基于环境容许值的海水增养殖区环境质量评价方法及应用*

刘爱英　马元庆　于广磊　何健龙　程　玲　王月霞　宋秀凯①

(山东省海洋资源与环境研究院　山东省海洋生态修复重点实验室　烟台　264006)

摘要　为解决现有海水增养殖区水环境评价方法中不能将营养盐匮乏、养殖状况恶劣等极端状况区分，导致评价结论与养殖实际环境不符的问题，本方法引入了环境容许值概念，将海水指标划分为污染型、区间型及洁净型三种类型，分别确定不同指标的评价标准、最小和最大容许值，将监测数据归一化无量纲处理后，以最劣的单因子质量指数作为该养殖区综合质量指数判定标准，据此将评价区域环境质量划分为优秀、良好、一般及较差四个等级。本文利用建立的海水增养殖区水环境质量综合评价指标和评价模型对山东省 8 个海水增养殖区进行了实例验证，结果表明：将 DIN 及 PO_4 作为区间型指标，而非传统意义上的污染指标，能够识别出海区的首要环境问题，解决了由于单一营养盐参数评价为引起海区富营养化而掩盖了其他营养盐匮乏的实际养殖问题；建立的最劣值为主、平均值为辅的计算方法，避免了“劣势掩盖”及“信息漏缺”问题；提出的指标容许值概念的应用避免了极限监测值对评价结果的放大影响。

关键词　增养殖区；水质评价；营养盐；评价标准；环境容许值；环境质量指数

中图分类号　X55　　doi: 10.11693/hyhz20170700199

海水增养殖是我国渔业重要组成部分。除港口、滨海旅游度假区及保护区等功能区外，近岸水域、滩涂已被充分利用于水产增养殖，并有逐渐往深水区发展的趋势；至 2015 年底，我国海水养殖面积达到 2.32×10^6 hm^2(中国渔业统计年鉴，2016)，成为世界第一海水养殖大国。但随着养殖规模的扩展，环境条件与养殖活动之间的相互限制及负面影响日益显现；部分海域氮磷污染较重，海水富营养化(过锋等，2012)，赤潮时有发生(国家海洋局，2012—2016)；有的养殖区氮磷比值失衡，呈磷或氮限制性贫营养状态(李洪波等，2010；刘爱英等，2013)；营养盐不足导致养殖生物死亡或产量下降(FAO，1989)，初级生产力无法满足养殖需要。海洋环境质量评价是正确认识环境质量现状，掌握环境演变规律，保护海洋生态系统及合理开发利用海洋资源的前提及必要手段。国内外众多学者已提出了诸多有关海洋环境质量评价的方法和模式。目前，我国包括海水增养殖区在内的海洋环境评价普遍采用的方法包括单因子评价法(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，2007a，b，c)、营养指数法(戴纪翠等，2009；吴锐等，2015)及多因子综合评价法(何荣等，2014；国家海洋局，2002)等；以上评价方法均基于第二类海水水质标准(GB3097-1997)建立，除 DO 及 pH 外，水质监测值越低，环境质量评价结果越优。营养盐是海洋生产力的重要化学物质基础，其中任何一种要素的缺乏都可能成为海洋藻类及滤食性贝类生长的限制性因素。根据传统评价标准及评价方法对海水养殖系统进行评价，在营养盐匮乏或养殖状况恶劣的增养殖区可能会得到“富营养化”或“环境质量优良”的评价结论，评价结果不能完全反应增养殖区实际环

* 海水综合评价项目，DOMEP(MEA)-02 号；山东省科技发展计划，2014GSF11703 号；山东省农业重大应用技术创新项目，2017—2019。刘爱英，研究员，E-mail: aiyingl@163.com

① 通讯作者：宋秀凯，副研究员，E-mail: xiukaisong@163.com

收稿日期：2017-07-27，收修改稿日期：2017-11-29

境状况。本文把营养盐指标氮、磷作为区间型指标，而非传统意义上的污染指标；并引入容许值概念，确定新型水环境评价标准，以期建立更符合海水增养殖区环境管理及养殖生产实际需求的评价方法，为诊断主要环境胁迫因子，评估养殖环境质量等级，保障养殖水域生态系统良性循环，合理制定海洋功能区划，控制水域养殖容量，充分发挥水产养殖在我国海洋生态系统和国民经济中的重要作用提供科学依据。

1　评价方法构建

1.1　评价指标

海水增养殖区环境监测体系包括 pH、溶解氧、COD、营养盐类、重金属类、微生物及持久性有机污染物等共计 20 余个指标。根据监测指标的生态环境效应将其分为污染型、区间型及洁净型三种类型。污染型指标是指监测值越大，环境质量评价越差的指标，如 COD、石油类、重金属、粪大肠菌群等有毒有害物质；区间型指标是指监测值偏离一定区间越远，环境质量评价越差的指标，如 pH、DIN 及 PO_4(见图 1)；洁净型指标是指监测值越大，环境质量评价越好的指标，如 DO。

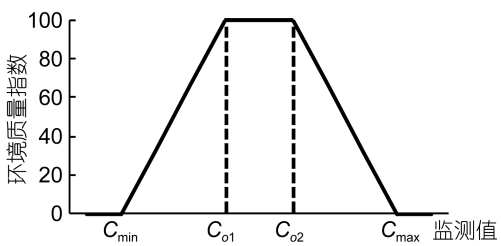

图 1　区间型指标的评价标准与环境质量关系示意图
Fig.1　Relationship between standard values of interval indices and environmental quality

1.2　评价标准及容许值

各评价指标的评价标准及最小容许值、最大容许值见表 1。COD、石油类、重金属、粪大肠菌群、pH、DO 的评价标准采用其第二类海水水质标准值(GB 3097-1997); DIN 及 PO_4 的评价标准为一区间范围。

容许值是指环境因子对海水增养殖活动不会产生有害影响的“相对安全浓度”。本方法规定当评价指标监测值≤最小容许值或≥最大容许值时，环境质量指数等于 0。容许值确定的原则: (1) 与现行海水水质标准相衔接; (2) 对毒有害污染物严格，对营养盐类宽松; (3) 不偏离增养殖区实际情况; (4) 用于调节评价模型的输出参数，便于环境质量等级判定划分。pH、重金属类及粪大肠菌群的容许值取其评价标准的次级海水水质标准值，即第三类海水水质标准；因汞的二类及三类水质标准为同一数值，故其容许值取第四类海水水质标准。根据养殖生物对 DO 耐受性确定其最小容许值为 3mg/L。综合考虑养殖水域生态系统结构平衡稳定及能量流动、养殖高产需要，确定 DIN 及 PO_4 的标准区间及最大、最小容许值。

1.3　评价方法

1.3.1　评价流程　　监测值无量纲转换→单因子质量指数计算→海水质量指数计算

1.3.2　监测值无量纲转化　根据评价指标类型将其在各站次的监测值运用式(1)、式(2)或式(3)转换，使之成为一组无量纲的介于 0—100 之间的数据；该数值为站次质量指数，其值越大，该站次环境质量越好。

污染型指标的无量纲转化: 当监测值 C_{ij}≤标准值 C_o 时，站次质量指数为 100；当 C_{ij}≥最大容许值 C_{max} 时，站次质量指数为 0；当 $C_o<C_{ij}<C_{max}$ 时，按式(1)进行转换。

$$P'_{ij}=\left(1-\frac{C_{ij}-C_o}{C_{max}-C_o}\right)\times 100 \tag{1}$$

洁净型指标的无量纲转化: 当监测值 C_{ij}≤最小容许值 C_{min} 时，站次质量指数为 0；当 C_{ij}≥标准值 C_o 时，站次质量指数为 100；当 $C_{min}<C_{ij}<C_o$ 时，按式(2)进行转换。

$$P'_{ij}=\left(\frac{C_{ij}-C_{min}}{C_o-C_{min}}\right)\times 100 \tag{2}$$

区间型指标的无量纲转化: 当监测值 C_{ij}≤最小容许值 C_{min} 或≥最大容许值 C_{max} 时，站次质量指数为 0；当位于标准区间，即 $C_{o1}\leqslant C_{ij}\leqslant C_{o2}$ 时，站次质量指数为 100；其余监测值的无量纲转化按式(3)进行。

$$P'_{ij}=\begin{cases}\left(\dfrac{C_{ij}-C_{min}}{C_{o1}-C_{min}}\right)\times 100, C_{min}<C_{ij}<C_{o1}\\ \left(1-\dfrac{C_{ij}-C_{o2}}{C_{max}-C_{o2}}\right)\times 100, C_{o2}<C_{ij}<C_{max}\end{cases} \tag{3}$$

式(1)、(2)及(3)中，P'_{ij} 为评价指标 i 在 j 站次的无量纲转化值，即站次质量指数，C_{ij} 为评价指标 i 在 j 站次的监测值，C_o 为评价指标 i 的标准值，C_{max} 为评价指标 i 的最大容许值；C_{min} 为评价指标 i 的最小容许值；C_{o1} 为评价指标 i 标准区间的下限值，C_{o2} 为评价指标 i 标准区间的上限值。

表 1 海水指标评价标准

Tab.1 Evaluation standard and allowable value of sea-water index

评价指标	标准值 C_o	标准区间 $C_{01}-C_{02}$	最小容许值 $C_{\min}$	最大容许值 $C_{\max}$	指标类型
COD(mg/L)	3			6	污染型
石油类(mg/L)	0.05			0.3	污染型
汞(μg/L)	0.2			0.5	污染型
镉(μg/L)	5			10	污染型
铅(μg/L)	5			10	污染型
总铬(μg/L)	100			200	污染型
铜(μg/L)	10			50	污染型
锌(μg/L)	50			100	污染型
砷(μg/L))	30			50	污染型
粪大肠菌群(个/L)	2000, 生食贝类 140			4000, 生食贝类 2600	污染型
DIN(mg/L)		0.015—0.3	0.0015	2.0	区间型
PO_4(mg/L)		0.003—0.03	0.0006	0.15	区间型
pH		7.8—8.5	6.8	9.0	区间型
DO(mg/L)	5		3		洁净型

1.3.3 单因子质量指数 将某个评价指标在拟评价区域及评价时间段的所有无量纲指数通过算数平均法计算得到该单项指标的质量指数，即单因子质量指数。评价区域、评价时段内只要有一次监测值超标，该单因子质量指数即小于 100。单因子质量指数计算式:

$$p_i = \frac{1}{n}\sum_{1}^{n} P'_{ij} \tag{4}$$

式(4)中，P_i 为 i 指标的单因子质量指数；P'_{ij} 为 i 指标在 j 站次的无量纲转化值; n 为站次数量。

1.3.4 海水质量指数 取所有评价指标中，单因子质量指数最小值为海水质量指数。

$$M = \min_{i=n}(P_1, P_2, \cdots, P_i) \tag{5}$$

1.4 质量等级划分标准及意义

根据 M 值将养殖区海水环境质量分为优秀、良好、一般及较差 4 个等级；环境质量等级划分标准及其表征意义见表 2。

表 2 海水增养殖区水环境质量等级划分标准

Tab.2 Mariculture zones environmental quality grade

海水质量指数	环境质量级别	对增养殖活动的影响
$95 \le M \le 100$	优秀	满足增养殖区功能要求，营养盐结构合理，非常适宜增养殖。
$60 \le M < 95$	良好	基本满足增养殖区功能要求，轻度污染或营养盐轻度贫乏，适宜增养殖，注意环境及养殖生物质量监测。
$20 \le M < 60$	一般	中度污染或营养盐中度贫乏，可以增养殖，但需监控污染源，关注养殖生物质量，注意调整增养殖模式，警惕赤潮及养殖病害发生。
$M < 20$	较差	严重污染或营养盐非常匮乏，环境受到严重损伤，不利于增养殖。

2 实例验证

2.1 数据来源及方法验证

2.1.1 数据来源 验证用数据为 2014 年山东省海水增养殖区监测资料。8 个增养殖区名称及地理位置见表 4 及图 2，分别位于渤海湾、莱州湾、山东半岛北部、东部及南部近岸区域，养殖类型包括滩涂贝类养殖、筏式贝类养殖和筏式藻类养殖。样品采集及分析依据《海洋监测规范第 3 部分：样品采集、贮存与运输》(GB17378.3-2007)、《海洋监测规范第 4 部分：海水分析》(GB17378.4-2007)及《海洋监测规范第 7 部分：近海污染生态调查和生物监测》(GB17378.7- 2007)进行。利用本文方法对各养殖区进行环境质量评价，并与单因子污染指数评价法、营养指数法的评价结果进行比对。

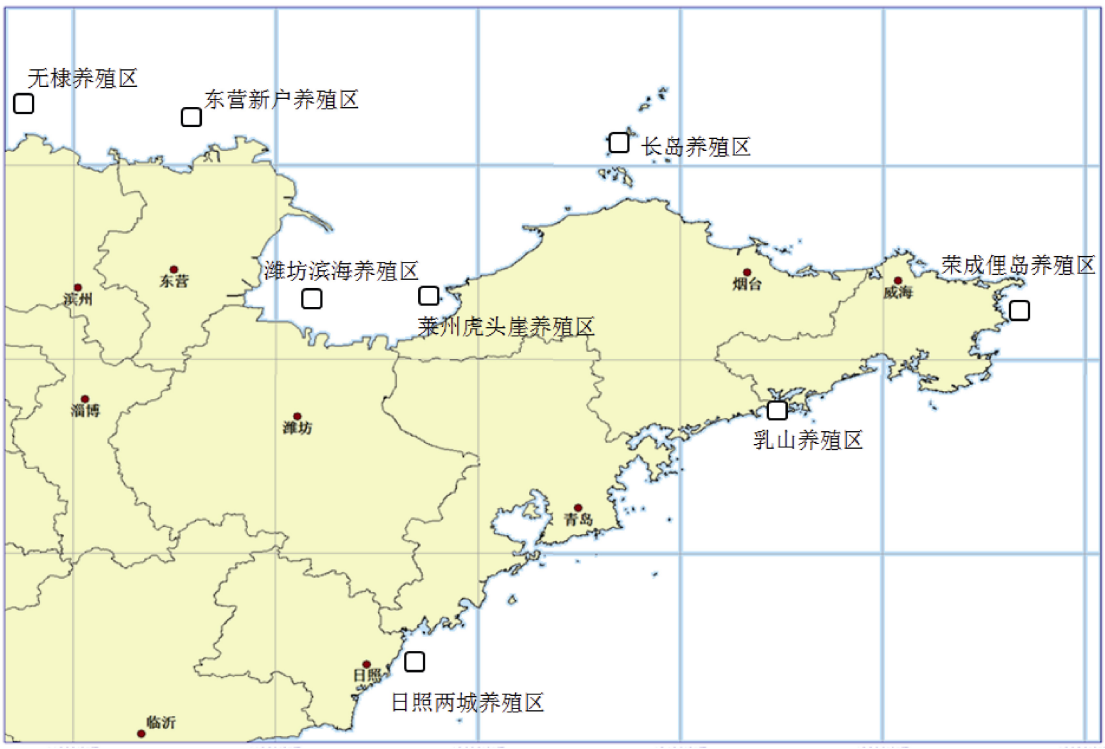

图 2　实例验证海水增养殖区位置示意图

Fig.2　Location diagram about verified mariculture zones

2.1.2　单因子指数计算方法　　利用单项指标的实测数据和标准对比分类，取水质最差指标的类别为评价结果，有一项污染物超标即认为该区域超标。

单因子评价基本模式: $P_i = C_i / C_{io}$

式中, P_i 为单因子污染指数, C_i 为某因子实测值, C_{io} 为某因子的二类海水水质标准值。

溶解氧评价模式: $P_{DO} = (C_m - C_{DO}) / (C_m - C_{DOO})$

式中, P_{DO} 为溶解氧污染指数, C_{DO} 为溶解氧实测值, C_{DOO} 为溶解氧的二类海水水质标准值, C_m 为 7.6 mg/L (20℃、盐度 30 的海水饱和溶解氧值)。

pH 评价模式: $P_{pH} = \dfrac{(2pH - (pH_u + pH_d))}{|pH_u - pH_d|}$

式中: P_{pH} 为 pH 污染指数, pH 为实测值, pH_u 为二类海水水质标准的上限值, pH_d 为标准的下限值。

2.1.3　营养指数计算方法

$$E = (C_{COD} \times C_{DIN} \times C_{DIP}) \times 10^6 / 4500$$

式中, C_{COD}、C_{DIN}、C_{DIP} 分别为水体中 COD、DIN 及 PO_4 的实测浓度，单位为 mg/L; E 值越高，水体富营养化程度越严重; 当 $1 \le E \le 3$, 水体轻度富营养化, $3 < E \le 9$, 中度富营养化, $E > 9$, 重度富营养化。

2.2　验证结果

利用 3 种方法对 8 个海水增养殖区水环境质量的评价结果见表 3。利用本文方法评价结果表明，环境质量优秀、良好、一般及较差的养殖区比例分别为 25.0%、37.5%、37.5%及 0; 其中无棣及乳山养殖区水环境质量优秀，东营、长岛及日照养殖区水环境质量良好，该 5 个增养殖区营养盐结构较合理，适宜于开展增养殖活动; 莱州虎头崖、潍坊滨海及荣成俚岛养殖区环境质量一般，需调整养殖模式和养殖密度; 导致虎头崖及俚岛养殖区环境质量下降的因素为磷酸盐含量偏低、呈限制性贫营养状态; 与之相反，滨海养殖区存在的主要环境问题则为氮、磷富营养化。单因子指数法评价结果显示，达标养殖区占比 37.5%，首要污染物为 DIN 和石油类; “优秀”养殖区数量小于“达标”养殖区数量，源于本文方法将部分“达标”而营养盐偏低的站位给予了较低评价。营养指数法评价结果显示，滨海、东营新户及无棣养殖区分别呈现重度、中度及轻度富营养化水平; 而根据本文方法评价，将“轻度”或“中度”富营养化区域的评价级别归类为优秀或良好。富营养化指数为 DIN、PO_4 及 COD 三者相乘结果，其值并不能真正反映单个指标浓度，某一指标增加导致的“富营养化”评价结果，可能会掩盖其它指标的实际“贫营养”。

表 3 三种方法的评价结果
Tab.3 The results of three evaluation methods

评价区域	本文方法			单因子指数法		营养指数法	
	指数	质量等级	首要环境问题	首要污染物/指数	质量状况	指数	富营养化水平
无棣养殖区	97.7	优秀	—	DIN/1.11	超标	1.84	轻度
东营新户养殖区	91.5	良好	氮轻度污染	石油类/1.27	超标	4.10	中度
潍坊滨海养殖区	28.5	一般	氮中度污染 磷轻度污染	DIN/6.83 DIP/1.39	超标	50.21	重度
莱州虎头崖养殖区	23.6	一般	磷中度贫乏	DIN/1.25	超标	0.35	未富营养化
长岛养殖区	86.2	良好	石油类轻度污染	石油类/1.46	超标	0.41	未富营养化
荣成俚岛养殖区	58.9	一般	磷中度贫乏	—	达标	0.20	未富营养化
乳山养殖区	99.8	优秀	—	DIN/0.70	达标	0.25	未富营养化
日照两城养殖区	66.9	良好	磷轻度贫乏	DIN/0.46	达标	0.11	未富营养化

3 结果与分析

3.1 评价指标体系构建

现行海洋监测规范及海水增养殖区监测技术规程规定，海水增养殖区环境监测体系包含 20 余个水环境指标。选取的评价指标应能反映增养殖区水环境的自然属性及增养殖活动的影响，并且与现行标准及政策相关、数据易于获取及评价结果指导性强等。我国近岸海域绝大部分指标符合海洋功能区质量要求，主要污染物为 DIN、COD、石油类等(国家海洋局, 2012—2016)。本文方法为一开放指标体系，综合质量指数基于最小单因子质量指数确定，只要不漏选主要污染要素，则评价指标类型及数量的变化，不会影响各养殖区之间、同一养殖区各年份间的环境状况比对。

3.2 评价标准确定

Fisher 等(1992)发现浮游植物生长的限制阈值为 DIN=0.03mg/L，PO_4=0.006mg/L，如果营养盐浓度低于此，则被视为浮游植物生长的限制性因子；此后 Justić 等(1995)认为一般情况下海水中营养盐 DIN=0.014mg/L，PO_4=0.0031mg/L 可以作为浮游植物生长的最低阈值；Vollenweider(1968)关于磷负荷和初级生产力关系的研究也表明了磷的重要性；营养盐是影响浮游植物群落结构的主要因子，二者之间呈现正相关关系(宋秀凯等，2010；李斌等，2013；刘懂等, 2016)。我国渔业水质标准(GB11607-89)规定 DIN 及 PO_4 标准值分别为 0.3mg/L 及 0.03mg/L。综合考虑相关研究成果与国家标准，本方法将营养盐评价标准确定为一区间范围，即 DIN 为 0.015—0.3mg/L，PO_4 为 0.003—0.03mg/L；其余指标评价标准采用第二类海水水质标准值。

3.3 容许值确定

通常情形下，污染物浓度过高可导致环境恶化和生物生产力降低，而营养盐的一定程度的增加，往往提高了初级生产力(Pätsch *et al*, 1997)及养殖生物量。实际养殖生产发现，DIN 及 PO_4 超过二类海水水质标准情况下，贝类生长状况仍旧良好，且并不会导致养殖产品出现质量问题(刘爱英等，2013)。本文方法适当增大 DIN、PO_4 及 COD 最大不容许值，以相对放宽对其的评价尺度；DIN 与 PO_4 的方法检出限为 0.0014mg/L 及 0.00062mg/L(海洋调查规范第 4 部分)，基于此，其最小容许值分别取 0.0015mg/L 及 0.0006mg/L。

研究表明，多种鱼类及虾蟹类的低氧致死浓度为 1—2mg/L(Allan *et al*, 1991; Martinez *et al*, 1998; Jiang, 1999; 陈婉情等，2015)；当水环境中 DO 小于 4mg/L 时，鱼类生长速度下降(Brett *et al*, 1981)；确定 DO 的第四类海水水质标准值 3mg/L 为其最小容许值。

美国国家贝类卫生计划(NSSP)规定，海水中粪大肠菌群 2600MPN/L 为贝类养殖限制区域标准，超过 90%样品超过该值时，贝类产品需要暂养净化才可达到人类安全消费水平；海水水质标准(GB 3097-1997)规定一、二、三类海水的粪大肠菌群标准值为 2000 个/L、生食贝类养殖区 140 个/L；陈添铮(2013)通过一周年调查发现，罗源湾养殖区水体中粪大肠菌群数量范围为未检出—2400 个/L，平均 403 个/L；参考美国对贝类养殖区的分类标准，并且考虑我国居民的饮食习惯及养殖区微生物环境实际情况，确定粪大肠菌群最大容许值为一般养殖区 4000 个/L、生食养殖区 2600 个/L。

3.4　综合质量指数计算

近年来, 国内许多学者采用模糊数学评价法(何歆, 2007; 宋科等, 2013)、改良的内梅罗指数法(钟硕良等, 2008)及综合评价法(何荣等, 2014)等对养殖区海水质量进行了综合评价。现有评价方法, 各具一定优势, 但不同程度存在着计算比较繁琐或指数表征意义不明显问题。本方法取单因子质量指数最小值为综合质量指数, 计算简便, 降低了在海洋业务化监测工作中推广使用的门槛, 适用于开放的评价指标体系, 可用于对不同地区、不同年份养殖区环境质量状况的比较。该方法并不似传统单因子指数评价方法, 只考虑环境因子中受污染最严重的、而忽略了其他环境因子。运用该评价方法, 首先通过对每个监测值的无量纲转换, 降低了极限值对最终评价结果的影响, 相对突出了其他指标的影响; 其次, 通过各个指标单因子质量指数除能识别首要问题因子外, 尚可判别其它因子污染或匮乏程度。

3.5　模型应用限制

本方法适用于依靠吸收海区营养盐和摄取浮游植物生长的藻类及贝类增养殖区, 是否适用于需要人工投喂饲料的虾类、鱼类养殖区仍待验证。相对于以往的海水增养殖区评价方法, 本模型最明显变化表现于营养盐标准区间及容许值的确定。环境因子浓度与养殖系统生态健康的剂量-反应模型是标准值及容许值正确建立的基础, 而目前尚欠缺该方面研究; 随着研究深入, 需对相关标准进行不断优化与完善。

4　结论

(1) 针对现有海水水质标准不适用于增养殖区, 导致评价结论与环境实际不符的问题, 将评价指标重新划分为污染型、区间型及洁净型三种类型; 氮、磷作为区间型指标, 而非传统意义的污染型指标。

(2) 引入环境因子容许值概念, 确定各评价指标的最大及最小容许值; 建立三种指标类型的监测数据无量纲转换模型, 将监测数据归一化无量纲处理, 避免了极限监测值对评价结果的放大影响。

(3) 将某个指标在拟评价区域及评价时间段的所有无量纲值通过算数平均法得到单项指标的质量指数; 评价区域、评价时段内只要有一次监测值超标, 该单因子质量指数即小于 100; 取单因子指数最小者作为评价区域海水环境质量指数。该最劣值为主、平均值为辅的评价方法, 避免了“劣势掩盖”及“信息漏缺”问题。

(4) 本文评价方法将评价区域环境质量划分为优秀、良好、一般及较差四个等级, 并提出了相应管理建议。山东省 8 个海水增养殖区中, 62.5%的养殖区海水环境质量“优秀”或“良好”, 适宜于开展增养殖; 环境质量等级“一般”水域占 37.5%, 存在的主要问题为氮中度污染或磷轻、中度贫乏, 需调整养殖模式或减少养殖密度。实例验证表明, 本文评价方法能够识别出海区的主要环境问题, 评价结果符合评价区域环境质量及养殖活动实际情况。

致谢　实例验证用数据分别由滨州市海洋环境监测站、东营市海洋与渔业环境监测中心、山东省潍坊市海洋环境监测中心站、烟台市海洋环境监测预报中心、威海市海洋与渔业监测减灾中心、日照市海洋环境监测预报中心及长岛县海洋环境监测中心提供, 谨致谢忱。

参　考　文　献

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007a. GB 17378.4-2007 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 118—120

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007b. GB 17378.7-2007 海洋监测规范第 7 部分: 近海污染生态调查和生物监测. 北京: 中国标准出版社, 42—47

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2007c. GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范第 4 部分: 海水化学要素调查. 北京: 中国标准出版社, 161

过　锋, 赵　俊, 陈聚法等, 2012. 胶州湾贝类养殖区氮、磷污染现状及动态变化. 渔业科学进展, 33(5): 116—122

刘　懂, 陈　晨, 王　莉等, 2016. 象山港海洋牧场示范区浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系. 海洋与湖沼, 47(5): 1024—1032

刘爱英, 马元庆, 李　斌等, 2013. 山东省三个贝类增养殖区营养盐季节分布及营养盐限制性分析. 海洋环境科学, 32(1): 54—57

农业部渔业渔政管理局, 2016. 2016 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国标准出版社, 32—60

李　斌, 白艳艳, 邢红艳等, 2013. 四十里湾营养状况与浮游植物生态特征. 生态学报, 33(1): 260—266

李洪波, 梁玉波, 袁秀堂等, 2010. 辽宁长海县海域营养状况季节分析与评价. 海洋环境科学, 29(5): 689—692

吴　锐, 雷永乾, 王　畅等, 2015. 粤东柘林湾养殖区海水富营养化评价. 环境科学与技术, 38(10): 210—215

何　荣, 张秋丰, 牛福新等, 2014. 天津汉沽贝类增养殖区环境质量综合评价. 水产科学, 33(7): 455—458

何　歆, 2007. 广州市渔业水域生态环境综合评价与水产品质量安全研究. 广州: 暨南大学博士学位论文, 96

宋　科, 赵　晟, 张　力等, 2013. 基于模糊综合评价法的东极大黄鱼(*Larimichthys crocea*)养殖区海水水质评价. 海洋与湖沼, 44(2): 383—388

宋秀凯, 刘爱英, 马元庆等, 2010. 东营近海枯水期浮游生物

群落特征研究. 海洋湖沼通报, (1): 95—102
陈添铮, 2013. 罗源湾养殖区太平洋牡蛎及其海水环境中的粪大肠菌群周年变化. 福建水产, 35(4): 264—269
陈婉情, 吴洪喜, 吴 亮等, 2015. 5 种海水养殖鱼类幼鱼的耗氧率及窒息点. 海洋学研究, 33(2): 76—81
国家海洋局, 2002. 海水增养殖区监测技术规程. http://www.coi.gov.cn/fagui/huanjingjiance/201107/t20110727_14996.html
国家海洋局, 2010—2016. 中国海洋环境状况公报. http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/
钟硕良, 阮金山, 吴立峰等, 2008. 厦门海域贝类养殖生态环境质量评价和类别划分研究. 海洋水产研究, 29(6): 15—26
戴纪翠, 高晓薇, 倪晋仁等, 2009. 深圳近海海域营养现状分析与富营养化水平评价. 环境科学, 30(10): 2879—2883
Allan G L, Maguire G B, 1991. Lethal levels of low dissolved oxygen and effects of short-term oxygen stress on subsequent growth of juvenile *Penaeus monodon*. Aquaculture, 94(1): 27—37
Brett J R, Blackburn J M, 1981. Oxygen requirements for growth of young coho (*Oncorhynchus kisutch*) and sock eye (*O. nerka*) salmon at 15℃. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 38(4): 399—404
FAO, 1989. Culture of kelp *Laminaria japonica* in China. RAS/86/024 Training Manual 89/I
Fisher T R, Peele E R, Ammerman J W *et al*, 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. Marine Ecology Progress Series, 82: 51—63
Jiang J, 1999. Study of oxygen consumption rate, CO_2 exhaust, respiratory quotient and tolerance to low dissolved oxygen in four shrimps species. Journal of Zhanjiang Ocean University, 86(1): 73—83
Justić D, Rabalais N N, Turner R E, 1995. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. Marine Pollution Bulletin, 30(1): 41—46
Martínez E, Aguilar M, Trejo L *et al*, 1998. Lethal low dissolved oxygen concentrations for postlarvae and early juvenile *Penaeus setiferus* at different salinities and pH. Journal of the World Aquaculture Society, 29(2): 221—229
Pätsch J, Radach G, 1997. Long-term simulation of the eutrophication of the North Sea: temporal development of nutrients, chlorophyll and primary production in comparison to observations. Journal of Sea Research, 38(3 — 4): 275—310
Vollenweider R A, 1968. The scientific basis of lake and stream eutrophication, with particular reference to phosphorus and nitrogen as eutrophication factors. Technical Report, DAS/SCI/68.27.OECD, Paris

THE ASSESSMENT METHOD OF SEA WATER ENVIRONMENT ON MARICULTURE ZONES BASED ON ENVIRONMENTAL PERMISSIBLE VALUE

LIU Ai-Ying, MA Yuan-Qing, YU Guang-Lei, HE Jian-Long, CHENG Ling, WANG Yue-Xia, SONG Xiu-Kai
(*Shandong Marine Resource and Environment Research Institute*, *Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology*, *Yantai* 264006, *China*)

Abstract The current assessment method of seawater environment quality used usually gets inconsistency evaluation conclusions with the actual mariculture environment as it cannot distinguish extreme conditions such as nutrient deficiency and adverse aquaculture situation. In this study, the concept of environment permissible value was introduced, and indices of seawater quality were divided into three types, pollution, interval, and clean. Additionally, evaluation criteria, and the minimum/maximum permissible value of each index were determined. After normalized and nondimensional process of the data from monitoring stations, the minimum single factor quality index was used as the comprehensive quality index. Based on comprehensive quality indices, the regional environmental quality of mariculture zones were divided into four levels including excellent, good, average and bad. Furthermore, the developed evaluation model and comprehensive evaluation indicator system were applied to eight mariculture zones in Shandong province. The results showed that DIN and PO_4 used as interval rather than pollution index could discover the primary environmental problems in the reality of marine aquaculture, and the calculation method established using the worst value as the primary index and mean value as the supplemental index could avoid disadvantage concealment and information omissions. Therefore, the use of permissible value of indices could avoid the overestimation of limit value-based assessment method effectively.

Key words mariculture zone; water quality assessment; nutrients; evaluating standard; environment permissible value; environmental quality grade