

基于水质状态和生态响应的综合富营养化评价模型 ——以山东半岛典型海域富营养化评价为例*

吴在兴^{1,2} 俞志明¹ 宋秀贤¹ 袁涌铨^{1,2} 曹西华¹

(1. 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

提要 对前期构建的长江口及其邻近水域的富营养化评价模型作了进一步改进,并根据 2006 年至 2007 年春夏秋冬四个季节的山东半岛典型海域的调查资料,将该模型应用于山东半岛典型海域的富营养化评价。评价结果表明:在“优、良、中、差、劣”五个富营养化等级中,山东半岛大部分海湾和近岸海域出现“中”到“差”程度的富营养化状况,且海湾内富营养化程度明显高于近岸海域。较突出的富营养化症状主要是夏秋季节高浓度的叶绿素水平和周期性发生的有毒有害藻华。烟台四十里湾、丁字湾和青岛胶州湾是山东半岛富营养化状况较严重的三个海湾。仅少数海域,如日照北部近海和黄岛近海的富营养化程度处于“良”的等级。评价模型同时包含富营养化压力因素(水质状态)和效应因素(生态响应)两个方面,在指标评分上不仅考虑评价浓度,还考虑浓度出现的频率和空间覆盖度等方面,以及对各指标合理分配权重,使得评价模型更能准确、全面地反映海域富营养化状况。

关键词 富营养化评价; 典型海域; 山东半岛; 水质状态; 生态响应

中图分类号 X821 doi: 10.11693/hyh20121116001

富营养化是指营养盐等进入水体环境后,在适当的光照、温度等条件下,引发诸如藻类等生物增殖的自然过程(Ferreira *et al*, 2007)。近几十年来,农药化肥的施用、化石燃料的燃烧等人类活动,加速了氮磷等营养元素随地表径流或大气沉降向近海输移(Nixon, 1995),使得近海富营养化成为了一个突出的海洋环境问题。近海富营养化的主要症状包括高水平的浮游植物生物量(Boynton *et al*, 1982)、大型藻类的过度生长、低氧和缺氧区的形成、有毒有害藻华的发生、以及生态系统中沉水植被的消亡和鱼类的死亡等(Burkholder *et al*, 1992)。我国近三十年来经济的快速发展带来了严重的近海富营养化问题,近海营养盐浓度严重超标,赤潮、绿潮和低氧缺氧等富营养化症状频发,给水产养殖等行业带来很多不良影响(Shen, 2001; Huang *et al*, 2003; 张莹莹等, 2007; 徐兆礼等, 2009)。

富营养化评价能让管理者全面掌握富营养化问题的程度和范围,进而在管理和消除富营养化问题上能优化资源和制定决策,是富营养化管理的关键之一,已成为广泛关注的热点问题。在我国,富营养化指数法(邹景忠等, 1983)和营养质量状态指数法(陈于望, 1987)是目前广泛应用的以营养盐为基础的富营养化评价方法。在逐渐认识到近海系统复杂的非线性特征后(Cloern, 2001),以人工神经网络和模糊数学理论等为代表的软计算方法被应用于近海系统的富营养化评价(陈鸣渊等, 2007; 苏畅等, 2008)。无论是富营养化指数法还是软计算方法,都以营养盐为富营养化的指示指标或者营养盐在评价中占较大权重,因此得到的结果总是近岸营养盐浓度较高的区域为富营养化严重的区域。然而这种结果对于某些近岸海域来说,并不能完全真实的反映其富营养化状

* 国家重点基础研究发展计划(973 项目), 2010CB428706 号; 海洋公益性行业科研专项经费项目, 201205001 号; 山东省“两区”建设专项资金支持项目, 项目批准号: “两区”建设专项资金支持项目; 国家基金委“创新研究群体科学基金”资助, 41121064 号。吴在兴, 博士研究生, E-mail: xingguang0215@hotmail.com

通讯作者: 俞志明, 研究员, E-mail: zyu@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2012-11-16, 收修改稿日期: 2013-03-18

况: 例如在长江口, 口门内和浑浊带丰富的营养盐并未导致严重的富营养化症状出现, 而远离海岸水域的营养盐浓度相对较低却出现了明显的低氧和浮游植物的大规模暴发等富营养化症状; 在北戴河海域, 近几年连续发生微微藻赤潮, 而营养盐指数法却无法准确反映出这种富营养化程度(Chai *et al.*, 2006; 张万磊等, 2012)。

针对以营养盐为基础的富营养化评价模型的不足, 国际上很多海洋研究机构开始尝试在近岸海域应用基于症状的多参数评价模型: 较著名的包括巴黎-奥斯陆委员会和美国国家海洋和大气管理局分别提出的综合评价法(OSPAR-COMPP, OSPAR Commission, 2003)和河口营养状况评价(ASSETS, Bricker *et al.*, 2003)。但由于不同水域的地理位置、气候等特点存在差异, 且国外评价模型中所涉及的如沉水植被等评价指标在我国绝大部分近海从未被监测过, 使得国外评价模型难以在我国近海的富营养化评价中推广和应用。俞志明等(2011)在参考国际上

基于“压力-状态-响应”框架的富营养化评价模型ASSETS等的结构基础上, 考虑我国广泛开展的海域环境监测特点和我国在不同地理位置海域的富营养化研究成果, 筛选确定了适合长江口海域区域特性的富营养化指示指标、富营养化评价阈值和标准, 提出了基于水质状态和生态响应的富营养化评价综合模型。本研究在对前期构建的长江口富营养化评价模型进一步改进的基础上, 将模型应用于山东半岛典型海域, 以反映该区域不同地理位置海域的富营养化状况, 为富营养化管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 调查与数据收集

本研究中用于富营养化评价的数据来自 2006 年至 2007 年春夏秋冬四个季节对山东半岛东北部及南部典型海湾和近岸海域的“908”调查专项所获得的营养盐、COD、叶绿素、溶解氧和浮游植物丰度等数据。“908”专项调查的采样站位如图 1 所示。

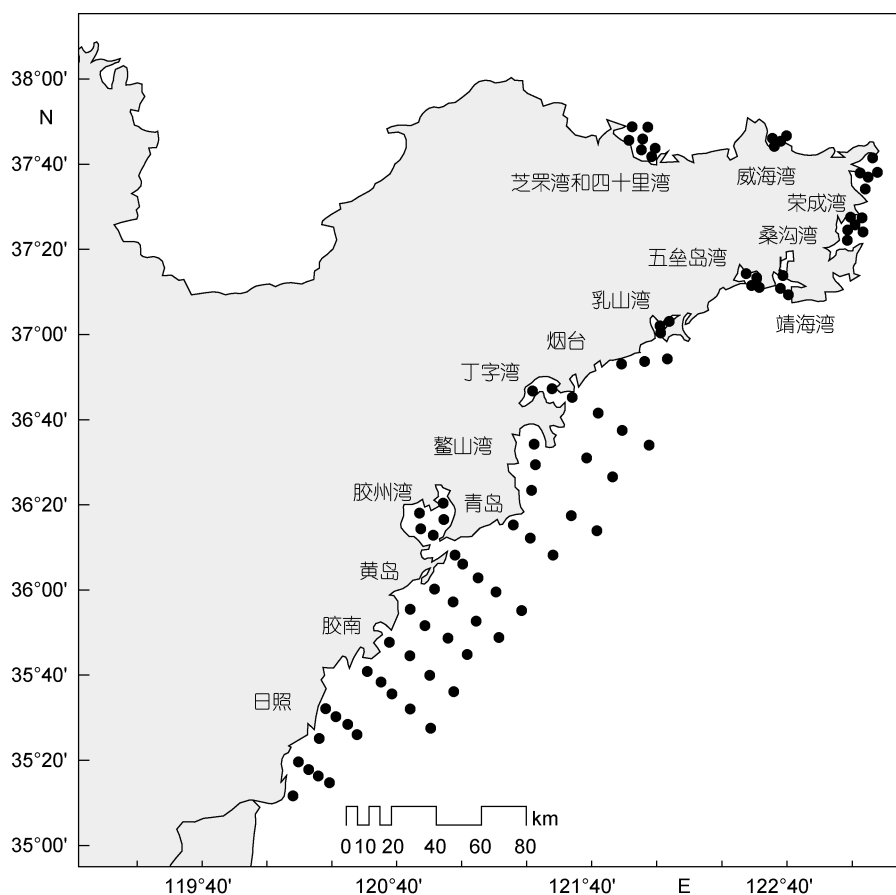


图 1 山东半岛近岸海域“908”调查站位

Fig.1 The “908” monitoring sites for offshore areas east of Shandong Peninsula

在富营养化评价中,除溶解氧采用底层溶解氧数据外,其他数据均采用各个采样层次平均数据,浮游植物丰度采用各采样水层的平均值。有毒有害藻华事件的发生次数、面积和持续时间等资料来自部分文献及历年国家海洋环境质量公报数据和山东海洋环境质量公报数据(国家海洋局,2003—2008;山东海洋与渔业厅,2005—2009)。

1.2 评价模型的构建

1.2.1 模型指标体系的选取与标准确定

为全面反映海域富营养化状况,选取水质状态和生态响应两方面指标作为富营养化评价的指标。水质状态指标包括溶解无机氮(DIN)、溶解无机磷(DIP)和化学需氧量(COD)。生态响应包含初级生态响应(叶绿素 *a*、浮游植物细胞总丰度或单个种类浮游植物细胞丰度比例、大型藻过度生长)和次级生态响应(底层溶解氧、有毒有害藻华发生)指标(表 1)。

表 1 富营养化评价指标体系
Tab.1 Indices for eutrophication assessment

| 富营养化因素 | | 评价指标 | |
|--------------|----------|--------|---|
| 富营养化 致害因素 | 水质状态 | | 溶解无机氮 |
| | | | 磷酸盐 |
| | | | 化学需氧量 |
| 富营养化 响应因素 | 生态 响应 | 初级生态响应 | 叶绿素 <i>a</i> 浮游植物细胞总丰度 或单个种类浮游植物 细胞丰度比例 大型藻过度生长问题 |
| | | 次级生态响应 | 有毒有害藻华事件 底层溶解氧浓度 |

水质状态反映了海域富营养化的致害或压力因素,生态响应反映了海域富营养化的效应因素。初级和次级生态响应则反映了富营养化过程的两个阶段和两种严重程度。虽然我国绝大部分海域并不监测大型藻指标,但 2007 年以后,我国黄海江苏近岸海域出现了大面积的浒苔暴发,也成为了一种由近海富营养化而带来的生态灾害;大型和微型海藻对富营养化条件直接响应,造成其大量生长和暴发,是海水富营养化最显著的结果(Morand *et al*, 2004);甚至在一些近海较浅的海湾和泻湖,营养盐加富最先带来的可能是大型藻而非微型藻的过度生长(Nobre, 2005),所以选取大型藻作为指标可以更全面地反映富营养化状况。根据近海系统的地理分布和特异性差异等因素,微型藻细胞丰度指标在本方法中被设计成一个

依据具体条件可选择性的指标。在一些特殊海域,如长江口,甲藻门藻类随着富营养化程度的加重,在浮游植物总丰度中所占的比例呈现上升趋势(栾青杉,2007;章飞燕,2009),能很好的反映富营养化的程度。在其他近海系统中,某些种类则可能随着富营养化程度的加重呈现比例下降的趋势。在没有特定种类能通过比例变化明显指示富营养化变化的海域,浮游植物总丰度则成为一个很好的指标(CEC, 2000)。

各种指标的阈值和标准见表 2。在各种指标阈值和标准的确定中,充分考虑了我国近岸海域的富营养化特点和以往针对南北海域的富营养化问题的研究。其中,水质状态指标采用国家海水水质标准设定富营养化标准(GB 3097-1997)。叶绿素 *a* 阈值和标准范围则参考我国南北不同地理位置的近岸海域前期的富营养化研究,将其阈值设定为 5 μ g/L(邹景忠等,1983;陈鸣渊等,2007)。浮游植物总丰度和溶解氧阈值分别参考欧盟水框架指令和美国 ASSETS 的富营养化评价模型(CEC, 2000; Bricker *et al*, 2003)。在单个浮游植物种对富营养化响应显著的海域,单个浮游植物种丰度比例则根据该海域浮游植物丰度的历史数据和当前数据,根据美国环保局提出的方法确定阈值和标准范围(USEPA, 2001),如长江口根据历史数据和当前数据(栾青杉,2007;章飞燕,2009),将标准范围设定为 1%—20%。

1.2.2 海域系统分区

在进行富营养化评价之前,对近岸海域参考 ASSETS 方法按照统一的原则进行分区,分区后对每个区域进行分别评价,再根据每个分区的评价结果通过面积加权的方式得到整个区域的富营养化评价结果。分区的依据是海域系统不同区域的盐度差异。具体根据每个采样点所获取的不同季节所有的盐度数据的盐度中值按照盐度 <0.5, 0.5 <盐度 <25,和盐度 >25 进行系统分区(NOAA, 1985)。对于没有淡水流入的海湾而言,每个区域的盐度可能都在 25 以上,则可直接将全海湾作为整体进行评价。采用统一的分区标准使得在不同地理位置、不同近海系统进行富营养化程度之间的比较保持一致性,也便于找到同一区域不同分区富营养化程度的差异。

1.2.3 富营养化综合评价

对于每个富营养化评价指标,根据每个分区内所有采样点获得的采样数据的累积频率曲线得到指标的评价浓度值:对于 DIN、DIP、COD、Chl *a*, 采用 90%累积频率所对应的浓度值作为评价值;对于 DO, 则采用 10%累积频率所对应的浓度值作为评价值。累积频率曲线获得的

表 2 富营养化评价指标的标准
Tab.2 Thresholds and ranges of indices for eutrophication assessment

| 指标 | 阈值和标准范围 | | | | | |
|------|------------------|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------|------|
| | 优 | 良 | 中 | 差 | 劣 | |
| 水质状态 | DIN(mg/L) | ≤0.2 | >0.2, ≤0.3 | >0.3, ≤0.4 | >0.4, ≤0.5 | >0.5 |
| | DIP(mg/L) | ≤0.015 | >0.015, ≤0.03 | >0.03, ≤0.045 | >0.045 | |
| | COD(mg/L) | ≤2 | >2, ≤3 | >3, ≤4 | >4, ≤5 | >5 |
| 生态响应 | Chla(μg/L) | ≤1 | >1, ≤3 | >3, ≤5 | >5 | |
| | 浮游植物总丰度(个/升) | ≤10 ³ | >10 ³ , ≤10 ⁴ | >10 ⁴ , ≤10 ⁶ | >10 ⁶ | |
| | 单个藻种丰度比例(长江口)(%) | ≤1 | >1, ≤10 | >10, ≤20 | >20 | |
| | DO(mg/L) | >5 | >2, ≤5 | >0, ≤2 | 0 | |

评价价值比平均值或某一次监测值更具统计意义和代表性, 可以避免使用海域监测过程出现的某些异常值(90%累积频率得到评价价值是为了排除叶绿素、营养盐等的异常高值, 10%累积频率得到评价价值是为了排除 DO 的异常低值), 使得评价结果更能反映海域的富营养化状况。

每个分区内每个指标的评价得分再通过逐步决策逻辑表得到(表 3、4、5)。逐步决策逻辑充分考虑了分区内指标的评价浓度、此种浓度出现的频率(偶尔出现、周期性出现还是持续出现)和分区内出现此浓度的空间覆盖度。空间覆盖度通过计算浓度等于或高于评价浓度的采样点个数占采样点总个数的比例得出。例如一个盐度分区所有采样点叶绿素 *a* 的 90% 累积频率浓度值为 4μg/L, 则此浓度值落入表 2 中范围为 3—5μg/L 的中的类型, 那么盐度分区内每个采样点的叶绿素 *a* 的 90%累积浓度均计算出来后, 那些累积浓度大于 3μg/L(标准范围的下限)的采样点所占分区内总采样点个数的比例即为此盐度分区叶绿素 *a* 的空间覆盖度。对于大藻的过度生长问题和有毒有害藻华问题, 由于没有统一的富营养化阈值, 故不考虑评价浓度, 而是采用对问题的出现频率、覆盖度和持续时间等半定量数据进行挖掘的方法确定评价得分(参见表 4、5)。最终的海域富营养化等级由以下 4 个步骤得到:

1. 对于水质状态, 从表 3 得到每个分区每个指标的评价得分后, 根据每个分区的面积和海域总面积计算每个指标的面积加权表达值并求和, 即得到每个参数在整个区域的表达水平。整个海域水质指标的表达水平即通过计算三个水质状态指标表达水平的平均值得到(公式(1))。水质状态的最终类型即通过水质状态水平和类型对应表得出(表 6)。

$$L = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left[\sum_{j=1}^n \left(\frac{A_j}{A_E} V \right) \right] \quad (1)$$

其中, L 为水质状态的表达水平, V 为每个分区每个参数的评价得分; A_j 为某个分区的面积, A_E 为整个海域的总面积; n 为分区的个数, p 为水质指标的个数。

2. 初级生态响应的表达水平采用与水质状态的表达水平相同的方法获得。对于次级生态响应, 单个指标(底层溶解氧或者有毒有害藻华)的表达水平与水质状态和初级生态响应每个指标表达水平的获得方法相同, 但次级生态响应总的表达水平是选取底层溶解氧或者有毒有害藻华两者得分和表达水平中更高的那个。次级生态响应反映了更高层次的富营养化症状, 选用两者中的最大值而不是平均值为了给予次级生态响应在富营养化评价中更高的权重。

3. 得到初级和次级生态响应的表达水平后, 依据图 2 中的矩阵得出初级和次级生态响应的类型和总的生态响应类型。初级生态响应和次级生态响应组合的依据是给予次级生态响应更高的权重。例如, 高的表达水平的初级生态响应和低表达水平的次级生态响应的组合表明区域内严重的次级富营养化症状在高的营养盐压力下依然没有表现出来, 总的生态响应等级则归类为“中”(图 2 中的等级“3”); 相反, 高的表达水平次级生态响应和低表达水平的初级生态响应表明区域内严重的富营养化症状已经出现, 总的生态响应等级则归类为“中高”(图 2 中的等级“4”)。

4. 参考美国 ASSETS 方法中组合人类压力和河口营养状态的矩阵, 将水质状态类型和生态响应类型通过组合表(表 7)得到整个海域的综合富营养化评价结果。由于高浓度的营养盐不一定导致严重的富营养化症状(Cloern, 2001), 所以在表 7 中给予生态响应较高的权重。在近海系统中, 由于浮游植物对营养盐

表 3 水质状态逐步决策逻辑表
Tab.3 Logical decision process for determination of water quality

| 浓度 | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 | 浓度 | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 | 浓度 | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 |
|-------|---------|----------|------|---------|---------|----------|------|--------|---------|----------|------|
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 1 | | 25—50 | 持续、周期 | 1 | | 25—50 | 持续、周期 | 1 |
| >0.5 | 25—50 | 偶尔 | 0.75 | >0.045 | 25—50 | 偶尔 | 0.75 | >0.045 | 25—50 | 偶尔 | 0.75 |
| 劣 | 0—25 | 持续、周期 | 0.75 | 差 | 0—25 | 持续、周期 | 0.75 | 差 | 0—25 | 持续、周期 | 0.75 |
| | 0—25 | 偶尔 | 0.5 | | 0—25 | 偶尔 | 0.5 | | 0—25 | 偶尔 | 0.5 |
| | 未知 | 未知 | 0.75 | | 未知 | 未知 | 0.75 | | 未知 | 未知 | 0.75 |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 |
| >0.4, | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 | >0.03, | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 | >0.03, | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 |
| ≤0.5 | 25—50 | 偶尔 | 0.5 | ≤0.045 | 25—50 | 偶尔 | 0.5 | ≤0.045 | 25—50 | 偶尔 | 0.5 |
| 差 | 0—25 | 持续、周期 | 0.5 | 中 | 0—25 | 持续、周期 | 0.5 | 中 | 0—25 | 持续、周期 | 0.5 |
| | 0—25 | 偶尔 | 0.25 | | 0—25 | 偶尔 | 0.25 | | 0—25 | 偶尔 | 0.25 |
| | 未知 | 未知 | 0.5 | | 未知 | 未知 | 0.5 | | 未知 | 未知 | 0.5 |
| DIN | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 | DIP | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 | COD | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 |
| >0.3, | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 | >0.015, | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 | >3, | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 |
| ≤0.4 | 25—50 | 偶尔 | 0.25 | ≤0.03 | 25—50 | 偶尔 | 0.25 | ≤4 | 25—50 | 偶尔 | 0.25 |
| 中 | 0—25 | 持续、周期 | 0.25 | 良 | 0—25 | 持续、周期 | 0.25 | 中 | 0—25 | 持续、周期 | 0.25 |
| | 0—25 | 偶尔 | 0 | | 0—25 | 偶尔 | 0 | | 0—25 | 偶尔 | 0 |
| | 未知 | 未知 | 0.25 | | 未知 | 未知 | 0.25 | | 未知 | 未知 | 0.25 |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.25 | ≤0.015 | 任何 | 未知 | 0 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.25 |
| >0.2, | 25—50 | 持续、周期 | 0.25 | 优 | 未知 | 未知 | 不计 | >2, | 25—50 | 持续、周期 | 0.25 |
| ≤0.3 | 0—25 | 偶尔 | 0 | 未知 | 未知 | 未知 | 不计 | ≤3 | 0—25 | 偶尔 | 0 |
| 良 | 0—50 | 持续、周期 | 0 | | | | | 良 | 0—50 | 持续、周期 | 0 |
| | 未知 | 偶尔 | 0 | | | | | | 未知 | 偶尔 | 0 |
| ≤0.2 | 任何 | 未知 | 0 | | | | | ≤2 | 任何 | 未知 | 0 |
| 优 | 未知 | 未知 | 不计 | | | | | 优 | 未知 | 未知 | 不计 |
| 未知 | 未知 | 未知 | 不计 | | | | | 未知 | 未知 | 未知 | 不计 |

表 4 初级生态响应逐步逻辑决策表
Tab.4 Logical decision process for determining direct response

| 浓度 | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 | 个/升 (%) | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 | 过度生长问题 | 覆盖度 (%) | 频率 | 得分 |
|-----------|---------|----------|------|--|---------|----------|------|--------|---------|----|------|
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 | | 25—100 | 持续 | 1 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 1 | | 25—50 | 持续、周期 | 1 | | 0—25 | 持续 | 0.75 |
| >5 | 25—50 | 偶尔 | 0.75 | >10 ⁶ (>20) | 25—50 | 偶尔 | 0.75 | | 25—100 | 周期 | 1 |
| 差 | 0—25 | 持续、周期 | 0.75 | 差 | 0—25 | 持续、周期 | 0.75 | 观测到 | 0—25 | 周期 | 0.75 |
| | 0—25 | 偶尔 | 0.5 | | 0—25 | 偶尔 | 0.5 | 大型藻 | 25—100 | 偶尔 | 0.75 |
| | 未知 | 未知 | 0.75 | | 未知 | 未知 | 0.75 | | 0—25 | 偶尔 | 0.5 |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 | | 未知 | 任何 | 0.75 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 | >10 ⁴ , ≤10 ⁶ | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 | 未观测到 | | | 0 |
| >3, ≤5 | 25—50 | 偶尔 | 0.5 | (>10, ≤20) | 25—50 | 偶尔 | 0.5 | 未知 | | | 不计 |
| 中 | 0—25 | 持续、周期 | 0.5 | 浮游植物总丰度 (长江口甲藻丰度比例) | 0—25 | 持续、周期 | 0.5 | | | | |
| | 0—25 | 偶尔 | 0.25 | 中 | 0—25 | 偶尔 | 0.25 | | | | |
| | 未知 | 未知 | 0.5 | | 未知 | 未知 | 0.5 | | | | |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 | | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 | | | | |
| | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 | >10 ³ , ≤10 ⁴ | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 | | | | |
| >1, ≤3 | 50—100 | 偶尔 | 0.5 | (>1, ≤10) | 25—50 | 偶尔 | 0.25 | | | | |
| 良 | 0—25 | 持续、周期 | 0.25 | 良 | 0—25 | 持续、周期 | 0.25 | | | | |
| | 0—50 | 偶尔 | 0.25 | | 0—25 | 偶尔 | 0 | | | | |
| | 未知 | 未知 | 0.25 | | 未知 | 未知 | 0.25 | | | | |
| ≤1 优 | 任何 | 任何 | 0 | ≤10 ³ 或 (≤1)优 | 任何 | 任何 | 0 | | | | |
| 未知 | 未知 | 未知 | 不计 | 未知 | 未知 | 未知 | 不计 | | | | |

表 5 次级生态响应逐步决策逻辑表
Tab.5 Logical decision process for determining indirect response

| 浓度 | 覆盖率(%) | 频率 | 得分 | 藻华问题 | 覆盖率(%) | 持续时间 | 频率 | 水平 | 得分 |
|-----------|------------|----------|------|--------|--------|------|-------|----|------|
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 1 | | 50—100 | 数周至月 | 持续、周期 | 高 | 1 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 1 | | 0—50 | 数周至月 | 持续、周期 | 高 | 0.75 |
| 0 | 25—50 | 偶尔 | 0.75 | | 50—100 | 数周至月 | 偶尔 | 高 | 0.75 |
| 差 | 10—25.0—10 | 持续、周期 | 0.75 | | 0—50 | 数周至月 | 偶尔 | 中 | 0.5 |
| | 10—25.0—10 | 偶尔 | 0.5 | 有毒有害藻华 | 50—100 | 数天至周 | 持续、周期 | 高 | 0.75 |
| | 未知 | 未知 | 0.75 | 观测到 | 0—50 | 数天至周 | 持续、周期 | 中 | 0.5 |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.75 | | 50—100 | 数天至周 | 偶尔 | 中 | 0.5 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 0.75 | | 0—50 | 数天至周 | 偶尔 | 低 | 0.25 |
| >0, ≤2 | 25—50 | 偶尔 | 0.5 | | 50—100 | 一天 | 持续、周期 | 中 | 0.5 |
| 中 | 10—25.0—10 | 持续、周期 | 0.5 | | 0—50 | 一天 | 持续、周期 | 低 | 0.25 |
| DO | 10—25.0—10 | 偶尔 | 0.25 | | 50—100 | 一天 | 偶尔 | 低 | 0.25 |
| | 未知 | 未知 | 0.5 | | 0—50 | 一天 | 偶尔 | 低 | 0.25 |
| | 50—100 | 持续、周期、偶尔 | 0.5 | 未观测到 | 未知 | 未知 | 任何 | 中 | 0.5 |
| | 25—50 | 持续、周期 | 0.5 | | — | — | — | — | 0 |
| >2, ≤5 | 25—50 | 偶尔 | 0.25 | 未知 | 未知 | 未知 | 未知 | 未知 | 不计 |
| 良 | 10—25.0—10 | 持续、周期 | 0.25 | | | | | | |
| | 10—25.0—10 | 偶尔 | 0 | | | | | | |
| | 未知 | 未知 | 0.25 | | | | | | |
| >5 优 | 任何 | 任何 | 0 | | | | | | |
| 未知 | 未知 | 未知 | 不计 | | | | | | |

表 6 水质状态表达水平和类型对应表
Tab.6 Level of water quality and category

| 水质表达水平 | 等级 | 类型 |
|------------|----|----|
| ≤0.2 | 1 | 低 |
| >0.2, ≤0.4 | 2 | 中低 |
| >0.4, ≤0.6 | 3 | 中 |
| >0.6, ≤0.8 | 4 | 中高 |
| >0.8, ≤1 | 5 | 高 |

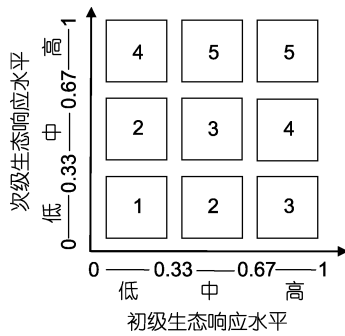


图 2 生态响应评价因子组合矩阵标准判别表
Fig.2 The integrated class of the ecological response

的吸收作用或者系统对营养盐稀释、浮游植物对营养盐的吸收等作用存在滞后性,“高”的水质状态和“低”的生态响应或者“低”的水质状态和“高”的生态响应

在很短的时间内可能同时存在;但是在四个季节的采样周期中,这两种情况发生的可能性几乎为零,故在表 7 中排除了这两种组合。最终评价等级、不同等级的代表颜色都与美国 ASSETS 和欧盟 WFD(水框架指令)富营养化评价模型一致。

2 结果与讨论

2006—2007 年四个季节山东半岛东北部和南部海域调查站位的理化指标和生物数据的统计如表 8 所示。浓度较低的叶绿素 a 出现在冬季的荣成湾、桑沟湾海域以及胶南近岸外侧海域。而夏季,从北部芝罘湾和四十里湾到东部的威海各海湾,再到南部的乳山湾和丁字湾,叶绿素 a 出现普遍的高浓度,可达 20—50μg/L。较低的 DIP 和 DIN 主要出现在春夏季节的鳌山湾、胶南和黄岛近岸外侧海域。而较高的 DIP、DIN 出现在冬季的北部芝罘湾和四十里湾到东部的威海各海湾再到南部的乳山湾和丁字湾;总体来说,比起近岸海域,海湾内具有较严重的营养盐富集现象,且冬季营养盐浓度普遍较高。低浓度的 DO 主要集中于夏季的烟台芝罘湾和四十里湾,以及南部的丁字湾海域。浮游植物丰度高值主要出现在夏季的四十里湾和南部的鳌山湾、胶南近岸外侧海域。

表 7 富营养化综合评价表
Tab.7 Aggregation of water quality and ecological response to an overall eutrophic status

| 等级 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | |
|------|---------------|----|---|----|---|----------|
| 水质状态 | 高 | 中高 | 中 | 中低 | 低 | |
| 生态响应 | 高 | 中高 | 中 | 中低 | 低 | |
| 因子类型 | 组合 | | | | | 等级(表示颜色) |
| 水质状态 | 1 2 | | | | | 1(优, 蓝色) |
| 生态响应 | 1 1 | | | | | |
| 水质状态 | 1 2 3 3 4 | | | | | 2(良, 绿色) |
| 生态响应 | 2 2 1 2 1 | | | | | |
| 水质状态 | 1 1 2 3 4 4 5 | | | | | 3(中, 黄色) |
| 生态响应 | 3 4 3 3 2 3 2 | | | | | |
| 水质状态 | 2 2 3 4 5 | | | | | 4(差, 橙红) |
| 生态响应 | 4 5 4 4 3 | | | | | |
| 水质状态 | 3 4 5 5 | | | | | 5(劣, 红色) |
| 生态响应 | 5 5 4 5 | | | | | |

表 8 山东半岛海域理化指标和生物数据统计
Tab.8 Data statistics for indicators of coastal areas in Shandong Peninsula

| 指标 | 均值 | 范围 | 指标 | 均值 | 范围 |
|-------------|-------------|-----------|--------------------|--------------------------|---|
| DIN(μg/L) | 208.6±202.5 | 3.7—1766 | 浮游植物丰度 (cell/L) | 4.7±5.73×10 ³ | 4×10 ² —5.58×10 ⁴ |
| DIP(μg/L) | 12.27±11.27 | 0.2—65 | DO(mg/L) | 8.35±1.85 | 1.25—13.3 |
| Chl a(μg/L) | 4.26±7.52 | 0.2—50.25 | | | |

由于本研究中所有海湾和近海区域的盐度均在 27 以上, 所以对每个海湾不再分区, 当作一个整体来评价。对于青岛、日照、烟台等近岸海域, 按照采样点的空间分布以及海域所属的行政区域进行分别评价。评价结果见图 3 所示。在“优、良、中、差、劣”五个富营养化等级中, 山东半岛大部分海湾和近岸海域出现“中”到“差”程度的富营养化状况, 较突出的富营养化症状主要是夏秋季节发生的高浓度叶绿素水平。烟台四十里湾、丁字湾和青岛胶州湾是山东半岛富营养化状况较严重的三个海湾, 富营养化症状主要是出现周期性的有毒有害藻华事件, 四十里湾、丁字湾还形成夏季低氧现象, 可能与夏季频繁暴发大规模赤潮后赤潮生物的降解过程耗氧有关(喻龙等, 2009), 另外这些海湾具有较多的排污口和养殖虾池(马绍赛等, 1997), 夏季其产生的大量有机物耗氧也可能导致低氧。丁字湾、胶州湾这种半封闭型海湾的湾底区域水交换能力差(孙英兰等, 2003), 容易产生较严重的富营养化症状。仅少数海域, 如日照北部和黄岛近岸海域的富营养化程度处于“良”的等级。而两

者之间的胶南近岸海域和北部青岛鳌山湾海域富营养化状况则处于“中”的等级, 可能与这些区域海岸线的众多海湾开展网箱养殖排放营养盐有关(蔡惠文, 2007), 因此这些近岸海域虽没出现显著的叶绿素高值、低氧和赤潮现象, 也要加强针对养殖的富营养化管理。总体来看, 海湾内的富营养化程度明显高于湾外近岸海域, 胶州湾、丁字湾等半封闭海湾的富营养化程度高于开放型的海湾。通过对不同典型海域综合富营养化等级的比较, 管理者可直观掌握海域当前的富营养化状况, 便于制定富营养化管理策略。

除其他海域的评价结果直接由图 3 给出外, 胶州湾的详细评价过程由表 9 给出。

各指标评价浓度通过其浓度的累积频率曲线获得, 图 4 给出了胶州湾富营养化评价中 DO 和 chl *a* 的累积频率曲线, 累积频率为 90% 所对应的 chl *a* 浓度值约为 6.0 μg/L, 累积频率为 10% 所对应的 DO 浓度值约为 6.3 mg/L。

2007 年来山东半岛近海海域发生了大型藻类浒苔绿潮事件, 研究认为这类大型藻并非在山东近海

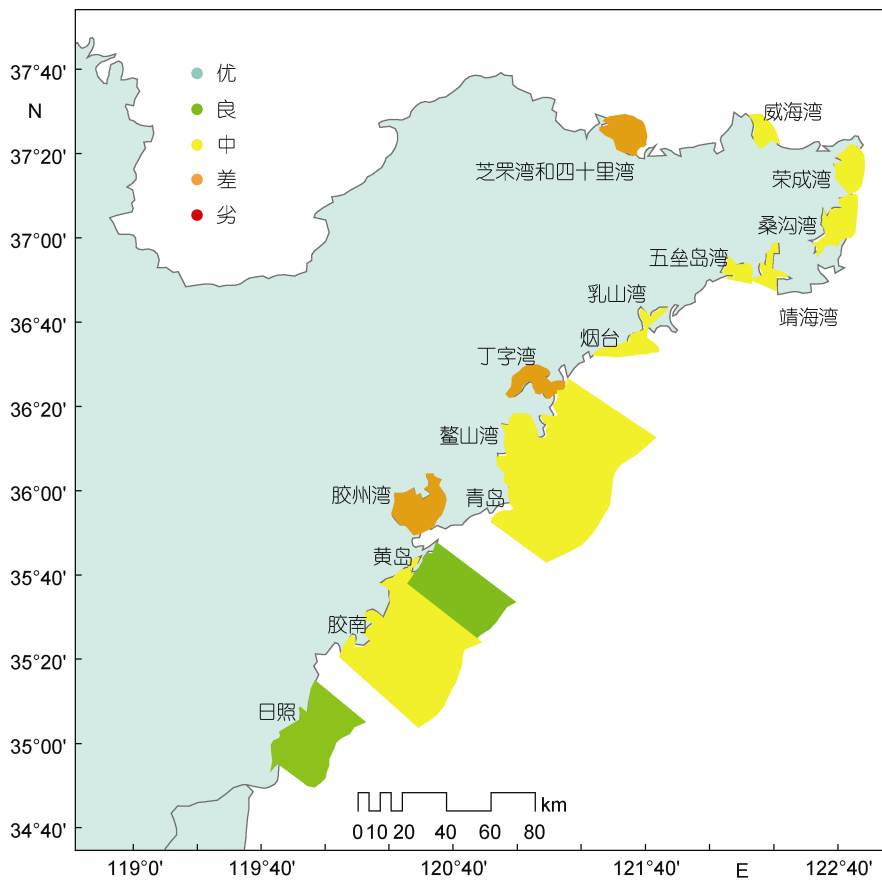


图 3 山东半岛典型海域富营养化综合评价结果

Fig.3 Results of eutrophication assessment for coastal areas in Shandong Peninsula

直接暴发, 而是由其他海域漂流至山东近海(Pang *et al.*, 2010), 该指标与山东半岛近岸海域富营养化相关的环境参数之间不具有直接的相关性, 故本研究在山东半岛近岸所选择的典型海域的富营养化评价中, 大型藻类指标没有参与评价。胶州湾 COD 数据由于未搜集到也不参与评价。从四季来看, 营养盐和叶绿素的高值并非持续性发生, 而是具有一定的季节性规律和周期性。而对于有毒有害藻华, 2000 年, 2001 年, 2003 年和 2004 年在胶州湾周期性地出现几平方公里到二百平方公里的赤潮, 一般持续一天到数天(吴玉霖等, 2005), 综合三方面得分为 0.5。结合水质状态等级和生态响应等级, 胶州湾最终富营养化综合等级为“差”, 对应颜色为橙色。

3 结论

(1) 山东半岛东北部南部的大部分典型海域呈现

“中”到“差”程度的富营养化状况, 总体上海湾内富营养化程度高于湾外近海海域, 半封闭型海湾的富营养化程度高于开放型海湾。整个典型海域较突出的富营养化症状主要是夏秋季节发生的高浓度叶绿素水平。

(2) 烟台四十里湾、丁字湾和青岛胶州湾是山东半岛富营养化状况较严重的三个海湾, 富营养化症状除了高浓度的叶绿素水平, 还出现周期性的有毒有害藻华事件, 四十里湾和丁字湾还出现夏季低氧现象。日照、黄岛近海富营养化程度相对较轻。

(3) 模型的诸多优势使得模型更能全面、准确反映该海域的富营养化程度、状况: 指标全面包含富营养化压力因素(水质状态)和效应因素(生态响应), 并合理赋予权重; 不只考虑富营养化问题的浓度, 还综合考虑问题出现的空间覆盖度和频率; 应用四个季节的评价数据, 避免得到对富营养化问题有季节偏差的反映等。

表 9 2006—2007 四个季节监测数据在胶州湾富营养化评价中的应用
Tab.9 Application of monitoring data in four seasons for eutrophication assessment of Jiaozhou Bay

| 指标 | 水质状态指标(mg/L) | | | 初级生态响应 | | | 次级生态响应 | |
|----------------|--------------|-------|-------|---------------------|----------------------|-----|-----------|------|
| | COD | DIN | DIP | Chl <i>a</i> (µg/L) | 浮游植物丰度 (cell/L) | 大型藻 | DO (mg/L) | HABs |
| 累积百分比评价浓度 | 不计算 | 0.469 | 0.021 | 6.0 | 9.45×10 ³ | 不计算 | 6.3 | 数天到周 |
| 空间覆盖度% | — | >50% | >50% | 40% | >50% | — | 任何 | 15% |
| 发生频率 | — | 周期性 | 周期性 | 周期性 | 周期性 | — | 任何 | 周期性 |
| 指标表达水平 | 忽略 | 0.75 | 0.5 | 1 | 0.5 | 忽略 | 0 | 0.5 |
| 水质状态和生态响应的表达水平 | | 0.625 | | | 0.75 | | | 0.5 |
| 水质状态和生态响应等级 | | 4 中高 | | | | | | 4 中高 |
| 综合富营养化等级 | | | | | 4 差 | | | |

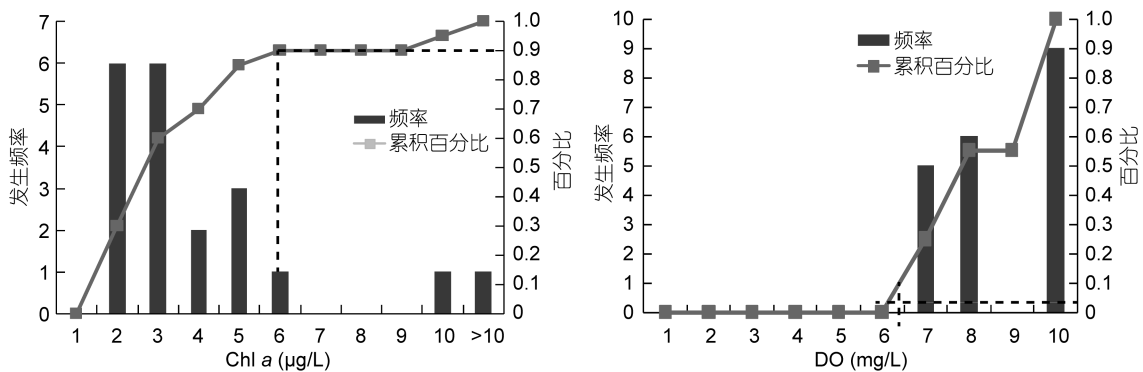


图 4 胶州湾 chl *a* 和 DO 监测浓度的累积频率曲线

Fig.4 90th percentile value of chl *a* and 10th percentile value of DO in Jiaozhou Bay
虚线分别代表 90%和 10%累积频率所对应的指标评价

参 考 文 献

- 马绍赛, 周诗贻, 1997. 丁字湾大潮汛期营养状况及其变化分析. 中国水产科学, 4(3): 44—47
- 山东海洋与渔业厅, 2005—2009. 山东海洋环境质量公报.
- 孙英兰, 张越美, 2003. 丁字湾物质输运及水交换能力研究. 中国海洋大学学报, 33(1): 1—6
- 陈于望, 1987. 厦门港海域营养状况的分析. 海洋环境科学, 6(3): 14—19
- 吴玉霖, 孙松, 张永山, 2005. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响. 海洋与湖沼, 36(6): 487—499
- 张万磊, 张永丰, 张建乐等, 2012. 北戴河赤潮监控区环境质量状况分析. 环境与资源, 7: 13—16
- 张莹莹, 张经, 吴莹等, 2007. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究. 环境科学, 28(8): 1649—1654
- 邹景忠, 董丽萍, 秦保平, 1983. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨. 海洋环境科学, 2(2): 41—54
- 苏畅, 沈志良, 姚云等, 2008. 长江口及其邻近海域富营养化水平评价. 水科学进展, 19(1): 99—105
- 陈鸣渊, 俞志明, 宋秀贤等, 2007. 利用模糊综合评价长江口水域富营养化水平. 海洋科学, 31(11): 47—54
- 国家海洋局, 2003—2008. 国家海洋环境质量公报.
- 俞志明, 沈志良等, 2011. 长江口水域富营养化. 北京: 科学出版社, 549
- 徐兆礼, 叶属峰, 徐韧, 2009. 2008年中国浒苔灾害成因条件和过程推测. 水产学报, 33(3): 430—437
- 栾青杉, 2007. 长江口及其邻接水域浮游植物群集生态学研究. 青岛: 中国海洋大学硕士论文, 1—72
- 章飞燕, 2009. 长江口及邻近海域浮游植物群落变化的历史对比及其环境因子研究. 上海: 华东师范大学硕士论文, 1—75
- 喻龙, 郝彦菊, 蔡悦荫, 2009. 四十里湾赤潮高发期营养盐与叶绿素 *a* 的年际变化. 海洋环境科学, 5(28): 558—561
- 蔡惠文, 2007. 海岸带网箱养殖环境容量研究——以胶南海域为例. 青岛: 中国海洋大学博士论文: 1—128
- Boynton W R, Kemp W M, Keefe C W, 1982. A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production. In: Kennedy V S ed. Estuarine Comparisons. Academic Press, New York: 69—90
- Bricker S B, Ferreira J G, Simas T C *et al*, 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. Ecological Modelling, 169(1): 39—60
- Burkholder J M, Noga E J, Hobbs C H *et al*, 1992. New phantom dinoflagellate is the causative agent of major estuarine fish kills. Nature, 358(6385): 407—410
- Chai C, Yu Z M, Song X X *et al*, 2006. The status and characteristics of eutrophication in the Yangtze River (Changjiang) estuary and the adjacent East China Sea, China. Hydrobiologia, 563: 313—328
- Cloern J E, 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. Marine Ecology Progress Series, 210: 223—253
- Council of European Communities (CEC), 2000. Council Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. Off J Eur Commun L, 327: 1—73
- Ferreira J G, Bricker S B, Simas T C, 2007. Application and sensitivity testing of a eutrophication assessment method on coastal systems in the United States and European Union. Journal of Environmental Management, 2(4): 433—445
- Huang X P, Huang L M, Yue W Z, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. Marine Pollution Bulletin, 47(1—6): 30—36
- Morand P, Merceron M, 2004. Coastal eutrophication and excessive growth of macroalgae. Recent Research of Developmental Environment Biology, 1(2): 395—449
- Nixon S W, 1995. Coastal marine eutrophication—A definition, social causes, and future concerns. Ophelia, 41(1): 199—219
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 1985. National estuarine inventory: Data atlas. vol.1: Physical and hydrologic characteristics. Rockville, MD: Strategic Assessment Branch, Ocean Assessments Division. 103 pp.
- Nobre A M, Ferreira J G *et al*, 2005. Management of coastal eutrophication: Integration of field data, ecosystem-scale simulations and screening models. Journal of Marine Systems, 56(3—4): 375—390
- OSPAR Commission, 2003. OSPAR Integrated Report 2003 on the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area Based Upon the First Application of the Comprehensive Procedure. OSPAR Commission, London.
- Pang S J, Liu F, Shan T F, *et al*, 2010. Tracking the algal origin of the Ulva bloom in the Yellow Sea by a combination of molecular, morphological and physiological analysis. Marine Environmental Research, 69(4): 207—215
- Shen Z L, 2001. Historical changes in nutrient structure and its influences on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52(2): 211—224
- USEPA, 2001. United States Environmental Protection Agency. Nutrient Criteria Technical Guidance Manual, Estuarine and Coastal Marine Waters, EPA-822-B-01-003

A NEW SYSTEM OF EUTROPHICATION ASSESSMENT FOR BOTH WATER QUALITY AND ECOLOGICAL RESPONSE: A CASE STUDY IN TYPICAL AREAS OFF SHANDONG PENINSULA

Wu Zai-Xing^{1,2}, Yu Zhi-Ming¹, Song Xiu-Xian¹, Yuan Yong-Quan^{1,2}, Cao Xi-Hua¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Science, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract A new scoring system for eutrophication assessment is described that modified from a previous one once applied in Changjiang River estuary. The new system was applied in typical coastal areas of Shandong Peninsula with all-season monitoring data in 2006 to 2007 supported by a “908” special monitoring programs for coastal seas in China. The results indicate that trophic status for the most bays and coastal areas ranged from categories “Moderate” to “Poor”. Typical eutrophication featured high-concentration chlorophyll *a* in seasons of harmful algal bloom that occurred periodically. The inner-bay eutrophic conditions were more serious than that outside the bays. The Sishili Bay and Dingzi Bay in Yantai, and the Jiaozhou Bay in Qingdao were three most seriously eutrophicated bays in Shandong Peninsula in the score of “Poor”, while coastal areas off Rizhao City and Huangdao District of Qingdao scored “Good” in trophic status. Therefore, considering both causative factors (water quality) and effect factors (ecological response), with the new system, one can score for a marine region based not only the applicable concentration of a matter, but also the spatial coverage and occurrence frequency of the concentration, and adjust weightings on parameters in system design case by case. This would make eutrophication assessment more accurate, realistic, and comprehensive.

Key words eutrophication assessment; typical coastal areas; Shandong Peninsula; water quality; ecological response