

深圳近海海域营养现状分析与富营养化水平评价

戴纪翠^{1,2}, 高晓薇^{1,2}, 倪晋仁^{1,2*}, 尹魁浩³

(1. 北京大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 北京大学水沙科学教育部重点实验室, 北京 100871; 3. 深圳市环境科学研究院, 深圳 518001)

摘要: 根据 2002~2007 年对深圳近海海域水质的调查资料, 阐述了深圳近海 9 个研究区域营养盐的时空变化特征, 研究了营养盐氮、硝氮、亚硝态氮及磷酸盐和环境因子的相关关系, 并利用有机污染指数、富营养化指数和潜在的富营养化对海域进行了评价。结果表明, 深圳西部海域营养盐水平远高于东部海域, 其中 2002 年和 2006 年营养盐的污染水平相对较高。东部海域水体中磷酸盐和无机氮的多年平均值为 0.007 mg/L 和 0.078 mg/L, 而西部海域则分别高达 0.090 mg/L 和 1.544 mg/L。营养盐与 pH 和盐度等环境因子呈显著的负相关关系。研究区域的 N/P 多数大于 Redfield 比值, 属于严重的磷缺乏区域。富营养化评价表明, 深圳东部海域的富营养化程度远远小于西部海域, 东部海域的富营养化指数 6 a 平均值为 0.11, 而西部海域则为 42.15, 基本上属于磷限制中度潜在性富营养化区, 个别海域已达到磷限制潜在性富营养化状态。

关键词: 深圳近海; 营养盐; 富营养化; 评价

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)10-2879-05

Status Analysis of Nutrients and Eutrophication Assessment in Shenzhen Coastal Waters

DAI Ji-cui^{1,2}, GAO Xiao-wei^{1,2}, NI Jin-ren^{1,2}, YIN Kui-hao³

(1. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Shenzhen Academy of Environmental Science, Shenzhen 518001, China)

Abstract: Based on the field data of Shenzhen coastal water quality in 2002-2007, variation characteristics of nutrients including NH_4^+-N , NO_3^--N , NO_2^--N , $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ and DIN were presented. And the correlations between nutrients and pH, salinity were also investigated. Furthermore, eutrophication index (E), organic pollution index (A) and potential eutrophication were employed to assess the eutrophication degree of Shenzhen coastal waters. Results show that the nutrient levels of east coast are higher than that of west coast. And the peak year of nutrients are 2002 and 2006. The average concentrations of $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ and DIN are 0.007 mg/L and 0.078 mg/L for Shenzhen east coast while 0.090 mg/L and 1.544 mg/L for west coast. Nutrients in Shenzhen coastal waters have negative correlations with pH and salinity. The N/P ratios are all far more than 16 indicating that Shenzhen coast belongs to seriously P-limiting water. Eutrophication degree of Shenzhen east coast is far lower than that of west coast, and the average eutrophication index of east coast is 0.11 while 42.15 for west coast. Furthermore, west coast is classified as P-limiting moderate level potential eutrophication area and even as P-limiting potential eutrophication level.

Key words: Shenzhen coast; nutrients; eutrophication; assessment

近岸海域是陆海相互作用的耦合带和生产力最高的区域, 经济的高速发展给这些区域的环境带来了巨大的污染负荷和压力, 在受到地表径流、工业废水及生活污水和海水养殖等人类活动的影响下, 近岸海域环境污染问题日益严峻, 其中富营养化已经成为沿海国家的一个重要的水环境问题, 并引起了人们的广泛关注, 成为当前水污染防治与控制的重要课题与研究重点^[1,2]。

深圳位于我国广东省南部沿海, 东临大鹏湾、大亚湾, 西连珠江口伶仃洋, 是我国快速工业化和城市化的典型区域, 当地经济的迅速发展对环境造成了巨大压力, 尤其是人类活动对深圳近海环境的影响日益加剧, 富含氮、磷营养盐的工农业废水的大量排放使深圳近海海域营养盐结构发生了很大变化, 同

时导致局部海域赤潮频频发生。很多学者从不同的角度对深圳近海海域的重金属、有机污染和营养化等方面进行了研究^[3~5], 并针对问题提出了治理的对策和建议, 但较少涉及到海域的富营养化现状和水平的研究和综合评价, 尤其是缺乏多年的数据积累。本研究通过对 2002~2007 年 6 a 的监测资料的统计和分析, 对深圳近海海域的营养现状和富营养水平进行了分析和评价, 以为该海域的赤潮研究以及富营养化密切相关的其他污染问题研究提供依据。

收稿日期: 2008-11-12; 修订日期: 2009-02-20

基金项目: 中国博士后科学基金项目(200800440246); 深圳市环保局环境科研专项资金项目

作者简介: 戴纪翠(1977~), 女, 博士后, 主要研究方向为环境质量评价, E-mail: daijc@szpku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: nijinren@iee.pku.edu.cn

1 材料与方法

深圳市环境保护局每年对深圳近岸海域水质和浮游植物分枯、丰、平三水期进行监测,每期监测一次。收集了 2002~2007 年深圳近海 9 个海域的营养盐等相关数据,主要包括氨氮 NH_4^+-N 、硝酸态氮 NO_3^--N 、亚硝酸态氮 NO_2^--N 、磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 、pH、盐度以及浮游植物等相关数据。深圳海域包括深圳湾西北部沿岸、珠江口东南部沿岸、大鹏湾北部和东部沿岸及大亚湾西部沿岸 4 个海区。由于受到香港半岛的阻隔,深圳海域东西部水体交换甚少,因此根据地理位置将深圳海域分为东西部 2 个海域,东部海域包括大鹏湾北部和东部及大亚湾西部,西部海域包括深圳湾北部和珠江口东南部,具体监测的站位如图 1 所示。深圳海域的水质状况基本上保持良好,以 2007 年为例,严重污染海域依然主要分布在深圳湾和珠江口近岸局部海域,主要污染物是无机氮、活性磷酸盐和石油类。主要入海污染物氨氮、磷酸盐、化学耗氧量的年均值超出国家地表水环境质量标准(GB 3838-2002)的四类水质标准,其余监测指标均达到国家地表水环境质量标准的一类或二类水质标准^[6]。



Fig.1 Sampling sites of Shenzhen coast for water quality

2 结果与讨论

2.1 营养盐变化特征分析

2.1.1 氮磷的时空变化特征

表 1 列出的是深圳东西部海域各营养盐的含量变化。可以看出,调查海域水体中营养盐的含量较高,而且时空变化较大。磷酸盐、硝氮、氨氮、亚硝酸态氮和无机氮的含量均是西部海域大于东部海域,而西部海域尤以深圳湾中部区域各项营养盐的含量

最高,其次是深圳湾出口和固戍近海。东部海域水体中的磷酸盐和无机氮基本上能达到一类水质标准,而西部海域水体中各营养盐的含量已经远超一类水质标准。东部海域中沙头角湾口的营养盐含量最高,其他西部海域之间营养盐的含量相差不大。深圳东部海域是黄金旅游岸线,政府和环保部门在污染控制方面有较好的监管措施,而西部海域接收来自于关内的罗湖、福田、南山和关外的宝安区的污染物,入海污染物通量较大^[5]。其中深圳湾由于是一个半封闭的海湾,与外海水体交换能力较弱,越靠近湾顶交换能力越弱,而固戍近海还受到珠江口入海污染物的影响。因此无机氮、磷酸盐等污染物的含量在西部海域普遍高于东部海域。从营养盐的年度变化来看,在调查的 6 a 中,2006 年和 2002 年 2 个年份无机氮和磷酸盐的含量较高,污染程度较重。

表 1 深圳近海海域营养盐的年度变化/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Annual change of nutrients in Shenzhen coastal waters/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$						
区域	年份	$\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$	NH_4^+-N	NO_2^--N	NO_3^--N	DIN
东部海域	2002	0.010	0.055	0.008	0.065	0.128
	2003	0.003	0.035	0.001	0.020	0.056
	2004	0.002	0.020	0.002	0.019	0.041
	2005	0.003	0.013	0.004	0.050	0.066
	2006	0.012	0.070	0.005	0.023	0.099
	2007	0.010	0.042	0.007	0.031	0.080
	平均值	0.007	0.039	0.005	0.035	0.078
西部海域	2002	0.071	0.466	0.176	0.928	1.571
	2003	0.104	0.599	0.150	0.693	1.442
	2004	0.069	0.450	0.210	0.788	1.448
	2005	0.066	0.366	0.234	0.779	1.379
	2006	0.129	0.458	0.264	1.148	1.870
	2007	0.103	0.435	0.298	0.823	1.555
	平均值	0.090	0.462	0.222	0.860	1.544

由于氮和磷分别以可溶无机态、可溶有机态和悬浮颗粒态赋存于水体中,其中可溶无机磷主要形态是活性磷酸盐,可溶无机氮则以硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐存在。就无机氮的组分而言,研究区域都以 NO_3^--N 为主,平均比例为 49%,其次是 NH_4^+-N ,平均比例为 41.6%,比例最小的是 NO_2^--N 。海水中的 NO_3^--N 是化合物的无机氮中(热力学上)的稳定形式,而氨氮在深圳近海水体中的含量也较高,这与该海域受到生活污水的影响有关,因为生活污水中一般都含有高浓度的氨氮^[7]。

N/P 是考察营养盐结构的主要指标^[8,9]。浮游植物通过光合作用以一定比例吸收海水中营养元素构成植物细胞原生质,同时释放一定量的氧气。正常的 N/P 值为 16 (Redfield 比值),N/P 值低于 16,表

明藻类的生长受氮限制;而 N/P 值高于 16,则表明是磷限制^[10].除东部海域的部分年份和部分海域外,深圳西部海域水体中 N/P 值大都大于 16,说明浮游植物光合作用受 N 限制的可能性极小,绝大部分海域主要是受 P 的限制.过量的 N 及高 N/P 值特性且持续升高的趋势使这一海域生态系统对 P 的浓度变化十分敏感,营养结构将向着更加不平衡的方向演变,这可能是近 20 年来这一地区富营养化程度加剧、赤潮频发的主要原因.这也反映在海洋浮游植物的群落结构上,一般来说,硅藻和甲藻是海洋浮游植物群落中的基本组成部分,两者的数量变动对浮游植物群落结构和海洋生态环境的维持起着十分重要的作用^[11~13].高的甲藻比例预示着甲藻可以大量生长而导致赤潮的暴发^[14].高的氮、磷比可能会降低硅藻的竞争力,使得甲藻比硅藻更占有优

势,进一步恶化环境^[15].随着 N/P 值的增大,深圳近海海域水体中由以硅藻为绝对优势转变为硅藻和甲藻的联合占优,甲藻在显著地增加.以深圳湾中为例,在 2003 年和 2004 年 2 个年份里,浮游植物的优势种分别是硅藻属的膝沟藻(2003 年)和具尾鳍藻、中肋骨条藻(2004 年),而在 2006 年则以甲藻门中的多纹膝沟藻为优势浮游植物种.

2.1.2 营养盐与 pH 和盐度的相关性分析

营养盐的赋存状态与其他水体环境因子之间存在着双向的内在联系.水体的环境因子影响着营养盐的水平和赋存状态,而营养盐的水平和状态的改变将在一定程度上改变水体的理化性质,进而影响着水体中其他物质的形态分布^[16].对深圳近海的氨氮、硝氮、亚硝氮、无机氮和磷酸盐与 pH 和盐度(S)的相关性进行了研究,结果如表 2 所示.

表 2 各项因子与 pH 和盐度的相关关系

Table 2 Correlationship between nutrients and pH, salinity

	PO ₄ ³⁻ -P	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	DIN	pH	S
PO ₄ ³⁻ -P	1.00						
NH ₄ ⁺ -N	0.92	1.00					
NO ₂ ⁻ -N	0.87	0.77	1.00				
NO ₃ ⁻ -N	0.64	0.52	0.85	1.00			
DIN	0.86	0.81	0.95	0.92	1.00		
pH	-0.74	-0.70	-0.82	-0.84	-0.88	1.00	
S	-0.72	-0.59	-0.89	-0.96	-0.93	0.85	1.00

从表 2 可以看出,营养盐与盐度和 pH 都呈显著的负相关,其中与硝酸盐的负相关最为显著,说明深圳近海的营养盐主要来自陆源径流的输送,同时也说明低盐高营养盐的大陆沿岸水与高盐低营养盐的外海水交错混合过程中,营养盐的浓度随着盐度的增加被稀释而降低.而各营养盐的含量随 pH 的增大而降低,因为浮游植物进行光合作用,吸收水体中的营养盐,同时消耗水中的 CO₂ 导致 pH 值升高^[17],因而两者之间呈负相关.另外,各营养盐之间大都呈正相关,说明深圳近海营养盐水平受到陆源输入的影响比较大,各营养盐的来源大致相同.

2.2 富营养水平评价

人类活动引起的营养盐输入通量的增加和营养盐比值的改变是造成河口及沿岸海域富营养化的根源.目前评价海水富营养化程度的模型和方法较多,本研究采用有机污染指数(A)、富营养化指数(E)和潜在的富营养化对深圳近海的 9 个研究区域进行评价.

2.2.1 有机污染指数(A)

近年来,我国各海域赤潮频繁发生,与有机污染

物负荷增加有重要的关系^[18].海水有机污染评价指数法综合考虑了海水的有机污染和无机污染指标,利用 COD、DIN、DIP、DO 4 个水质指标对海水质量状况进行评价,能反映水质的整体状况^[19].其计算公式为:

$$A = \frac{COD_j}{COD_s} + \frac{DIN_j}{DIN_s} + \frac{DIP_j}{DIP_s} + \frac{DO_j}{DO_s}$$

(1)

式中,A 为有机污染指数;COD_j、DIN_j、DIP_j 和 DO_j 分别为相应要素的实测值;COD_s、DIN_s、DIP_s 和 DO_s 分别为相应要素的一类海水水质标准值.

海水的有机污染指数与对应的污染程度级别见表 3.深圳近海海域的有机污染指数如表 4 所示.

由表 3 和表 4 可以看出,西部海域的有机污染指数远远大于东部海域,东部海域在各个年份基本上都在清洁的范围内,东部海域以沙头角湾口的污染程度最大,部分年份已属轻度污染,西部海域的有机污染程度级别均属于严重污染的程度,深圳湾中部海域的有机污染指数最高,其次是固戍近海.从年际变化特征来看,在 2006 年有机污染指数最大,污染最重.

表 3 海水有机污染与海水营养水平分级

Table 3 Grade for organic pollution and nutrient level of sea water

项目	I	II	III	IV	V	VI
有机污染指数(A)	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	>4
污染程度	优良	清洁	较清洁	轻度污染	中度污染	严重污染
富营养化指数(E)	0~0.25	0.25~0.5	0.5~0.75	0.75~1.0	>1	>2
营养水平	低贫营养	贫营养	中营养	中高营养	富营养	高富营养

表 4 深圳近海海域的富营养化指数和有机污染指数

Table 4 Eutrophication index and organic pollution index of Shenzhen coastal area

位置	富营养化指数(E)						有机污染指数(A)					
	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
核电近海	0.20	0.01	0.01	0.03	0.09	0.09	0.54	-0.41	-0.33	-0.16	0.18	0.36
东西冲近海	0.01	0.05	0.01	0.02	0.10	0.06	-0.26	-0.04	-0.37	-0.23	0.20	0.01
下沙近海	0.15	0.01	0.02	0.01	0.14	0.06	0.41	-0.42	-0.13	-0.35	0.46	0.13
乌泥湾湾口	0.20	0.02	0.13	0.04	0.13	0.06	0.54	-0.28	0.20	-0.09	0.40	-0.11
小梅沙湾口	0.31	0.03	0.01	0.08	0.21	0.04	0.64	-0.21	-0.17	0.16	0.67	-0.08
沙头角湾口	0.77	0.13	0.27	0.03	1.95	0.70	1.62	0.25	0.67	-0.28	2.53	1.74
东部海域	0.28	0.02	0.03	0.04	0.20	0.11	0.65	-0.26	-0.14	-0.14	0.57	0.28
深圳湾中	88.13	161.9	79.69	59.12	123.0	94.96	17.67	24.57	15.96	16.60	23.52	22.13
深圳湾出口	13.20	12.16	14.64	7.68	57.31	12.16	8.15	7.48	7.16	7.07	15.63	8.50
固戍近海	21.14	22.61	31.08	16.88	34.74	19.69	10.86	9.65	11.86	8.96	13.78	11.86
西部海域	33.71	46.99	38.19	24.07	72.91	37.02	12.26	13.90	11.68	10.86	17.64	14.21

2.2.2 富营养化指数(E)

采用目前国内常用的富营养化公式评价深圳海域富营养化状况. 富营养化指数的计算公式为^[20]:

$$E = \frac{\text{COD} \times \text{DIN} \times \text{DIP}}{4\,500} \times 10^6 \tag{2}$$

式中, E 为富营养化指数; COD 为化学需氧量(mg/L); DIN 为无机氮含量(mg/L); DIP 为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 含量(mg/L). 当 $E > 1$ 时, 表明水体呈富营养化, E 值越高, 水体富营养化程度越严重. 表 3 和表 4 列出的是富营养化指数对应的污染程度和深圳近海海域的富营养化指数. 从表 4 可以看出, 深圳近海的富营养化程度与有机污染指数评价的结果类似, 东部海域基本上处于低贫营养和贫营养的状态, 尤以沙头角湾口的程度最高, 而西部海域已经处于高富营

养化的程度, 其中深圳湾中海域富营养化指数在 2006 年和 2003 年甚至超过 100, 富营养化程度非常高, 这也与西部海域大量输入的陆源污染物和水动力条件有关^[5].

2.2.3 潜在性富营养化评价

一般海水中正常的 N/P 值为 16:1, 浮游植物大约以 16:1 的比例从海水中摄取 N 和 P, 因此必然有一部分氮(对磷限制水体而言)或磷(对氮限制水体而言)相对过剩. 根据传统的海水富营养化评价标准, 这部分过剩的营养盐将导致海区的营养化水平提高, 但实际上它们并不能被浮游植物利用, 并没有对实质性的富营养化作贡献^[21]. 本研究根据郭卫东等^[22]提出的以氮、磷营养盐作为评价参数的新富营养化评价模式(表 5)对深圳近海的潜在的富营养化

表 5 潜在的富营养化评价

Table 5 Potential eutrophication assessment standard

级别	营养级	DIN/mg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁻ /mg·L ⁻¹	N/P
I	贫营养	<0.2	<0.03	8~30
II	中度营养	0.2~0.3	0.03~0.045	8~30
III	富营养	>0.3	>0.045	8~30
IV _P	磷限制中度营养	0.2~0.3	—	>30
V _P	磷限制中度潜在性富营养	>0.3	—	30~60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>0.3	—	>60
IV _N	氮限制中度营养	—	0.03~0.045	<8
V _N	氮限制中度潜在性富营养	—	>0.045	4~8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>0.045	<4

水平进行评价。

对深圳近海的 N/P、无机氮和磷酸盐的分析表明,东部近海海域基本上处于贫营养状态,西部海域基本上处于磷限制中度潜在性富营养区,其中固戍近海除 2003 年为磷限制中度潜在性富营养外,其他年份均属于磷限制潜在性富营养区,深圳湾出口除 2002 年和 2006 年 2 个年份是磷限制潜在性营养区,其他 4 个年份均是磷限制中度潜在性富营养,而深圳湾湾口海域大致属于磷限制中度潜在性富营养化区和富营养化区。

3 结论

(1) 2002~2006 年深圳近海营养盐调查结果的 分析表明,深圳近海营养盐的大小基本上是西部海 域大于东部海域,其中 2002 年和 2006 年 2 个年份营 养盐的含量最高,海域污染较重。无机氮的主要组 成部分是硝氮 NO_3^- -N 和氨氮 NH_4^+ -N, NO_2^- -N 只占较 小的比例。N/P 远高于 Redfield 比值,属于严重的磷 缺乏型区域。营养盐与 pH 和盐度等环境因子有着 较密切的关系。

(2) 有机污染指数和富营养化指数的研究表 明,深圳西部海域的富营养化程度远大于东部海域, 其中东部海域以沙头角湾口、西部海域以固戍近海 为富营养化程度较高的海区。

(3) 潜在性富营养化研究表明,深圳东部海域 基本上处于贫营养状态,而西部海域则基本上属于 磷限制中度潜在性富营养化区。

参考文献:

[1] Nixon S W. Coastal eutrophication: A definition, social causes and future concerns [J]. *Ophelia*, 1995, **41**: 199-220.

[2] 黄小平,黄良民. 珠江口海域无机氮和活性磷酸盐含量的时空变化特征[J]. *台湾海峡*, 2002, **21**(4): 416-421.

[3] 丘耀文,张干,郭玲利,等. 深圳湾生态系统多环芳烃(PAHs)特征及其生态危害[J]. *环境科学*, 2007, **28**(5): 1056-1061.

[4] 刘文新,李向东. 深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(3): 305-309.

[5] 郭伟,朱大奎. 深圳围海造地对海洋环境影响的分析[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2005, **41**(3): 286-296.

[6] 深圳市海洋局. 2007 年深圳市海洋环境质量公报[R]. 深圳: 深圳市海洋局, 2007.

[7] 孙丕喜,张朝晖,郝林华,等. 桑沟湾海水中营养盐分布及潜在性富营养化分析[J]. *海洋科学进展*, 2007, **25**(4): 436-445.

[8] 彭云辉,孙丽华,陈浩如,等. 大亚湾海区营养盐的变化及富营养化研究[J]. *海洋通报*, 2002, **21**(3): 44-48.

[9] 郑丙辉,秦延文,孟伟,等. 1985~2003 年渤海湾水质氮磷生源要素的历史演变趋势分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(3): 494-499.

[10] Yu Z G, Zhang J, Yao Q Z, *et al.* Nutrients in the Bohai Sea [A]. In: Hong G H, Zhang J, Chung C S (eds). *Biogeochemical process in the Bohai and Yellow sea* [C]. Seoul: The Dongjin Publication Association, 1999. 11-20.

[11] 吴玉霖,孙松,张永山,等. 胶州湾浮游植物数量长期动态变化的研究[J]. *海洋与湖沼*, 2004, **35**(6): 518-523.

[12] Riegman R. Nutrient related selection mechanisms in marine phytoplankton communities and the impact of eutrophication on the planktonic food web [J]. *Water Science Technology*, 1995, **32**(4): 63-75.

[13] 王朝晖,陈菊芳,徐宁,等. 大亚湾澳头海域硅藻、甲藻的数量变动及其与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2005, **36**(2): 186-192.

[14] 孙军,刘东艳,杨世民,等. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 2002, **33**(5): 461-471.

[15] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, **16**(3-4): 191-198.

[16] 龙爱民,陈绍勇,田正隆. 珠江口及近海水体中铜的含量和形态分布及其与营养盐的空间分布关系[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(4): 10-13.

[17] 王玉衡,蒋国昌,董恒霖. 春季浙江南部海区溶解氧、pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究[J]. *海洋学报*, 1990, **12**(5): 654-660.

[18] 覃秋荣,龙晓红. 北海市近岸海域富营养化评价[J]. *海洋环境科学*, 2000, **19**(2): 43-45.

[19] 陈于望,王宪,蔡明宏. 湄洲湾海域营养状态评价[J]. *海洋环境科学*, 1999, **18**(3): 39-43.

[20] 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[J]. *海洋环境科学*, 1983, **2**(2): 41-53.

[21] 曲丽梅,姚德,丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价[J]. *环境科学*, 2006, **27**(2): 263-267.

[22] 郭卫东,章小明,杨逸萍,等. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. *台湾海峡*, 1998, **17**(1): 64-70.