

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第 32 卷 第 19 期 Vol.32 No.19 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 19 期

2012 年 10 月 (半月刊)

目 次

中国野生东北虎数量监测方法有效性评估	张常智, 张明海, 姜广顺 (5943)
城市居民食物氮消费变化及其环境负荷——以厦门市为例	于 洋, 崔胜辉, 赵胜男, 等 (5953)
珠江口水域夏季小型底栖生物群落结构	袁俏君, 苗素英, 李恒翔, 等 (5962)
2010 年夏季雷州半岛海岸带浮游植物群落结构特征及其与主要环境因子的关系	 (5972)
阿根廷滑柔鱼两个群体间耳石和角质颞的形态差异	龚玉艳, 张才学, 孙省利, 等 (5972)
黄河三角洲滨海草甸与土壤因子的关系	方 舟, 陈新军, 陆化杰, 等 (5986)
盘锦湿地净初级生产力时空分布特征	谭向峰, 杜 宁, 葛秀丽, 等 (5998)
菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用	王莉雯, 卫亚星 (6006)
花生植株和土壤水浸液自毒作用研究及土壤中自毒物质检测	张 亮, 黄建国, 韩玉竹, 等 (6016)
遮荫对金莲花光合特性和叶片解剖特征的影响	黄玉茜, 韩立思, 杨劲峰, 等 (6023)
火干扰对小兴安岭草丛、灌丛沼泽温室气体短期排放的影响	吕晋慧, 王 玄, 冯雁梦, 等 (6033)
古尔班通古特沙漠南部植物多样性及群落分类	顾 韩, 牟长城, 张博文, 等 (6044)
黄土高原樟子松和落叶松与其他树种枯落叶混合分解对土壤的影响	张 荣, 刘 彤 (6056)
长期集约种植对雷竹林土壤氨氧化古菌群落的影响	李 茜, 刘增文, 米彩红 (6067)
H ₂ O ₂ 参与 AM 真菌与烟草共生过程	秦 华, 刘卜榕, 徐秋芳, 等 (6076)
北京山区防护林优势树种分布与环境的的关系	刘洪庆, 车永梅, 赵方贵, 等 (6085)
旱直播条件下强弱化感潜力水稻根际微生物的群落结构	邵方丽, 余新晓, 郑江坤, 等 (6092)
不同森林类型根系分布与土壤性质的关系	熊 君, 林辉锋, 李振方, 等 (6100)
臭氧胁迫下硅对大豆抗氧化系统、生物量及产量的影响	黄 林, 王 峰, 周立江, 等 (6110)
垃圾填埋场渗滤液灌溉对土壤理化特征和草本花卉生长的影响	战丽杰, 郭立月, 宁堂原, 等 (6120)
稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响	王树芹, 赖 娟, 赵秀兰 (6128)
不同施氮措施对旱作玉米地土壤酶活性及 CO ₂ 排放量的影响	郑建初, 张岳芳, 陈留根, 等 (6138)
北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例	张俊丽, 高明博, 温晚霞, 等 (6147)
.....	孙特生, 李 波, 张新时 (6155)
辽宁省能源消费和碳排放与经济增长的关系	康文星, 姚利辉, 何介南, 等 (6168)
基于 FARSITE 模型的丰林自然保护区潜在林火行为空间分布特征	吴志伟, 贺红士, 梁 宇, 等 (6176)
不同后作生境对玉米地天敌的冬季保育作用	田耀加, 梁广文, 曾 玲, 等 (6187)
云南紫胶虫种群数量对地表蚂蚁多样性的影响	卢志兴, 陈又清, 李 巧, 等 (6195)
阿波罗绢蝶种群数量和垂直分布变化及其对气候变暖的响应	于 非, 王 吟, 王绍坤, 等 (6203)
专论与综述	
海水养殖生态系统健康综合评价: 方法与模式	蒲新明, 傅明珠, 王宗灵, 等 (6210)
海草场生态系统及其修复研究进展	潘金华, 江 鑫, 赛 珊, 等 (6223)
水华蓝藻对鱼类的营养毒理学效应	董桂芳, 解绶启, 朱晓鸣, 等 (6233)
环境胁迫对海草非结构性碳水化合物储存和转移的影响	江志坚, 黄小平, 张景平 (6242)
生态免疫学研究进展	徐德立, 王德华 (6251)
研究简报	
喀斯特峰丛洼地不同森林表层土壤有机质的空间变异及成因	宋 敏, 彭晚霞, 邹冬生, 等 (6259)
准噶尔盆地东南缘梭梭种子雨特征	吕朝燕, 张希明, 刘国军, 等 (6270)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 336 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2012-10



封面图说: 岸边的小白鹭——鹭科白鹭属共有 13 种, 其中有大白鹭、中白鹭、白鹭 (小白鹭)、黄嘴白鹭等, 体羽皆是全白, 世通称白鹭。夏季的白鹭成鸟繁殖时枕部着生两条狭长而软的矛状羽, 状若双辫, 肩和胸着生蓑羽, 冬季时蓑羽常全部脱落, 白鹭虹膜黄色, 嘴黑色, 脚部黑色, 趾呈黄绿色。小白鹭常常栖息于稻田、沼泽、池塘水边, 以及海岸浅滩的红树林里。白天觅食, 好食小鱼、蛙、虾及昆虫等。繁殖期 3—7 月。繁殖时成群, 常和其他鹭类在一起, 雌雄均参加营巢, 次年常到旧巢处重新修葺使用。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201106270959

蒲新明,傅明珠,王宗灵,张新军. 海水养殖生态系统健康综合评价:方法与模式. 生态学报, 2012, 32(19): 6210-6222.

Pu X M, Fu M Z, Wang Z L, Zhang X J. Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(19): 6210-6222.

海水养殖生态系统健康综合评价:方法与模式

蒲新明^{1,2}, 傅明珠^{1,2,*}, 王宗灵^{1,2}, 张新军³

(1. 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061; 2. 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室, 青岛 266061;

3. 山东省荣成市海洋与渔业局, 荣成 264300)

摘要:我国海水养殖业快速、大规模发展的同时给生态系统带来巨大的压力,养殖自身的健康和持续发展也受到影响。为了评估海水养殖生态系统所承受的环境压力、系统的状态和发展趋势,以海湾养殖生态系统为典型,根据系统性、动态性、生态-社会-经济相结合的原则,构建了基于指标体系和层次分析法的海水养殖生态系统健康综合评价的方法与模式,以期对养殖海域生态系统健康评估和适应性管理提供科学工具。

关键词:海水养殖;生态系统健康评价;层次分析法;指标体系

Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method

PU Xinming^{1,2}, FU Mingzhu^{1,2,*}, WANG Zongling^{1,2}, ZHANG Xinjun³

1 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

2 Key Laboratory of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

3 Rongcheng Fishery and Ocean Bureau, Rongcheng 264300, China

Abstract: Since the notion of ‘health’ was introduced to the field of ecosystem assessment in the late 1980s, ecosystem health has become a source of concern for scientists, environment managers and the public, and protecting this health is the new goal of ecosystem management. Ecosystem health is generally accepted in terms of ‘system organization, resilience and vigor, as well as the absence of signs of ecosystem distresses’, which also includes the presence of essential functions and key attributes that sustain the life of the system. A healthy ecosystem is defined as being ‘stable and sustainable’, maintaining its organization and autonomy over time; and resilient to stress. Due to the complexity and diversity of ecosystems, various conceptual frameworks, methods and indicators have been put forth for assessing ecosystem status and environmental quality. Although more and more attention has been given to marine ecosystems of late, assessment studies of these systems are still in their infancy.

The rapid development of extensive mariculture in China is placing pressures on marine ecosystems, which in turn affects the health and sustainability of mariculture development. The mariculture ecosystem is a special and complex system, which is under intense pressure by human activities. The main features of this ecosystem are simple biological community structures, dysfunctional material and energy recycling, and an easily degradable system. The ecological problems in mariculture ecosystems include the deterioration of water and sediment environment, increased eutrophication, damage of natural biological communities, and decreased biodiversity. The degraded habitats will subsequently impact the

基金项目:我国近海海洋综合调查与评价专项课题(908-02-04-07),海洋公益性行业科研专项经费项目(200805069)

收稿日期:2011-06-27; **修订日期:**2012-06-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fumingzhu@fio.org.cn

development of mariculture by causing decreased seafood quality and frequent occurrence of diseases.

In China, health assessments of various natural coastal ecosystems have been attempted in recent years, such as the Yangtze River Estuary, Yellow River Estuary, Jiaozhou Bay and some coastal wetland ecosystems. However, there still remains no published study focusing on the health of mariculture ecosystems. To assess the pressure, state and responses of the ecosystems that support aquaculture, an integrated framework and method was developed in the present paper for assessing the health of mariculture ecosystems represented by those in embayments.

The framework and method was developed through an analytic hierarchical process and included 25 indicators. The assessment approach followed the Pressure-State-Response (PSR) processes. The Pressure layer included two components: external pollution pressure (influx of nutrients, oil and heavy metals into the mariculture system) and aquaculture pressure (aquaculture density/scale, degree of self-pollution and cultured species diversity). The State layer included four components: hydrological condition (water exchange capacity), water quality (concentrations of nutrients, oil and heavy metals, dissolved oxygen level/COD, water transparency/SPM), sediment quality (content of organic carbon/nitrogen/phosphorus, concentration of oil and heavy metals, ORP) and biological community quality (biodiversity index of phytoplankton, zooplankton and benthos, abundance of microbe/fecal coliforms, and integrity of significant habitats). The Response layer included four components: HABs occurrence, aquaculture diseases, aquaculture product quality, invasion of alien species. This is the first attempt to establish an evaluation method concerned exclusively with marine aquaculture ecosystems in China. This method is expected to be a tool for ecosystem health assessment and adaptive marine management in mariculture domains.

Key Words: mariculture; ecosystem health assessment; analytic hierarchical process (AHP); index system

我国海水养殖业的发展速度快、规模大,但发展的同时也给海水养殖生态系统带来巨大的压力,并引起一系列的生态环境问题^[1-4]。这些问题包括养殖环境中的水体和沉积物环境质量恶化、富营养化程度加剧、自然生物群落结构被破坏、海洋生物多样性降低等。生态环境的退化又反作用于海水养殖业,造成养殖产品的产量和质量降低、病害情况加剧等^[5-6],严重威胁海水养殖业的健康可持续发展。为了准确认识海水养殖生态系统所承受的环境压力、系统的状态和面临的问题,以对养殖海域进行适应性的有效管理,需要对海水养殖生态系统健康进行科学和综合评价。

海水养殖生态系统作为海洋生态系统的一个特殊类型,是人类为了获取更大生态服务功能而干预下产生的自然-社会-经济复合生态系统,具有生物结构简单、物质能量循环受阻、自我调控能力差、受人类活动干扰强烈等特点,这决定了该生态系统的结构和功能更易退化。然而,目前我国对海洋生态系统健康评价研究还处于初始阶段,研究区域主要为长江口^[7]、黄河口^[8]、浙江近海^[9]、胶州湾^[10]以及部分滨海湿地生态系统^[11-12]等自然生态系统,对海水养殖生态系统健康状况的综合评价方法目前还未见有报道。

本文将以建立系统的、定量性的和具有较强可操作性的海湾型海水养殖生态系统的评价理论和方法为目标,探讨能够比较全面准确反映海水养殖生态系统存在问题与现状的评价理论与方法。这对于认识海水养殖所面临的环境和生态问题,提出科学合理的修复方案和管理对策,将具有重要的指导意义。

1 生态系统健康的概念与评价方法概述

生态系统健康的概念目前已经得到公众、学者和管理者的广泛关注,并成为生态系统管理的重要依据。虽然生态系统健康目前尚没有统一和明确的概念,但它所包涵的意义已被逐渐认识:(1)生态系统的健康就是指某个生态系统结构稳定、功能健全,对外界环境压力具有抵抗力和恢复力,不发生生态灾害;(2)生态系统健康不是仅指生态系统的自然状态,还取决于人的价值观^[13];(3)需要用整体性和系统性的观点看待生态系统的现状和问题,才能准确认识生态系统的健康。生态系统健康的概念提法很多,目前一般认为,如果一个生态系统是稳定、持续和活跃的,能够维持其组织结构,受到干扰后能够在一段时间内自动恢复过来,则这个

生态系统是健康的^[14-15]。

目前,生态系统健康评价方法主要有 8 种,适用于海洋生态系统的有 4 种,分别为指示物种法、营养级分析法、生态过程速率法和指标体系法^[16],但最常用的为指示物种法和指标体系法^[17-18]。前者主要依据生态系统的关键物种、特有物种等的数量、生产力、多样性及一些生理生态指标描述生态系统的健康状况;后者则充分考虑了生态系统的复杂性,将多种指标与信息集成在一起,全面地反映生态系统的健康状况^[19]。由于指示物种法具有筛选标准不明确、难以选择合适的生物类群等缺点,近年来指标体系法在海洋生态系统健康评价中得到了更为广泛的应用,例如缅甸湾^[20]、Chesapeake 湾^[21]、芬迪湾^[22]、香港的 Tolo 港^[23]、长江口^[7]、黄河口^[8]以及浙江近海^[9]等采用不同的指标体系进行了环境质量与生态系统的评价。

不同的海洋生态系统具有独特的生物群落结构和生态系统功能,因此建立广泛应用的评价指标体系是十分困难的,需要对不同的生态系统制定具有针对性的评价方法。海水养殖生态系统的演变与退化包括一般生态系统演变的几个环节,即:在养殖活动和污染等环境压力下,反映生态系统的结构和功能现状的状态指标发生了变化,并进一步导致了一系列的环境与生态问题。因此本文以压力-状态-响应这 3 个步步承接又相对独立的层次为主线,采用指标体系法和层次分析法建立了海水养殖生态系统综合评价方法,以阐明生态系统健康存在的问题、引发的原因和导致的后果等。

2 海水养殖生态系统健康评价目标与原则

海洋生态系统健康评价的目的不仅在于能给出一个生态系统健康的分数或级别,更在于在海洋生态系统调查和研究与海洋的管理方案、保护措施以及民众知情之间建立一个沟通的桥梁,把晦涩难懂的科学语言和符号经过分析、提炼、综合,以容易理解的方式向管理者或公众解释目标海域生态系统的基本特点、面临的主要环境压力和存在的主要环境问题,以指导有关该海域的开发、利用、保护等各种行为。

生态系统本身的模糊性、波动性等特点决定了不可能对其健康程度给出非常精确的数量化描述;但为了体现生态系统的历史演化趋势和不同生态系统间的差别,应该给出生态系统健康的可量化指标。为了协调这二者之间的矛盾,以等级划分这种半定量的方式对生态系统进行健康评价是适宜的。

海水养殖生态系统健康评价的主体是海水养殖生态系统,因此需要从生态系统的整体性、稳定性和可持续性出发,全面综合地反映生态系统的健康状况和存在问题,为优化管理方案提供依据,以实现海水养殖产业的健康持续发展。海水养殖生态系统评价应遵循以下原则:

(1) 系统性原则 评价应系统反映海水养殖生态系统的结构、功能、主要胁迫因子等多个方面,防止以少数几个指标以偏概全。

(2) 动态性原则 动态性原则包括两个含义,一是海水养殖生态系统健康程度是随着各种自然和人为活动的变化而动态变化的;另一含义是不同评价指标的权重在不同生态系统之间是变化的。

(3) 模块化原则 直接评价养殖生态系统由于设计参数多难以入手,仅一个综合评价指标也难以全面反映生态系统的现状和问题。因此有必要采取模块化的评价方法,将养殖压力、污染压力、生态系统结构、生态系统功能等分别评价,最后通过系统的原理与方法将它们结合起来,得到综合全面的评价结果。

(4) 生态、经济和社会相结合的原则 海水养殖生态系统除了其自然属性,还具有显著的社会和经济属性,其主要经济和社会功能是提供高产优质的海产品,要在评价过程中予以综合考虑。

3 评价模块和指标体系

3.1 评价模块与指标体系

本文以压力-状态-响应(P-S-R)为主线,基于指标体系法和层次分析法,对海水养殖生态系统分为 3 个层次 10 个模块并筛选了 25 类指标对其健康状况进行评价,评价框架图详见图 1。

3.2 评价指标权重

采用专家咨询法来确定各指标的初始权重。通过问卷调查,咨询了有关研究领域的专家 50 余人次,得到有效问卷 24 份。以生态系统健康的总评价指标为 100 分计,各评价指标的权重值见表 1,括号内的数值为某

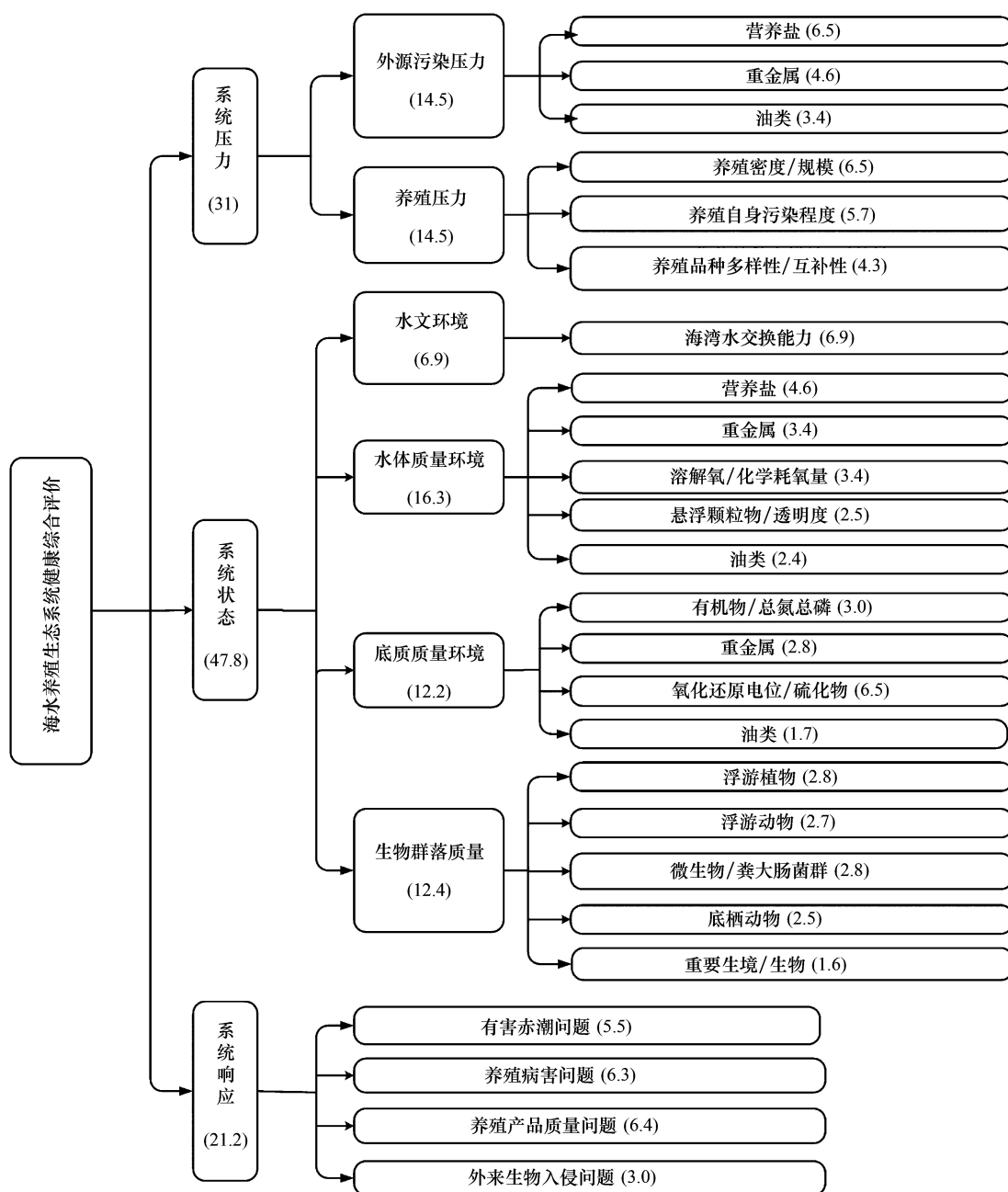


图1 海水养殖生态系统健康综合评价层次结构图(括号内数字为初始权重)

Fig. 1 The hierarchical structure of the integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health (number in brackets are initial weights of indicators)

一指标或模块在其上一级层次中所占的归一化权重。

通过专家咨询法得到的权重是主观权重,反映了各评价指标在一般情况下重要程度的差异。但在实际的评价过程中,往往不同的养殖生态系统由于本身自然环境以及养殖活动的特殊性,所产生的生态问题的性质和程度也会有所不同。所以对于某一给定的养殖生态系统,各个指标在生态系统健康评价中的权重应该是具有特殊性。因此有必要采取动态权重的方法,既反映一般海水养殖生态系统的共性,又反映不同养殖生态系统的具体情况,以得到更合理的评价结果。

确定动态权重的原则一般是指标的差异程度。一般认为差异程度越大的指标越重要,因为从统计学的角度看,偏差大的指标更能反映各系统之间的差异。但很多时候指标的差异程度与其重要性并不一致。对海水

养殖生态系统来说,超标程度较大或评价得分较低的指标对生态系统的影响程度较明显,应该给予更大关注或赋以更大权重,所以指标权重应该与指标的评价得分具有负相关关系。

综合考虑专家的主观权重和指标值的客观权重,某一指标的动态权重可以计算为:

$$D_{ij} = W_{ij}/P_{ij}$$

(1)

式中, D_{ij} 为 i 模块中 j 指标的动态权重; W_{ij} 为 i 模块中 j 指标的专家权重; P_{ij} 为 i 模块中 j 指标的评价得分。

4 评价标准与方法

海水养殖生态系统的评价标准,主要参考了我国现行的《海水水质标准》、《渔业水质标准》、《海洋沉积物质量标准》、《海洋生物质量标准》、《海水增殖养殖区监测技术规程》、《海洋调查规范:海洋生态调查指南》、《近岸海洋生态健康评价指南》等的相关标准与方法^[25-31]。对于标准中不包含的指标,则根据文献报道中关于海洋养殖区以及自然海区相关参数的历史研究结果来设定评价标准,具体评价标准分别见表 1—表 3。

4.1 压力层次

4.1.1 外源污染压力模块

对于养殖海区的外源污染压力采用污染压力指数法进行评价(参考海洋调查规范第 9 部分:海洋生态调查指南^[29],并进行了适当修改):某一污染物的污染压力指数等于该污染物每年入海通量除以评价海区中该污染物总量。

$$P_i = F_i/(C_i \times V_i)$$

(2)

式中, P_i 为 i 污染物的污染压力指数; F_i 为 i 污染物每年进入评价海区的通量,单位为 kg; C_i 为 i 污染物在评价海区中的平均浓度,单位为 kg/m³; V_i 为评价海区的水体体积,单位为 m³。

外源污染物中主要考虑营养盐、重金属和石油类。对于营养盐污染物主要考虑氮和磷,在评价中氮的优先顺序为总氮(TN)、总无机氮(TIN)、氨氮(NH₄-N)和硝态氮(NO₃-N),磷的优先顺序为总磷(TP)、活性磷酸盐(PO₄-P)。营养盐的外源污染压力,选择氮和磷中压力较大的。重金属的污染压力分别计算 Hg、Cd、As、Pb、Cu 等几种我国近海主要金属污染物的污染压力,并取其中的最大值。评价标准见表 1。

表 1 压力层次各指标评价得分标准
Table 1 Assessment criteria of indicators in ecosystem pressures

模块 Module	指标 Indicator	评分标准 Assessment criteria				
外源污染压力 External pollution pressure	外源污染压力	>10	5—10	2—5	0.5—2	<0.5
养殖压力 Aquaculture pressure	养殖面积所占比例/%	80—100	60—80	40—60	20—40	<20
	自身污染压力	>10	5—10	2—5	0.5—2	<0.5
	养殖品种多样性/互补性	只养殖一个品种或同一生态位的几个品种	主要养殖品种占有不同生态位,但在生态关系搭配上没有合理比例	主要养殖品种在生态位上具有一定的互补关系	养殖品种较多;不同养殖品种之间在空间和季节上的搭配比较合理	实现了科学合理的养殖密度和多品种的混养、轮养,能够在不同营养级之间、不同区域和不同季节充分利用自然资源的同时,将对环境和生态系统的压力降低到最小化
得分		1	2	3	4	5

4.1.2 养殖压力模块

(1) 养殖密度/规模 采用养殖面积占海湾面积的比例进行计算,见表 1。

(2) 养殖自身污染压力

对于养殖自身污染压力也采用污染压力指数法进行评价:某一污染物的污染压力指数等于该污染物通过养殖生物的入海通量除以评价海区中该污染物总量。养殖污染考虑的污染物是氨氮和磷酸盐。如果养殖活动增加了沉积物向水体释放营养盐的速率,应把增加的释放通量计算在内。

$$F_i = \sum_{j=1}^n Q_j \times E_{ij}$$
 (3)

式中, Q_j 为评价海区中 j 养殖生物每年的养殖产量,单位为 kg; E_{ij} 为在一个养殖周期中 j 养殖生物向水体中输出的 i 污染物的量,单位为 kg/kg。污染压力指数 P_i 的计算方法与评价标准同 4.1.1 外源污染压力部分。

(3) 养殖品种多样性/互补性

采用专家评判法。通过对了解目标海水养殖生态系统的专家、养殖户或管理人员进行问卷调查得到评价得分。

4.2 状态层次

4.2.1 水文环境模块

海水养殖生态系统的水文环境模块评价主要考虑海湾的水交换能力,可采用海水的半交换周期进行评价。这里的半交换周期是指物质浓度降低为原始浓度一半时所经历的时间长度。评价标准通过参考与对比我国近海不同海湾海水半交换周期的数值模拟研究结果进行确定^[32-41]。

表 2 状态层次各指标评价得分标准
Table 2 Assessment criteria of indicators in ecosystem state

模块 Module	指标 Indicator	评价标准 Assessment criteria				
水文环境 Hydrological environment	半交换周期 Half-life time/d	>60	40—60	20—40	10—20	<10
	富营养化指数 Eutrophication index (EI)	>15	5—15	2—5	1—2	<1
水体环境质量 Water quality	重金属潜在风险指数 Potential ecological risk index for heavy mental (RI)	>200	100—200	60—100	30—60	<30
	溶解氧(奈墨罗指数) DO(Nemerow index)	>2	1.5—2	1—1.5	0.5—1	<0.5
	悬浮物浓度 suspended substance concentration/(mg/L)	>100	50—100	10—50	5—10	<5
	油类/(mg/L)	>0.5	0.1—0.5	0.05—0.1	0.02—0.05	<0.02
	有机碳含量 Organic carbon content/%	>4	2—4	1—2	0.5—1	<0.5
底质环境质量 Sediment quality	重金属潜在风险指数 Potential ecological risk index for heavy mental (RI)	>200	100—200	60—100	30—60	<30
	氧化还原电位 Oxidation-Reduction Potential/mv	<-100	-100—0	0—100	100—200	>200
	硫化物含量 Sulphite content(10 ⁻⁶)	>600	400—600	200—400	100—200	<100
	油类 Oil(10 ⁻⁶)	>1000	500—1000	200—500	100—200	<100
	生物多样性 biodiversity (H')	<1	1—1.5	1.5—2	2—3	>3
生物群落质量 Biological community quality	水体粪大肠菌群 Fecal coliforms density in water/(ind/L)	>2000	1000—2000	500—1000	100—500	<100
	底质粪大肠菌群 Fecal coliforms density in sediment/(ind/g wt)	>100	60—100	40—60	20—40	<20
	养殖对海区生境和野生生物的影响 Impacts of aquaculture on the wildlife and their habitats	原生境受到极大破坏或完全丧失	原生境显著改变;面积显著减少或功能显著降低	占有了部分原重要生境或对相邻重要生境造成破坏性影响	养殖活动占用了少量重要生境	养殖活动对重要生境没有破坏
得分 Score		1	2	3	4	5

4.2.2 水体环境质量模块

水体环境质量模块包括营养盐、重金属、溶氧/化学耗氧量、悬浮颗粒物/透明度、油类污染物 5 类评价指标。海水养殖海域水质环境评价标准,适用于中华人民共和国海水水质标准(GB3097-82)第二类海水水质标准。首先对每一类评价指标单独进行评价。

(1) 营养盐

采用邹景忠等^[42]提出的海湾富营养化评价指数和《近岸海域环境监测技术规范》:

$$EI = \text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}/4500 \quad (4)$$

式中, EI 为富营养化指数; COD 为化学耗氧量浓度, mg/L ; DIN 为无机氮浓度, $\mu\text{g/L}$; DIP 为无机磷浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

(2) 重金属

采用单项污染指数评价法和 Hakanson^[40] 提出的潜在生态风险指数法对多种重金属的污染情况进行综合评价。

$$RI = \sum_{i=1}^m T_i \frac{C_i}{S_i} \quad (5)$$

式中, RI 为多种金属潜在生态风险指数; T_i 为第 i 种重金属的毒性系数,用于反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度; C_i 为第 i 种重金属的实测浓度, S_i 为第 i 种重金属的标准浓度。毒性系数 T_i ^[41] 和标准浓度的取值见表 3,其中标准浓度 S 采用《海水水质标准》(GB3097—1997) 中的 II 类海水中的重金属标准值。多种金属潜在生态风险指数 RI 的评分标准见表 2,借鉴了 Hakanson 的划分标准,并参考蒋增杰等^[42] 的相关研究进行了适当调整。

表 3 水体重金属污染评价的毒性系数和标准浓度

Table 3 Toxic coefficients and standard concentrations for the assessment of heavy metals in water column

金属 Heavy metals	Hg	Cd	As	Pb	Cu
毒性系数 Toxic coefficient T_i	40	30	10	5	5
标准浓度 Standard concentration $S/(mg/L)$	0.0002	0.005	0.030	0.005	0.010

(3) 溶解氧

对溶解氧的评价指数采取蔡墨罗(N. L. Nemerow)指数公式进行计算:

$$I_i(\text{DO}) = \frac{C_{\max} - C_i}{C_{\max} - S_i} \quad (6)$$

式中, $C_{\max}$ 为监测期间(如枯水、平水、丰水期)饱和溶解氧的最大值; C_i 为底层溶氧的实测浓度, S_i 为海水溶氧的标准浓度,取值为 5.0 mg/L 。 $C_{\max}$ 采用 Weiss 提出的综合考虑温度和盐度的饱和溶解氧计算公式(Weiss 方程)进行计算:

$$\begin{aligned} \ln C &= A_1 + A_2(100/T) + A_3 \ln(T/100) + A_4 \ln(T/100) + S[B_1 + B_2(T/100) + B_3(T^2/10^4)] \\ A_1 &= -173.4292, A_2 = 249.6399, A_3 = 143.3483, A_4 = -21.8492 \\ B_1 &= -0.033093, B_2 = 0.014259, B_3 = -0.0017000 \end{aligned} \quad (7)$$

式中, C 是氧气的溶解度,单位为 mL/L ($1 \text{ mg/L} = 1.428 \text{ mL/L}$); T 是热力学温度,单位为 K ; S 为海水盐度。

(4) 悬浮颗粒物/透明度

(5) 油类污染物 采用单项污染指数评价法,评价标准参考《海水水质标准》GB3097—1997 并进行了适当调整。

4.2.3 底质环境质量模块

底质环境质量模块包括四类评价指标,分别为 1) 有机物/总氮总磷含量;2) 氧化还原电位/硫化物含量(如果两项指标均有评价结果,则以硫化物含量的评价结果为准);3) 油类污染物和 4) 重金属。前三类指标

均采用单项污染指数评价法,评价标准的制定是在参考《海洋沉积物质量》GB18668—2002 以及不同海区特别是养殖海区沉积物相关参数实测值的基础上制定的^[43-58]。沉积物重金属评价方法同 4.2.2 水体重金属污染评价方法,只是金属背景值取值采用海洋沉积物质量标准(GB18668—2002)中的一类沉积物质量标准值(而不是工业化前沉积物中污染物背景值,在多数海湾这一背景值难以获得)。

4.2.4 生物群落质量模块

(1) 浮游植物、浮游动物和底栖动物

浮游植物、浮游动物和底栖动物是海洋生态系统中最重要几个生物类群。生物多样性是其群落质量的最佳评价指标,指示生物多样性变化最常用的是 Shannon-Weaver 指数,其计算公式如下:

$$H' = - \sum_{i=1}^s \left(\frac{n_i}{N} \right) \log_2 \left(\frac{n_i}{N} \right)$$
 (8)

式中, S 为样品中的种类总数; N 为样品中的总个体数; n_i 为样品中第 i 种的个体数。

评价标准的确定参考陈清潮提出的生物多样性阈值评价标准^[3]以及《海水增养殖区监测技术规程》^[30]中底栖生物多样性的评价标准,并进行了适当的调整,见表 2。

(2) 微生物

对微生物的评价采用单项指数法,对水体和底质中的粪大肠菌群分别进行评价,评价结果选择评价得分较低者,见表 2。

(3) 养殖对海区生境和野生生物的影响

采用专家评判法。通过对了解目标海水养殖生态系统的专家、养殖户或管理人员进行问卷调查得到评价得分,见表 2。

4.3 响应层次

对于海水养殖生态系统的生态问题和响应采用专家评判法。通过对了解目标海水养殖生态系统的专家、养殖户或管理人员进行问卷调查得到评价得分。

表 4 响应层次各指标评价得分标准
Table 4 Assessment criteria for the indicators in ecosystem response

指标 Indicators	评分标准 Assessment criteria				
有害赤潮问题 HABs	在较大区域频繁发生,或藻毒素经常超标,出现中毒事件。	局部海区频繁发生,或有藻毒素超标现象	时有发生,在局部对养殖生物造成影响	偶尔小规模发生、未有明显危害。	没有有影响的赤潮纪录
养殖病害问题 Aquaculture diseases	出现大规模养殖病害事件,给养殖活动造成巨大损失。	养殖病害在局部海区时常发生,造成明显经济损失。	局部海区出现养殖病害,造成一定程度减产	个别养殖品种出现病害,未造成严重后果。	没有发生养殖病害。
养殖产品质量问题 Quality of aquaculture products	养殖产品中金属、药残、毒素等某项指标超标不可食用,或出现中毒事件。	养殖产品中金属、药残、毒素等含量升高,不符合出口更严格的质量标准,尚未造成中毒事件。	养殖产品中金属、药残、毒素等某项指标偶有超标,但经过处理后不影响食用。	养殖产品中金属、药残、毒素等指标达到标准,但营养价值和口味有所下降。	养殖产品品质好,各项污染物均不超标。
外来生物入侵问题 Invasion of alien species	外来生物漫延性增长,失去控制,显著改变原生态系统结构与功能,损害养殖活动。	外来生物在在自然界中已形成局部种群,改变了局部海区原生物群落结构。	外来生物在在自然界中已形成局部种群,但未对原生物群落造成很大影响。	出现少量外来生物,但外来生物完全可控。	无外来生物入侵事件。
得分 Score	1	2	3	4	5

5 综合评价模式

5.1 对各模块和层次的评价结果计算

对于某一个评价因子,其评价依据主要来自调查资料。但由于调查数据在生态系统中的空间和时间跨度

是有限的,很难全面反映生态系统的特征。一些短期的生态现象,如赤潮问题,由于其时间跨度一般只有数天到数周,在很多以季度为周期的调查中可能完全体现不出来。因此为了保证评价结果的真实和科学性,应深入调查目标海域的管理者和用海民众,以了解其生态系统的真正问题所在。尤其在生态问题/响应层次,应主要根据当地调访的结果。

对某一项指标进行评价,应对各个站位的调查数据分别计算其评价得分后,取平均值,在无法获得详细的调查数据时也可用平均数据进行评价。对一项指标中包含数项评价因子,如外源污染压力中包括多项污染物,应取因子中的最低评价得分作为指标的得分。在一个评价模块中包括数项指标的,则根据指标的评价得分和权重因子计算其模块的评价得分:

$$P_i = (\sum_{j=1}^m P_{ij} \times D_{ij}) / \sum_{j=1}^m D_{ij} \quad (9)$$

式中, P_i 是第 i 项评价模块的评价得分; m 是该模块中评价指标的数量; P_{ij} 是第 j 项指标的评价得分; D_{ij} 是第 j 项指标的动态权重; D_i 是第 i 项评价模块的评价权重,等于 m 项评价指标的权重之和。

在一个评价层次(压力、状态和响应层次分别计算)中包括数项模块的,首先计算各模块的动态权重 D_i ,然后根据评价模块的评价得分和动态权重计算其评价结果:

$$D_i = W_i / P_i \quad (10)$$

$$P_k = (\sum_{i=1}^n P_i \times D_i) / \sum_{i=1}^n D_i \quad (11)$$

式中, P_k 是海水养殖生态系统健康的 k 层次的评价得分; P_i 是第 i 项评价模块的评价得分; W_i 是第 i 项评价模块的评价权重, D_i 是第 i 项评价模块的评价动态权重。

5.2 评价结果与级别划分

海水养殖生态系统健康评价的得分范围在 1.0—5.0 之间,5.0 表示健康程度最高,1.0 表示健康程度最低。根据具体得分将海水养殖生态系统的健康程度划分为 5 级,见表 5:

表 5 海水养殖生态系统健康程度级别划分表

Table 5 Ranking of marine aquaculture ecosystem health

评价指数 P Assessment index	压力等级 Pressure ranking	状态等级 State ranking	响应等级 Response ranking	健康等级 Health ranking	颜色表示 Indicating colors
1.0—1.8	很大	很差	很差	很差	红
1.8—2.6	较大	较差	较差	较差	橙
2.6—3.4	中等	中等	中等	中等	黄
3.4—4.2	较小	较好	较好	较好	蓝
4.2—5.0			很好	很好	绿

根据评价结果,采用国际上通用的 5 等级法来划分养殖生态系统的健康程度,并分别用绿、蓝、黄、橙、红等色彩表示。评价结果除了要给出各评价指标、模块和层次的得分,需要配以说明文字来阐述结果。

要分为压力、状态和响应 3 个层次分别进行描述。根据结果评价生态系统的现状、受到的压力和存在的问题。海水养殖生态系统健康综合评价结果表,将表中区域的评价结果填上并标注颜色。计算评价海区的总评价得分,并给出总计评价意见,包括海水养殖生态系统在压力、状态和响应的各个方面的特点和问题;并根据生态学的原理分析这些问题产生的原因,并结合其历史变化情况预测以后的发展方向。最后根据评级结果和评价中发现的问题,提出改善海水养殖生态系统的建议,为制定科学有效的管理方案提供依据,最终实现海水养殖产业的健康持续发展。

致谢:国家海洋局第二海洋研究所、山东省海水养殖研究所、宁波大学、国家海洋环境监测中心、中国海洋大学、中国科学院海洋研究所、国家海洋局第一海洋研究所等多名专家对本文的评价方法给出了宝贵意见并参与了专家评分,特此致谢。

References:

- [1] Mao Y Z. Effects of Bivalve Raft Culture on Environment and Their Ecological Regulation in Sanggou Bay, China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [2] Gan J L, Lin Q, Jia X P, Huang H H, Cai W G. Characteristic polluted of organic matter in surfacial sediment in the cage culture area of Dapengao Bay. *Marine Environmental Science*, 2006, 35(3): 5-8.
- [3] Zhang J H. Effect of Filter Feeding Shellfish Mariculture on the Ecosystem and the Evaluation of Ecology Carrying Capacity [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [4] Zhang L X, Zhao M, Fu X Q, Cai Y H. The variation trend of seawater environment of Xiangshan Harbor and study of their R/S forecasting in recent 22 years. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010, (1): 115-120.
- [5] Fang J G, Sun H L, Kang S H, Sun Y, Zhou S L, Song Y L, Cui Y, Zhao J, Yang Q F, Li F, Zhang A J, Wang X Z, Tang T Y. Mariculture status and optimising measurements for the culture of scallop *colalis farreri* and kelp *laminaria japonica* in Sanggou Bay. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 95-102.
- [6] Zhang F S, Yang H S. Analysis of the causes of mass mortality of farming *Chlamys Farreri* in summer in coastal areas of Shandong, China. *Marine Science*, 1999, (1): 44-47.
- [7] Ye S F, Liu X, Ding D W. Ecosystem health assessment of the Changjiang River Estuary: indicator system and its primarily assessment. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(4): 128-136.
- [8] Yang J Q, Luo X X, Zhang Q Y, Zhang R. Ecosystem health diagnosis and analysis of the Yellow River Estuary and adjacent area // Ding D W, Shi H H, Zhang X L, et al, eds. *Study on the Water Quality Changes and Ecological Impacts in Coastal Areas*. Beijing: Marine Press, 2009: 267-270.
- [9] Chen Z H, Pan D L, Bai Y. Study of coastal water zone ecosystem health in Zhejiang Province based on remote sensing data and GIS. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(5): 27-34.
- [10] Wang B D, Han B. Method for integrated assessment of near-shore ecological environment quality and its application to Jiaozhou Bay. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(3): 400-404.
- [11] Zheng Y H, Wang S G, Chen G Z. Diagnostic methods and assessment indictors for mangrove wetland ecosystem health. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 111-116.
- [12] Jiang W G, Li J, Li J H, Xie Z R, Wang W J. Assessment of wetland ecosystem health in the Liaohe River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 408-414.
- [13] Ehrenfeld D. Ecosystem health and ecological theories // Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Island Press, Covelo, California, 1992: 135-143.
- [14] Rapport D J. What constitutes ecosystem health? *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132.
- [15] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Covelo, California: Island Press, 1992.
- [16] Jørgensen S E, Xu F L, Marques J C, Salas F. Application of indicators for the assessment of ecosystem health // Jørgensen S E, Costanza R, Xu F L, eds. *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*. Florida: CRC Press, 2005: 5-66.
- [17] Ma K M, Kong H M, Guan W B, Fu B J. Ecosystem health assessment: methods and directions. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [18] Wang L F, Xu S B. *Introduction to Analytic Hierarchy Process*. Beijing: China Renmin University Press, 2000.
- [19] Zhang Z H, Su W X, Xu Z J. International research advances on marine ecosystem health // Ding D W, Shi H H, Zhang X L, et al, eds. *Study on the Water Quality Changes and Ecological Impacts in Coastal Areas*. Beijing: Marine Press, 2009: 256-267.
- [20] Sherman K. Sustainability, biomass yields, and health of coastal ecosystems: an ecological perspective. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 112(3): 277-301.
- [21] Boesch D F. Measuring the health of the Chesapeake Bay: toward integration and prediction. *Environmental Research*, 2000, 82(2): 134-142.
- [22] Epstein PR, Rapport D J. Changing coastal marine environments and human health. *Ecosystem Health*, 2006, 2(3): 166-176.
- [23] Xu F L, Lam K C, Zhao Z Y, Chen Y D, Tao S. Marine coastal ecosystem health assessment: a case study of the Tolo Harbour, Hong Kong, China. *Ecological Modeling*, 2004, 173(4): 355-370.
- [24] Liu P, Zhang Y L, Yan X T, Kuang X H. The method of interactive group decision-making for AHP based on Experts' dynamic weights. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(13): 85-90.
- [25] Bureau of Environment Protection Administration of the People's Republic of China. GB3097—1997 Sea water quality standard. Beijing: Standard

- Press of China, 2002.
- [26] Bureau of Environment Protection Administration of the People's Republic of China. GB11607-91 Water quality standard for fisheries. Beijing: Standard Press of China, 2002.
- [27] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18668—2002 Marine Sediment Quality. Beijing: Standard Press of China, 2002.
- [28] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18421—2001. Marine Biological Quality. Beijing: Standard Press of China, 2002.
- [29] Specifications for oceanographic survey Part 9: Guidelines for marine ecological survey GB/T 12763. 9—2007. Beijing: Standard Press of China, 2007.
- [30] State Oceanic Administration. Technical regulations for the monitoring of marine aquaculture areas. 2002.
- [31] State Oceanic Administration. HY/T 087—2005. The guidance of the assessment of coastal marine ecosystem health. Beijing: Standard Press of China, 2005.
- [32] Dong L X, Su J L. Numerical study of water exchange in Xiangshangang Bay II. Model application and water exchange study. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(5): 465-470.
- [33] Liu H, Pang W R, Luo Z B, Shi X F. Numerical study on the tidal regime in Meizhou Bay. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2009, 28(1): 118-122.
- [34] Liu H, Wu Q S, Luo Z B, Pan W R. Model study on the tidal regime and pollutant transport in the Fuqing Bay. *Journal of Xiamen University: Natural Sciences*, 2009, 48(1): 139-143.
- [35] Liu X H. Ecosystem Dynamic Models for South Yellow Sea and An Aquaculture Bay [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [36] Lü X G, Zhao C, Xia C S, Qiao F L. Numerical study of water exchange in the Jiaozhou Bay and the tidal residual currents near the bay mouth. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(2): 20-30.
- [37] Sun Y L, Zhang Y M. A numerical model of pollutant transport and seawater exchange in Dingzi Bay. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2003, 22(1): 1-6.
- [38] Wei H, Tian T, Zhou F, Zhao L. Numerical study on the water exchange of the Bohai Sea; simulation of the half-life time by dispersion model. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 2002, 32(4): 519-525.
- [39] Zou J Z, Dong L P, Qin B P. Primary study on the eutrophication and HAB problems in Bohai Sea. *Marine Environmental Science*, 1983, 2(2): 41-55.
- [40] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [41] Hilton J, Davison W, Oehsenbein U. A mathematical model for analysis of sediment core data: implications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms. *Chemical Geology*, 1985, 48(1/4): 281-291.
- [42] Jiang Z J, Fang J G, Zhang J H, Mao Y Z, Wang W. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Sungan Bay. *Journal of Agro-Environment science*, 2008, 27(1): 301-305.
- [43] Huang X P, Guo F, Huang L M. Distribution characteristics and pollution of nitrogen and phosphorus in core sediments of marine culture area in Dapeng Cove. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29(1): 91-97.
- [44] Wang L S, Shi X Y, Zhang C S. Distribution and origins of organic carbon and organic nitrogen in ECS sediments of high-frequency HABs areas. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(2): 165-169.
- [45] Lü X X, Zou L, Liu S M, Wang F. Preservation of organic carbon and chlorophylls in the intertidal sediments of Jiaozhou Bay. *Marine Sciences*, 2008, 32(5): 40-45.
- [46] Wu P, Sun Y, Xu L M, Meng W, Jiang S X, Song J Z. Self-pollution status in shellfish mudflat culture areas of the Rushan Bay East Valley. *Marine Fisheries Research*, 2007, 28(1): 87-94.
- [47] Yuan H M, Lü X X, Li X G, Li N, Sun Y M, Zhan T R, Song J M. Geochemical characteristics of organic carbon in Bohai Sea sediments with natural grain size. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(2): 115-120.
- [48] He J H, Yu W, Yin M D. Study on the burial organic carbon in the sediments of continental Chukchi Sea. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2010, 29(2): 277-282.
- [49] Wang Q, Qu K M, Ma S S, Song Y L. Distribution and variation of AVS in the sediments of Rushan Bay. *Marine Fisheries Research*, 2008, 29(2): 102-107.
- [50] Hu L, Liu S M, Ren J L, Zhu Y Y, Zhang J. Study on distribution of acid volatile sulfide in sediments of coastal zone in East China Sea. *Marine Environmental Science*, 2009, 28(5): 482-486.
- [51] Pu X Q, Zhong S J, Liu F, Xu D R. Restriction factors to sulfide formation in estuarine sediments of Licun River of Jiaozhou Bay. *Geochimica*,

2009, 38(4): 323-333.

- [52] Wu Q Q, Ma Q M, Wang J G, Jiang Z H, Wang X L. The AVS in surface sediment of near sea area of Huanghe Estuary. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(2): 126-129.
- [53] Yin X J, Yang Q H, Wang H, Chen G Q. Study on bioavailability of acid volatile sulfide and heavy metal in sediments from the Pearl River Estuary coastal zone. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(3): 302-310.
- [54] Wang J Y, Ma D Y, Bao Y E, Liu G Y, Liu J. Evaluation on sediment quality in Yellow Sea and East China Sea. *Marine Environmental Science*, 2003, 22(4): 21-24.
- [55] Ou S M, Zheng J H, Zheng Q S, Richardson B J. Concentrations of petroleum hydrocarbons (PHCS) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surficial sediments along Xiamen harbour and Yuandang lake in China by GC-MS. *Fujian Analysis and Testing*, 2003, 12(3): 1785-1791.
- [56] Yuan Q, Jiang M, Wang Y L. Distribution character of oil in the Changjiang Estuary and adjacent waters. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(2): 17-20.
- [57] Chen K. Study on the Distributed characteristics of petroleum hydrocarbon in surface sediment in Meizhou bay. *Journal of Fujian Fisheries*, 2009, 122(3): 27-29.
- [58] Pan J M, Hu C Y, Liu X Y, Zhou H Y, Lu B. Distribution of oil content in sediment of Zhujiang Estuary and relation with estuarine environment. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(2): 23-27.

参考文献

- [1] 毛玉泽. 桑沟湾滤食性贝类养殖对环境的影响及其生态调控 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [2] 甘居利, 林钦, 贾晓平, 黄洪辉, 蔡文贵. 大鹏湾网箱养殖海域底质有机物污染特征. *海洋环境科学*, 2006, 35(3): 5-8.
- [3] 张继红. 滤食性贝类养殖活动对海域生态系统的影响及生态容量评估 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [4] 张丽旭, 赵敏, 付旭强, 蔡燕红. 近 22 年来象山港海域水环境变化趋势及 R/S 预测研究. *海洋湖沼通报*, 2010, (1): 115-120.
- [5] 方建光, 孙慧玲, 匡世煊, 孙耀, 周诗赉, 宋云利, 崔毅, 赵俊, 杨琴芳, 李锋, 张爱君, 王兴章, 汤庭耀. 桑沟湾海水养殖现状评估及优化措施. *海洋水产研究*, 1996, 17(2): 95-102.
- [6] 张福绥, 杨红生. 山东沿岸夏季栉孔扇贝大规模死亡原因分析. *海洋科学*, 1999, (1): 44-47.
- [7] 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. *海洋学报*, 2007, 29(4): 128-136.
- [8] 杨建强, 罗先香, 张秋艳, 张蕊. 黄河口近岸海域海洋生态系统健康诊断及分析 // 丁德文, 石洪华, 张学雷, 著. 近岸海域水质变化及生态环境效应研究. 北京: 海洋出版社, 2009: 267-270.
- [10] 王保栋, 韩彬. 近岸生态环境质量综合评价方法及其应用. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 400-404.
- [11] 郑耀辉, 王树功, 陈桂珠. 滨海红树林湿地生态系统健康的诊断方法和评价指标. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 111-116.
- [12] 蒋卫国, 李京, 李加洪, 谢志仁, 王文杰. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价. *生态学报*, 2005, 25(3): 408-414.
- [17] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. *生态学报*, 2001, 21(12): 2106-2116.
- [18] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论. 北京: 中国人民大学出版社, 2000.
- [19] 张朝晖, 苏蔚潇, 徐宗军. 海洋生态系统健康的国际研究进展 // 丁德文, 石洪华, 张学雷, 著. 近岸海域水质变化机理及生态环境效应研究. 北京: 海洋出版社, 2009: 256-267.
- [24] 刘鹏, 张园林, 晏湘涛, 匡兴华. 基于专家动态权重的群组 AHP 交互式决策方法. *数学的实践与认识*, 2007, 37(13): 85-90.
- [25] 国家环境保护局. GB 3097—1997 海水水质标准. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [26] 国家环境保护局. GB11607—91 渔业水质标准. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局. GB 18668—2002 海洋沉积物质量. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [28] 国家质量监督检验检疫总局. GB18421—2001 海洋生物质量. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [29] 海洋调查规范第 9 部分: 海洋生态调查指南 GB/T 12763. 9—2007. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [30] 国家海洋局. 海水增养殖区监测技术规程. 2002.
- [31] 国家海洋局. HY/T 087—2005. 近岸海洋生态健康评价指南. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [32] 董礼先, 苏纪兰. 象山港水交换数值研究 II. 模型应用和水交换研究. *海洋与湖沼*, 1999, 30(5): 465-470.
- [33] 刘浩, 潘伟然, 骆智斌, 石晓枫. 湄洲湾潮流特性的数值研究. *台湾海峡*, 2009, 28(1): 118-122.
- [34] 刘浩, 吴青松, 骆智斌, 潘伟然. 福清湾潮流场及污染物输运特性的模型研究. *厦门大学学报: 自然科学版*, 2009, 48(1): 139-143.
- [35] 刘学海. 南黄海及养殖功能海域生态动力学模型研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [36] 吕新刚, 赵昌, 夏长水, 乔方利. 胶州湾水交换及湾口潮流特征的数值研究. *海洋学报*, 2010, 32(2): 20-30.
- [37] 孙英兰, 张越美. 丁字湾物质输运及水交换能力研究. *青岛海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(1): 1-6.

- [38] 魏皓, 田恬, 周锋, 赵亮. 渤海水交换的数值研究-水质模型对半交换时间的模拟. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2002, 32(4): 519-525.
- [39] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学, 1983, 2(2): 41-55.
- [42] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 王巍. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 301-305.
- [43] 黄小平, 郭芳, 黄良民. 大鹏澳养殖区柱状沉积物中氮、磷的分布特征及污染状况研究. 热带海洋学报, 2010, 29(1): 91-97.
- [44] 王丽莎, 石晓勇, 张传松. 东海赤潮高发区沉积物中有机碳、有机氮的分布及其来源. 海洋环境科学, 2010, 29(2): 165-169.
- [45] 吕欣欣, 邹立, 刘素美, 王芳. 胶州湾潮间带沉积物有机碳和叶绿素的埋藏特征. 海洋科学, 2008, 32(5): 40-45.
- [46] 吴鹏, 孙耀, 徐林梅, 孟伟, 姜守轩, 宋建中. 乳山湾东流区滩涂贝类养殖环境中自身污染现状分析. 海洋水产研究, 2007, 28(1): 87-94.
- [47] 袁华茂, 吕晓霞, 李学刚, 李宁, 孙云明, 詹天荣, 宋金明. 自然粒度下渤海沉积物中有机碳的地球化学特征. 环境化学, 2003, 22(2): 115-120.
- [48] 何建华, 余雯, 尹明端. 楚科奇海陆架有机碳埋藏研究. 台湾海峡, 2010, 29(2): 277-282.
- [49] 王强, 曲克明, 马绍赛, 宋云利. 乳山湾沉积物中酸挥发性硫化物(AVS)的分布变化特征. 海洋水产研究, 2008, 29(2): 102-107.
- [50] 胡蕾, 刘素美, 任景玲, 朱媛媛, 张经. 东海近岸沉积物中酸可挥发性硫化物的分布研究. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 482-486.
- [51] 蒲晓强, 钟少军, 刘飞, 许德如. 胶州湾李村河口沉积物中硫化物形成的控制因素. 地球化学, 2009, 38(4): 323-333.
- [52] 武倩倩, 马启敏, 王继刚, 江志华, 王修林. 黄河口近岸海域沉积物酸可挥发性硫化物(AVS)的研究. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 126-129.
- [53] 尹希杰, 杨群慧, 王虎, 陈光谦. 珠江口海岸带沉积物中酸可挥发性硫化物与重金属生物毒性研究. 海洋环境科学, 2007, 25(3): 302-310.
- [54] 王菊英, 马德毅, 鲍永恩, 刘广远, 刘娟. 黄海和东海海域沉积物的环境质量评价. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 21-24.
- [55] 欧寿铭, 郑建华, 郑金树, Richardson B J. 色谱-质谱联机测定厦门港和员当湖表层沉积物中的石油烃和多环芳香烃的含量. 福建分析测试, 2003, 12(3): 1785-1791.
- [56] 袁骐, 蒋玫, 王云龙. 长江口及邻近水域油污分布特征. 海洋环境科学, 2005, 24(2): 17-20.
- [57] 陈凯. 湄洲湾海域表层沉积物石油类分布特征. 福建水产, 2009, 122(3): 27-29.
- [58] 潘建明, 扈传昱, 刘小涯, 周怀阳, 卢冰. 珠江河口沉积物中石油烃分布及其与河口环境的关系. 海洋环境科学, 2002, 21(2): 23-27.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 19 October, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Assessment of monitoring methods for population abundance of Amur tiger in Northeast China	5943
..... ZHANG Changzhi, ZHANG Minghai, JIANG Guangshun (5943)	
Changes of residents nitrogen consumption and its environmental loading from food in Xiamen	5953
..... YU Yang, CUI Shenghui, ZHAO Shengnan, et al (5953)	
Analysis of the meiobenthic community in the Pearl River Estuary in summer	5962
..... YUAN Qiaojun, MIAO Suying, LI Hengxiang, et al (5962)	
Community characteristics of phytoplankton in the coastal area of Leizhou Peninsula and their relationships with primary environmental factors in the summer of 2010	5972
..... GONG Yuyan, ZHANG Caixue, SUN Xingli, et al (5972)	
Morphological differences in statolith and beak between two spawning stocks for <i>Illex argentinus</i>	5986
..... FANG Zhou, CHEN Xinjun, LU Huajie, et al (5986)	
Relationships between coastal meadow distribution and soil characteristics in the Yellow River Delta	5998
..... TAN Xiangfeng, DU Ning, GE Xiuli, et al (5998)	
Variation analysis about net primary productivity of the wetland in Panjin region	6006
..... WANG Liwen, WEI Yaxing (6006)	
Mobilization of potassium from Soils by <i>rhizobium phaseoli</i>	6016
..... ZHANG Liang, HUANG Jianguo, HAN Yuzhu, et al (6016)	
Autotoxicity of aqueous extracts from plant, soil of peanut and identification of autotoxic substances in rhizospheric soil	6023
..... HUANG Yuqian, HAN Lisi, YANG Jinfeng, et al (6023)	
Effects of shading on the photosynthetic characteristics and anatomical structure of <i>Trollius chinensis</i> Bunge	6033
..... LV Jinhui, WANG Xuan, FENG Yanmeng, et al (6033)	
Short-term effects of fire disturbance on greenhouse gases emission from sedge and shrubs forested wetland in Lesser Xing'an Mountains, Northeast China	6044
..... GU Han, MU Changcheng, ZHANG Bowen, et al (6044)	
Plant species diversity and community classification in the southern Gurbantunggut Desert	6056
..... ZHANG Rong, LIU Tong (6056)	
Effects of mixing leaf litter from <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> and <i>Larix principis-rupprechtii</i> with that of other trees on soil properties in the Loess Plateau	6067
..... LI Qian, LIU Zengwen, MI Caihong (6067)	
Effects of long-term intensive management on soil ammonia oxidizing archaea community under <i>Phyllostachys praecox</i> stands	6076
..... QIN Hua, LIU Borong, XU Qiufang, et al (6076)	
Hydrogen peroxide participates symbiosis between AM fungi and tobacco plants	6085
..... LIU Hongqing, CHE Yongmei, ZHAO Fanggui, et al (6085)	
Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area	6092
..... SHAO Fangli, YU Xinxiao, ZHENG Jiangkun, et al (6092)	
Analysis of rhizosphere microbial community structure of weak and strong allelopathic rice varieties under dry paddy field	6100
..... XIONG Jun, LIN Huifeng, LI Zhenfang, et al (6100)	
Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties	6110
..... HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, et al (6110)	
Effect of silicon application on antioxidant system, biomass and yield of soybean under ozone pollution	6120
..... ZHAN Lijie, GUO Liyue, NING Tangyuan, et al (6120)	
Effect of landfill leachate irrigation on soil physiochemical properties and the growth of two herbaceous flowers	6128
..... WANG Shuqin, LAI Juan, ZHAO Xiulan (6128)	
Nitrous oxide emissions affected by tillage measures in winter wheat under a rice-wheat rotation system	6138
..... ZHENG Jianchu, ZHANG Yuefang, CHEN Liugen, et al (6138)	
Effects of different fertilizers on soil enzyme activities and CO ₂ emission in dry-land of maize	6147
..... ZHANG Junli, GAO Mingbo, WEN Xiaoxia, et al (6147)	
The response of agro-ecosystem productivity to climatic fluctuations in the farming-pastoral ecotone of northern China: a case study in Zhunger County	6155
..... SUN Tesheng, LI Bo, ZHANG Xinshi (6155)	
The relationship between energy consumption and carbon emission with economic growth in Liaoning Province	6168
..... KANG Wenxing, YAO Lihui, HE Jienan, et al (6168)	
Spatial distribution characteristics of potential fire behavior in Fenglin Nature Reserve based on FARSITE Model	6176
..... WU Zhiwei, HE Hongshi, LIANG Yu, et al (6176)	
Chill conservation of natural enemies in maize field with different post-crop habitats	6187
..... TIAN Yaojia, LIANG Guangwen, ZENG Ling, et al (6187)	
Effect of population of <i>Kerria yunnanensis</i> on diversity of ground-dwelling ant	6195
..... LU Zhixing, CHEN Youqing, LI Qiao, et al (6195)	
Response of <i>Parnassius apollo</i> population and vertical distribution to climate warming	6203
..... YU Fei, WANG Han, WANG Shaokun, et al (6203)	
Review and Monograph	
Integrated assessment of marine aquaculture ecosystem health: framework and method	6210
..... PU Xinming, FU Mingzhu, WANG Zongling, et al (6210)	
Seagrass meadow ecosystem and its restoration: a review	6223
..... PAN Jinhua, JIANG Xin, SAI Shan, et al (6223)	
Nutri-toxicological effects of cyanobacteria on fish	6233
..... DONG Guifang, XIE Shouqi, ZHU Xiaoming, et al (6233)	
Effect of environmental stress on non-structural carbohydrates reserves and transfer in seagrasses	6242
..... JIANG Zhijian, HUANG Xiaoping, ZHANG Jingping (6242)	
Advances in ecological immunology	6251
..... XU Deli, WANG Dehua (6251)	
Scientific Note	
The causes of spatial variability of surface soil organic matter in different forests in depressions between karst hills	6259
..... SONG Min, PENG Wanxia, ZOU Dongsheng, et al (6259)	
Characteristics of seed rain of <i>Haloxylon ammodendron</i> in southeastern edge of Junggar Basin	6270
..... LÜ Chaoyan, ZHANG Ximing, LIU Guojun, et al (6270)	

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 19 期 (2012 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 19 (October, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元