

DOI: 10.12264/JFSC2021-0119

山东近海产卵场健康状况评价体系

韩青鹏^{1,3}, 单秀娟^{1,2,4}, 陈云龙^{1,2,4}, 金显仕^{1,2,4}, 刘凯^{1,4}, 胡贝尔¹, 崔培东¹

1. 农业农村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. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266237;
3. 中国海洋大学水产学院, 山东 青岛 266003;
4. 山东长岛海洋生态系统国家野外科学观测研究站, 山东 长岛 265800

摘要: 产卵场对渔业资源补充起关键作用, 其健康状态直接决定了渔业资源世代发生量和可持续产出。本研究以山东近海产卵场为研究区域, 基于国内外海洋生态系统健康评价体系的综合分析, 以 20 世纪 80 年代山东近海健康状况作为基准, 利用层次分析法构建了产卵场健康状况量化评价体系, 并对该体系的评价结果进行了验证。评价体系从产卵场环境和产卵场功能(一级指标)考虑, 包含了生物环境、水文环境、人为干扰、鱼卵仔稚鱼、产卵群体和产卵场面积 6 个二级指标以及 21 个三级指标, 通过平均综合健康指数(CHI)表征产卵场健康状态。以 2008 年 5 月山东近海产卵场健康状况为例对本研究构建的产卵场健康量化评价体系的结果进行了验证。结果表明, 2008 年 5 月山东近海产卵场平均 CHI 为 0.571, 处于亚健康状态, 其中山东半岛北部产卵场、海州湾北部产卵场、山东半岛南部产卵场和莱州湾产卵场 CHI 分别为 0.596、0.593、0.590 和 0.505, 该评价结果一定程度上客观反映了山东近海产卵场的健康状况。

关键词: 山东近海; 产卵场; 健康评价; 层次分析法

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2022)01–0079–12

处于早期生活史阶段的渔业种群对渔业资源的补充起关键作用, 是渔业资源可持续利用的基础, 同时早期生活史阶段也是对环境抵御能力最脆弱、死亡率最高的发育阶段^[1]。我国在环境变化对种群早期生活史及渔业资源补充的影响研究中取得了一些重要成果^[2–4]。其中, 产卵场作为渔业种群早期生活史关键生境之一, 是影响渔业资源补充的重要环境要素, 其健康与否直接决定了渔业资源世代发生量和可持续产出。目前, 针对产卵场评价的研究仅见于山东省海洋与渔业厅对山东近海产卵场与索饵场的定性评价报告^[5]、王志忠等^[6]对黄河口牡蛎产卵场水文环境的评价以

及潘广臣等^[7]对莱州湾鱼卵、仔稚鱼的评价, 对产卵场功能健康状况的量化综合评价研究尚未见报道。

山东近海是 260 种渔业种类的重要栖息地^[8–9], 也是重要的产卵场, 对黄渤海渔业资源的补充起着重要作用^[8,10–11]。在环境变化和人类活动多重压力下, 山东近海生态系统结构和功能及可持续产发生了显著变化^[12–14], 出现渔业资源衰退、生物多样性下降、生态服务功能受损等现象^[15–17], 也进一步影响到产卵场的健康和生态功能。

本研究以山东近海为研究区域, 基于渔业资源拖网、鱼卵仔稚鱼及环境调查数据以及 20 世纪

收稿日期: 2021-03-26; **修订日期:** 2021-04-14.

基金项目: 山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0501-1); 山东省泰山学者专项基金项目; 中国水产科学研究院科研业务费团队项目(2020TD01).

作者简介: 韩青鹏(1993–), 男, 博士, 研究方向为渔业资源. E-mail: qphan@foxmail.com

通信作者: 单秀娟, 研究员, 研究方向为渔业资源. E-mail: shanxj@ysfri.ac.cn

80、90 年代历史资料,综合分析国内外关于海洋生态系统健康评价方法^[18-23],围绕产卵场资源补充的核心功能,建立量化的产卵场健康状况综合评价指标体系,采用层次分析法确定指标权重,用于评价山东近海产卵场的健康状况,以期为黄渤海渔业资源养护和生态补偿提供技术支撑,也为中国近海产卵场健康状况量化评价提供一个范例。

1 数据来源与评价体系构建

1.1 研究区域与数据来源

山东近海入海河流众多,使其成为优良的产卵场、索饵场和渔场,渔场总面积约 $2.2 \times 10^5 \text{ km}^2$ ^[8-9]。根据刘效舜等^[10]、唐启升等^[8]、程济生^[1]及山东省海洋与渔业厅^[5]的研究结果,本研究将山东近海产卵场划分为莱州湾、山东半岛北部近海(烟威近海)、山东半岛南部近海(石岛-青岛近海)及海州湾北部产卵场 4 个研究区域(图 1)。

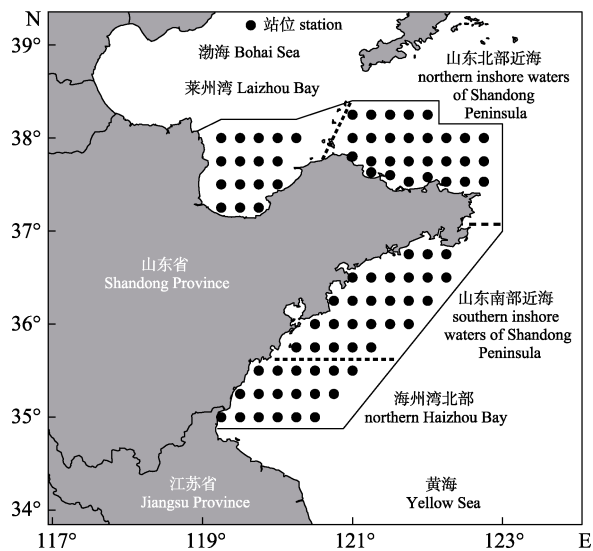


图 1 山东近海产卵场

Fig. 1 Spawning grounds in Shandong inshore waters

数据来源于中国水产科学研究院黄海水产研究所历史调查资料(1982—1983 年 5 月鱼卵仔稚鱼调查、1982—1983、1998—1999 年 5 月渔业资源调查)及山东省海洋与渔业厅《山东近海产卵场与索饵场综合评价》报告^[5]。2008 年 5 月调查站位如图 1 所示,本研究所用的历史调查均覆盖了图 1 中的研究区域。所用调查船舶均为当地渔船,拖速为 3 kn,渔获率数据标准化为 ind/km^2 。鱼卵、

仔稚鱼调查方法参照卞晓东等^[24]。水文环境、浮游植物和浮游动物调查参照《海洋监测规范》(GB 17378.7-2007)^[25]和《海洋调查规范》(GB/T 12763.6-2007)^[26]。

1.2 评价体系构建

评价指标体系要体现产卵场资源补充的核心功能,并考虑影响其核心功能的直接和间接因素指标,选取指标可从常规调查中获取。综合分析以往研究^[1,3,15],评价体系设立产卵场环境和产卵场功能 2 个一级指标,6 个二级指标。其中,产卵场环境设生物环境、水文环境和人为干扰 3 个二级指标;产卵场功能设鱼卵仔稚鱼、产卵群体、产卵场面积 3 个二级指标;三级指标见表 1。选取的这些指标对产卵场功能具有足够的表征作用,如鱼类在繁殖期间对环境要求严格,水温、盐度等水文环境因素影响着鱼类的产卵强度、空间范围、时间以及鱼类与饵料生物(生物环境因素)的时空匹配性,进而影响鱼类资源量的变动^[3,10,14-15]。此外,鱼类早期生活阶段仔稚鱼的成活率也取决于鱼类初次摄食时开口饵料的丰度(生物环境因素)、水温和盐度等水文环境因素^[1,14]。水文环境的变化对生物环境变化也有着强烈影响,溶解氧、无机氮等是其重要的监测指标^[1]。人为干扰指标表征着大规模围填海工程等人类活动的潜在影响,这些活动对产卵场及其功能具有显著的破坏作用^[14]。鱼卵仔稚鱼和产卵群体则表征着产卵场资源补充的核心功能^[1,3,10,14-15]。卞晓东等^[24]研究表明,渤海近 30 年鱼类早期补充群体呈现明显的种类更替现象,体现了鱼类群落内多重生态位的交替失调和渔业资源结构性衰退。因此种类的更替是产卵场健康评价的重要指标。同时考虑到维持各功能群的相对平衡对产卵场资源补充的核心功能,以及渔业生态系统的稳定的重要作用,本研究把种类数列为本体系的重要指标,并细分了长距离洄游种类数、短距离洄游种类数和地方性种类数指标。产卵场面积则是产卵场资源补充核心功能的间接表征,产卵场面积越大则意味着适合产卵的区域越大、鱼卵数量越多,因此被选为产卵场健康评价的重要指标。

表 1 山东近海产卵场健康评价指标体系

Tab. 1 Health assessment system of spawning grounds in Shandong inshore waters

一级指标 first-level indicator	二级指标 second-level indicator	三级指标 third-level indicator
产卵场环境(A ₁) spawning ground environment	生物环境(B ₁) biotic environment	浮游植物种类数(C ₁) phytoplankton species number
		浮游植物密度(C ₂) phytoplankton density
		浮游动物种类数(C ₃) zooplankton species number
		浮游动物密度(C ₄) zooplankton density
	水文环境(B ₂) hydrological environment	水温(C ₅) water temperature
		盐度(C ₆) salinity
		酸碱度(C ₇) pH
		溶解氧(C ₈) dissolved oxygen
		无机氮(C ₉) inorganic nitrogen
		活性磷酸盐(C ₁₀) reactive phosphate
	人为干扰(B ₃) human disturbance	开发强度指数(C ₁₁) exploitation intensity indicator
产卵场功能(A ₂) spawning ground function	鱼卵仔稚鱼(B ₄) fish eggs and larvae and juveniles	鱼卵种类数(C ₁₂) species number of eggs
		鱼卵密度(C ₁₃) fish egg density
		仔稚鱼种数(C ₁₄) species number of fish larvae and juveniles
		仔稚鱼密度(C ₁₅) density of fish larvae and juveniles
	产卵群体(B ₅) spawning stock	产卵群体种类数(C ₁₆) species number of spawning stock
		产卵群体密度(C ₁₇) density of spawning stock
		长距离洄游种类数(C ₁₈) number of long-distance migratory species
		短距离洄游种类数(C ₁₉) number of short-distance migratory species
	产卵场面积(B ₆) spawning ground area	地方性种类数(C ₂₀) number of endemic species
		核心产卵场面积占比(C ₂₁) ratio of core spawning ground area to spawning ground area

1.3 评价方法

1.3.1 产卵场健康状况评价指标权重确定 使用已在海洋生态系统评价中得到广泛应用的层次分析法(analytic hierarchy proces, AHP)^[27-29], 结合专家对产卵场核心功能的判定意见及打分, 确定各评价指标对产卵场健康的重要程度, 按照 1~9 标度构造判断矩阵, 计算权重并进行一致性检验^[27,30], 最终确定山东近海产卵场健康状况评价指标权重值。

1.3.2 指标数据标准化 各指标单位和数量级不同, 在计算健康评价指数前, 需要对数据通过基

准值/范围与指标重新赋值进行标准化(归一化)来消除量纲影响。基准值/范围与指标重新赋值标准见表 2。基准值选择采用以下原则: (1)若有国家标准, 则参考国家标准, 例如以《海水水质标准》(GB3097-1997)一类水质标准(适用于海洋渔业水域)为酸碱度、溶解氧、无机氮和活性磷酸盐制定归一化基准值/范围; (2)若没有国家标准, 则综合考虑借鉴相关科学研究成果, 例如综合考虑相关文献[1,12,14]制定浮游植物种类数的基准值; 综合考虑 5—6 月大部分产卵鱼类最适产卵温度和盐度范围^[10,15]制定水温和盐度的基准范围。

表 2 山东近海产卵场健康评价指标的基准值与赋值标准

Tab. 2 Benchmark value and assignment criteria of inshore spawning ground health assessment indicators in Shandong Province

指标 indicator	5-6 月基准值/范围 benchmark value/range during May-June	赋值标准 assignment criteria	文献来源 reference source
浮游植物种类数 species number of phytoplankton	≥ 45	A	[1,12,14]
浮游植物密度/(ind/m ³) phytoplankton density	75000-3800000	B	[1,31]

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

指标 indicator	5-6 月基准值/范围 benchmark value/range during May-June	赋值标准 assignment criteria	文献来源 reference source
浮游动物种类数 species number of zooplankton	≥35	A	[1,12,14]
浮游动物密度/(ind/m ³) zooplankton density	≥20000	B	[1,31-32]
水温/℃ water temperature	14.5-20.5 (底温 bottom temperature 13-20)	B	[10,15]
盐度 salinity	28-30.5 (底盐 bottom salinity 28-30.5)	B	[10,15]
酸碱度 pH	7.8-8.5	B	[31,33]
溶解氧/(mg/L) dissolved oxygen	≥6	A	[31,33]
无机氮/(mg/L) inorganic nitrogen	0.0014-0.2000	C	[14,31,33]
活性磷酸盐/(mg/L) reactive phosphate	0.0031-0.0150	C	[14,31,33]
开发强度指数 exploitation intensity indicator	见公式 1 equation1	D	[22]
鱼卵种类数 species number of fish eggs	≥34	A	1982-1983 年鱼卵仔稚鱼调查及文献[1,14] survey of fish eggs, larvae and juveniles from 1982 to 1983 and references[1,14]
鱼卵密度/(ind/station) eggs density	≥32211	A	1992-1993 年鱼卵仔稚鱼调查及文献[31-32] survey of fish eggs, larvae and juveniles from 1992 to 1993 and references[31-32]
仔稚鱼种数 species number of fish larvae and juveniles	≥44	A	1982-1983 年鱼卵仔稚鱼调查及文献[1,14] survey of fish eggs, larvae and juveniles from 1982 to 1983 and references[1,14]
仔稚鱼密度/(ind/station) density of fish larvae and juveniles	≥1500	A	1992-1993 年鱼卵仔稚鱼调查 survey of fish eggs, larvae and juveniles from 1992 to 1993
产卵群体种类数 species number of spawning stock	≥42	A	1982-1983、1998-1999 年渔业资源调查及文献 [1,14,34] fisheries resources survey in 1982-1983, 1998-1999 and references [1,14,34]
产卵群体密度/(ind/km ²) density of spawning stock	≥34109	A	1982 年渔业资源调查 fisheries resources survey in 1982
长距离洄游种类数 number of long-distance migratory species	≥9	A	各种类数见文献[1,5,10,14-15,34] the coefficient is the ratio of various classes.
短距离洄游种类数 number of short-distance migratory species	≥18	A	references ^[1,5,10,14-15,34]
地方性种类数 number of endemic species	≥15	A	
核心产卵场面积比 ratio of core spawning ground area to spawning ground area	各核心产卵场面积与各个研究区域面积的比值 ratio of each core spawning ground area to each survey water area		[35]

注: A. 指标值大于等于基准值则重新赋值为 1, 范围外则指标值重新赋值为 $1 - |(\text{指标值} - \text{基准值}) / \text{基准值}|$; B. 指标值在基准范围内重新赋值为 1, 范围外则指标值重新赋值为 $1 - |(\text{指标值} - \text{基准值}) / \text{基准值}|$, 指标值小于基准值, 则基准值特指基准值下限, 指标值大于基准值, 则基准值特指基准值上限, 其中 $|(\text{指标值} - \text{基准值}) / \text{基准值}|$ 最大值为 1; C. 指标值在基准范围内重新赋值为 1, 范围外则指标值重新赋值为 $1 - |(\text{指标值} - \text{基准值}) / \text{基准值}|$, 指标值小于基准值, 则基准值特指基准值下限, 指标值大于基准值, 则基准值特指基准值上限, 其中 $|(\text{指标值} - \text{基准值}) / \text{基准值}|$ 最大值为 1, 指标值重新赋值最小值为 0.1; D. 1-开发强度指数。

Note: A. If the indicator value is greater than or equal to the benchmark value, it will be reassigned to 1. If the indicator value is outside the benchmark value range, it will be reassigned to $1 - |(\text{indicator value} - \text{benchmark value}) / \text{benchmark value}|$; B. If the indicator value is within the benchmark range, it will be reassigned to 1. If the indicator value is outside the benchmark value range, it will be reassigned to $1 - |(\text{indicator value} - \text{benchmark value}) / \text{benchmark value}|$. If the indicator value is less than the benchmark value, the benchmark value refers to the lower limit of the benchmark range, and if the indicator value is more than the benchmark value, the reference value refers to the upper limit of the benchmark range, where the maximum value of $|(\text{indicator value} - \text{benchmark value}) / \text{benchmark value}|$ is 1; C. If the indicator value is within the benchmark range, it will be reassigned to 1. If the indicator value is outside the benchmark value range, it will be reassigned to $1 - |(\text{indicator value} - \text{benchmark value}) / \text{benchmark value}|$. If the indicator value is less than the benchmark value, the benchmark value refers to the lower limit of the benchmark range, and if the indicator value is more than the benchmark value, the reference value refers to the upper limit of the benchmark range, where the maximum value of $|(\text{indicator value} - \text{benchmark value}) / \text{benchmark value}|$ is 1. The minimum value of indicator value reassignment is 0.1; D. 1-Development intensity index.

依据《山东省海域使用许可信息》(<http://data.sd.gov.cn/portal/catalog/6152737cd3164b8c98f1446012bbec09>)的统计数据, 分类计算用海开发活动, 计算标准参考刘晴等^[22]。开发强度指数(D)计算参考刘晴等^[22], 公式为:

$$D = \sum_{i=1}^n S_i \times K_i$$

(1)

式中, S_i 为第 i 类用海面积与研究区域面积比, K_i 为用海方式的影响强度系数。研究区域面积使用 R 语言程序包 `PBSmapping`^[36] 计算。

核心产卵场面积计算参考 Han 等^[35], 即大于最大密度 1% 的面积之和。核心产卵场面积占比为产卵场核心面积与研究区域面积的比值。

1.3.3 山东近海产卵场综合健康指数 根据产卵场健康评价指标权重和重新赋值数据, 计算山东近海产卵场评价的综合健康指数(comprehensive health indicator, CHI):

$$CHI = \sum_{i=1}^m W'_i \times R_i$$

(2)

式中, W'_i 为指标 i 的最终权重值, R_i 为指标 i 的重新赋值。根据刘晴等^[22], 依据综合健康指数将产卵场健康状况分为 5 种状态: 极不健康(0~0.2)、不健康(>0.2~0.4)、亚健康(>0.4~0.6)、较健康(>0.6~0.8) 和健康(>0.8~1.0)。

2 结果与分析

2.1 产卵场健康评价指标权重

山东近海产卵场各级评价指标的相对重要性标度及其权重值见表 3~8。一级指标中, 产卵场环境和功能权重值分别为 0.3 和 0.7。二级指标中, 产卵场环境类别下各指标权重值由高到低依次为: 水文环境 B_2 (0.544)、生物环境 B_1 (0.346)、人为干扰 B_3 (0.110); 产卵场功能类别下各指标权重值由高到低依次为: 鱼卵仔稚鱼 B_4 (0.479)、产卵群体 B_5 (0.458)、产卵场面积 B_6 (0.063)。表 3~8 计算了各二级指标类别下对应三级指标的权重值。通过一级指标权重值、各个一级指标下二级指标权重值(W_1 、 W_2)及各二级指标下三级指标权重值(W_{11} 、 W_{12} 、 W_{13} 、 W_{24} 、 W_{25} 、 W_{26})相乘得到山东近海产卵场健康评价指标的最终权重值 W' 。

表 3 A_1 - B 判断矩阵及权重

Tab. 3 Judgment matrix and weight for A_1 - B

A_1	B_1	B_2	B_3	W_1
B_1	1	1/2	4	0.345950
B_2	2	1	4	0.543753
B_3	1/4	1/4	1	0.110297

$\lambda=3.053871$; $CR=3.053871<0.1$ (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: A_1 为产卵场环境; B_1 为生物环境; B_2 为水文环境; B_3 为人为干扰; W_1 为权重 1; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: A_1 denotes spawning ground environment; B_1 denotes biotic environment; B_2 denotes hydrological environment; B_3 denotes human disturbance; W_1 denotes weight 1; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

表 4 A_2 - B 判断矩阵及权重

Tab. 4 Judgment matrix and weight for A_2 - B

A_2	B_4	B_5	B_6	W_2
B_4	1	1	8	0.479085
B_5	1	1	7	0.458252
B_6	1/8	1/7	1	0.062663

$\lambda=3.001982$; $CR=0.001905714<0.1$ (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: A_2 为产卵场功能; B_4 为鱼卵仔稚鱼; B_5 为产卵群体; B_6 为产卵场面积; W_2 为权重 2; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: A_2 denotes spawning ground function; B_4 denotes fish eggs and larva and juveniles; B_5 denotes spawning stock; B_6 denotes spawning ground area; W_2 denotes weight 2; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

表 5 B_1 - C 判断矩阵及权重

Tab. 5 Judgment matrix and weight for B_1 - C

B_1	C_1	C_2	C_3	C_4	W_{11}	W'
C_1	1	1/2	1	1/2	0.166667	0.017297518
C_2	2	1	2	1	0.333333	0.034595027
C_3	1	1/2	1	1/2	0.166667	0.017297518
C_4	2	1	2	1	0.333333	0.034595027

$\lambda=4$; $CR=0<0.1$ (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: B_1 为生物环境; C_1 为浮游植物种类数; C_2 为浮游植物密度; C_3 为浮游动物种类数; C_4 为浮游动物密度; W_{11} 为权重 11; W' 为最终权重; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: B_1 denotes biotic environment; C_1 denotes species number of phytoplankton; C_2 denotes phytoplankton density; C_3 denotes species number of zooplankton; C_4 denotes zooplankton density; W_{11} denotes weight 11; W' denotes the final weight; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

2.2 山东近海产卵场健康评价

2.2.1 莱州湾产卵场健康评价 莱州湾产卵场各生物环境指标中浮游植物指标均大于等于 0.6, 达到/超过较健康状态, 浮游动物密度指标处于极

表 6 B_2 -C 判断矩阵及权重
Tab. 6 Judgment matrix and weight for B_2 -C

B_2	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	W_{12}	W'
C_5	1	1	4	3	3	3	0.306478	0.049994
C_6	1	1	4	3	3	3	0.306478	0.049994
C_7	1/4	1/4	1	1/2	1	1	0.080567	0.013143
C_8	1/3	1/3	2	1	1	1	0.110706	0.018059
C_9	1/3	1/3	1	1	1	1	0.097886	0.015968
C_{10}	1/3	1/3	1	1	1	1	0.097886	0.015968

$\lambda=4.045937$; CR=0.0172047<0.1 (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: B_2 为水文环境; C_5 为水温; C_6 为盐度; C_7 为酸碱度; C_8 为溶解氧; C_9 为无机氮; C_{10} 为活性磷酸盐; W_{12} 为权重 12; W' 为最终权重; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: B_2 denotes hydrological environment; C_5 denotes water temperature; C_6 denotes salinity; C_7 denotes pH; C_8 denotes dissolved oxygen; C_9 denotes inorganic nitrogen; C_{10} denotes reactive phosphate; W_{12} denotes weight 12; W' denotes the final weight; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

表 7 B_4 -C 判断矩阵及权重
Tab. 7 Judgment matrix and weight for B_4 -C

B_4	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	W_{24}	W'
C_{12}	1	2	2	3	0.425397	0.142661
C_{13}	1/2	1	1	2	0.230556	0.077319
C_{14}	1/2	1	1	1	0.194841	0.065342
C_{15}	1/3	1/2	1	1	0.149206	0.050038

$\lambda=4.045937$; CR=0.0172047<0.1 (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: B_4 为鱼卵仔稚鱼; C_{12} 为鱼卵种类数; C_{13} 为鱼卵密度; C_{14} 为仔稚鱼种数; C_{15} 为仔稚鱼密度; W_{24} 为权重 24; W' 为最终权重; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: B_4 denotes fish eggs and larvae and juveniles; C_{12} denotes species number of eggs; C_{13} denotes fish eggs density; C_{14} denotes species number of fish larvae and juveniles; C_{15} denotes density of fish larvae and juveniles; W_{24} denotes weight 24; W' denotes the final weight; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

不健康状态(表 9)。水文环境总体处于健康状态,但无机氮含量超出基准值两倍。产卵场功能中鱼卵、仔稚鱼各指标状态均较差,鱼卵种类数相对较高。产卵群体密度处于极不健康状态,产卵群体种类数和地方性种类数相对较好,长距离洄游种类数和短距离洄游种类数处于亚健康状态。核心产卵场面积占比大于 0.900。综合健康指数为 0.505 (图 2),产卵场处于亚健康状态。

2.2.2 山东半岛北部产卵场健康评价 山东半岛北部产卵场各生物环境指标除浮游动物密度外均

表 8 B_5 -C 判断矩阵及权重
Tab. 8 Judgment matrix and weight for B_5 -C

B_5	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	C_{20}	W_{25}	W'
C_{16}	1	2	1	1	1	0.231111	0.074135
C_{17}	1/2	1	1	1	1	0.175556	0.056314
C_{18}	1	1	1	1	1	0.197778	0.063442
C_{19}	1	1	1	1	1	0.197778	0.063442
C_{20}	1	1	1	1	1	0.197778	0.063442

$\lambda=5.05861$; CR=0.0130827<0.1 (通过一致性检验 have passed the consistency test)

注: B_5 为产卵群体; C_{16} 为产卵群体种类数; C_{17} 为产卵群体密度; C_{18} 为长距离洄游种类数; C_{19} 为短距离洄游种类数; C_{20} 为地方性种类数; W_{25} 为权重 25; W' 为最终权重; λ 为特征根; CR 为检验系数。
Note: B_5 denotes spawning stock; C_{16} denotes species number of spawning stock; C_{17} denotes density of spawning stock; C_{18} denotes number of long-distance migratory species; C_{19} denotes number of short-distance migratory species; C_{20} denotes number of endemic species; W_{25} denotes weight 25; W' denotes the final weight; λ denotes eigenvalue; CR denotes test coefficient.

处于健康状态,浮游动物密度指标处于极不健康状态(表 9)。水文环境总体处于健康状态。产卵场功能中鱼卵、仔稚鱼各指标状态均差。产卵群体种类数、长距离洄游种类数和短距离洄游种类数处于健康状态,而产卵群体密度则处于极不健康状态。核心产卵场面积占比指标处于亚健康状态。综合健康指数为 0.596 (图 2),产卵场处于亚健康状态。

2.2.3 山东半岛南部产卵场健康评价 山东半岛南部产卵场各生物环境指标除浮游动物密度外均大于 0.900,处于健康状态,浮游动物密度指标处于极不健康状态(表 9)。水文环境处于健康状态。产卵场功能中鱼卵、仔稚鱼各指标状态均差。产卵群体密度较低,处于不健康状态,其他产卵群体指标处于健康状态。核心产卵场面积占比指标处于亚健康状态。2008 年 5 月综合健康指数为 0.590 (图 2),产卵场处于亚健康状态。

2.2.4 海州湾北部产卵场健康评价 海州湾北部产卵场各生物环境指标中浮游植物指标处于健康状态,浮游动物密度和浮游动物种类数指标分别处于极不健康状态和亚健康状态(表 9)。水文环境总体处于健康状态,但活性磷酸盐含量远超出基准范围。产卵场功能中鱼卵、仔稚鱼各指标状态

表 9 山东近海产卵场综合健康指数
Tab. 9 Comprehensive health indicators of spawning grounds in Shandong inshore waters

指标 index	归一化赋值 normalized assignment				权重值 W'	指标得分 index score			
	莱州湾 Laizhou Bay	山东半岛北部 northern Shan- dong Peninsula	山东半岛南部 southern Shan- dong Peninsula	海州湾北部 northern Haizhou Bay		莱州湾 Laizhou Bay	山东半岛北部 northern Shan- dong Peninsula	山东半岛南部 southern Shan- dong Peninsula	海州湾北部 northern Haizhou Bay
C_1	0.644	1.000	1.000	1.000	0.017	0.011	0.017	0.017	0.017
C_2	1.000	1.000	1.000	1.000	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035
C_3	0.600	1.000	0.914	0.571	0.017	0.010	0.017	0.016	0.010
C_4	0.108	0.075	0.025	0.005	0.035	0.004	0.003	0.001	0.000
C_5	1.000	0.943	0.959	1.000	0.050	0.050	0.047	0.048	0.050
C_6	1.000	0.956	0.968	0.973	0.050	0.050	0.048	0.048	0.049
C_7	1.000	1.000	1.000	1.000	0.013	0.013	0.013	0.013	0.013
C_8	1.000	1.000	1.000	1.000	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
C_9	0.100	1.000	1.000	1.000	0.016	0.002	0.016	0.016	0.016
C_{10}	1.000	0.938	1.000	0.100	0.016	0.016	0.015	0.016	0.002
C_{11}	0.993	0.999	1.000	1.000	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
C_{12}	0.439	0.439	0.234	0.146	0.143	0.063	0.063	0.033	0.021
C_{13}	0.011	0.021	0.043	0.016	0.077	0.001	0.002	0.003	0.001
C_{14}	0.204	0.090	0.158	0.181	0.065	0.013	0.006	0.010	0.012
C_{15}	0.012	0.003	0.011	0.004	0.050	0.001	0.000	0.001	0.000
C_{16}	0.549	0.956	1.000	1.000	0.074	0.041	0.071	0.074	0.074
C_{17}	0.057	0.048	0.264	0.599	0.056	0.003	0.003	0.015	0.034
C_{18}	0.444	1.000	0.889	1.000	0.063	0.028	0.063	0.056	0.063
C_{19}	0.500	1.000	0.833	0.833	0.063	0.032	0.063	0.053	0.053
C_{20}	0.667	0.600	1.000	1.000	0.063	0.042	0.038	0.063	0.063
C_{21}	0.917	0.571	0.450	0.667	0.044	0.040	0.025	0.020	0.029

注: C_1 , 浮游植物种类数; C_2 , 浮游植物密度; C_3 , 浮游动物种类数; C_4 , 浮游动物密度; C_5 , 水温; C_6 , 盐度; C_7 , 酸碱度; C_8 , 溶解氧; C_9 , 无机氮; C_{10} , 活性磷酸盐; C_{11} , 开发强度指数; C_{12} , 鱼卵种类数; C_{13} , 鱼卵密度; C_{14} , 仔稚鱼种数; C_{15} , 仔稚鱼密度; C_{16} , 产卵群体种类数; C_{17} , 产卵群体密度; C_{18} , 长距离洄游种类数; C_{19} , 短距离洄游种类数; C_{20} , 地方性种类数; C_{21} , 核心产卵场面积占比。
Note: C_1 , species number of phytoplankton; C_2 , phytoplankton density; C_3 , species number of zooplankton; C_4 , zooplankton density; C_5 , water temperature; C_6 , salinity; C_7 , pH; C_8 , dissolved oxygen; C_9 , inorganic nitrogen; C_{10} , reactive phosphate; C_{11} , exploitation intensity indicator; C_{12} , species number of eggs; C_{13} , fish eggs density; C_{14} , species number of fish larvae and juveniles; C_{15} , density of fish larvae and juveniles; C_{16} , species number of spawning stock; C_{17} , density of spawning stock; C_{18} , number of long-distance migratory species; C_{19} , number of short-distance migratory species; C_{20} , number of endemic species; C_{21} , ratio of core spawning ground area to spawning ground area.

均差, 低于其他三个产卵场。产卵群体密度处于较健康状态, 其余产卵群体指标则为健康状态。核心产卵场面积占比指标大于 0.600, 处于较健康状态。2008 年 5 月综合健康指数为 0.593 (图 2), 产卵处于亚健康状态。

综上, 2008 年 5 月山东近海各产卵场健康状况均处于亚健康状态(图 2), 综合健康指数由高到低依次为山东半岛北部(0.596)、海州湾北部(0.593)、山东半岛南部(0.590)、莱州湾(0.505)。5 月山东近海 4 个产卵场综合健康指数平均值为 0.571 (图 2), 总体处于亚健康状态。

3 讨论

3.1 产卵场健康评价指标体系

本研究围绕产卵场的核心功能及其环境基础, 以山东近海为例, 筛选了产卵场健康评价指标并建立了产卵场健康评价体系。该指标体系的指标选择与权重赋值具有科学性, 其中大多数指标具有条件指标的某些特征, 表征产卵场的当前状态。产卵场的核心功能是资源补充, 资源补充的核心是鱼卵、仔稚鱼的种类和数量。渔业资源群落结构和多样性是生态系统稳定性和生态功能的重要体现。产卵群体、长距离洄游种、短距离洄

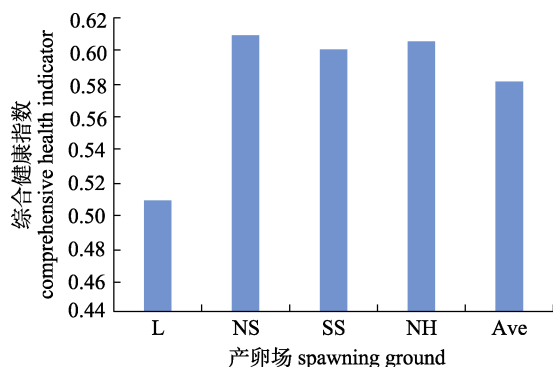


图 2 山东近海产卵场分布综合健康指数

L: 莱州湾; NS: 山东半岛北部; SS: 山东半岛南部;

NH: 海州湾北部; Ave: 各产卵场平均.

Fig. 2 Comprehensive health indicator of spawning ground in Shandong inshore waters

L: Laizhou Bay; NS: Northern Shandong Peninsula;

SS: Southern Shandong Peninsula; NH: Northern Haizhou Bay; Ave: Average.

游种、地方性种类数和生物量表征着产卵场的结构和功能^[8-9], 决定着鱼卵、仔稚鱼种类和数量。核心产卵场面积占比是产卵场功能评价在空间上的扩展。因此, 鱼卵、仔稚鱼、产卵群体、洄游种类及核心产卵场面积占比指标是该指标体系中重要的组成部分, 共占有 0.700 的权重值。

同时, 鱼卵、仔稚鱼种类和数量又与饵料基础密切相关。浮游植物和浮游动物是渔业生物直接或间接的食物, 其群落种类组成和数量分布对渔业资源早期补充及资源变动均发挥重要作用^[3,15]。同时, 浮游动、植物被认为是环境变化的良好指示物^[1], 在多个海洋生态系统健康评价中作为重要指标被纳入^[19-20,22,29]。因此, 浮游动、植物构成的生物环境指标是产卵场健康评价指标体系必要的部分, 占有 0.104 的权重值。

水温、盐度和 pH 等不仅决定着饵料基础的变化, 间接影响资源的补充, 而且影响鱼类的产卵繁殖及鱼卵、仔稚鱼的存活率, 从而直接影响着产卵场的功能^[10,14]。此外, 山东近海人类活动密集, 各类工程用海、污染物排放, 加剧了海水富营养化, 导致了产卵场和育幼场质量退化、饵料基础失衡、生物多样性降低等^[3,14,37-38]。氮、磷等营养盐和溶解氧含量是评价海水富营养化程度的重要依据, 影响着浮游植物种类组成和密度分布, 进而影响浮游动物, 通过食物链逐级传递^[14]。围

填海等活动造成栖息地破碎化深刻影响着渔业资源早期补充的环境因子^[14]。污染问题在中国近海也不容忽视, 崔毅等^[37]研究表明污染破坏了莱州湾产卵场, 污染水域内鱼卵种类和数量均有减少。因此, 水文环境指标和开发强度指数被纳入产卵场健康评价指标, 共占有 0.196 的权重值。另外, 水文环境空间分布差异也影响产卵场健康状况, 如刘晴等^[22]研究发现海州湾水环境在空间上存在不同程度的污染, 近岸海域水环境污染程度略高于离岸海域, 离岸海域健康状况相对优于近岸海域, 因此, 今后评价可精细化体现产卵场的功能差异。目前的开发强度指数指标难以衡量围填海产生的生态效应, 需要进一步完善改进这一指标。

3.2 评价体系结果验证

根据综合健康评价指数, 山东近海 4 个产卵场健康状况均处于亚健康状态, 尤其是鱼卵、仔稚鱼指标评分极低。李虎等^[32]研究发现山东沿岸海域“海洋荒漠化”现象越来越严重。以往关于山东近海渔业资源、鱼卵仔稚鱼的研究也佐证了产卵场功能受损情况, 如, 渤海鱼卵、仔稚鱼近 30 余年变迁表明, 自 1982 年始各调查季节(冬季除外) 渤海鱼卵、仔稚鱼种类数以及资源丰度指数持续下降, 并且在多重干扰作用下, 渤海鱼类早期补充过程各个关键环节已随其生境的消失或污染等变化而发生不可逆变化或变迁^[24]。1982—2008 年莱州湾及黄河口水域优势种由营养级高、经济价高的底层鱼类替换为营养级低的底层鱼类及中上层鱼类, 渔获量和渔业生态系统健康水平持续降低^[39]; 孙吉亭等^[40]对山东省渔业生态系统健康性评价结果表明, 2008 年左右山东省海洋渔业处于较差的发展状态, 海洋渔业资源严重紧缺。

山东近海各产卵场浮游植物指标均在合理范围之内, 浮游动物密度普遍低于基准范围。浮游动物是仔稚鱼的重要饵料之一, 其种类组成和数量分布特征在很大程度上决定了资源的补充量^[14], 因此, 2008 年山东近海浮游动物密度从饵料角度对产卵场功能的实现及健康状况具有较大的负面影响。李虎等^[32]的研究也表明浮游动物是导致山东半岛近岸海域生态健康恶化的主要因素之一。

除普遍影响产卵场健康的指标外,各产卵场在各指标得分上的差异影响了 4 个产卵场综合健康指数。如,莱州湾产卵场在 5 月浮游植物种类数、浮游动物种类数、长距离洄游种类数、短距离洄游种类数等指标得分上相对较低,造成莱州湾产卵场综合健康指数低。莱州湾产卵场长距离洄游种类、短距离洄游种类数远低于其他 3 个产卵场,可能与洄游通道遭到严重破坏有一定的关系^[14]。

综上分析,本研究筛选的产卵场健康评价指标,结合综合健康指数,一定程度上客观反映了山东近海产卵场的健康状况,并具有量化产卵场健康状况的优点,便于比较不同时期产卵场的健康状态,以评估产卵场管理措施的实效性。但实现产卵场健康评价指标精准量化仍具有很大挑战性。随着监测技术的进步、对资源补充过程认识的提升以及社会、经济指标的纳入,将进一步推动产卵场健康的综合评估和适应性管理。

参考文献:

- [1] Cheng J S. Ecological Environment and Biological Community in Coastal Waters of the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2004: 3-386. [程济生. 黄渤海近岸水域生态环境与生物群落[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2004: 3-386.]
- [2] Deng J Y, Zhao C Y. Marine Fisheries Biology[M]. Beijing: Agriculture Press, 1991: 1-452. [邓景耀, 赵传纲. 海洋渔业生物学[M]. 北京: 农业出版社, 1991: 1-452.]
- [3] Jin X S, Zhao X Y, Meng T X, et al. The Yellow Sea and Bohai Sea Biological Resources and Habitats[M]. Beijing: Science Press, 2005: 241-261. [金显仕, 赵宪勇, 孟田湘, 等. 黄、渤海生物资源与栖息环境[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 241-261.]
- [4] Jin X S, Dou S Z, Shan X J, et al. Hot spots of frontiers in the research of sustainable yield of Chinese inshore fishery[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(1): 124-131. [金显仕, 窦硕增, 单秀娟, 等. 我国近海渔业资源可持续产出基础研究的热点问题[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(1): 124-131.]
- [5] Comprehensive evaluation of spawning and feeding grounds in Shandong Province inshore waters[R]. Jinan: Shandong Provincial Oceanic and Fishery Department, 2011: 3-50. [山东省近海产卵场与索饵场综合评价[R]. 济南: 山东省海洋与渔业厅, 2011: 3-50.]
- [6] Wang Z Z, Zhang J L, Gu H D, et al. Assessment of water quality in oyster spawning ground in Yellow River estuary and adjacent waters[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2017, 30(3): 29-34. [王志忠, 张金路, 顾汉东, 等. 黄河口牡蛎产卵场及邻近海域水质现状评价[J]. 水产学杂志, 2017, 30(3): 29-34.]
- [7] Pan G C, Qiu S Y, Zhang H, et al. Evaluating the fish eggs and juveniles in the Laizhou Bay using analytical hierarchy process[J]. Marine Sciences, 2017, 41(5): 34-41. [潘广臣, 邱盛尧, 张华, 等. 基于层次分析法的莱州湾鱼卵、仔稚鱼评估[J]. 海洋科学, 2017, 41(5): 34-41.]
- [8] Tang Q S, Ye M Z. Development and Protection of Shandong Offshore Fishery Resources[M]. Beijing: Agriculture Press, 1990: 1-166. [唐启升, 叶懋中. 山东近海渔业资源开发与保护[M]. 北京: 农业出版社, 1990: 1-166.]
- [9] Chen D G. Fishery Ecology in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 1991: 2-135. [陈大刚. 黄渤海渔业生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991: 2-135.]
- [10] Aquatic Products Bureau, Yellow Sea Fisheries Headquarters, Ministry of Agriculture. Fishery Resources Investigation and Regionalization in the Yellow Sea and Bohai Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1990: 1-22. [农业部水产局, 农业部黄海区渔业指挥部. 黄渤海渔业资源调查与区划[M]. 北京: 海洋出版社, 1990: 1-22.]
- [11] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Bulletin on the status of inshore fishery resources in China[R]. 2021: 3-50. [中华人民共和国农业农村部. 中国近海渔业资源状况公报[R]. 2021: 3-50.]
- [12] Jin X S, Qiu S Y, Liu X Z, et al. The Foundation and Prospect of Stock Enhancement of Fishery Resources in the Bohai Sea and Yellow Sea[M]. Beijing: Science Press, 2014: 1-395. [金显仕, 邱盛尧, 柳学周, 等. 黄渤海渔业资源增殖基础与前景[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 1-395.]
- [13] Han Q P, Shan X J, Wan R, et al. Spatiotemporal distribution and the estimated abundance indices of *Larimichthys polyactis* in winter in the Yellow Sea based on geostatistical delta-generalized linear mixed models[J]. Journal of Fisheries of China, 2019, 43(7): 1603-1614. [韩青鹏, 单秀娟, 万荣, 等. 基于地统计二阶广义线性混合模型的黄海冬季小黄鱼时空分布和资源量指数估算[J]. 水产学报, 2019, 43(7): 1603-1614.]
- [14] Jin X S. Adaptive Response and Resource Effect of Fishery Population to Environmental Change in the Bohai Sea[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 7-280. [金显仕. 渤海渔业种群对环境变化的适应性响应及资源效应[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 7-280.]

- [15] Jin X S, Cheng J S, Qiu S Y, et al. The Comprehensive Research and Assessment of Fishery Resources in the Yellow Sea and Bohai Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 1-395. [金显仕, 程济生, 邱盛尧, 等. 黄渤海渔业资源综合研究与评价[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 1-395.]
- [16] Li Z Y, Wu Q, Shan X J, et al. Keystone species of fish community structure in the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2018, 25(2): 229-236. [李忠义, 吴强, 单秀娟, 等. 渤海鱼类群落结构关键种[J]. 中国水产科学, 2018, 25(2): 229-236.]
- [17] Lin Q, Wang J, Yuan W, et al. Effects of fishing and environmental change on the ecosystem of the Bohai Sea[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(3): 619-629. [林群, 王俊, 袁伟, 等. 捕捞和环境变化对渤海生态系统的影响[J]. 中国水产科学, 2016, 23(3): 619-629.]
- [18] Ye S F, Liu X, Ding D W. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: Indicator system and its primarily assessment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(4): 128-136. [叶属峰, 刘星, 丁德文. 长江河口海域生态系统健康评价指标体系及其初步评价[J]. 海洋学报, 2007, 29(4): 128-136.]
- [19] Hershner C, Havens K, Bilkovic D M, et al. Assessment of Chesapeake bay program selection and use of indicators[J]. EcoHealth, 2007, 4(2): 187-193.
- [20] Platt T, Sathyendranath S. Ecological indicators for the pelagic zone of the ocean from remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(8): 3426-3436.
- [21] Yang B, Sui P, Chen Y Q, et al. Progress in ecosystem health assessment[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(21): 291-296. [杨斌, 隋鹏, 陈源泉, 等. 生态系统健康评价研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(21): 291-296.]
- [22] Liu Q, Xu M, Li F, et al. Health diagnosis of Haizhou bay neritic ecosystem[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2013, 29(3): 301-302, 304. [刘晴, 徐敏, 李飞, 等. 海州湾生态系统健康诊断[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29(3): 301-302, 304.]
- [23] Wu Z J, Chen S Q, Wang D R, et al. The health assessment of the sea grass bed ecosystem in the east coast of Hainan Islands[J]. Marine Sciences, 2014, 38(8): 67-74. [吴钟解, 陈石泉, 王道儒, 等. 海南岛东海岸海草床生态系统健康评价[J]. 海洋科学, 2014, 38(8): 67-74.]
- [24] Bian X D, Wan R J, Jin X S, et al. Ichthyoplankton succession and assemblage structure in the Bohai sea during the past 30 years since the 1980s[J]. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(2): 1-15. [卞晓东, 万瑞景, 金显仕, 等. 近 30 年渤海鱼类种群早期补充群体群聚特性和结构更替[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(2): 1-15.]
- [25] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard of the People's Republic of China: The specification for marine monitoring—Part 7: Ecological survey for offshore pollution and biological monitoring, GB 17378.7-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-12. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 海洋监测规范第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测 GB 17378.7-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-12.]
- [26] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Specifications for oceanographic survey—Part 6: Marine biological survey, GB/T 12763.6-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008: 1-15. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 海洋调查规范第 6 部分: 海洋生物调查 GB/T 12763.6-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-15.]
- [27] Saaty T L. How to make a decision: The analytic hierarchy process[J]. European Journal of Operational Research, 1990, 48(1): 9-26.
- [28] Yang J Q, Cui W L, Zhang H L, et al. Marine ecosystem health structure and function index assessment in the west of Laizhou bay[J]. Marine Science Bulletin, 2003, 22(5): 58-63. [杨建强, 崔文林, 张洪亮, 等. 莱州湾西部海域海洋生态系统健康评价的结构功能指标法[J]. 海洋通报, 2003, 22(5): 58-63.]
- [29] Yang H, Yuan Z T, Liu J, et al. Primarily assessment of ecosystem health of Changjiang tunnel-bridge project in Shanghai waters[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(11): 1031-1037. [杨红, 袁政涛, 刘健, 等. 上海隧桥工程海域生态系统健康的初步评价[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(11): 1031-1037.]
- [30] Wang L F, Xu S B. Introduction to Analytic Hierarchy Process[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1990: 1-303. [王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990: 1-303.]
- [31] State Oceanic Administration. Marine Industry Standard of the People's Republic of China: The guidance for the assessment of coastal marine ecosystem health, HY/T 087-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 1-12. [国家海洋局.

- 中华人民共和国海洋行业标准: 近岸海洋生态健康评价指南 HY/T 087-2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 1-12.]
- [32] Li H, Song X X, Yu Z M, et al. An integrative assessment of marine ecosystem health in coastal waters along the Shandong Peninsula[J]. Marine Sciences, 2014, 38(10): 40-45. [李虎, 宋秀贤, 俞志明, 等. 山东半岛近岸海域生态系统健康综合评价[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 40-45.]
- [33] National Environmental Protection Agency, State Oceanic Administration. National Standard of the People's Republic of China: Sea water quality standard, GB 3097-1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1998: 1-20. [国家环境保护局, 国家海洋局. 中华人民共和国国家标准: 海水水质标准 GB 3097-1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 1-20.]
- [34] Chen D G. Fishery Resources Biology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 3-184. [陈大刚. 渔业资源生物学[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 3-184.]
- [35] Han Q P, Grüss A, Shan X J, et al. Understanding patterns of distribution shifts and range expansion/contraction for small yellow croaker (*Larimichthys polyactis*) in the Yellow Sea[J]. Fisheries Oceanography, 2021, 30(1): 69-84.
- [36] Schnute J T, Boers N, Haigh R, et al. PBSmapping: Mapping fisheries data and spatial analysis tools[CP/OL]. (2021-01-13). <https://cran.r-project.org/package=PBSmapping>.
- [37] 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.]
- [38] Sun S. Challenges in the jellyfish bloom research[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(3): 257-261. [孙松. 水母暴发研究所面临的挑战[J]. 地球科学进展, 2012, 27(3): 257-261.]
- [39] Sun P F. Preliminary analysis of fishery resource structure and health assessment of fishery ecosystem in the Laizhou Bay and Yellow River estuary[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014: 5-100. [孙鹏飞. 莱州湾及黄口水域渔业资源结构特征与渔业生态系统健康评价的初步分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014: 5-100.]
- [40] Sun J T, Xu W Y. Health evaluation of marine fisheries ecosystem in Shandong[J]. Ecological Economy, 2020, 36(6): 73-76, 101. [孙吉亭, 徐文玉. 山东省海洋渔业生态系统健康性评价[J]. 生态经济, 2020, 36(6): 73-76, 101.]

Health assessment system of the spawning ground in Shandong inshore waters

HAN Qingpeng^{1,3}, SHAN Xiujuan^{1,2,4}, CHEN Yunlong^{1,2,4}, JIN Xianshi^{1,2,4}, LIU Kai^{1,4}, HU Bei'er¹, CUI Peidong¹

1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;
2. Function Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China;
3. College of Fisheries, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;
4. National Field Observation and Research Center for Changdao Marine Ecosystem, Changdao 265800, China

Abstract: Spawning grounds play a key role in recruiting fishery resources, and their health status directly contributes to the biomass dynamics and sustainability of fishery resources. In the present study, using spawning grounds in Shandong inshore waters as an example, based on the comprehensive analysis of various marine ecosystem health assessment studies, a health assessment system of the spawning ground was established by the analytic hierarchy process, and the evaluation results of the system were verified. Two first-level indicators were considered in the health assessment system, the environment and function of the spawning ground. Six second-level indicators were covered, namely, biotic environment, hydrological environment; human disturbance; fish eggs, larvae, and juveniles; spawning stock size; and spawning ground area. There were 21 third-level indicators. The health status of the spawning ground was characterized by a comprehensive health indicator (CHI), with the health status of the spawning grounds in Shandong inshore waters during the 1980s regarded as the baseline. The results of the health assessment system of the spawning ground conducted in this study were verified using the spawning ground health status in the Shandong inshore in May 2008 as an example. The average CHI was 0.571 in the spawning grounds in Shandong inshore waters during May 2008. In general, the spawning ground had a sub-health status. The CHI of the northern Shandong Peninsula, northern Haizhou Bay, southern Shandong Peninsula, and Laizhou Bay were 0.596, 0.593, 0.590, and 0.505, respectively. The accuracy of the evaluation system was proven by a comprehensive analysis of the results of related studies.

Key words: Shandong inshore waters; spawning ground; health assessment; analytic hierarchy process

Corresponding author: SHAN Xiujuan. E-mail: shanxj@ysfri.ac.cn