

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2016.15317

捕捞和环境变化对渤海生态系统的影响

林群¹, 王俊¹, 袁伟¹, 范振华², 金显仕¹

1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 中国水产科学研究院 黄海水产研究所, 山东 青岛 266071;
2. 国家海洋信息中心, 天津 300171

摘要: 以 1982 年的渤海 Ecopath 静态模型为起始状态, 设置 17 个功能群, 利用 CPUE 和渔业相对捕捞强度作为时间强制序列, 构建渤海 Ecosim 模型, 模拟 1982—2008 年渤海生态系统发育的动态变化及捕捞的影响; 利用气候环境时间序列数据, 分析环境变化对渤海生态系统渔业资源的影响。研究发现, 1982—2008 年间, 只有口虾蛄的生物量保持上升趋势, 主要经济鱼种小黄鱼、蓝点马鲛、鲷、花鲈、黄鲫等的生物量均呈下降趋势, 虾蟹类、头足类的生物量相对稳定。渤海渔获物的平均营养级在 1982—2008 年间明显下降, 总捕捞产量在 1984 年之后一直保持上升趋势, 两者之间存在显著的负相关; FIB 指数的变动与捕捞产量的变动保持一致。Q-90 多样性指数在 1982—1987 年间处于波动状态, 从 1988—1994 年间保持增长趋势, 在 1994 年之后迅速下降, 由 2.5 降至 0.5 附近, 渔业生物多样性下降; 渤海海表盐度、海表水温、黄河径流量对捕捞产量影响显著。Ecosim 模型终止状态(2008 年)与起始状态(1982 年)的比较表明, 系统成熟度降低, 生态系统出现一定程度的退化, 渔业捕捞是渔业生态系统出现退化的主要原因, 降低了生态系统总体的生物量水平; 除捕捞因素外, 环境变化也是影响渤海生态系统渔业资源变动的主要因素。

关键词: 渤海; Ecosim 动态模型; 生态系统结构; 生态系统功能; 捕捞; 环境变化

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2016)03-0619-11

渤海为天然半封闭内海(117°50′~122°35′E, 37°10′~41°N), 平均水深为 18.7 m, 最大水深为 70 m, 坡度为 28°, 海域面积约 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。渤海水域水交换能力较差, 水温受大陆气候影响较大、季节变化显著。沿岸有许多大小河流入海, 水质肥沃, 饵料生物丰富, 是黄、渤海多种经济鱼虾类的产卵场和索饵场, 在黄、渤海渔业生产上占有极其重要的地位^[1]。20 世纪 50 年代以来, 黄海水产研究所对渤海的渔业资源、生态环境等进行了多次大规模的调查与监测工作, 积累了丰富的基础资料。近年来, 渤海渔业资源的种类减少、生物多样性下降, 渔业资源量呈衰退趋势^[1-2]; 群

落结构有显著变化, 高营养级的优势种逐渐被经济价值低的小型中上层鱼类取代, 高营养层生物的平均营养级有所下降^[3-4]; 一些优势种的群体组成小型化, 年龄结构低龄化, 性成熟提前^[5-6]; 渤海水域富营养化、陆源污染日益加剧^[7-8], 捕捞压力不断增大, 严重威胁着渤海生态系统的健康。本研究利用 Ecopath with Ecosim 软件, 以 1982 年的 Ecopath 静态模型^[9]为基础, 建立渤海 Ecosim 动态模型, 模拟捕捞对渤海渔业资源的变动以及生态系统发育过程的影响, 分析主要渔业种类资源量的变化及生态系统退化原因, 为基于生态系统的渔业管理提供科学依据。

收稿日期: 2015-08-10; 修订日期: 2015-09-14.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2015CB453303); 公益性行业(农业)科研专项经费项目(201303050); 山东省泰山学者建设工程专项; 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(20603022012008).

作者简介: 林群(1980—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事渔业资源与生态研究. E-mail: linqun@ysfri.ac.cn

通信作者: 金显仕, 研究员. E-mail: jin@ysfri.ac.cn

1 材料与方法

1.1 Ecosim 模型的构建

以 1982 年的渤海 Ecopath 静态模型(图 1)为起始状态, 设置 17 个功能群: 鳀(*Engraulis japonicus*), 黄鲫(*Setipinna taty*), 蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*), 其他中上层鱼类, 小黄鱼(*Larimichthys polyactis*), 花鲈(*Lateolabrax japonicus*), 底栖鱼类, 其他底层鱼类, 口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*), 虾类, 蟹类, 棘皮动物, 多毛类, 头足类, 浮游动物, 浮游植物, 碎屑, 其食物组成矩阵、生物量、生产量/生物量、消耗量/生物量、生态营养效率以及捕捞产量为输入的主要参数^[9], 构建渤海 Ecosim 动态模型。

Ecosim 模型^[10]在 Ecopath 模型的基础上加入时间动态模块, 通过捕捞强度的改变、捕食者与被捕食者之间的关系以及捕食行为变动, 模拟生态系统长期的、短期的动态变化。Ecosim 利用 Ecopath 第一个主方程产生微分方程估计每个功能群的生物量动态, 基本方程如下:

$$\frac{dB_i}{dt} = g_i \sum_{j=1}^n f(B_j, B_i) - \sum_{j=1}^n f(B_i, B_j) + I_i - (M_i + F_i + e_i) \cdot B_i \quad (1)$$

其中 dB_i/dt 指功能群 i 在单位时间的生物量变化; g_i 是净生长效率(生产量与消耗量的比值); I_i 是迁入量; e_i 是迁出率; M_i 和 F_i 分别是功能群 i 的自然死亡率和捕捞死亡率; $f(B_j, B_i)$ 是基于觅食场所理论的捕食者 j 对被捕食者 i 摄食量的预测函数。Ecosim 将饵料生物的生物量分成 2 部分: 易被捕食部分(Vulnerable)和不易被捕食部分(Invulnerable)。

$$f(B_j, B_i) = \frac{v_{ij} a_{ij} B_i B_j}{v_{ij} + v'_{ij} + a_{ij} B_j} \quad (2)$$

其中 v 和 v' 指饵料在易捕食和不易捕食 2 种状态之间的转换率, v_{ij} 设置为 1 表明饵料 i 与捕食者 j 之间的捕食关系以上行控制为主, v'_{ij} 设置远大于 1 表明以下行营养控制为主, 中间值指混合营养控制^[11-12]; a_{ij} 指捕食者 j 对饵料 i 的有效搜索效率。

1.2 渔业时间强制序列及 Ecosim 模型参数的调试

Ecosim 模型通过设置参数脆弱性(vulnerability), 模拟捕食者和被捕食者的相互关系(上行控制、下行控制、混合营养控制), 本研究中将 v_{ij} 初始值设为混合营养控制模式($v_{ij}=2$); 通过引入时间强制序列调试参数脆弱性, 采用的时间驱动变量是单

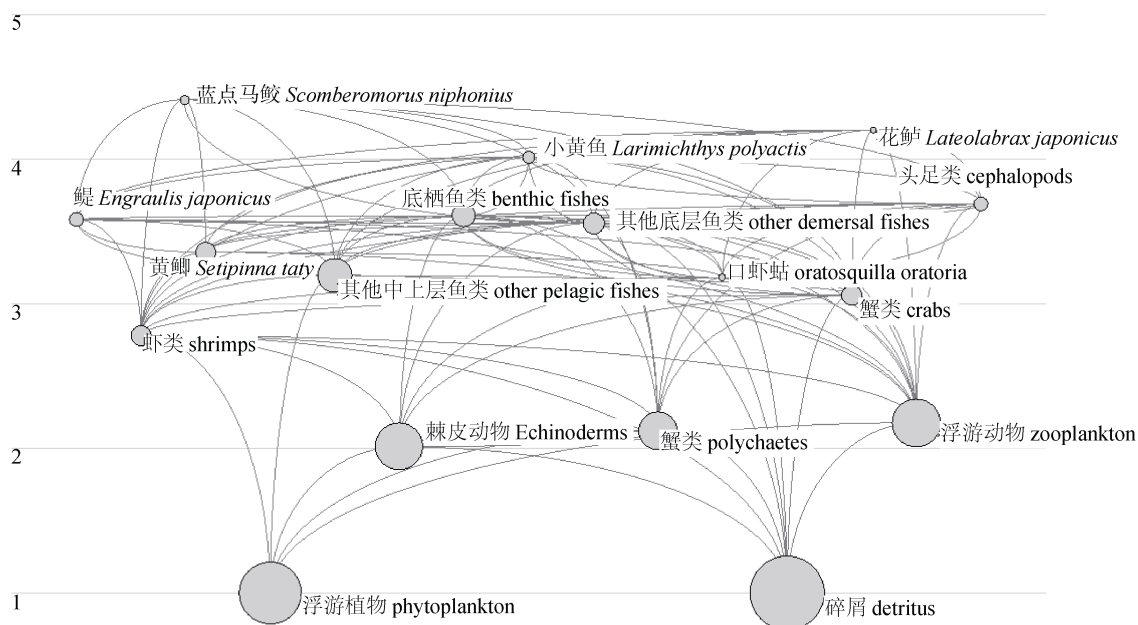


图 1 渤海生态系统 Ecopath 模型(1982 年)的能量流程图

Fig. 1 Flow chart of trophic interaction in Bohai Sea Ecopath model(1982)

位捕捞努力量渔获量(CPUE, 每千瓦的平均产量 t/kW)(图 2)和渔业相对捕捞强度(图 3), 数据引自中国渔业统计年鉴。渔业相对捕捞强度为捕捞努

力量(渔船功率)的时间序列, 将各年的捕捞努力量除以起始年份的捕捞努力量, 得到以 1 为起始值的时间强制序列。

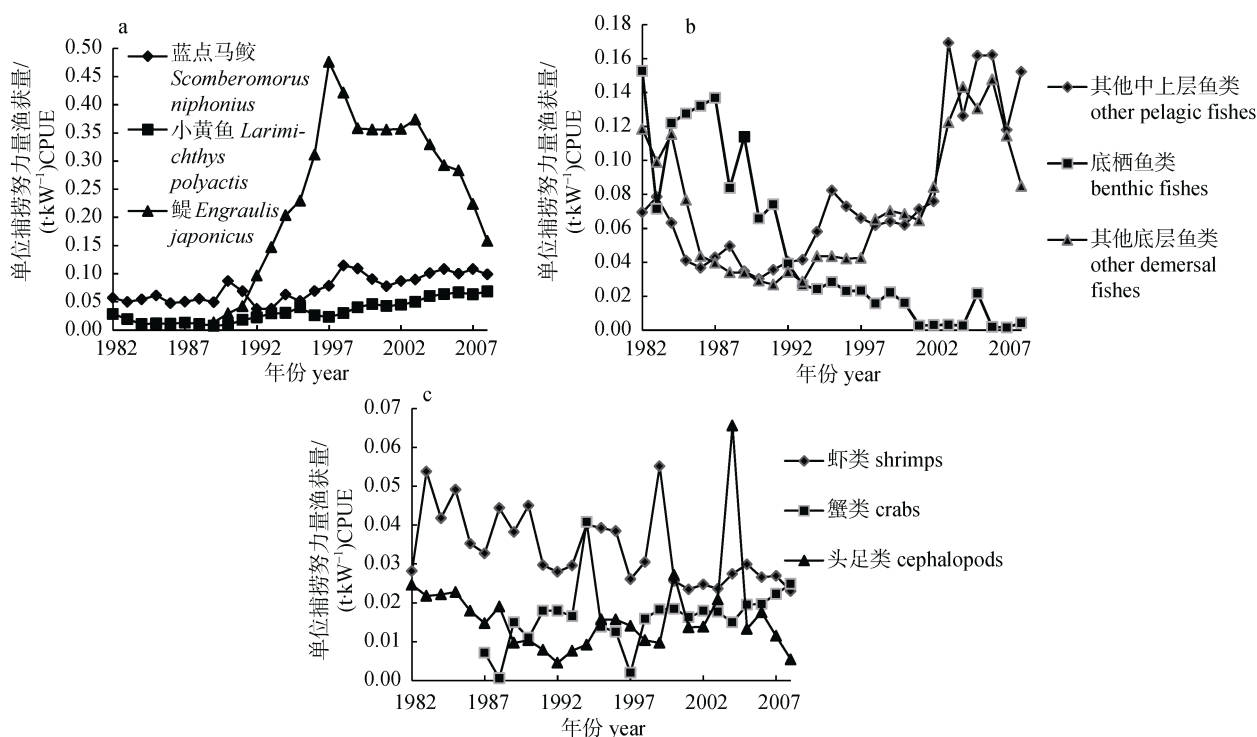


图 2 1982—2008 年渤海单位捕捞努力量渔获量时间序列

Fig. 2 Time series of catch per unit fishing effort in Bohai Sea from 1982 to 2008

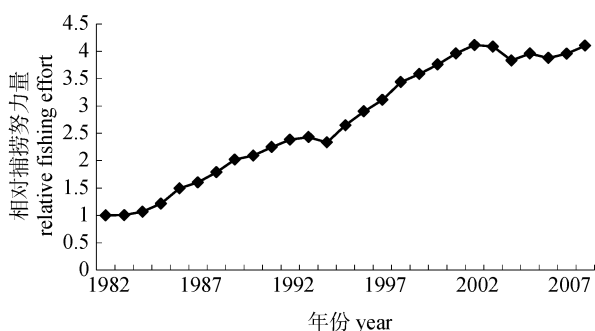


图 3 1982—2008 年渤海渔业相对捕捞强度时间强制序列

Fig. 3 The time forcing series of relative fishing effort in Bohai Sea from 1982 to 2008

1.3 气候环境变量时间序列数据

气候环境因子采用海表水温(SST)、海表盐度(SSS)、年降水量(JS)、黄河径流量(Runoff)1982—2008 年的时间序列资料(图 4)。渤海 SST、SSS、JS 资料取自鲅鱼圈、葫芦岛、龙口、塘沽、秦皇岛、老虎滩 6 个海洋站实际观测的年时间序列平

均值。黄河径流量资料取自利津站实际观测的年时间序列值。SST、SSS、JS、Runoff 时间序列数据进行处理, 服从正态分布, 利用 SPSS19.0 统计分析软件, 对渔业捕捞产量(catch)和各因子时间序列及其时间滞后序列进行 Pearson 相关分析, 筛选对渔业捕捞产量有显著影响的气候环境因子, 并结合捕捞努力量进行多元线性回归。

1.4 评估渔业影响的海洋营养指数

Ecosim 模型用来评估渔业对生态系统影响的海洋营养指数, 主要有 Q-90 多样性指数、渔获物的平均营养级(the mean trophic level of fishery catch, TLc)、营养平衡指数指数(fishing-in-balance index, FIB)以及总捕捞量等。

Q-90 多样性指数是 Kempton's Q 指数^[13]的一个变量, 描述了生态系统功能群的多样性, 综合

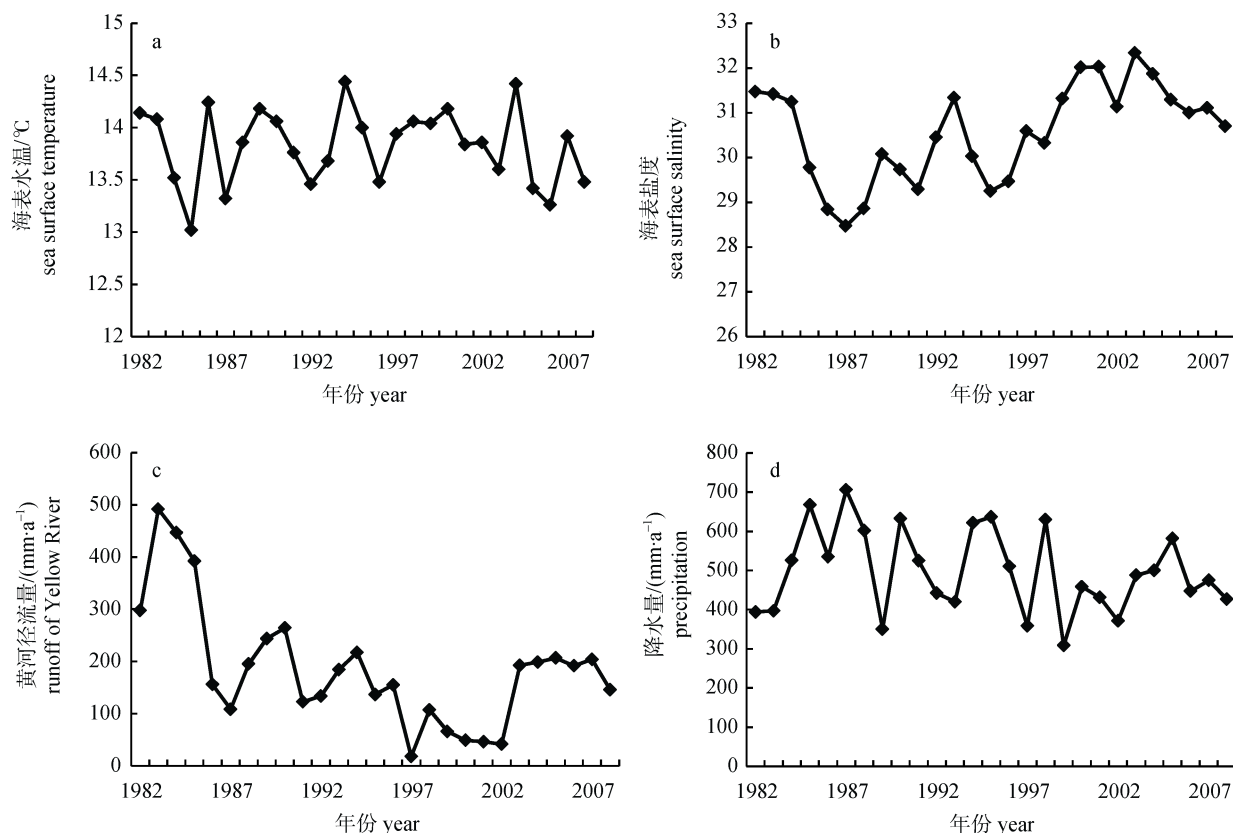


图 4 1982—2008 年渤海气候环境变量时间序列

Fig. 4 Time series of climate and environment variables in Bohai Sea from 1982 to 2008

了功能群的丰富度和均匀度, 由累积种类丰度曲线的斜率计算得出^[14], 公式如下:

$$Q_{-90} = \frac{0.8S}{\log(R_2 / R_1)} \quad (3)$$

式中, S 是模型中种类(功能群)的个数, R_1 和 R_2 分别是累积种类丰度分布的 10% 和 90% 对应的生物量值。

渔获物的平均营养级作为海洋营养指数之一, 可以衡量海洋生态系统的生物多样性水平^[15], 计算公式如下:

$$TLC_k = \frac{\sum_i (Y_{ik} \times TL_i)}{\sum_i Y_{ik}} \quad (4)$$

式中, TLC_k 为第 k 年的渔获物平均营养级, Y_{ik} 为捕捞种类 i 在第 k 年的捕捞量, TL_i 为捕捞种类 i 的营养级。

营养平衡指数(FIB)作为衡量捕捞产量与营养级间“平衡”的指标, 定义如下:

$$FIB_k = \log[Y_k \times (1/TE)^{TLC_k}] - \log[Y_0 \times (1/TE)^{TLC_0}] \quad (5)$$

可简化如下:

$$FIB_k = \log[Y_k / Y_0] + TLC_0 - TLC_k \quad (6)$$

式中, Y_k 为第 k 年的捕捞产量, TE 为平均转换效率(通常设定为 10%)^[16], 下标 0 表示基准年, 本研究中采用 1982 年。FIB 指数的定义指出: 当营养级的下降与捕捞产量的增加相匹配时, FIB 指数无变化; 当渔区扩张或产量的增加比营养级下降得快时, FIB 指数呈增长趋势; 当渔业消耗生态系统过多的生物量导致生态系统的功能减弱或捕捞产量增加的速度不足以弥补营养级的降低时, FIB 指数呈下降趋势。

2 结果与分析

2.1 渤海渔业种类生物量变化趋势的动态模拟

利用 CPUE 和捕捞努力量数据进行渤海 Ecosim 模型脆弱性参数的调试, 较好的调试误差平方和(SS)为 121.3, Ecosim 模型模拟了 1982—

2008 年间渤海鱼类、大型无脊椎动物相对生物量(当年生物量/初始生物量)的动态变化, 结果如图 5 所示。结果表明, 在捕捞强度和单位捕捞努力量渔获量时间序列驱动下, 鲈的相对生物量在 20 世纪 80—90 年代有所上升, 90 年代中期下降迅速; 主要经济鱼种小黄鱼的生物量在 80 年初期有所上升, 而后逐渐呈下降趋势, 2002 年之后资源量稍有恢复; 大型中上层鱼类蓝点马鲛的生物量 1982 一直呈下降趋势, 2008 年仅为 1982 年的 15%;

黄鲫、花鲈生物量呈下降趋势, 1982—1992 年花鲈下降趋势明显; 底栖鱼类、其他底层鱼类的生物量均呈下降趋势; 虾类、头足类生物量略有上升, 蟹类生物量略有下降; 口虾蛄相对生物量在 1982—1987 年有一定幅度的下降, 1988 年到 90 年代初一直保持上升趋势, 2000 年左右生物量出现下降, 而后趋于稳定, 2008 年的生物量增为 1982 年的 4.6 倍。其他中上层鱼类的生物量基本保持稳定。

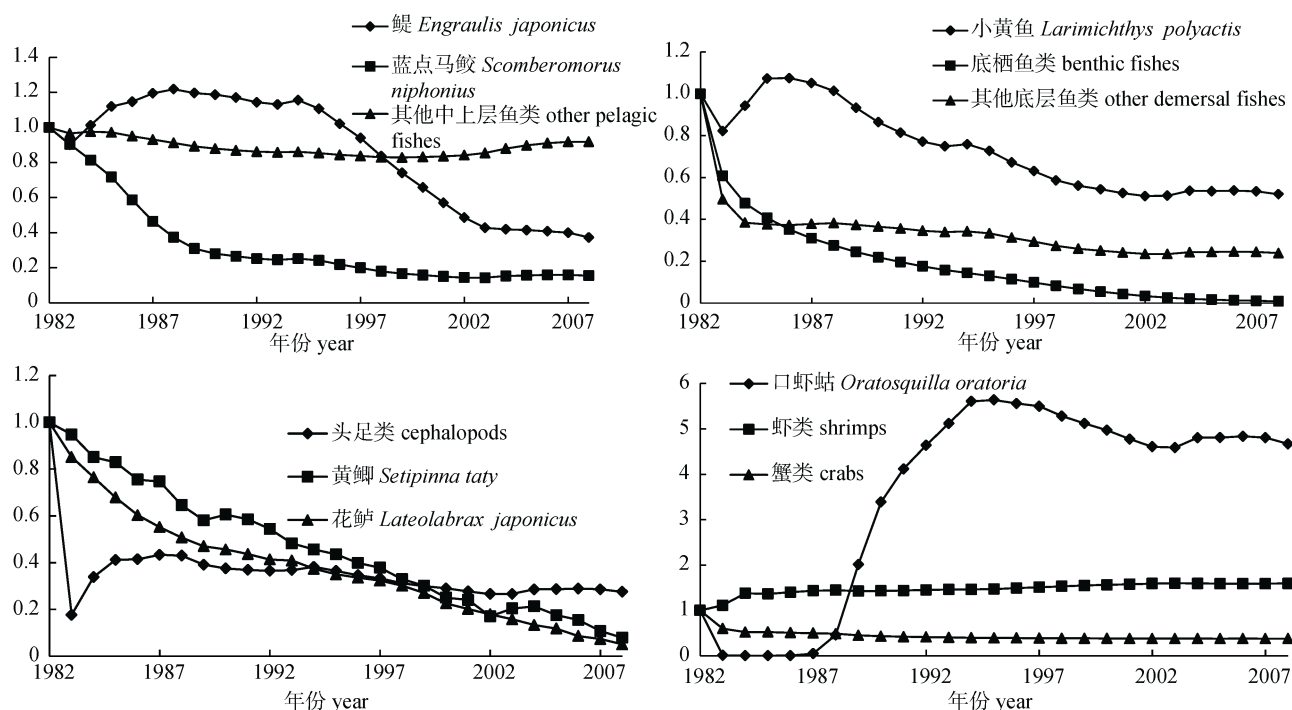


图 5 渤海渔业种类相对生物量的 Ecosim 模拟结果

Fig. 5 Simulation of relative biomass of fishing species in Bohai Sea ecosystem

2.2 模型终止与起始状态的比较

Ecopath 模型的生态网络分析(network analysis)功能能够计算评估生态系统成熟度和稳定性的生态指数: 总初级生产量/总呼吸量(TPP/TR)、系统净生产量、信息、系统杂食系数等, 在成熟的生态系统中, 系统没有多余的生产量再利用, TPP/TR 值逐渐接近于 1, 系统净生产量值接近于 0, 信息值较高, 系统杂食系数较低。将 Ecosim 模型运行结束时(2008 年)的最终状态保存为一个 Ecopath 模型, 将其系统总体状态与起始状态

(1982 年)的 Ecopath 模型进行比较(表 1), 可见系统总流量、流入碎屑总量稍有下降, 但变化不明显; 渔获物平均营养级由 3.69 降至 3.44, 系统总生物量下降了 13%, 总捕捞产量增加了约 13%; 描述系统成熟度的参数中, 系统净生产量有小幅增加, 系统杂食系数下降幅度较大(减少 50%), TPP/TR 增加了 12%, 信息值稍有下降, 总 P/B 值增加了 14%, Finn's 循环指数减少了 31%。2008 年的系统状态与 1982 年相比, 系统成熟度降低, 生态系统出现一定的退化。

表 1 渤海生态系统终止年(2008)与起始年(1982)总体特征的比较
Tab. 1 Comparison of system statistics in Bohai Sea ecosystem between 1982 and 2008

系统总体特征 system statistic	1982	2008
渔获物平均营养级 trophic level of catch	3.69	3.44
系统总生物量(排除碎屑)/(t·km ⁻²) total biomass (excluding detritus)	19.90	17.41
总捕捞产量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) total catches	1.09	1.23
总净初级生产量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) total net primary production	2536.88	2535.56
系统总流量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) total system throughput	5362	5314
流入碎屑总量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) total flows to detritus	2351.48	2346.01
系统净生产量/(t·km ⁻² ·a ⁻¹) net system production	2276.55	2302.09
系统杂食系数 systems omnivory index	0.508	0.248
信息 information	1.162	1.131
总初级生产量/总呼吸量 TPP/TR	9.75	10.86
总 P/B total primary production/total biomass	127.49	145.66
Finn's 循环指数/% Finn's cycling index	1.55	1.07

2.3 Ecosim 模型模拟的海洋营养指数的变动

利用时间强制序列, Ecosim 模型模拟评估了渔业捕捞对渤海生态系统的影响、Q-90 多样性指数、FIB 指数、渔获物的平均营养级以及总捕捞产量等的变动情况(图 6~8)。Q-90 多样性指数在 1982—1987 年间处于波动状态, 从 1988—1994 年间保持增长趋势, 在 1994 年之后迅速下降, 由 2.5 降至 0.5 附近; 1982—1983 年, 随着捕捞产量和 FIB 的大幅度下降, 渔获平均营养级也有所下降; 1984—1992 年捕捞产量和 FIB 总体呈增长趋势, 渔获平均营养级下降, 捕捞产量的增加不足以弥补渔获平均营养级的降低, 生态系统的平衡结构受到破坏; 渔业捕捞导致了生物量的下降, 也一定程度地导致生态系统生物多样性的下降, 对生态系统的功能有一定削弱, 渤海渔业处于

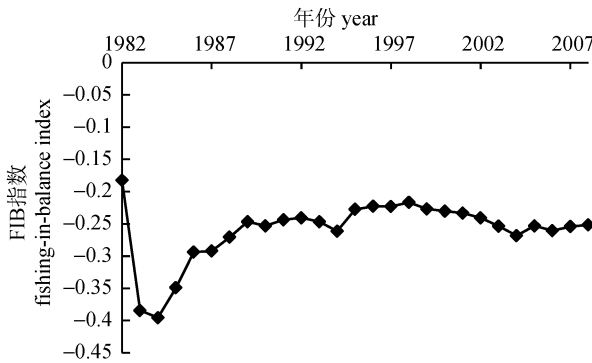


图 6 渤海渔业的营养平衡指数
Fig. 6 Fluctuation of fishing-in-balance indexes in Boahi Sea

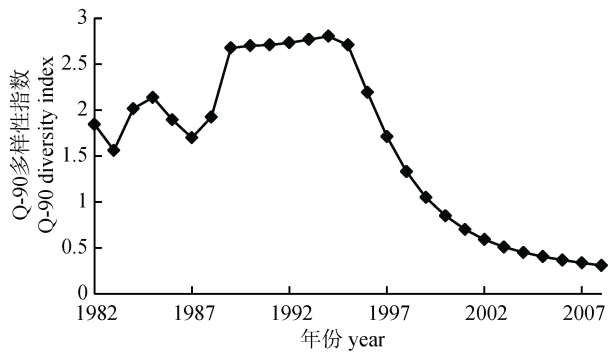


图 7 渤海 Q-90 指数
Fig. 7 Fluctuation of Q-90 index in Boahi Sea

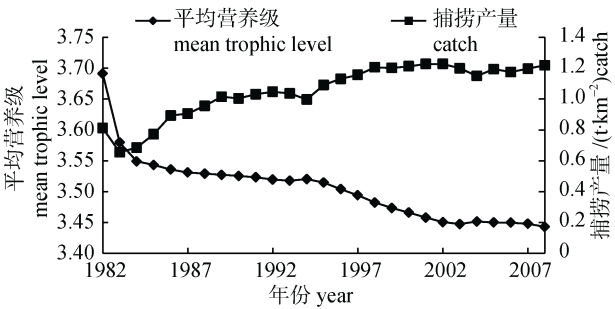


图 8 1982—2008 年渤海渔业捕捞产量及对应的平均营养级的变化
Fig. 8 Annual catch of Bohai Sea fishery and its corresponding mean trophic level from 1982 to 2008

“不平衡”状态。渔获物平均营养级与捕捞产量之间存在显著的负相关($P<0.05$)(图 8), 相关系数为-0.81。

2.4 环境变化对渤海生态系统渔业资源的影响
通过对捕捞产量和各环境变量及其时间滞后

序列的 Pearson 相关分析得出, 对渔业捕捞产量有显著影响的环境变量为海表盐度、黄河径流量、海表水温, 海表温度和盐度与渤海捕捞产量呈显著正相关, 黄河径流与捕捞产量呈显著负相关, 剔除了年降水量, 其中海表水温、海表盐度、黄河径流量均存在时滞效应(表 2)。

表 2 捕捞产量与环境变量的相关分析
Tab. 2 Correlations on catch, environment variables in Bohai Sea ecosystem

环境变量 environment variable	相关系数(时滞/年)correlation coefficient(time lag/a)	P
海表水温 sea surface temperature	0.509(4); 0.402(3)	0.007; 0.037
海表盐度 sea surface salinity	0.524(0); 0.389 (1)	0.005; 0.045
黄河径流量 Yellow River runoff	-0.649(0); -0.696(1); -0.688(2); -0.663(3); -0.648(4)	0.000

引入捕捞努力量, 将捕捞产量与捕捞努力量和表 2 中的环境时间序列进行多元线性回归, 消除多重共线, 剔除回归系数不显著($P>0.05$)的自变量, 最终得到的回归模型如下:

$$\text{Catch}_i = 0.944\text{Effort}_i + 8.91\text{SSS}_i - 0.171\text{Runoff}_i - 17.183\text{SST}_{i-4} \quad (7)$$

其中, Catch_i 为第 i 年的捕捞产量(10^4t), Effort_i 为第 i 年的捕捞努力量(10^4kW), SSS_i 为第 i 年的海表

盐度, Runoff_i 为第 i 年的黄河径流量(mm), SST_{i-4} 第 $i-4$ 年的海表水温($^{\circ}\text{C}$)。

回归模型显著($P<0.01$), 其 F 统计量为 213.6, $R^2=0.97$ 。运用回归模型模拟捕捞产量, 估算出来的渤海捕捞产量与实际捕捞产量比较如图 9 所示, 估算值与实际捕捞产量较吻合, 说明考虑环境因素和捕捞作用可简单模拟捕捞产量的变动。

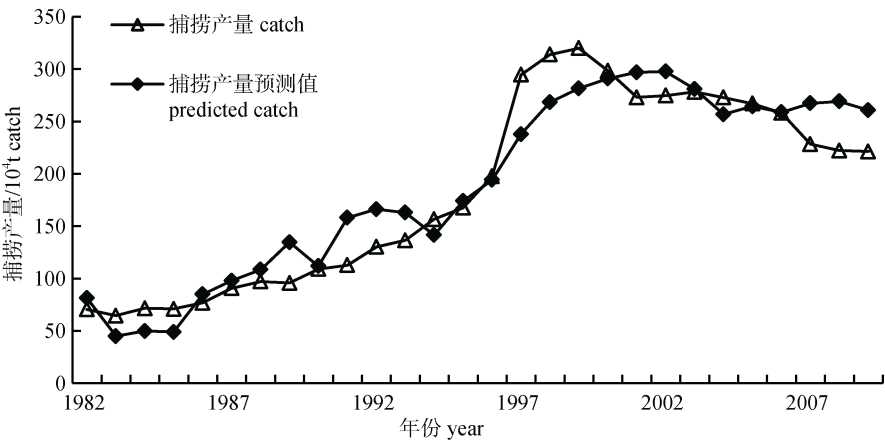


图 9 渤海捕捞产量与模型预测值的波动趋势比较
Fig. 9 Comparison between actual and predicted catches in Bohai Sea

3 讨论

Ecosim 模型基于食物网的变化, 从时间尺度模拟渔业捕捞对生态系统的动态影响, 应用广泛。本研究以渤海生态系统 1982 年的 Ecopath 模型作为初始状态, 利用 CPUE 和渔业相对捕捞强度作为时间强制序列, 构建 Ecosim 模型, 模拟 1982—2008 年渤海生态系统发育的动态变化以及捕捞对生态系统发育的影响。渤海主要渔业种类

生物量的动态变化模拟结果与 1982—2008 年期间渤海资源密度情况比较, 其变化趋势基本一致^[17-18]。主要经济鱼种小黄鱼的生物量在 20 世纪 80 年初期有所上升, 而后逐渐呈下降趋势, 2002 年之后资源量稍有恢复, 但群体结构出现小型化和低龄化, 主要以补充群体为主^[5]。渤海自 20 世纪 80 年代开展增殖放流至今, 花鲈作为增殖放流种之一, 1982—1992 年间兴起的捕捞花鲈鱼苗, 严重地损害了花鲈资源, 造成了花鲈资源量在 1982—

1992 年间的急剧下降^[1], 直到 2010 年资源量开始小幅度回升^[18]。鲢的相对生物量在 20 世纪 80—90 年代有所上升, 90 年代中期开始下降迅速, 鲢资源量的下降与不断增加的捕捞产量息息相关, 1997 和 1998 年鲢年产量均远远超过其 50 万 t 最大持续产量^[19]。近几年的调查结果显示, 鲢的资源量仍未恢复, 2009—2010 年鲢的生物量仅为 1982 年的 2%^[17]。蓝点马鲛作为渤海的大型中上层鱼类, 资源量也呈下降趋势, 2008 年生物量仅为 1982 年的 15%, 2010 年生物量为 1982 年的 9%^[17]。渤海主要渔业种类生物量的下降, 主要与不断增加的捕捞强度密切相关, 渤海捕捞努力量在 1982—2008 年间呈不断上升趋势, 2008 年较 1982 年增加了 3.10 倍(图 3)。渤海的捕捞作业主要是拖网捕捞大型经济鱼类, 大型鱼类捕食者资源衰退的同时减轻了虾蟹、头足类的摄食压力, 小型中上层鱼类和无脊椎动物生物保持稳定或有所增加, 1982—2008 年, 头足类、口虾蛄、小型中上层鱼类(黄鲫等)逐渐成为主要的优势种类。

2008 年的系统状态与 1982 年起始状态相比, 成熟度降低, 渤海生态系统出现一定的退化。海洋生态系统受人类活动和气候变化的双重作用, 人类活动主要通过捕捞直接或间接地影响着生态系统。海洋营养指数的变动模拟也表明, 捕捞是渤海渔业生态系统出现退化的主要原因, 降低了生态系统总体的生物量水平。过度捕捞造成渔业资源严重衰退, 个体平均体长变小、性成熟提前, 改变了鱼类种群结构, 进而改变种类的食物关系, 引起食物网结构的改变; 过度捕捞的恶性循环, 最终影响生态系统结构和功能的改变、造成生态系统生产力、恢复力的降低。渔获物平均营养级的变化受捕捞强度、生态系统的群落结构变动、主要渔获物的食性组成变动和个体大小等的影响, 渤海渔获物的平均营养级在 1982—2008 年明显下降, 由 1982 年的 3.69 降为 2008 年的 3.44。1998—1999 年渤海占生物量 90% 的营养层次重要生物资源种类其平均营养级为 3.46^[20], 该时期 Ecosim 模型模拟结果显示渔获物的平均营养级为 3.47, 两者结果较吻合, 可见 Ecosim 模型的构建基于食

物网结构的变化, 模拟食性变化的精确度较高。渤海总捕捞产量在 1984 年之后一直保持上升趋势, 两者之间显著的负相关关系显示, 渔获物平均营养级的下降和捕捞强度的增加紧密相关, 渔获物中长寿命、高营养级的底层鱼类比例下降, 而短寿命、低营养级的小型中上层鱼类比例上升是渔获物平均营养级的下降的主要原因^[21]。

气候环境变化可以引起鱼类个体特征、种群结构和群落组成的改变, 直接或间接地影响渔业资源量、甚至改变生态系统的结构和功能^[22-26]。环境变化对渤海渔业生态系统也产生一定的影响, 对渔业捕捞产量有显著影响的环境变量为海表盐度、黄河径流量、海表水温, 渔业生物都有适合生存的环境条件, 水温、盐度是主要的环境条件之一, 过高或过低的温度和盐度都会对鱼类生长产生直接影响, 水温、盐度的变化直接影响到鱼类的生长与代谢强度等; 20 世纪 80 年代以来, 黄河径流量波动较大, 黄河径流可影响河口及邻近海域的盐度、浑浊度、溶解氧和温度等环境因素, 进而间接影响渤海渔业资源, 捕捞产量与捕捞努力量和上述环境变量的回归模拟显示, 环境因素和捕捞作用可简单模拟其捕捞产量。渤海属典型的半封闭型内海, 水域交换能力差, 无法通过海水交换移出污染物; 近年来, 随着近岸海域污染日趋严重(无机氮、活性磷酸盐、石油类等超标)、海洋灾害频发(赤潮等), 也影响到渤海生态系统的健康, 造成近岸生态环境以及鱼虾产卵场的破坏, 降低了渔业生物的产卵率和渔业生物种群的增长率, 引起渔业资源的衰退^[27-29]。气候变化通过物理环境的变化影响到生态系统的各个阶层, 通过生物地球化学过程影响到水体营养盐, 从而引起初级生产力的变化, Ecosim 模型可以导入初级生产力时间驱动序列模拟气候变动对生态系统的影响^[30-31], 本研究由于这方面的数据不充分, 今后将引入探讨。

参考文献:

- [1] Jin X S. The dynamics of major fishery resources in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2001, 7(4): 22-26.[金显仕. 渤海主要渔业生物资源变动的研

- 究[J]. 中国水产科学, 2001, 7(4): 22–26.]
- [2] Jin X S, Tang Q S. The structure, distribution and variation of the fishery resources in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 1998, 5(3): 18–24.[金显仕, 唐启升. 渤海渔业资源结构、数量分布及其变化[J]. 中国水产科学, 1998, 5(3): 18–24.]
- [3] Deng J Y, Jin X S. Dynamic characteristics of abundance and community structure of fishery species in the overwintering ground of the Bohai Sea[J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 42–46.[邓景耀, 金显仕. 渤海越冬场渔业生物资源量和群落结构的动态特征[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 42–46.]
- [4] Zhang B, Tang Q S. Study on Trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(4): 393–404.[张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 393–404.]
- [5] Guo X P, Jin X S, Dai F Q. Growth variations of small yellow croaker (*Pseudosciaena polyactis* Bleeker) in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(2): 243–249.[郭旭鹏, 金显仕, 戴芳群. 渤海小黄鱼生长特征的变化[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 243–249.]
- [6] Li X S, Niu M X, Dai F Q. The characteristics of structure and distribution of spawning stock of fishery species in the Bohai Sea[J]. Marine Fisheries Research, 2008, 29(4): 15–21.[李显森, 牛明香, 戴芳群. 渤海渔业生物生殖群体结构及其分布特征[J]. 海洋水产研究, 2008, 29(4): 15–21.]
- [7] Chen J L, Liu W X, Liu S Z, et al. An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments in Bohai Sea[J]. Marine Science, 2004, 28(12): 16–21.[陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. 海洋科学, 2004, 28(12): 16–21.]
- [8] Liu X H. Analysis on environment situation of coastal areas of Bohai Sea[J]. Environmental Protection Science, 2010, 36(1): 14–18.[刘学海. 渤海近岸水域环境污染状况分析[J]. 环境保护科学, 2010, 36(1): 14–18.]
- [9] Lin Q. Studies on the ecosystem energy transfer and function in the typical waters of Yellow and Bohai Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012: 1–127.[林群. 黄渤海典型水域生态系统能量传递与功能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012: 1–127.]
- [10] Walters C, Christensen V, Pauly D. Structuring dynamic models of exploited ecosystems from trophic mass-balance assessments[J]. Rev Fish Biol Fish, 1997, 7: 139–172.
- [11] Christensen V, Walters C J. Ecopath with Ecosim: methods, capabilities and limitations[J]. Ecol Model, 2004, 172: 109–139.
- [12] Li Y K, Song B, Chen Y, et al. Simulation of ecosystem dynamics of Lake Taihu using Ecopath with Ecosim model[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2009, 16(2): 257–265.[李云凯, 宋兵, 陈勇, 等. 太湖生态系统发育的 Ecopath with Ecosim 动态模拟[J]. 中国水产科学, 2009, 16(2): 257–265.]
- [13] Kempton R A, Taylor L R. Models and statistics for species diversity[J]. Nature, 1976, 262: 818–820.
- [14] Ainsworth C H, Pitcher T J. Modifying Kempton's species diversity index for use with ecosystem simulation models[J]. Ecol Indic, 2006, 6: 623–630.
- [15] Pauly D, Watson R. Background and interpretation of the 'Marine Trophic Index' as a measure of biodiversity[J]. Phil T R Soc B, 2005, 360: 415–423.
- [16] Pauly D, Christensen V. Primary production required to sustain global fisheries[J]. Nature, 1995, 374: 255–257.
- [17] Jin X S. The Foundation and Prospect of Stock Enhancement of Fishery Resources in the Bohai Sea and Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2014: 84–93.[金显仕. 黄渤海渔业资源增殖基础与前景[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 84–93.]
- [18] Shan X J, Jin X S, Li Z Y, et al. Fish community structure and stock dynamics of main releasing fish species in the Bohai Sea[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(6): 1–9.[单秀娟, 金显仕, 李忠义, 等. 渤海鱼类群落结构及其主要增殖放流鱼类的资源量变化[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(6): 1–9.]
- [19] Iversen S A, Zhu D, Johannessen A, et al. Stock size, distribution and biology of anchovy in the Yellow Sea and East China Sea[J]. Fish Res, 1993, 16(2): 147–163.
- [20] Zhang B, Tang Q S. Study on trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(4): 393–404.[张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 393–404.]
- [21] Zhang B, Wu Q, Jin X S. Interannual variation in the food web of commercially harvested species in Laizhou Bay from 1959 to 2011[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2015, 22(2): 1–10.[张波, 吴强, 金显仕. 1959—2011 年间莱州湾渔业资源群落食物网结构的变化[J]. 中国水产科学, 2015, 22(2): 1–10.]
- [22] Perry A L, Low P J, Ellis J R, et al. Climate change and distribution shifts in marine fishes[J]. Science, 2005, 308: 1192–1195.
- [23] Tojo N, Kruse G H, Funk F C. Migration dynamics of Pa-

- cific herring (*Clupea Pallasii*) and response to spring environmental variability in the southeastern Bering Sea[J]. Deep-Sea Res Part II, 2007, 54: 2832–2848.
- [24] Beaugrand, G. Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas[J]. Deep-Sea Res Part II, 2009, 56: 656–673.
- [25] Cheung W W L, Zeller D, Pauly D. Projected species shifts due to climate change in the Canadian Marine Ecoregions[R]. A report of the Sea around US project to Environment Canada, 2011: 46.
- [26] Cheung W W L, Lam V, Samiento J L, et al. Global-warming induced changes in the catch potential of Regional Seas[R]//Christensen V, Lai S, Palomares M L D, et al. The state of biodiversity and fisheries in Regional Seas. Canada: The Fisheries Centre, University of British Columbia. 2011, 19(3): 50–54.
- [27] Shan Z X, Zheng Z H. On influence upon fishery resources polluted in the Bohai Sea[J]. Shandong Fisheries, 1996, 13(3): 34–36.[单志欣, 郑振虎. 渤海污染对水产资源的影响[J]. 齐鲁渔业, 1996, 13(3): 34–36.]
- [28] Cui Y, Ma S S, Li Y P, et al. Pollution situation in the Laizhou Bay and its effects on fishery resources[J]. Marine Fisheries Research, 2003, 24(1): 35–41.[崔毅, 马绍赛, 李云平, 等. 莱州湾污染及其对渔业资源的影响[J]. 海洋水产研究, 2003, 24(1): 35–41.]
- [29] Xu S S, Song J M, et al. Petroleum hydrocarbons and their effects on fishery species in the Bohai Sea, North China[J]. J Environ Sci, 2011, 23(4): 553–559.
- [30] Preikshot D B. The influence of geographic scale, climate and trophic dynamics upon North Pacific oceanic ecosystem models[D]. Vancouver: the University of British Columbia, 2007.
- [31] Watson R A, Nowara G B, Tracey S R. Ecosystem model of Tasmanian waters explores impacts of climate change induced changes in primary productivity[J]. Ecol Model, 2013, 264: 115–129.

Effects of fishing and environmental change on the ecosystem of the Bohai Sea

LIN Qun¹, WANG Jun¹, YUAN Wei¹, FAN Zhenhua², JIN Xianshi¹

1. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture; Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment of Shandong Province; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China

Abstract: Using a 1982 model of the Bohai Sea as the starting state, an Ecosim model was constructed for the Bohai Sea, including the 17 functional groups. Using time series of catch per unit effort (CPUE) and relative fishing effort as the driving factors, this model simulated the dynamic changes in different developmental stages of the Bohai Sea ecosystem and the impact of fishing on this ecosystem. The effects of climate change on the fishery resources of the Bohai Sea ecosystem were analyzed based on the environmental time series data. From 1982 to 2008, the biomass of *Oratosquilla oratoria* showed an increasing trend, and the biomasses of some species of high economic value showed decreasing trends, including *Pseudosciaena polyactis*, *Scomberomorus niphonius*, *Engraulis japonicus*, *Lateolabrax japonicus*, and *Setipinna taty*, and the biomasses of shrimp, crabs, and cephalopods were relatively stable. The mean trophic level of the catch clearly decreased from 1982 to 2008, and correlated significantly negatively with the total catch. The fishing-in-balance (FIB) index followed the same trends as the total catch, increasing after 1984. The Q-90 diversity index fluctuated slightly from 1982 to 1987, maintaining a growth trend in 1988–1994, followed by a rapid decline after 1994, from 2.5 to around 0.5, and the fishing biodiversity decreased. The surface salinity, surface temperature, and Yellow River runoff significantly affected the fishing yield in the Bohai Sea. A comparison of the initial (1982) and end states (2008) of the model showed that the maturity of the ecosystem decreased. Overfishing resulted in the degeneration of the ecosystem and a decline in the total biomass. Thus, fishing and environmental changes were the main factors affecting the changes in the fishery resources in the Bohai Sea ecosystem.

Key words: Bohai Sea; Ecosim dynamic simulation model; ecosystem structure; ecosystem function; fishing; environmental change

Corresponding author: JIN Xianshi. E-mail: jin@ysfri.ac.cn