

# 厦门海域水体富营养化状况综合评价\*

蒋荣根 贺青 邝伟明 暨卫东<sup>①</sup>

(国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005)

**提要** 以 2003—2012 年厦门海域监测数据为基础,参考美国第二代富营养化评价方法,针对厦门海域实际监测特点并结合我国水体富营养化研究现状与评价标准,进行部分改良,使其更适用于该海域水体的富营养化状况评价。应用此评价体系,本文研究了厦门海域水体富营养化压力程度;以叶绿素 *a* 为初级症状指标、以底层溶解氧及赤潮发生状况为次级症状指标分析了水体富营养化的状态水平;并通过结合厦门海域整治、人口增长趋势、经济发展趋势以及周边营养盐入海现状等因素预测了未来厦门海域水体富营养化压力变化趋势。结果表明,厦门海域水体综合评价等级为中等富营养化程度,其中压力等级为中高、状态和响应的评价等级均为中级。该评价结果较好地反映了厦门海域水体富营养化程度、压力和症状,便于海洋管理部门对厦门海域环境容量进行监控与管理。

**关键词** 厦门海域;富营养化;综合评价;压力-状态-响应

**中图分类号** X52 doi: 10.11693/hyhz20130600084

厦门是中国东南沿海重要港口风景城市之一。随着国民经济的迅速发展,人口数量的急剧增加,工农业及生活废物的排放给厦门周边海域的环境造成了巨大压力,该海域的富营养化状况和赤潮问题日趋突出(林辉等, 2002, 2008)。因此掌握厦门湾海域水体的富营养化状况,对于保护厦门海域生态质量环境,更科学合理地开发利用该海域资源,促进海湾型城市建设具有重要意义。

随着对富营养化研究水平的不断提高以及为满足现代海岸带综合管理的需求,基于富营养化症状的第二代评价体系应运而生,并已成为国际评价水体富营养化的主流(王保栋, 2005)。第二代富营养化评价方法综合多项指标,比较全面地论述了水体富营养化的致害因素,其结果综合性、可比性和精确度均较高(Bricker *et al.*, 2003; Nobre *et al.*, 2005; Ferreira *et al.*, 2007, 2011; Garmendia *et al.*, 2012)。国内已有学者运用第二代富营养化评价的科学理念研究了我国沿岸海域水体富营养化状况,屠建波等(2006)应用欧盟“综合评价法”研究了长江口及其邻近海域富营养

化状况,认为其属于“问题海域”;吴迪等(2010)研究表明 2004—2006 年间双台子河口生态监控区均未处于富营养化状态;王保栋等(2012)研究表明 2010 年长江口海域富营养化状况级别为“劣”。但目前关于厦门湾海域水体富营养化问题的研究报道仍处于以水体营养盐为主体的第一代评价体系(暨卫东等, 1996; 郑爱榕, 2000; 林辉等, 2002; 林辉等, 2008),仅通过富营养化状态指数法、模糊综合评价法等公式计算水体富营养化程度,尚未有运用第二代富营养化评价体系研究厦门海域水体富营养化状况的相关报道。因此,本文根据厦门湾海域的实际调查状况,以 2003—2012 年厦门海域长期监测数据为基础,基于压力-状态-响应(PSR)模型,通过研究厦门海域水体富营养化压力程度、分析当前水体富营养化初级症状和次级症状水平以及预测未来几年内营养盐入海通量响应趋势三方面内容综合评价该海域水体富营养化状况,以期获得对该海域富营养化状况的新认识,为预防、控制和减轻厦门海域水体污染损害与海洋生态环境灾害提供新的科学依据。

\*科研院所社会公益研究专项项目, 2004DIB3J084 号; 海洋公益性项目, 201105014-6 号。蒋荣根, 硕士研究生, E-mail: jiangronggen@126.com; 同等贡献第一作者: 贺青, 工程师, E-mail: heqing@tio.org.cn

通讯作者: 暨卫东, 硕士生导师, 研究员, E-mail: hyssjwd@163.com

收稿日期: 2013-06-26, 收修改稿日期: 2013-08-29

## 1 研究区域与数据资料

### 1.1 研究区域概况

厦门湾海域总面积约为 390km<sup>2</sup>, 周边地形复杂, 四周山峦屏障岸线曲折, 海岸主要由基岩岬角海岸组成, 海岸线总长约 262km, 其中水深大于 10m 的深水岸线达 43km。该海域分为湾内和湾外两部分, 湾内包括九龙江河口区、西海域和同安湾, 湾外包括南部海域、东部海域和大嶝海域。厦门海域潮汐形态属于正规半日潮, 平均潮差 3.96m; 潮流属往复流, 涨潮时流向湾内, 退潮时流向湾外。

### 1.2 数据资料来源

本文收集了 2003 年至 2012 年厦门湾海域监测数据, 每年监测频率分为丰水期、平水期、枯水期, 调查要素包括化学耗氧量(COD)、底层溶解氧(DO)、无机磷(DIP)、总无机氮(DIN)、叶绿素 *a* 等, 均来源于国家海洋局第三海洋研究所海洋化学与环境监测技术实验室对厦门湾海域长期监测资料累积。本文选取常年监测的 25 个站位作为分析站位(如图 1), 监测方法与分析方法均参照 GB17378.4—2007 海洋监测规范(国家质量技术监督局, 2007a)和 GB/T12763.4—2007 海洋调查规范(国家质量技术监督局, 2007b), 数据质量高、完整性好, 通过数据整理、质量控制与分析, 便于应用到水体富营养化模型计算与评价。

## 2 评价方法与标准

本文水体富营养化评价体系参照美国第二代水体富营养化评价方法(Bricker *et al*, 2003, 2007; Xiao *et al*, 2007), 以“压力-状态-响应”框架为评价体系, 富营养化程度各核心指标从最优到最劣分为低、中低、中、中高和高 5 个不同级别, 并分别对其赋为 5 分、4 分、3 分、2 分和 1 分。各项指标评价标准的确定主要结合国内外近岸海域富营养化评价标准(Bricker *et al*, 2003, 2007; 王保栋等, 2012)、GB3097—1997 海水水质标准(国家环境保护局, 1997)、GB/T12763.9—2007 海洋生态调查指南(国家质量技术监督局, 2007c), 并根据厦门海域相关研究报道及现有监测数据作出适当调整, 使其尽量适合厦门海域实际状况并做到各等级之间等间距, 以减少不同等级之间因间距不均所带来的等级隶属误差。最后采用矩阵法综合权衡上述三部分评价结果确定该海域水体富营养化程度。

### 2.1 水体富营养化压力

富营养化的根本原因在于水体营养盐含量增加, 本文拟通过改良后的营养状态指数公式计算水体富营养化压力程度。许多学者研究认为: 在所有海区中均完全照搬营养状态指数公式是不科学的, 主要是因为原公式中分母 4500 是特定海区 COD、DIN 和

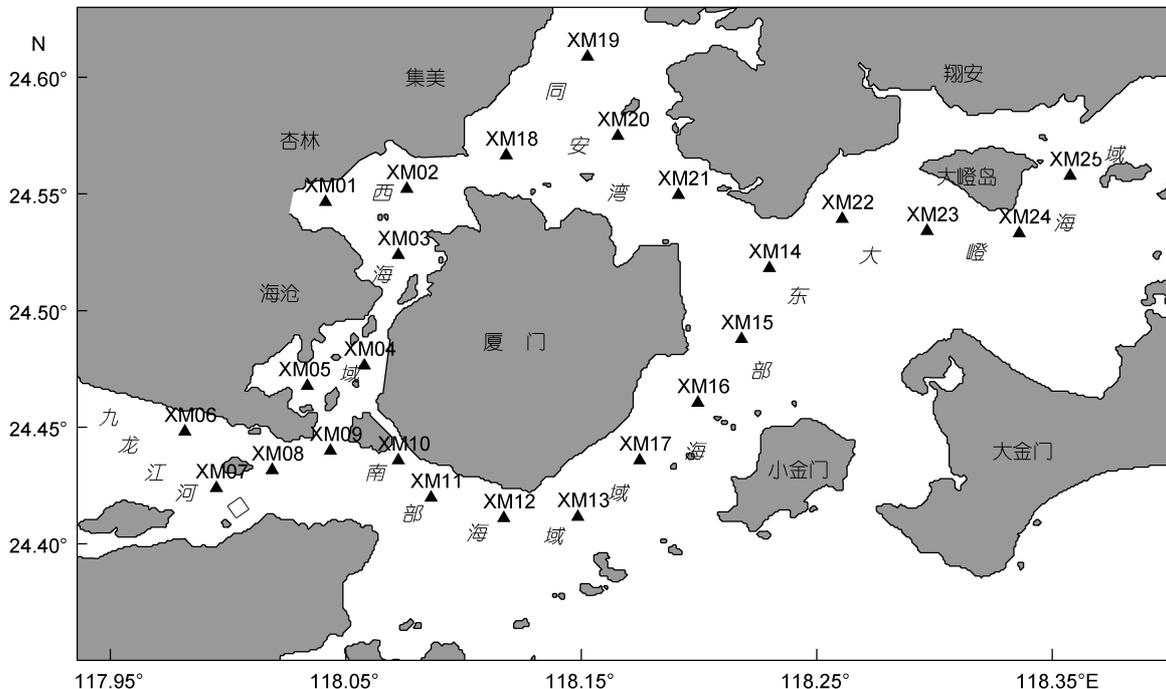


图 1 厦门湾水体富营养化研究海域

Fig.1 The area of study on eutrophication in the Xiamen Bay

DIP 三者富营养单项阈值的乘积,而在不同海区,这三者的阈值是不相同的,因而对营养状态指数公式进行调整(陈彬等, 2002; 张景平等, 2009), 如公式(1)。

$$P = \frac{\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}}{\text{COD}' \times \text{DIN}' \times \text{DIP}'} \quad (1)$$

其中,  $P$  代表水体富营养化压力指数值, COD、DIN、DIP 分别代表水体化学耗氧量、总无机氮、无机磷(单位: mg/L), COD'、DIN'、DIP' 分别代表化学耗氧量、总无机氮和无机磷的阈值。厦门湾海域富氮缺磷(林昱等, 1999), 根据厦门海域环境监测获取的水质参数的含量水平, 结合我国海水水质标准中第二类水质限定值, 并参考美国近岸水质状况评价标准(United States Environmental Protection Agency, 2012), 取 COD' 值为 3mg/L, DIN' 值为 0.3mg/L, DIP' 值为 0.03mg/L 作为厦门海域 COD、DIN、DIP 阈值。一般认为, 当营养状态指数值大于 1.0 时水体呈富营养化; 当营养状态指数值低于 0.4 时水体呈贫营养化; 当营养状态指数值介于 0.4—1.0 时水体呈现中营养化, 这里根据以上阈值并对其进行划分拟作为富营养化压力范围, 如表 1。

表 1 水体富营养化压力( $P$ )评价标准  
Tab.1 Assessment criteria for classification of eutrophic pressure

序号	等级	压力范围	赋分
1	低	$0 < P \leq 0.2$	5
2	中低	$0.2 < P \leq 0.4$	4
3	中	$0.4 < P \leq 0.6$	3
4	中高	$0.6 < P \leq 0.8$	2
5	高	$P \geq 1.0$	1

## 2.2 水体富营养化状态

富营养化状态评价基于水体营养盐含量增加引起的不同阶段症状, 分为初级症状和次级症状两个层次。初级症状是指水体富营养化直接引起的藻类加速生长和繁殖; 次级症状是指藻类大量繁殖, 经过优胜劣汰竞争进而引起的赤潮暴发, 然后, 在大量藻类死亡后有机体下沉降解消耗底层溶解氧, 底栖生物生存受到威胁等情况(Bricker *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2007)。根据厦门湾海域初级、次级生产力特征, 选择叶绿素  $a$  作为初级症状评价指标, 底层溶解氧和赤潮发生状况作为次级症状评价指标。

**2.2.1 叶绿素  $a$**  叶绿素  $a$  是海洋初级生产力的重要指标, 可以反映水体中浮游植物的生物量, 叶绿素  $a$  浓度过高或分布范围过广是富营养化初级阶段症状

的表征现象。采用厦门湾海域水体浮游植物旺盛期(如夏季)叶绿素  $a$  最大浓度及其出现频率评价初级症状水平。为避免因异常值引起的误判, 提高评价的可靠性, 采用统计方法求出累积百分数 90% 对应值作为叶绿素  $a$  浓度值。国际上一般将叶绿素  $a$  浓度低于  $5 \mu\text{g/L}$  作为水体富营养化状况最优的参考阈值(Bricker *et al.*, 2003; Bricker *et al.*, 2007); 根据对厦门同安湾及厦门岛周边海域的研究表明: 当叶绿素  $a$  浓度高于  $10 \mu\text{g/L}$  时可能会发生赤潮现象; 当叶绿素  $a$  浓度大于  $15 \mu\text{g/L}$  时厦门同安湾易发生赤潮(蔡励勋, 2008; 汤荣坤等, 2009; 陈朝华等, 2011)。暂拟叶绿素  $a$  的评价标准如表 2。

表 2 叶绿素  $a$  评价标准  
Tab.2 Criteria of assessment on chlorophyll  $a$

序号	浓度( $\mu\text{g/L}$ )	出现频率	等级	赋分
1		高	高	1
2	$\text{chl } a > 15$	中	中高	2
3		低	中	3
4		很低	中低	4
5		高	中高	2
6	$5 < \text{chl } a \leq 15$	中	中	3
7		低/很低	中低	4
8		高	中低	4
9	$0 < \text{chl } a \leq 5$	中/低/很低	低	5

出现频率是指叶绿素  $a$  浓度值达到累积百分数 90% 对应值的站位分布情况; 高:  $> 50\%$ , 中:  $25\% - 50\%$ , 低:  $10\% - 25\%$ ; 很低:  $0 - 10\%$ 。

**2.2.2 底层溶解氧** 底层溶解氧含量对水体生物的生存十分重要, 目前国内外富营养化评价方法中均已将底层溶解氧作为富营养化评价指标。运用统计方法求出累积百分数 10% 对应值作为底层溶解氧浓度值并结合其出现频率进行评价。一般认为底层溶解氧浓度低于  $5 \text{mg/L}$  时, 底栖生物生存会受到胁迫; 底层溶解氧浓度低于  $2 \text{mg/L}$  时底栖生物和鱼类会发生死亡(王保栋等, 2012)。为与国际一致, 本文选用  $2 \text{mg/L}$  和  $5 \text{mg/L}$  分别作为最低和最高浓度阈值。暂拟底层溶解氧具体评价标准如表 3。

**2.2.3 赤潮** 港湾赤潮是一种海域内的生态失衡现象。赤潮的发生不但会导致海洋生物种群结构发生变化, 而且许多赤潮生物释放的有害毒素会导致海洋动物中毒死亡或生长繁殖受到影响, 甚至会伴随着食物链的富集威胁到人类健康。目前赤潮发生状况已被作为评价指标之一, 在观测到赤潮发生的情况下, 根据其发生的持续时间和发生频率进行评价, 赤

潮相关分级部分参考美国富营养化评价中的分级标准(Bricker *et al.*, 2003)及国内学者相关研究(王保栋等, 2012), 其具体评价标准见表 4。

表 3 底层溶解氧评价标准  
Tab.3 Criteria of assessment on dissolved oxygen at sea bottom

序号	浓度(mg/L)	出现频率	等级	赋分
1	DO≤2	高	高	1
2		中	中高	2
3		低	中	3
4		很低	中低	4
5	2<DO≤5	高	中高	2
6		中	中	3
7		低/很低	中低	4
8	DO>5	—	低	5

出现频率是指底层溶解氧浓度低于累积百分数 10%对应值的站位分布情况; 高: >50%, 中: 25%—50%, 低: 10%—25%; 很低: 0—10%。

表 4 赤潮发生状况评价标准  
Tab.4 Criteria of assessment on red-tide incidence

序号	持续时间	发生频率	等级	赋分
1	持续 1 月以上	周期性	高	1
2	累计 2 月以上	偶发性	高	1
3	持续 1 月之内	周期性	中高	2
4	累计 2 月之内	偶发性	中高	2
5	持续 2 周之内	周期性	中	3
6	累计 1 月之内	偶发性	中	3
7	持续 1 周之内	周期性	中低	4
8	累计 2 周之内	偶发性	中低	4
9	持续 3 天之内	周期性	低	5
10	累计 1 周之内	偶发性	低	5

周期性: 季节性、可预测性; 偶发性: 随机性、不可预测性。

### 2.3 水体富营养化响应

水体富营养化评价的主要意义在于向环境管理部门提供有效管理和改善水体环境质量的相关依据, 为达到实时性管理和针对性整治的目的, 预测评价海域水体未来几年内的富营养化响应趋势必不可少。本文拟结合厦门海域周边人口增长状况, 经济发展趋势, 污染物排放等相关因素分析预测营养盐入海通量变化趋势, 富营养化响应趋势评价如表 5 (Bricker *et al.*, 2003)。

### 2.4 确定富营养化最终级别

运用矩阵模型综合权衡上述三部分评价结果, 给出优、良、中、差和劣 5 种水体富营养化程度等级。理论上讲, 在 3 类指标及每类指标 5 种不同等级的前提下, 存在 125(5<sup>3</sup>)个不同组合, 但其中存在 31 种不符合实际情况的组合, 因而将其剔除(见表 6)(Bricker

表 5 水体富营养化响应评价标准  
Tab.5 Criteria of assessment on response to eutrophication

序号	等级	变化趋势	赋分
1	低	显著改善	5
2	中低	略有改善	4
3	中	维持不变	3
4	中高	略有恶化	2
5	高	高度恶化	1

表 6 水体富营养化程度划分矩阵表  
Tab.6 The assessment matrix for classification of overall eutrophic grade

等级	5	4	3	2	1	
P	低	中低	中	中高	高	
S	低	中低	中	中高	高	
R	显著改善	略有改善	维持不变	略有恶化	显著恶化	
指标	排列组合矩阵					最终等级
P	5 5 5 4 4 4					优 5%
S	5 5 5 5 5 5					
R	5 4 3 5 4 3					
P	5 5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3					良 19%
S	5 5 4 4 4 4 4 5 5 4 4 4 5 5 5 4 4 4					
R	2 1 5 4 3 2 1 2 1 5 4 3 5 4 3 5 4 3					
P	5 5 5 5 5 4 4 4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 2 2 1 1					中 32%
S	3 3 3 3 3 4 4 3 3 3 3 3 5 5 4 4 3 3 3 4 4 4 4 3 3 3 2 3 3					
R	2 1 5 4 3 2 1 5 4 3 2 1 2 1 2 1 5 4 3 5 4 3 2 1 5 4 3 5 5 4					
P	4 4 4 4 4 3 3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1					差 24%
S	2 2 2 2 2 3 3 2 2 2 2 2 3 3 2 2 2 2 3 3 3 2 2					
R	5 4 3 2 1 2 1 5 4 3 2 1 2 1 4 3 2 1 3 2 1 5 4					
P	3 3 3 3 3 2 2 2 2 2 1 1 1 1 1 1 1 1					劣 19%
S	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 1 1 1 1 1					
R	5 4 3 2 1 5 4 3 2 1 3 2 1 5 4 3 2 1					

P: 水体富营养化压力; S: 水体富营养化状态; R: 水体富营养化响应。

*et al.*, 2003)。水体富营养程度优级必须满足响应趋势不再恶化, 良级则仅需保证状态等级为低或中低, 中级主要是中或中低等级富营养化状态与压力及响应趋势的众多组合; 差级和劣级则包括压力与状态的一系列不良状况, 即使相应的响应趋势会发生改善。

## 3 评价结果与分析

### 3.1 富营养化压力评价

根据上述富营养化压力公式(1), 对厦门湾海域分区评价分析水体富营养化压力程度, 有助于针对性管理和区域性改善水体质量。厦门湾海域富营养化压力程度计算结果及年际变化趋势如图 2。

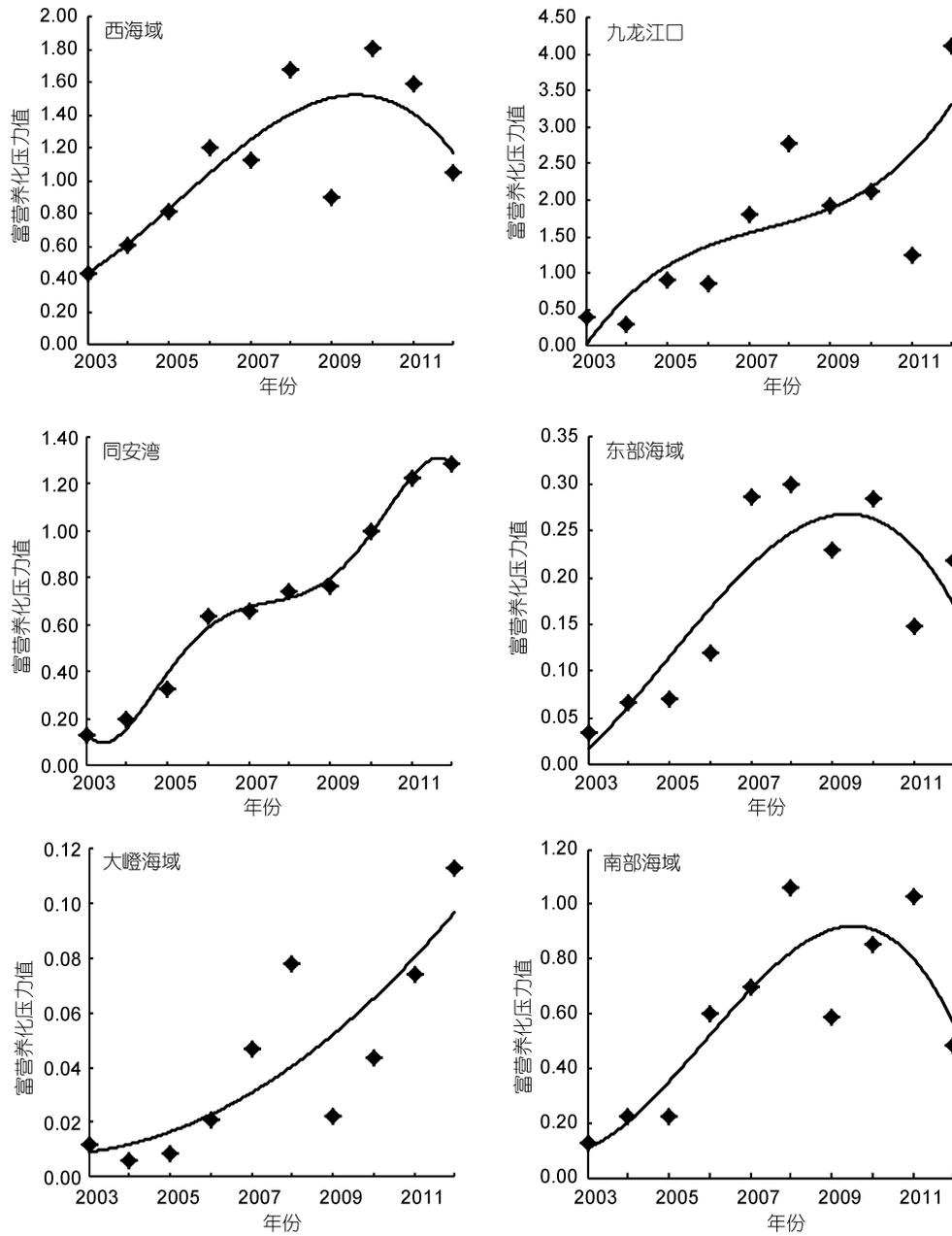


图2 厦门海域水体富营养化压力及年际变化趋势

Fig.2 Pressures and trends of eutrophication in Xiamen coastal waters

由图2可见, 2003—2012年厦门各海域富营养化压力状况随年际变化呈现不同程度的变化趋势。其中, 九龙江口水体富营养化压力状况最为恶劣, 总体呈上升趋势, 富营养化压力指数值介于0.29—4.12之间, 平均值为1.54, 富营养化压力等级为高, 其主要原因是受到九龙江上游超负荷营养盐径流的影响, 九龙江上游人口密度大、养殖业较多以及污染物排放量较大; 西海域水体富营养化压力呈现先上升再下降之势, 其压力值介于在0.43—1.68之间, 平均值为1.11, 富营养化压力等级为高, 主要原因一方面西海域

处于湾内半封闭型区域, 与外界水体交换动力很差, 污染物停留时间长, 另一方面是西海域周边人口密度较高, 环境压力较大, 且受九龙江高营养盐含量水体流入影响; 同安湾海域与西海域地理环境相似, 处于半封闭型区域, 其水体富营养化压力指数介于0.13—1.29之间, 总体均值为0.65, 总体等级为中高; 南部海域与外海水交换能力相对较强, 受污染程度略低, 为中等富营养化压力; 东部海域和大嶝海域水体与外海水交换条件良好, 水体停留时间较短, 周边人口密度较小, 受污染程度低, 水体富营养化压力等

级为低。厦门海域富营养化压力值介于 0.01—4.12 之间，总体均值为 0.68，富营养化压力等级为中高。湾外与湾内富营养化压力差异较大，这主要受地理环境因素、水动力条件、人口因素以及九龙江径流等多方面因素影响。西海域、东部海域和南部海域富营养化压力趋势均呈现先上升再下降的趋势，这可能与近几年来厦门海域周边环境整治有关，在一定程度上减缓了水体营养盐恶化趋势。同安湾海域富营养化压力则呈平缓上升趋势，尤其在 2010 年后达到高等级，这可能是由于该海域虽然经过整治与改善，但水体表征的响应速度较慢。大嶝海域富营养化压力虽然处于低等级，但其呈现明显的上升趋势。

### 3.2 富营养化状态评价

**3.2.1 叶绿素 a** 根据 2003—2012 年监测资料，对厦门海域叶绿素 a 含量进行累计统计分析，其浓度频次分布与累计百分数如图 3。分析结果表明：厦门海域叶绿素 a 累积百分数 90% 所对应的浓度值为 7.5 μg/L；叶绿素 a 浓度值达到或超出 7.5 μg/L 站位的出现频率为 9%，其分布主要集中于西海域和同安湾两个海域。根据表 2，厦门海域水体叶绿素 a 评价等级为中低级。

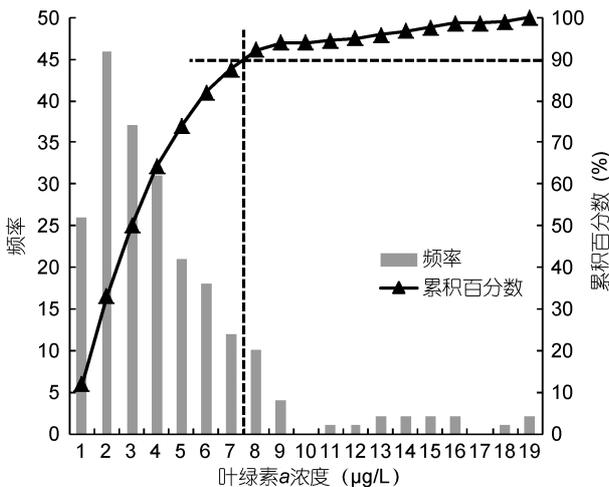


图 3 叶绿素 a 浓度分布频次与累积曲线

Fig.3 Frequency and the cumulative curve of the chlorophyll a values

**3.2.2 底层溶解氧** 根据 2003—2012 年监测资料，对厦门海域底层溶解氧含量进行累计统计分析，其浓度分布频率分布与累计百分数如图 4。分析结果表明：厦门海域底层溶解氧累积百分数 10% 所对应的浓度值为 4.96 mg/L；底层溶解氧浓度值低于 4.96 mg/L 站位的出现频率为 8%，其分布集中于西海

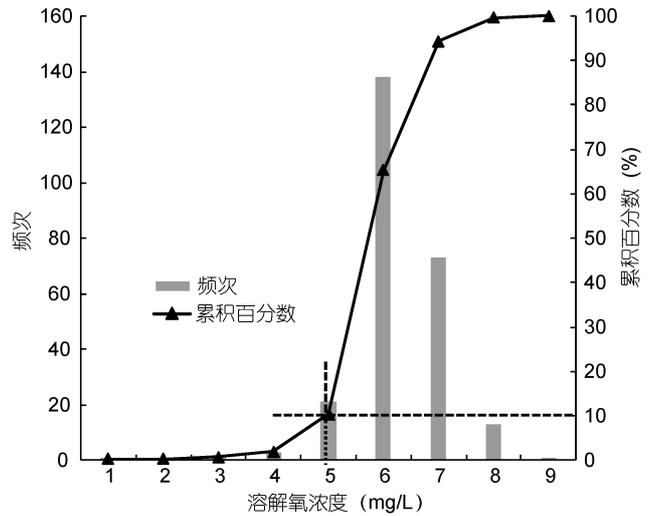


图 4 底层溶解氧浓度频次分布与累积曲线

Fig.4 Frequency and the cumulative curve of bottom dissolved oxygen values

域，个别站位出现于同安湾海域。根据表 3，厦门海域水体底层溶解氧评价等级为中低级。

**3.2.3 赤潮** 根据厦门市海洋环境质量公报(厦门市海洋与渔业局信息网, 2003—2012), 在 2003—2012 年间, 厦门海域有记录的赤潮发生次数为 53 起, 赤潮每年发生情况如图 5a, 其中 2003 年、2005 年、2006 年以及 2007 年是赤潮发生的高峰期, 发生赤潮的次数较多。厦门海域赤潮发生季节分布如图 5b, 夏季(6—8 月)发生的次数较多, 其他季节发生情况相对较少。每起赤潮暴发持续时间基本在 2 周之内, 年际间呈现一定的季节性变化。根据表 4 中判定标准, 厦门海域赤潮发生情况的评价等级为中级。

**3.2.4 确定富营养化状态结果** 在 2003—2012 年间, 厦门海域富营养化初级症状叶绿素 a 等级为中低级; 次级症状底层溶解氧等级为中低级, 赤潮发生状况等级为中级; 根据“一损俱损, 预防为主”的原则, 厦门海域富营养化状态的评价等级为中级。

### 3.3 富营养化趋势响应评价

厦门海域主要污染物来自九龙江及周边沿岸陆源排污点, 每年总无机氮入海通量及其年际变化率如图 6 所示, 2003—2012 年间厦门总无机氮入海通量呈现“上升—降低—上升—下降”的上下波动之势。根据全国第六次人口普查, 厦门人口数量迅速增长, 由 2000 年的 205.31 万人增长到 2010 年的 353.13 万人, 平均年增长率达 5.57%。厦门经济发展迅速, 国内生产总值由 2003 年的 759.69 亿元增长到 2012 年的 2817.07 亿元(图 7), 进入“十二五”时期以来, 2011 和

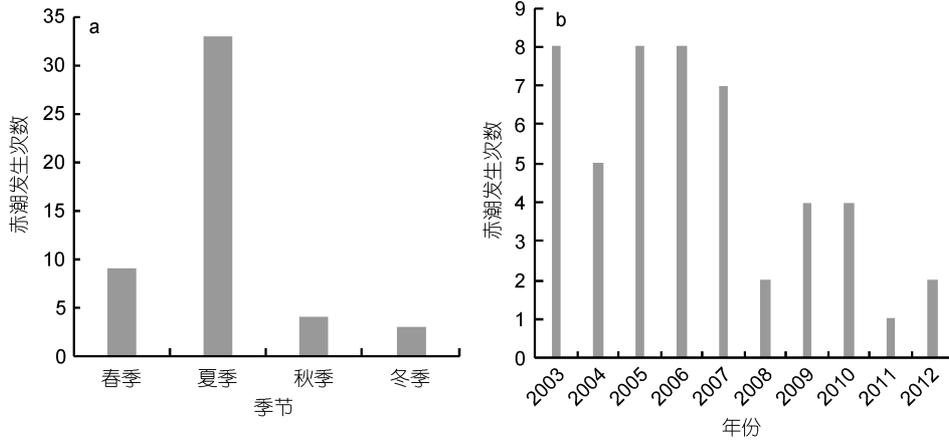


图 5 厦门海域不同季节(a)与年份(b)赤潮发生状况

Fig.5 Seasonal and annual variations of red tides in the Xiamen coastal waters

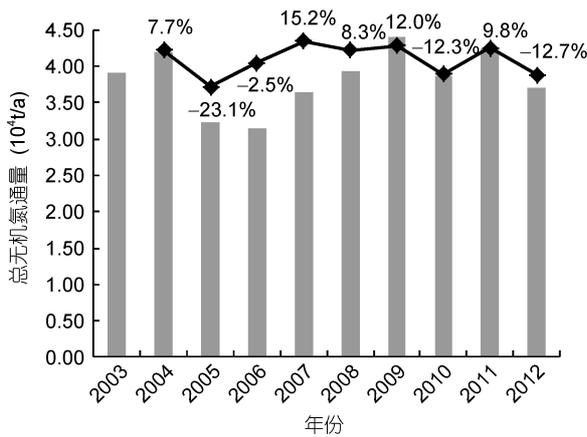


图 6 厦门海域 DIN 入海通量及年际变化

Fig.6 Flux and annual change of DIN in Xiamen coastal waters

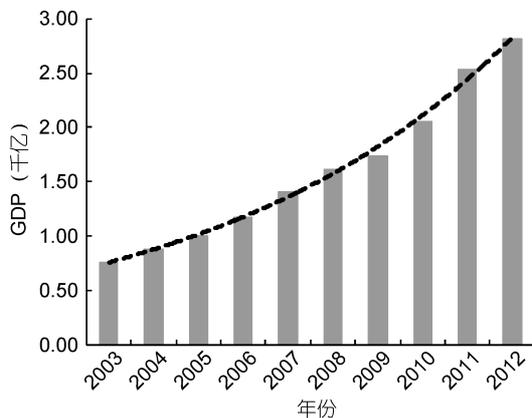


图 7 厦门市年际 GDP 及其增长趋势

Fig.7 GDP (gross domestic product) and its rising trend in Xiamen City from 2003 to 2012

2012 年厦门 GDP 增长率分别为 15.1% 和 12.1%，根据厦门市十二五规划纲要，预期 2015 年比 2010 年翻一番以上。经济的迅猛发展必然消耗大量能源和原材料，

导致污染物排放量增大；人口密度更为直观地体现了人口数量与环境质量的关系，人口密度影响环境的本质是高密度人口通过高强度的经济活动和资源利用对环境施加更大压力。但在加强厦门海域整治、污水处理厂建设、污水资源化、湿地修复和重建及重点流水环境综合整治和污染减排等政策的调控下，预计未来废水排放量与处理削减量基本持平，结合 2003—2012 年总无机氮入海趋势，未来一段时间内营养盐入海通量基本维持现状，根据表 5，厦门海域水体富营养化响应趋势等级为中级，预计未来几年内该海域富营养化症状基本不会发生变化。

### 3.4 富营养化状况综合评价结果

在 2003—2012 年间，厦门海域水体富营养化压力等级为中高级，富营养化状态等级为中级，富营养化未来响应趋势等级为中级，厦门海域水体富营养化的压力-状态-响应得分为 2-3-3，根据矩阵表 6，厦门海域水体富营养化综合评价等级为中级。

## 4 结论

(1) 厦门海域水体富营养化压力指数值为 0.68，处于中高等级。其中九龙江口区富营养化压力值为 1.54，呈明显上升趋势；西海域、东部海域和南部海域均呈现先上升再下降之势；同安湾海域呈平缓上升趋势，总体等级为中高；大嶼海域水体富营养化压力最低。

(2) 厦门海域富营养化初级阶段指标叶绿素 *a* 浓度为 7.5 μg/L，出现频率为 9%，初级症状等级为中低级；次级阶段指标底层溶解氧浓度为 4.96 mg/L，出现频率为 8%，其症状等级为中低级；历年赤潮暴发持

续时间在 2 周之内, 呈季节性变化, 其等级为中级。根据“一损俱损, 预防为主”的原则, 厦门海域水体富营养化状态等级为中级。

(3) 未来几年内, 厦门海域周边营养盐入海通量基本维持现状, 水体富营养化响应趋势等级为中级, 预计富营养化相关症状基本不会发生变化。

(4) 厦门海域水体富营养化的压力等级为中高, 状态和响应等级均为中等, 其水体富营养化综合状况等级为中等。其中, 西海域和九龙江口水体营养盐压力较大, 控制九龙江上游及西海域周边营养盐入海通量尤为重要。

### 参 考 文 献

- 王保栋, 2005. 河口和沿岸海域的富营养化评价模型. 海洋科学进展, 23(1): 82—86
- 王保栋, 孙 霞, 韦钦胜等, 2012. 我国近岸海域富营养化评价新方法及应用. 海洋学报, 34(4): 61—66
- 汤荣坤, 贺 青, 暨卫东等, 2010. 2005—2007 年厦门岛周边海域水体叶绿素含量的时空变化特征. 台湾海峡, 29(3): 342—351
- 吴 迪, 王菊英, 马德毅等, 2010. 基于 PSR 框架的典型河口富营养化综合评价方法研究. 海洋技术, 29(3): 29—32
- 陈 彬, 王金坑, 汤军健等, 2002. 福建湄洲湾海域营养状态趋势预测. 台湾海峡, 21(3): 322—327
- 陈朝华, 吴海燕, 陈克亮等, 2011. 近岸海域生态质量状况综合评价方法——以同安湾为例. 应用生态学报, 22(7): 1841—1848
- 林 昱, 林荣澄, 1999. 厦门西港引发有害硅藻水华磷的阈值研究. 海洋与湖沼, 30(4): 391—395
- 林 辉, 张元标, 2008. 厦门湾富营养化程度趋势变化研究. 台湾海峡, 27(3): 347—355
- 林 辉, 张元标, 陈金民, 2002. 厦门海域水体富营养化程度评价. 台湾海峡, 21(2): 154—161
- 国家环境保护局, 1997. GB3097-1997 海水水质标准. 国家环境保护局, 15—21
- 国家质量技术监督局, 2007a. GB17378.4-2007 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 1—162
- 国家质量技术监督局, 2007b. GB/T12763.4-2007 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, 1—65
- 国家质量技术监督局, 2007c. GB/T12763.9-2007 海洋调查规范 第 9 部分: 海洋生态调查指南. 北京: 中国标准出版社, 1—23
- 郑爱榕, 蔡明红, 张珞平等, 2000. 厦门同安湾水质状况评价. 海洋环境科学, 19(2): 46—49
- 屠建波, 王保栋, 2006. 长江口及其邻近海域富营养化状况评价. 海洋科学进展, 24(4): 532—538
- 厦门市海洋与渔业局信息网, 2013. 厦门市海洋环境质量公报 (2003—2012). 厦门: 厦门市海洋与渔业局
- 蔡励勋, 2008. 厦门同安湾海域赤潮期间叶绿素变化的若干典型特征. 海洋环境科学, 27(4): 331—334
- 暨卫东, 黄自强, 黄尚高等, 1996. 厦门西海域水体富营养化与赤潮关系研究. 海洋学报, 18(1): 51—60
- 张景平, 黄小平, 江志坚等, 2009. 2006 - 2007 年珠江口富营养化水平的季节性变化及其与环境因子的关系. 海洋学报, 31(3): 113—120
- Bricker S B, Ferreira J G, Simas T C, 2003. An integrated methodology for assessment of estuarine trophic status. Ecological Modelling, 169(1): 46—49
- Bricker S B, Longstaff B, Dennison W *et al*, 2007. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries: a decade of change, national estuarine eutrophication assessment update. NOAA Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No.26. National Centers for Coastal Ocean Science, Silver Spring, MD 20910, USA: 328
- Ferreira J G, Bricker S B, Simas T C, 2007. Application and sensitivity testing of a eutrophication assessment method on coastal systems in the systems in the United States and European Union. Environment Management, 82(4): 433—445
- Ferreira J G, Andersan J H, Borja A *et al*, 2011. Overview of eutrophication indicators to assess environmental status within the European Marine Strategy Framework Directive. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 93(2): 117—131
- Garmendia M, Bricker S B, Revilla M *et al*, 2012. Eutrophication assessment in Basque estuaries: comparing a north American and a European method. Estuaries and Coasts, 35(4): 991—1006
- Nobre A M, Ferreira J G, Newton A *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
- United States Environmental Protection Agency, 2012. National Coastal Condition Report IV. United States Environmental Protection Agency Office of Research and Development, Office of Water Washington, EPA-842-R-10-003
- Xiao Y, Ferreira J, Bricker S *et al*, 2007. Trophic assessment in Chinese coastal systems—review of methods and application to the Changjiang(Yangtze) Estuary and Jiaozhou Bay. Estuaries and Coasts, 30(6): 901—918

## ASSESSMENT OF EUTROPHICATION STATUS IN XIAMEN COASTAL WATERS

JIANG Rong-Gen, HE Qing, KUANG Wei-Ming, JI Wei-Dong  
(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

**Abstract** Using long-term monitoring data from 2003 to 2012, we built an integrated and suitable method for the assessment of Xiamen coastal waters based on American Phase II assessment procedures with modifications for Chinese situations. We studied the eutrophication pressure, analyzed the grade of overall eutrophic conditions including primary and secondary symptoms, and predicted the response trend in relationship to the economy, population, and nutrient input fluxes. The results show that, the integrated eutrophic grade in Xiamen coastal waters was moderate, the eutrophication pressure was moderate to high, and the degree of eutrophication status and response were both moderate. The results are comprehensive, which not only reflect the overall degree of eutrophication but also contribute to the management for effective monitoring on the environment quality of the Xiamen coastal waters.

**Key words** Xiamen sea area; eutrophication; integrated assessment; Pressure-Status-Response