征[J]. *中国水产科学*, 2011, 18(4): 867-876.
- FENG D X, CHEN L, LI Y K, et al. Structure and energy flow of Dianshan Lake ecosystem based on the Ecopath model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2011, 18(4): 867-876.
- [ 27 ] 刘恩生, 李云凯, 臧日伟, 等. 基于Ecopath模型的巢湖生态系统结构与功能初步分析[J]. *水产学报*, 2014, 38(3): 417-425.
- LIU E S, LI Y K, ZANG R W, et al. A preliminary analysis of the ecosystem structure and functioning of Lake Chaohu based on Ecopath model[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2014, 38( 3 ): 417-425.
- [ 28 ] 刘其根. 千岛湖保水渔业及其对湖泊生态系统的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2005.
- [ 29 ] 于佳, 刘佳睿, 王利, 等. 基于Ecopath模型的千岛湖生态系统结构和功能分析[J]. *水生生物学报*, 2021, 45(2): 308-317.
- YU J, LIU J R, WANG L, et al. Analysis on the ecosystem structure and function of Lake Qiandao based on ecopath model[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2021, 45(2): 308-317.
- [ 30 ] 陈作志, 邱永松, 贾晓平. 北部湾生态通道模型的构建[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(6): 1107-1111.
- CHEN Z Z, QIU Y S, JIA X P. Mass-balance Ecopath model of beibu gulf ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(6): 1107-1111.
- [ 31 ] 徐姗姗, 陈作志, 何培民. 杭州湾北岸大型围隔海域人工生态系统的能量流动和网络分析[J]. *生态学报*, 2008, 28(5): 2065-2072.
- XU S N, CHEN Z Z, HE P M. Energy flux and network analysis for an artificial ecosystem of a large enclosed sea area in North Hangzhou Bay[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28( 5 ): 2065-2072.
- [ 32 ] 王远超, 梁翠, 钱薇薇, 等. 基于生态通道模型的长江口及邻近海域生态系统能流动态分析[J]. *海洋科学*, 2018, 42(5): 54-

67.  
WANG Y C, LIANG C, XIAN W W, et al. Ecopath based dynamic analyses of energy flows of Yangtze Estuary and its adjacent waters[J]. *Marine Sciences*, 2018, 42(5): 54-67.
- [ 33 ] 徐超, 王思凯, 赵峰, 等. 基于Ecopath模型的长江口生态系统营养结构和能量流动研究[J]. *海洋渔业*, 2018, 40(3): 309-318.  
XU C, WANG S K, ZHAO F, et al. Trophic structure and energy flow of the Yangtze Estuary ecosystem based on the analysis with Ecopath model[J]. *Marine Fisheries*, 2018, 40(3): 309-318.
- [ 34 ] 林群, 金显仕, 郭学武, 等. 基于Ecopath模型的长江口及毗邻水域生态系统结构和能量流动研究[J]. *水生态学杂志*, 2009, 30(2): 28-36.  
LIN Q, JIN X S, GUO X W, et al. Study on the structure and energy flow of the Yangtze River Estuary and adjacent waters ecosystem based on ecopath model[J]. *Journal of Hydroecology*, 2009, 30(2): 28-36.
- [ 35 ] 杨林林, 姜亚洲, 袁兴伟, 等. 象山港典型增殖种类的生态容量评估[J]. *海洋渔业*, 2016, 38(3): 273-282.  
YANG L L, JIANG Y Z, YUAN X W, et al. Ecological carrying capacity of typical enhancement species in Xiangshan Bay[J]. *Marine Fisheries*, 2016, 38(3): 273-282.
- [ 36 ] 林群, 金显仕, 张波, 等. 基于营养通道模型的渤海生态系统结构十年变化比较[J]. *生态学报*, 2009, 29(7): 3613-3620.  
LIN Q, JIN X S, ZHANG B, et al. Comparative study on the changes of the Bohai Sea ecosystem structure based on Ecopath model between ten years[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3613-3620.
- [ 37 ] 林群, 单秀娟, 王俊, 等. 渤海中国对虾生态容量变化研究[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(4): 19-29.  
LIN Q, SHAN X J, WANG J, et al. Changes in Chinese shrimp (*Fenneropenaeus chinensis*) carrying capacity of the Bohai Sea[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(4): 19-29.
- [ 38 ] 吴忠鑫, 张秀梅, 张磊, 等. 基于Ecopath模型的荣成俾岛人工鱼礁区生态系统结构和功能评价[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(10): 2878-2886.  
WU Z X, ZHANG X M, ZHANG L, et al. Structure and function of Lidao artificial reef ecosystem in Rongcheng of Shandong Province, East China: an evaluation based on Ecopath model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2878-2886.
- [ 39 ] 许祯行. 基于Ecopath模型的獐子岛人工鱼礁区生态系统功能评价[D]. 大连: 大连海洋大学, 2015.
- [ 40 ] 张紫轩, 张继红, 吴文广, 等. 獐子岛海域虾夷扇贝底播增殖生态容量评估[J]. *中国水产科学*, 2021, 28(7): 878-887.  
ZHANG Z X, ZHANG J H, WU W G, et al. Ecological carrying capacity assessment of bottom-culture Yesso scallops, *Patinopecten yessoensis*, in Zhangzi Island[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2021, 28(7): 878-887.
- [ 41 ] 王腾, 张贺, 张虎, 等. 基于营养通道模型的海州湾中国明对虾生态容纳量[J]. *中国水产科学*, 2016, 23(4): 965-975.  
WANG T, ZHANG H, ZHANG H, et al. Ecological carrying capacity of Chinese shrimp stock enhancement in Haizhou Bay of East China based on Ecopath model[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2016, 23(4): 965-975.
- [ 42 ] CUI P H, ZHU H J. Ecosystem structure and energy flow analysis of the adjacent waters around Miaodao Islands based on Ecopath model[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*, 2020, 474(2): 022027.
- [ 43 ] 赵静, 章守宇, 许敏. 枸杞海藻场生态系统能量流动模型初探[J]. *上海海洋大学学报*, 2010, 19(1): 98-104.  
ZHAO J, ZHANG S Y, XU M. The primary research of the energy flow in Gouqi kelp bed ecosystem[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2010, 19(1): 98-104.
- [ 44 ] 杨彬彬. 基于Ecopath模型的三沙湾能量流动分析及大黄鱼试验性增殖放流[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [ 45 ] LINDEMAN R L. The trophic-dynamic aspect of ecology[J]. *Bulletin of Mathematical Biology*, 1991, 53(1/2): 167-191.
- [ 46 ] NATUGONZA V, AINSWORTH C, STURLUDÓTTIR E, et al. Simulating trade-offs between socio-economic and conservation objectives for Lake Victoria (East Africa) using multispecies, multifleet ecosystem models[J]. *Fisheries Research*, 2020, 229: 105593.
- [ 47 ] MENGE B A, BERLOW E L, BLANCHETTE C A, et al. The keystone species concept: variation in interaction strength in a rocky intertidal habitat[J]. *Ecological Monographs*, 1994, 64(3): 249-286.
- [ 48 ] MONTERO L C, CHRISTENSEN V, CASTROHERNÁNDEZ J J. Simulating trophic impacts of fishing scenarios on two oceanic islands using Ecopath with Ecosim[J]. *Marine Environmental Research*, 2021, 169: 105341.
- [ 49 ] SZALAJ D, TORRES M A, VEIGA-MALTA T, et al. Food-web dynamics in the Portuguese continental shelf ecosystem between 1986 and 2017: unravelling drivers of sardine decline[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2021, 251: 107259.
- [ 50 ] ANGELINI R, CONTENTE R F, ROSSI-WONGTSCHOWSKI C L D B, et al. Ecosystem modeling as a framework to convert a multi-disciplinary research approach into a useful model for the Araçá Bay (Brazil)[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2018, 164: 92-103.
- [ 51 ] PÜTS M, TAYLOR M, NÚÑEZ-RIBONI I, et al. Insights on integrating habitat preferences in process-oriented ecological models: a case study of the southern North Sea[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 431: 109189.
- [ 52 ] SERPETTI N, BENJAMINS S, BRAIN S, et al. Modeling small scale impacts of multi-purpose platforms: an ecosystem approach[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 694013.
- [ 53 ] HALOUANI G, VILLANUEVA C M, RAOUX A, et al. A spatial food web model to investigate potential spillover effects of a fishery closure in an offshore wind farm[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 212: 103434.
- [ 54 ] MENDOZA J C, CLEMENTE S, HERNÁNDEZ J C. Modeling the role of marine protected areas on the recovery of shallow rocky reef ecosystem after a catastrophic submarine volcanic eruption[J]. *Marine Environmental Research*, 2020, 155: 104877.
- [ 55 ] BOOTH S, WALTERS W J, STEENBEEK J, et al. An Ecopath

- with Ecosim model for the Pacific coast of eastern Japan: describing the marine environment and its fisheries prior to the Great East Japan earthquake[J]. *Ecological Modelling*, 2020, 428: 109087.
- [ 56 ] 李道季. 海洋微塑料污染状况及其应对措施建议[J]. 环境科学研究, 2019, 32(2): 197-202.
- LI D J. Research advance and countermeasures on marine microplastic pollution[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(2): 197-202.
- [ 57 ] 刘彬, 侯立安, 王媛, 等. 我国海洋塑料垃圾和微塑料排放现状及对策[J]. 环境科学研究, 2020, 33(1): 174-182.
- LIU B, HOU L, WANG Y, et al. Emission estimate and countermeasures of marine plastic debris and microplastics in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(1): 174-182.
- [ 58 ] BOYER J, RUBALCAVA K, BOOTH S, et al. Proof-of-concept model for exploring the impacts of microplastics accumulation in the Maryland coastal bays ecosystem[J]. *Ecological Modelling*, 2022, 464: 109849.
- [ 59 ] SANDBERG J, KUMBLAD L, KAUTSKY U. Can ECOPATH with ECOSIM enhance models of radionuclide flows in food webs: an example for  $^{14}\text{C}$  in a coastal food web in the Baltic Sea[J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2007, 92(2): 96-111.
- [ 60 ] FERRISS B E, ESSINGTON T E. Does trophic structure dictate mercury concentrations in top predators: a comparative analysis of pelagic food webs in the Pacific Ocean[J]. *Ecological Modelling*, 2014, 278: 18-28.
- [ 61 ] CRESSON P, BOUCHOUCHA M, MORAT F, et al. A multitracer approach to assess the spatial contamination pattern of Hake (*Merluccius merluccius*) in the French Mediterranean[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 184-194.
- [ 62 ] MCGILL L M, GERIG B S, CHALONER D T, et al. An ecosystem model for evaluating the effects of introduced Pacific salmon on contaminant burdens of stream-resident fish[J]. *Ecological Modelling*, 2017, 355: 39-48.
- [ 63 ] TAFFI M, PAOLETTI N, LIÒ P, et al. Bioaccumulation modelling and sensitivity analysis for discovering key players in contaminated food webs: the case study of PCBs in the Adriatic Sea[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 306: 205-215.
- [ 64 ] LARSEN L H, SAGERUP K, RAMSVATN S. The mussel path: using the contaminant tracer, Ecotracer, in Ecopath to model the spread of pollutants in an Arctic marine food web[J]. *Ecological Modelling*, 2016, 331: 77-85.
- [ 65 ] BENTLEY J W, SERPETTI N, FOX C, et al. Fishers' knowledge improves the accuracy of food web model predictions[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2019, 76(4): 897-912.
- [ 66 ] 肖喆, 李文攀, 张靖天, 等. 长潭水库生态问题诊断与对策研究[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(4): 670-677.
- XIAO Z, LI W P, ZHANG J T, et al. Diagnosis and countermeasures of eco-environmental problems in Changtan Reservoir[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2021, 11(4): 670-677.
- [ 67 ] CHRISTENSEN V, PAULY D. A guide to the Ecopath II software system: version 2.1[M]. Manila: International Center for Living Aquatic Resources Management, 1992: 1-67.
- [ 68 ] 刘其根, 王钰博, 陈立侨, 等. 保水渔业对千岛湖食物网结构及其相互作用的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(10): 2774-2783.
- LIU Q G, WANG Y B, CHEN L Q, et al. Impacts of aquatic environment protection oriented fishery on the structure of food web in Lake Qiandaohu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(10): 2774-2783. ◇