

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16224

基于 Stella 的江苏近海海域生态足迹模拟分析

王子超^{1,2}, 晁敏¹

1. 中国水产科学研究院 东海水产研究所, 上海 200090;
2. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306

摘要: 为了量化人类活动对海洋渔业资源可持续利用干扰的程度, 本研究基于渔业生态足迹的算法, 对江苏近海 1978—2014 年的生态足迹进行计算, 研究江苏省的渔业生态现状。在此基础上, 依据系统动力学(System Dynamics, SD)原理, 嵌入营养动态模式, 构建了江苏近海海域渔业生态足迹 SD 模型。利用 2006—2014 年的历史渔业数据验证该模型是可行的, 并运用模型预测了不同捕捞强度下江苏近海渔业生态系统的发展模式。结果表明: 1978—2014 年江苏近海渔业生态足迹由 $2.41 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 增长到 $6.61 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 平均值为 $5.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 已经高于生态承载力 $3.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 约为承载力的 1.5 倍, 表明江苏近海海域渔业生态资源已处于不可持续的发展状态中; 根据模型仿真分析, 如果进一步加强捕捞强度, 渔业生态足迹会急剧下降, 最终趋于 0 值, 且随着加强程度的增大, 生态足迹下降越快, 趋于 0 值的时间也越短; 根据海洋渔获量阈值的计算结果, 需要在目前捕捞强度基础上降低约 50%, 渔业生态足迹才能回升, 生态赤字也能平稳降低, 从而防止渔业生态系统崩溃。该研究结果可为江苏省可持续发展决策提供有益参考, 也可用于江苏近海海域生态效应的预警。

关键词: 江苏近海; 渔业生态足迹; Stella 软件; 捕捞强度

中图分类号: S932

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)03-0576-11

中国东、黄海近岸海域是渔业生物资源的密集区, 同时又是典型的生态脆弱区, 易受到沿海海洋开发利用等外部压力的影响, 从而出现生境破碎化、污染加剧等问题^[1], 反过来影响海区重要渔业资源的补充和恢复过程, 给海洋渔业生态系统的可持续发展带来了巨大挑战^[2]。为保护和恢复海洋资源, 基于海洋资源可持续利用的各种研究层出不穷, 其中海洋承载力的研究是一项重要的研究内容, 主要关注海洋能够支持人口、经济和环境协调发展的限度或能力^[3]。目前, 承载力研究已经从概念和理论研究层次拓展到实际应用中, 为社会经济发展决策提供借鉴, 成为评价可持续发展能力的重要手段之一^[4]。

由于承载力的核算涉及自然、社会和经济等诸多因素, 目前尚无统一和成熟的方法, 在长期发展的过程中, 由于行业的限制, 承载力的度量

方法仍然带有各自领域的特点, 目前, 生态承载力评价方法可概括为以下 4 类^[5-6]: (1)种群数量的 Logistic 法; (2)资源供需平衡法, 包括生态足迹法、能值分析法、自然植被第一性生产力估计方法、资源与需求的差量方法等; (3)指标体系法; (4)系统模型法。其中, 生态足迹可以简单形象地量化生物资源的供需状况, 逐渐成为研究的热点^[7]。

生态足迹由加拿大生态经济学家 William Rees 于 1992 年提出, 经 Mathis Wackernagel 进一步改进和发展后, 已形成完善的生态足迹模型, 成为一种度量可持续发展的新方法^[8], 同时也是度量人类活动对生态系统产生影响和压力的一条新途径^[9]。该模型自提出以来, 各国学者在全球、国家、区域等各种尺度上进行了大量的理论和实证研究, 形成了丰硕的研究成果。在海洋渔业领域, 由 Folke 等^[10]提出和发展了海洋渔业生态足迹的概

收稿日期: 2016-07-25; 修订日期: 2016-09-23.

基金项目: 农业部公益性行业(农业)科研专项(201203018).

作者简介: 王子超(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋生态学. E-mail: 13052318318@163.com

通信作者: 晁敏, 研究员. E-mail: chaomin1011@hotmail.com

念, 被定义为人类为满足自身需要的海产品、其他海洋产物以及服务所占用的海洋生态系统面积。目前海洋受人类影响较大, 所提供的产品及系统服务功能在传统的经济生活中未能充分体现出来, 因此渔业生态足迹成为计算自然生态系统提供潜在功能以及这部分功能所带来的实际价值的重要工具。随着研究的进展, 国外越来越多将其用于渔业可持续发展测度及海洋渔业的管理^[11-14]。近年来, 国内关于海洋生态足迹的研究逐渐增多, 研究涉及生态足迹的理论进展^[7, 15]、计算方法^[16-17]和区域案例研究^[18-19]等。从国内外相关研究进展可看出, 渔业生态足迹的计算和定量研究已经引起渔业科研工作者的高度重视。然而, 目前针对所计算的数据进行科学的整理、分析, 从而更进一步做出预测的研究并不多见。针对渔业生态足迹开展预测研究有利于掌握渔业系统对胁迫压力不可承载的临界点, 从而前瞻性地制订渔业管理政策, 预防渔业系统崩溃的情景出现。因此, 对近海海域开展渔业生态足迹的预测研究非常有必要。

作用于渔业生态系统的胁迫压力是动态变化的, 因此, 渔业生态足迹亦为动态变化, 本研究借助数学建模方法, 建立近岸海域渔业生态足迹模型, 并设定不同的胁迫压力情景模式, 模拟研究渔业生态足迹的动态变化, 为渔业资源的可持续利用和承载力分析提供了技术支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概述

本研究区域选择江苏近岸海域, 该区域位于我国沿海的中部, 界于 $31^{\circ}33'N\sim 35^{\circ}07'N$, $119^{\circ}20'E\sim 125^{\circ}00'E$ 之间, 包括海州湾渔场、吕四渔场和大沙渔场三部分。海岸线北起苏鲁交界的赣榆县绣针河口, 南抵苏沪交界的启东县长江口北岸, 包括连云港、盐城和南通 3 市, 总长约 954 km, 由北到南大致分为两段: 北部连云港附近的海岸以砂质为主, 中、南部的海岸主要是淤泥质^[20]。海岸带处于南北气候过渡的季风气候区, 苏北灌溉总渠以北属于暖温带气候, 以南为北亚热带气候。年降水量 800~1200 mm, 夏多冬少, 春秋过渡,

入海河流较多, 分属沂沭、淮河和长江三大水系^[21]。江苏沿海滩涂面积 0.51 万 km^2 , -15 m 等深线以内的海域面积为 2.44 万 km^2 , 分别占全国相应面积的 24%和 20%, 在全国各省区中居首位^[22]。近岸海域受黄海沿岸流、东海沿岸流、长江冲淡水及黄海冷水团的综合影响, 基础饵料丰富, 生态环境独特, 是许多渔业物种重要的产卵场和索饵场所^[23-24]。主要经济种类有小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)、银鲳(*Pampus argenteus*)、鲢(*Miichthys miiuy*)、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、葛氏长臂虾(*Palaemon gravieri*)等。

与 20 世纪 80 年代初的海岸带与海涂资源综合调查相比, 江苏近岸海域鱼类资源密度和资源量显著下降, 降幅分别达为 49.93%和 52.99%, 主要经济鱼类除小黄鱼外, 资源密度和资源量均大幅减少^[25]。目前江苏近海渔业资源存在的关键问题在于开发利用与渔业资源保护之间的矛盾, 捕捞力量严重过量, 使渔业资源长期处于不堪重负的状态, 从而导致主要捕捞对象资源衰退, 每个品种均存在不同程度的生长型捕捞过度, 对渔业资源的利用以当年生群体为主, 如果捕捞强度得不到有效控制, 将形成补充性捕捞过度, 则近海渔业资源由衰退趋向衰亡。

1.2 渔业生态足迹动态模型的构建

应用 Stella(Isee Systems 公司, 9.1.3 版本)软件作为模型构建平台, 模型结合渔业生态足迹原理, 遵循系统动力学(System Dynamics, SD)建模的基本步骤进行建模^[26], 构造了江苏近岸海域简单的渔业生态足迹动态模型, 模型仅考虑海洋捕捞作为江苏近岸渔业生态系统的胁迫压力, 针对捕捞对渔业资源造成的衰退影响, 以及渔业生态足迹的变化, 从而对江苏近岸海域渔业生态足迹的动态变化进行预测研究, 以期为恢复和养护江苏近岸海域渔业资源提出对策, 更为江苏海洋经济可持续发展的协调管理和综合决策机制提供有力保障。

模型包含 4 个模块: (1)饵料(浮游植物)(bait)模块; (2)渔业资源(fishery)模块; (3)生态承载力(Ecological Capacity, EC)模块; (4)渔业生态足迹(Marine Ecological Footprint, MEF)模块。各模块间相互关系如图 1 所示。

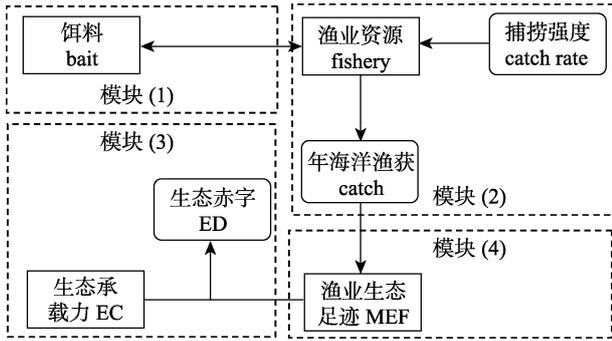


图 1 江苏近海渔业生态足迹 SD 模型各模块间相互关系图

Fig. 1 Interrelationships of marine ecological footprint (MEF) submodules of SD model along Jiangsu coastal areas

饵料模块与渔业资源模块间相互作用，并决定着区域渔业资源容纳量，渔业资源模块受物种生长、死亡过程和饵料丰度支配，依据本研究目的，渔业资源模块加入了捕捞压力作为决策变量，以研究不同捕捞压力策略下渔业生态足迹的变化。渔业生态足迹模块为模型的核心，受渔业水域面积、均衡因子的影响，生态承载力模块主要目的是衡量渔业生态足迹是否出现生态赤字

(Ecological Deficit, ED), 生态赤字计算公式如下:

$$ED=EC-MEF \quad (1)$$

式中, ED 为生态赤字(hm^2); EC 为生态承载力(hm^2); MEF 为渔业生态足迹(hm^2)。

当生态赤字为正时,说明生态承载力有一定比例的富余可以承载未来的渔业生态足迹增长,该区域渔业资源是可持续利用的。当生态赤字为负时,说明该区域的生态承载力已经不能支持当地的渔业生态足迹,亦即区域渔业处于生态超载状态,区域渔业资源处于不可持续利用状态。当生态赤字为零时,区域渔业资源处于可持续利用和不可持续利用状态的临界点。在计算足够精确的情况下,一般不存在这种情况。

依据各模块间的因果关系,采用 Stella 软件,得到渔业生态足迹的流程图(图 2)。本研究将模拟分析捕捞决策变量对渔业生态足迹输出的影响和变化趋势。Stella 软件内部依靠的数学运算体系非常严谨,并通过常微分方程组来构建模型。使用者构造数学方程式时可以非常简单,因为确定模型中各变量之间的关系(函数层中的数学关系)只

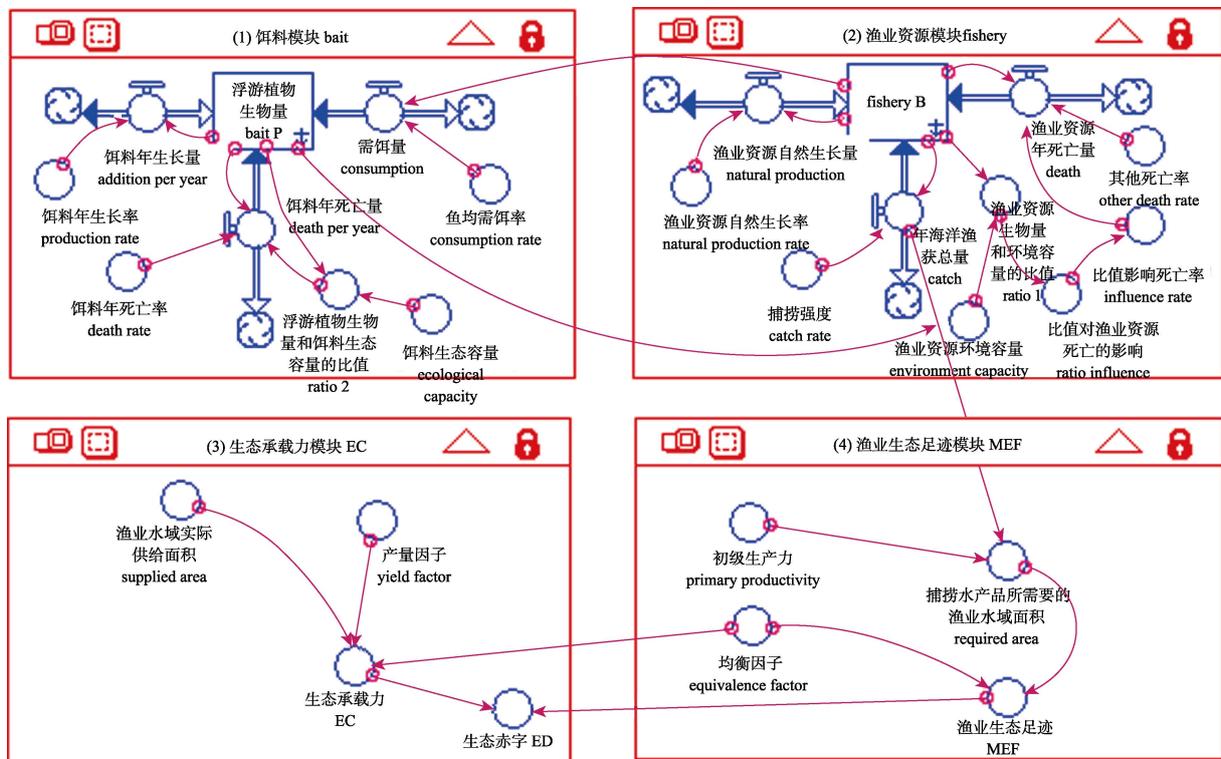


图 2 基于 Stella 的江苏近海渔业生态足迹流程图

Fig. 2 Flow chart of marine ecological footprint (MEF) of Jiangsu coastal waters based on Stella

需要通过图形化的语言方式来表达, 首先确定特定变量的初始变量, 然后所需变量的数值或者变化曲线就可以通过运行模型来得到, 因为计算机可以在后台操作所有复杂数据的运算流程^[27]。在建模时先将模型参数、自变量、因变量及辅助变量对应的图标元件布置在 Model 页面, 然后用箭头联系各元件来建立函数关系, 最后切换到 Equation 界面来输入函数表达式^[28], 模型数据及结果可以通过 Excel 存储或读取。

1.2.1 饵料模块 模型的饵料部分将设置浮游植物生物量 P 为状态变量。在近海海域生态系统, 浮游植物作为生产者将能量和营养物质转化为初级生产力, 并沿生物链流动。根据 908 专项黄海水区各航次调查数据, 南黄海初级生产力的年平均值为 $516 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ (以 C 计)^[29], 江苏近岸海域渔场总面积包括海州湾渔场、吕四渔场和大沙渔场三部分, 共 $11.187 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[30], 故该海域年初级产碳量约为 $2.11 \times 10^{10} \text{ kg}$, 按 1 g 碳相当于 10 g 鲜物质计算, 则浮游植物的鲜重为 $2.11 \times 10^{11} \text{ kg}$, 将此设置为浮游植物生物量 P 的初始值, 并将此值看作该水域饵料的生态容量值。渔业资源生物长到成熟平均约需饵料(鱼均需饵率)假设为 0.15, 饵料的自然生长率与自然死亡率均取值为 0.2。根据生态平衡原理, 采用营养动态模型估算江苏近岸海域生态系统的渔业资源容纳量, 营养动态模式计算公式^[31]为:

$$B = P \times E^n \quad (2)$$

式中, B 为渔业资源年生产力, P 为浮游植物年生产力(鲜重), E 为生态效率, n 为估算对象的营养阶层(营养级)。

此模型研究区域为江苏近岸海域, 水深小于 200 m 等深线, 生态效率按近海海域取值为 15%^[32]。估算对象的营养级采用黄海南部平均营养级取值 2.531^[33-34], 将渔业资源的环境容量 k 设为浮游植物年生产量的 0.15^{2.531} 倍, 并随之波动。

1.2.2 渔业资源模块 渔业资源生物量净减少取决于渔业资源自然死亡量和年海洋渔获总量, 而渔业资源自然生长量则构成了渔业资源量的补充量。模型中设置渔业资源生物量为状态变量, 年海洋渔获总量、渔业资源自然死亡量和渔业资源

自然生长量为相应的流率变量。该模块提供了生态足迹模块中渔业生态足迹计算所需要的流率变量年海洋渔获总量, 其变化在整个系统中处于支配地位。海洋渔业的发展程度受到渔业资源与生态承载力水平的制约, 对资源环境的开发超过一定的允许值, 人类的捕捞活动就会受到自然规律的惩罚。在江苏近岸海域生态足迹的模拟中, 根据渔业资源的环境容量值 k , 笔者将 2006 年的渔业资源初始量假设为 $1.45 \times 10^9 \text{ kg}$ 。生物在生长过程中, 自然繁殖率设定为 0.55, 由于造成死亡因素复杂, 这里将死亡率统一设定为 0.16。

对海洋捕捞产量产生影响的因素较多, 劳动力人数、投入的机动渔船的数量和功率、海洋渔业管理政策如为限制过度捕捞而实施的对海洋捕捞渔船实行渔船数量和主机功率零增长的“双控”政策^[35]、伏季休渔制度、捕捞限额制度等, 为方便下面使用系统动力学分析, 这里统一将这些影响因素定义为捕捞强度应用到构建的模型当中。

1.2.3 生态足迹模块 在该模块中设置渔业生态足迹为核心的数据转换器, 渔业生态足迹的变化与均衡因子和需要的渔业水域面积有关, 而渔业水域面积又和初级生产力及年海洋渔获总量有联系。对渔业生态足迹进行计算需要满足以下理论基础和假设^[16, 19]: (1)可以跟踪沿海城市在生产 and 消费过程中消耗的自然资源、能源及其产生的污染物; (2)消耗的资源、能源及排放的废弃物可以转化成为相应生产和占用海洋服务功能的生态生产性海域面积; (3)占用的海域面积能够折算成标准公顷(全球公顷), 1 hm^2 的生物生产能力等于当年全球土地(含渔业水域)的平均生产力; (4)用全球公顷表示的海域面积可以表达海域提供的各种生态服务功能; (5)提供各种生态功能的海域面积可具有非排它性; (6)自然供应的近岸海域承载力可以和近岸渔业生态足迹直接进行比较; (7)供给的面积(生态承载力)可以低于需求的渔业水域面积(渔业生态足迹), 表现为生态赤字。(8)上年结余的水产品的生态足迹按照当年的标准计算。

渔业生态足迹的计算公式:

$$\text{MEF} = S \times f \quad (3)$$

$$S = C/Y \quad (4)$$

式中, C 为年海洋渔获总量(kg); Y 为海洋捕捞水域的初级生产力(kg/hm²); S 为捕捞水产品所需要的渔业水域面积(hm²); f 为渔业水域的均衡因子; MEF 为渔业生态足迹(hm²)。

1.2.4 生态承载力模块 在该模块中设置生态赤字为核心的数据转换器, 其变化与生态承载力和生态足迹模块中的渔业生态足迹有关, 生态承载力的变化又和供给的渔业水域面积、产量因子和均衡因子有关。

生态承载力(Ecological Capacity, EC):

$$EC = (1-12\%) \times S' \times y \times f \quad (5)$$

式中, S' 为渔业水域实际供给面积(hm²); y 为渔业水域的产量因子; f 为渔业水域的均衡因子; 出于渔业生态安全考虑, 减 12% 系为生物多样性保留的水域面积(如各级渔业生态保护区、水产种质资源保护区等)^[16]; EC 为生态承载力(hm²)。

将计算出来的渔业生态足迹与该地区的生态承载力进行比较, 从而判断该地区的渔业发展是否处于生态可以支持的能力范围之内。

本文所需的年海洋捕捞总量以及渔业水域实际供给面积等数据主要来自《中国渔业统计年鉴》^[36]的有关资料, 本研究仍然采用渔业生态足迹模型换算中全球一致的渔业水域均衡因子和产量因子^[16](表 1), 进行渔业生态足迹和生态承载力的计算与分析。需要说明的是, 根据 Wackernagel 的计算数据^[8], 天然水域的初级生产力取自全球平均水域初级生产力。

表 1 渔业生态足迹参数值
Tab. 1 Parameters of MEF

参数 parameter	数值 value
均衡因子 equivalence factor, f	0.35
产量因子 yield factor, y	1
初级生产力/(kg·hm ⁻²) primary productivity, Y	29

1.2.5 主要方程

(1) 渔业资源生物量 $F(t) = 1.45 \times 10^9 (t-dt) + (\text{渔业资源自然生长量} - \text{渔业资源自然死亡量} - \text{年海洋渔获总量 } C) \times dt$

(2) 浮游植物生物量 $P(t) = 2.11 \times 10^{11} (t-dt) + (\text{饵料年生长} - \text{饵料年死亡} - \text{需饵量}) \times dt$

(3) 年海洋渔获总量 $C = F \times \text{捕捞强度}$

(4) 渔业资源自然生长量 = $F \times \text{渔业资源自然生长率}$

(5) 饵料年死亡量 = $P \times \text{饵料年死亡率} \times P/K_0$

(6) 饵料年生长量 = $P \times \text{饵料年生长率}$

(7) 需饵量 = $F \times \text{鱼均需饵率}$

(8) 渔业生态足迹 $MEF = C/Y \times f$

(9) 生态承载力 $EC = (1-12\%) S' \times y \times f$

(10) 生态赤字 $ED = EC - MEF$

式中, C 为年海洋渔获总量(kg); EC 为生态承载力(hm²); f 为渔业水域的均衡因子; F 为渔业资源生物量(kg); K_0 为饵料生态容量(kg); MEF 为渔业生态足迹(hm²); P 为浮游植物生物量(kg); S' 为渔业水域实际供给面积(hm²); t 为时间(年); y 为渔业水域的产量因子; Y 为海洋捕捞水域的初级生产力(kg/hm²)。

1.3 模型有效性验证

本研究以年海洋渔获量为例, 通过历史检验法来判断模型的可适性^[37]。即将主要变量的初始参数输入模型进行仿真运行, 把得到的模拟结果和实际数值做比较, 计算其偏离度^[38], 公式如下:

$$D_t = (X'_t - X_t) / X_t \times 100\% \quad (6)$$

式中, D_t 为偏离度; X'_t 为第 t 年的模拟结果; X_t 为第 t 年的实际数值。

2 结果与分析

2.1 江苏近岸海域渔业生态足迹现状

收集 1978—2014 年《中国渔业统计年鉴》中江苏省近海海洋捕捞产量的历史资料, 用于分析江苏近岸海域海洋捕捞产业发展现状和渔业生态足迹现状。对江苏省近岸海域主要年份的渔业生态足迹进行计算(表 2, 图 3), 江苏省近岸海域主要年份的平均渔业生态足迹为 5.38×10^6 hm²。平均生态承载力扣除 12% 生态多样性保护用地^[16] 计算为 3.45×10^6 hm², 平均生态赤字为 1.93×10^6 hm², 渔业生态足迹是生态承载力的将近 1.5 倍。结果表明, 目前江苏近岸海域的渔业生态足迹远远超过该海域的生态支持的能力, 对于海水产品资源的过度捕捞已经使江苏近海海域的海洋渔业发展处于不可持续状态。

表 2 江苏近岸海域主要年份渔业生态足迹表
Tab. 2 MEF in main years in Jiangsu Province coastal area

年份 year	捕捞 产量/t catch	渔业生态足迹 / $\times 10^6 \text{ hm}^2$ marine ecological footprint, MEF	生态承载力 / $\times 10^6 \text{ hm}^2$ ecological capacity, EC	生态赤字 / $\times 10^6 \text{ hm}^2$ ecological deficit, ED
1978	199648	2.41		1.04
1982	227322	2.74		0.70
1986	241590	2.92		0.53
1990	306824	3.70		-0.26
1994	465000	5.61		-2.17
1998	707796	8.54	3.45	-5.10
2002	606572	7.32		-3.88
2006	584386	7.05		-3.61
2010	570354	6.88		-3.44
2014	547952	6.61		-3.17
平均 mean	445744	5.38		-1.93

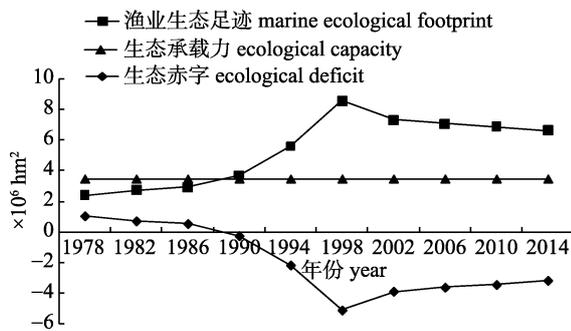


图 3 江苏近岸海域生态足迹和生态赤字变化图
Fig. 3 Change curve of marine ecological footprint (MEF) and Ecological deficit (ED) in Jiangsu Province coastal area

20 世纪 70 年代末江苏省海洋捕捞产量为 20 万 t 左右, 伴随着捕捞力量的逐渐投入, 渔业生态足迹也不断提高, 从 20 世纪 90 年代开始, 出现生态赤字, 并逐年增加, 到 20 世纪末, 产量达到 70 万 t, 与 70 年代相比增加近 4 倍。1998 年, 渔业生态足迹出现拐点, 呈下降趋势, 至 2014 年, 足迹降至 $6.61 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 生态赤字也有所降低, 但仍然维持在较高的水平。从整体发展态势来看, 江苏近海渔业生态足迹呈以 1998 年为转折点的倒 U 形变化趋势。受行星边界^[39]的启示, 动态生态足迹也应有一个产生生态赤字的阈值, 相应会得到海洋渔获总量的阈值, 通过公式(1)、(3)、(4)、(5)计算得到海洋渔获总量的阈值为 $2.85 \times 10^8 \text{ kg}$, 当海洋渔获量超过这个值就会产生生态赤字。

2.2 模型模拟结果分析

对历史数据(2006—2014 年)进行模拟, 将模拟结果和实际数值代入式(6), 拟合结果如表 3 所示。综合分析发现, 江苏近岸海域年海洋渔获量的模拟值和实际值的偏差较小(图 4), 偏离度介于 $-0.38\% \sim +3.54\%$ (符合 95% 的信度)。

表 3 年海洋渔获量的实际值与模拟值的比较
Tab. 3 Comparison of recapture amount between actual data and simulated outputs

年份 year	实际值/kg actual data	模拟值/kg simulated outputs	偏离度/% deviation
2006	584386000	580000000	0.75
2007	573519000	574200000	-0.12
2008	566308000	568458000	-0.38
2009	562663000	562773420	-0.02
2010	570354000	557145686	2.32
2011	568108000	551574229	2.91
2012	566085000	546058487	3.54
2013	553787000	540597902	2.38
2014	547952000	535191923	2.34

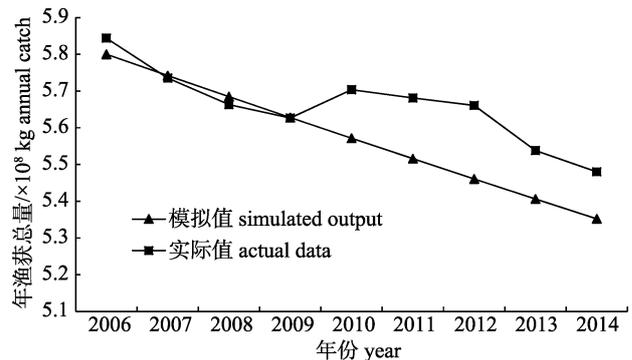


图 4 年海洋渔获量的实际值与模拟值比较图
Fig. 4 Comparison of recapture amount between actual data and simulated outputs

2.3 不同捕捞强度下的渔业生态足迹仿真分析

为了考察捕捞强度对渔业生态足迹的影响, 运用 STELLA 软件做敏感性分析(sensitivity analysis)。做敏感性分析的最终目的就是找到影响江苏近岸海域渔业生态足迹的限制因子, 并对限制因子进行有针对性的调控, 从而为江苏近岸海域渔业资源的可持续发展提供借鉴。

在上述模型基础上, 将捕捞强度视为决策变量, 设置捕捞强度为 0.2、0.4、0.6、0.8 等 4 种情况, 将 2006 年设为仿真基期年, 2022 年为仿真报

告期年, 仿真时间序列长度为 17 年, 运行分别得到 F 、MEF 以及 ED 的相应变化趋势。图 5 中, 分别用 4 种曲线来表示由大到小 4 种不同捕捞强度下各个变量的变化情况。在图 5a 中, 当捕捞强度为 0.2 时, 渔业资源生物量会逐渐增加, 最终达到一个较高的平衡值。随着捕捞强度的增加, 渔业资源生物量反而会逐渐降低, 在极高的捕捞强度下(图 5a 中曲线 3 和曲线 4 之间的变化), 渔业资源生物量最终会趋于 0, 表明极高的捕捞强度会造成渔业资源枯竭, 并且高强度的捕捞也会造成很高的生态赤字(图 5c 中曲线 3 和曲线 4 之间的变化), 长期如此会造成渔业生态系统的崩溃。

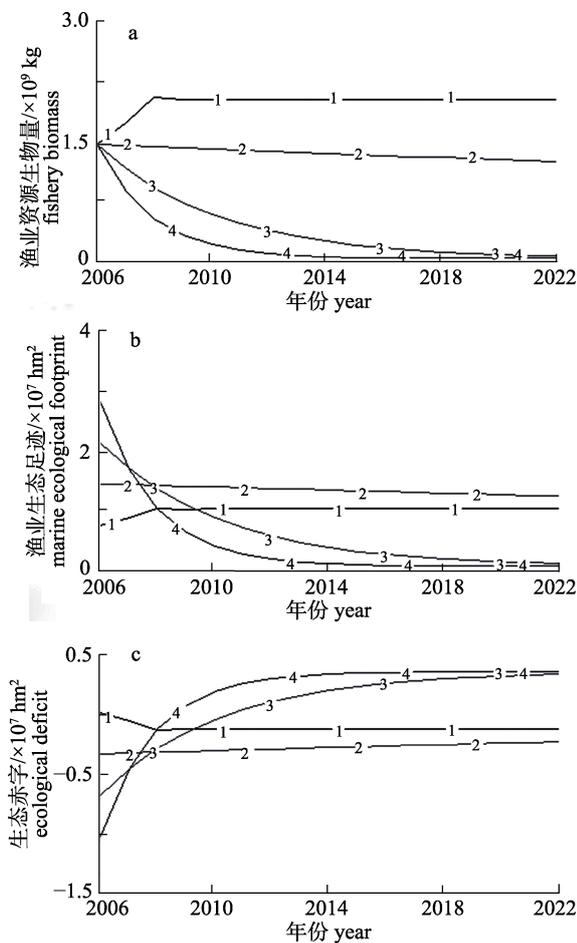


图 5 不同捕捞强度对渔业资源生物量、渔业生态足迹及生态赤字的影响

曲线 1 捕捞强度为 0.2; 曲线 2 捕捞强度为 0.4; 曲线 3 捕捞强度为 0.6; 曲线 4 捕捞强度为 0.8。

Fig. 5 Effects of different catch rate on fishery biomass, marine ecological footprint (MEF) and ecological deficit (ED)
The curve 1, 2, 3 and 4 indicate the catch rate is 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, respectively.

通过模型模拟得出, 目前捕捞强度大约在 0.4, 虽然在这样的捕捞强度下渔业生态足迹会在在一段时间内保持较高的水平, 但随着时间的推移已经呈现逐渐下降的趋势(图 5b 中曲线 2 的变化), 不利于海洋资源的可持续利用。在较低的渔获率下, 生态赤字短期内会下降, 然后保持一个相对较低的稳定水平, 有利于渔业生态系统的平衡发展。通过比较图 5 的 3 幅图得出, 在目前的捕捞水平下, 虽然在一段时间内能保持较高的渔业生态足迹, 渔业资源生物量在短期内也能满足人类需要, 但已经呈现下降的趋势, 是一种不可持续的发展方式。在极高的捕捞强度之下, 渔业生态足迹和渔业资源生物量都会从较高值发生脉冲式下降, 生态赤字急剧增加, 最终会引起渔业生态系统的崩溃。综合而言, 较为合理的捕捞强度为 0.2。结合本研究得出的海洋渔获总量的阈值, 需要在目前捕捞强度基础上降低约 50%, 才能维持江苏近岸海域渔业生态系统的健康发展。

3 讨论

同样运用渔业生态足迹方法研究江苏省海洋经济, 杨山等^[40]对 2000—2008 年江苏渔业生态足迹进行计算, 虽然未剔除养殖生态足迹的影响, 但变化趋势和本研究计算的捕捞生态足迹的变化趋势相似的。与国内近年开展的其他海域渔业生态足迹研究成果相比, 江苏海域渔业生态足迹略高于王若凡^[19]计算的 1990—2005 年厦门近岸海域的研究结果, 但变化趋势是类似的, 均是先增加后减少, 也与陈东景等^[15]调查的全国生态赤字的发展趋势相一致。综合目前的研究, 近海海域生态足迹变化趋势都呈倒 U 形抛物线状, 这可能和当时全国实施的“零增长政策”以及渔船回购措施^[41]有关。这些研究证明, 渔业生态足迹模型可量化人类活动对生态干扰程度的可行性, 但前述研究仅是针对渔业生态足迹的静态分析, 本研究通过结合系统动力学, 拟对未来渔业生态足迹变化趋势进行仿真模拟, 以期对江苏省可持续发展决策提供有益参考。

通过历史检验法计算得到的结果较麦尔哈巴·麦提尼亚孜^[42]和张爱儒^[43]研究的误差更小,

结果也更精确。另外,其模拟结果的变化趋势也符合现实情况,都是趋于降低的,表明主要变量的初始参数准确性比较高,因此该模型适应于江苏近岸海域渔业生态足迹的仿真模拟,结合渔业生态足迹和生态赤字的计算,可以为江苏省渔业资源的可持续开发利用提供合理参考依据。

4 结论

4.1 江苏近海渔业生态现状

运用渔业生态足迹公式,依据江苏近海 1978—2014 年捕捞产量的指标,对其生态足迹进行计算和分析,得出以下结论:江苏近海渔业资源的渔业生态足迹先逐年上升后缓慢下降,但仍保持较高的生态赤字,表明江苏近海渔业处于高生态足迹低生态承载力的不可持续发展状态。

4.2 江苏近海海域渔业生态足迹 SD 模型

以 Stella 为平台建立了江苏近海海域渔业生态足迹 SD 模型,对江苏近海 2006—2022 年不同捕捞强度下的渔业生态足迹仿真分析,得出结论:如果保持现有捕捞强度,短时间内会有较高的生态足迹,但已经呈现下降的趋势,是不可持续发展状态。从胁迫压力角度分析,捕捞强度应降低至目前的 50%,从而降低生态赤字。本模型为研究不同捕捞强度对江苏近岸海域渔业生态足迹的影响提供了可视化途径,并对模型结构、运行参数以及运行结果进行了修正,使该模型更适应于在江苏近岸海域渔业生态足迹研究中开展情景分析和调控方案研究,以便为江苏渔业、环保等部门规划、设计及管理提供参考。

4.3 展望

该模型将系统动力学和渔业生态足迹相结合,预测了渔业生态足迹在未来几年的变化,并通过嵌入营养动态模式估计渔业资源生物量的初始值,也增加了模型的科学性。

笔者在构建江苏近岸海域渔业生态系统时,为了能使构建的模型顺利运行,将一些难以确定的数据做了估计,如渔业资源生物量,年出生率及死亡率,只为使用者在日后具体运行中,可以根据实际情况进行调整,运用到其他海域。本研究作为对生态足迹 SD 模型的初次尝试,下一步

将开展海域生态足迹系统动力学的实证分析,这将是日后研究工作的重点和难点。

参考文献:

- [1] Li T. Preliminary study on community structure of fishery resources in north yellow sea and coastal waters of southern Shandong Peninsula[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. [李涛. 北黄海及山东半岛南部近岸海域渔业资源群落结构的初步研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.]
- [2] Huang X Y, Li B, Zhou J Y, et al. Evaluation of ecological vulnerability of Jiangsu coastal areas[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 22(5): 53–56. [黄夏银, 李冰, 周家艳, 等. 江苏沿海地区生态环境脆弱性分析[J]. 环境科技, 2009, 22(5): 53–56.]
- [3] Wei C, Ye S F, Guo Z Y, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(18): 5893–5904. [魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等. 海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用——以南通市为例[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5893–5904.]
- [4] Gu K K. Concepts and assessment methods of ecological carrying capacity[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(2): 389–396. [顾康康. 生态承载力的概念及其研究方法[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 389–396.]
- [5] Shi Y Z, Zhao H J. Review on quantitative evaluation method of ecological carrying capacity[J]. Yellow River, 2005, 27(3): 6–8. [石月珍, 赵洪杰. 生态承载力定量评价方法的研究进展[J]. 人民黄河, 2005, 27(3): 6–8.]
- [6] Wang K Y, Zou C J, Kong Z H, et al. Ecological carrying capacity and Chongming Island' s ecological construction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(12): 2447–2453. [王开运, 邹春静, 孔正红, 等. 生态承载力与崇明岛生态建设[J]. 应用生态学报, 2005, 16(12): 2447–2453.]
- [7] Zhao Y T, Xu S N, Qi Z H, et al. Review on ecological footprint of fisheries[J]. Fishery Modernization, 2015(2): 67–71. [赵玉涛, 徐姗姗, 齐占会, 等. 渔业生态足迹指数模型研究进展[J]. 渔业现代化, 2015(2): 67–71.]
- [8] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment & Urbanization, 1992, 4(2): 121–130.
- [9] Sun X, Cheng H S, Chen Z H. Assessment and forecast of urban sustainability based on ecological footprint[J]. Ecological Science, 2007, 26(4): 343–350. [孙逊, 成洪山, 陈章和. 基于生态足迹模型的城市可持续发展定量评估与预测[J]. 生态科学, 2007, 26(4): 343–350.]

- [10] Folke C, Troell M. The Ecological Footprint Concept for Sustainable Seafood Production: A Review[J]. *Ecological Applications*, 1998, 8(1): S63-S71.
- [11] Larsson J, Folke C, Kautsky N. Ecological limitations and appropriation of ecosystem support by shrimp farming in Colombia[J]. *Environmental Management*, 1994, 18(5): 663-676.
- [12] Bravo-Olivas M L, Chávez-Dagostino R M, López-Fletes C A, et al. Fishprint of coastal fisheries in Jalisco, Mexico[J]. *Sustainability*, 2014, 6: 9218-9230.
- [13] Bala B K, Hossain M A. Modeling of food security and ecological footprint of coastal zone of Bangladesh[J]. *Environ Dev Sustain*, 2009, 12: 511-529.
- [14] de Leo F, Miglietta P P, Pavlinović S. Marine ecological footprint of Italian Mediterranean fisheries[J]. *Sustainability*, 2014, 6: 7482-7495.
- [15] Chen D J, Li P Y, Du J, et al. The evaluation of sustainable development based on ecological footprint and human development index—A case of marine fishery resources utilization in china[J]. *China Soft Science*, 2006(5): 96-103. [陈东景, 李培英, 杜军, 等. 基于生态足迹和人文发展指数的可持续发展评价——以我国海洋渔业资源利用为例[J]. *中国软科学*, 2006(5): 96-103.]
- [16] Wu L J. A study of measurement on sustainable utilization of fisheries resource based on ecological footprint Index in fisheries[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2006. [吴隆杰. 基于渔业生态足迹指数的渔业资源可持续利用测度研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.]
- [17] Song Y Z, Han B P, Zhu G P, et al. Assessment on sustainable utilization of fisheries resources based on ecological footprint in Jiangsu province[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 31(2): 17-22. [宋亚洲, 韩宝平, 朱国平, 等. 基于生态足迹的江苏省渔业资源可持续利用评价[J]. *水生态学杂志*, 2010, 31(2): 17-22.]
- [18] Huang J. Study on an assessment model of the coastal sea ecological footprint[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007. [黄静. 近岸海域生态足迹计算模式研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.]
- [19] Wang R F. Study on the differences of marine ecological footprints between Xiamen and luoyuan bays[D]. Xiamen: Xiamen University, 2008. [王若凡. 厦门与罗源湾近岸海域生态足迹对比研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.]
- [20] Jiang S, Li J L, Li X W, et al. The eutrophication evaluation and cause analysis in Jiangsu coastal sea area[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24(4): 26-29. [姜晟, 李俊龙, 李旭文, 等. 江苏近岸海域富营养化现状评价与成因分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2012, 24(4): 26-29.]
- [21] Ren M E, Xu T G, Zhu J W. Comprehensive Survey Report of Coastal Zones and Tideland Resources in Jiangsu Province(1980-1984)[M]. Beijing: China Ocean Press, 1985: 25-83. [任美镠, 许廷官, 朱季文. 江苏省海岸带和滩涂资源综合调查报告(1980-1984)[M]. 北京: 海洋出版社, 1985: 25-83.]
- [22] Shen Y M. Nutrients distribution characters and its appraisalment inshore area in Jiangsu province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 6-10. [沈永明. 江苏近岸海域营养盐类污染分布特征与评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1): 6-10.]
- [23] Liu Z L, Cheng J H, Li S F, et al. Changes of fish community structure in Jiangsu, China Offshore areas[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2009, 16(2): 274-281. [刘尊雷, 程家骅, 李圣法, 等. 江苏近岸海域鱼类群落结构的变化[J]. *中国水产科学*, 2009, 16(2): 274-281.]
- [24] Zhang X J, Tang J H, Xiong Y, et al. The biological characteristics and spatial distribution of Chinese drum *Miichthys miiuy* along Jiangsu coastal areas in summer[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2008, 23(5): 376-381. [张学江, 汤建华, 熊瑛, 等. 江苏近岸夏季鲈的生物学与空间分布特征[J]. *大连水产学院学报*, 2008, 23(5): 376-381.]
- [25] 908 Special Office in Jiangsu Province. Integrated Survey and Evaluation Report of Offshore Marine in Jiangsu Province[M]. Beijing: Science Press, 2012: 615-638. [江苏省908专项办公室. 江苏近海海洋综合调查与评价总报告[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 615-638.]
- [26] Wang Q F. System Dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994: 25-27. [王其藩. 系统动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 25-27.]
- [27] Di Q B, Xu D S, Zhou L P. Study on the system dynamic model of marine economy sustainable development based on STELLA[J]. *Ocean Development and Management*, 2012, 29(3): 90-94. [狄乾斌, 徐东升, 周乐萍. 基于 STELLA 软件的海湾经济可持续发展系统动力学模型研究[J]. *海洋开发与管理*, 2012, 29(3): 90-94.]
- [28] Voinov R C A A. Modeling ecological and economic systems with STELLA: Part III[J]. *Ecol Model*, 2001(1-2): 1-7.
- [29] Sun S. China Regional Oceanography-Biological Oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 86-88. [孙松. 中国区域海洋学——生物海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 86-88.]
- [30] East China Sea Fisheries Command and Bureau of Aquatic Products, Ministry of Agriculture, Livestock and Fisheries. The Fisheries Resources Investigation and Division of the East China Sea[M]. Shanghai: East China Normal University

- Press, 1987: 5-6. [农牧渔业部东海区渔业指挥部, 农牧渔业部水产局. 东海区渔业资源调查和区划[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 1987: 5-6.]
- [31] Zhan B Y. Fishery Stock Assessment[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995: 257-270. [詹秉义. 渔业资源评估[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 257-270.]
- [32] Ning X R, Liu Z L, Shi J X. Evaluation of primary productivity and potential fishery production in the bohai sea, yellow sea and east china sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1995, 17(3): 72-84. [宁修仁, 刘子琳, 史君贤. 渤、黄、东海初级生产力和潜在渔业生产量的评估[J]. 海洋学报: 中文版, 1995, 17(3): 72-84.]
- [33] 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.]
- [34] Xu H X, Zhou Y D, He Z T. Biomass estimation of continental fishery resources in the east China sea using trophic level method[J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science, 2007, 26(4): 404-409. [徐汉祥, 周永东, 贺舟挺. 用营养动态模式估算东海区大陆架渔场渔业资源蕴藏量[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2007, 26(4): 404-409.]
- [35] Liang S, Qin M. A stochastic frontier analysis of productivity on fishing industry of Chinese inshore fleets: based on provincial panel data[J]. Journal of Agrotechnical, 2014(8): 118-127. [梁铄, 秦曼. 中国近海捕捞业生产的随机前沿分析——基于省级面板数据[J]. 农业技术经济, 2014(8): 118-127.]
- [36] Fishery Bureau of Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1978-2014. [农业部渔业局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 1978-2014.]
- [37] Chen Y X, Xue H F, Wang Y Y, et al. Simulation and adjustment of environmental carrying capacity based on system dynamics[J]. Computer Simulation, 2010, 27(2): 294-298. [陈永霞, 薛惠锋, 王媛媛, 等. 基于系统动力学的环境承载力仿真与调控[J]. 计算机仿真, 2010, 27(2): 294-298.]
- [38] Shi M J, Xu Z M. An analysis of the sustainable development in Zhangye municipality based on system dynamics model[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(4): 851-859. [师满江, 徐中民. 张掖市可持续发展系统动力学模拟分析[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 851-859.]
- [39] Rockström J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity[J]. Nature, 2009, 461(7263): 472-475.
- [40] Yang S, Wang Y T. Analysis on sustainable development of marine economy in Jiangsu Province based on marine ecological footprint correction model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 748-754. [杨山, 王玉婷. 基于生态足迹修正模型的江苏省海洋经济可持续发展分析[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 748-754.]
- [41] Zheng Y. Research of the controlling and measuring on fishing capacity of Chinese inshore fleets[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007. [郑奕. 中国近海渔业捕捞能力的控制与量化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.]
- [42] Marhaba Matniyaz, Wahap Halik. Theoretical research on groundwater resources carrying capacity based on SD model[J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(8): 105-109. [麦尔哈巴·麦提尼亚孜, 瓦哈甫·哈力克. 基于SD模型的吐鲁番地区地下水资源承载力理论研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 105-109.]
- [43] Zhang A R. Research on the industrial ecology mode in the San Jiangyuan ecological function area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015. [张爱儒. 三江源生态功能区产业生态化模式研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.]

Simulation of the marine ecological footprint of Jiangsu coastal waters using STELLA model

WANG Zichao^{1,2}, CHAO Min¹

1. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;
2. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Abstract: Human activity has put great pressure on the sustainable utilization of fishery resources. In order to quantify human activities based on the degree of interference, a model of the marine ecological footprint was calculated in order to understand the condition of Jiangsu coastal areas from 1978 to 2014. The system dynamics approach used a dynamic nutrition model and marine ecological footprint (MEF) analysis to build a system dynamics model of the marine ecological footprint of Jiangsu coastal areas. It is feasible to verify the model by way of historical fisheries data from 2006 to 2014, simulating the ecosystem development of Jiangsu coastal waters from 2006 to 2022 under different fishing intensities. The simulation results show that from 1978 to 2014, the marine ecological footprint of Jiangsu coastal waters increased from $2.41 \times 10^6 \text{ hm}^2$ to $6.61 \times 10^6 \text{ hm}^2$, with a mean value of $5.38 \times 10^6 \text{ hm}^2$, which is higher than the ecological carrying capacity of $3.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$, by approximately 1.5 times as much. This means that development in Jiangsu coastal waters has been at an unsustainable level according to the model simulation analysis; and assuming that the fishing intensity will only strengthen, the marine ecological footprint will fall sharply, and eventually to a zero value. The footprint drops faster and the time of tending to a zero value becomes shorter with increasing development. Based on the calculation of threshold catch, we need to reduce the fishing intensity by 50%, from now forward, to allow the fishery biomass to bounce back with smooth reductions in the ecological deficit, which might prevent a collapse in the fishery ecosystem. The research results are a worthwhile reference for making decisions on sustainable development in Jiangsu Province, and especially for forecasting ecological effects along the Jiangsu coast.

Key words: Jiangsu coastal waters; marine ecological footprint; STELLA; fishing intensity

Corresponding author: CHAO Min. E-mail: chaomin1011@hotmail.com