

# 海阳海域营养盐的空间分布及其对浮游植物生长的潜在性限制评价

刘晓丹<sup>1</sup>, 张锬<sup>1</sup>, 刘淑君<sup>1</sup>, 邬思齐<sup>2</sup>

(1. 自然资源部北海调查中心 青岛 266000; 2. 郑州大学 郑州 450000)

**摘要:** 根据2019年该海域海水营养盐四季的调查数据, 文章分析了营养盐质量浓度和空间分布特征, 并评价了氮、磷、硅营养盐对浮游植物生长的制约因素。结果表明, 海阳海域溶解无机氮(DIN)的主要形式是 $\text{NO}_3^-$ -N, 其次为 $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N质量浓度最低, 冬季的DIN质量浓度显著高于其他季节。夏秋季 $\text{PO}_4^{3-}$ -P质量浓度高于冬春季, 冬季表层 $\text{PO}_4^{3-}$ -P质量浓度最低。夏秋季 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si质量浓度显著低于冬春季节。不同季节中, DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P、 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si质量浓度高值区主要分布在近岸海域、乳山湾口门外以及离岸10~15 km区域, 整体呈现由近岸向远岸质量浓度递减趋势。潜在富营养化评价表明, 海阳海域基本处于贫营养状态, 冬季则处于磷限制中度营养状态。文章系统阐述了海阳海域营养盐的空间分布及潜在的限制性, 为该海域水质监测管理提供了基础数据支撑。

**关键词:** 营养盐; 空间分布; 限制因子

中图分类号: X508; P734; Q178

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2026)02-0112-10

## Spatial Distribution of Nutrients and the Potential Limitation for Phytoplankton Growth in the Coastal Waters of Haiyang

LIU Xiaodan<sup>1</sup>, ZHANG Kun<sup>1</sup>, LIU Shujun<sup>1</sup>, WU Siqu<sup>2</sup>

(1. North China Sea Survey Center, MNR, Qingdao 266000, China;

2. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Based on the 2019 seasonal survey data of seawater nutrients, this study analyzed the concentration characteristics and spatial distribution patterns of nutrients, and assessed the limiting effects of nitrogen, phosphorus, and silicon nutrients on phytoplankton growth in the study area. The results indicated that nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3^-$ -N) was the dominant component of dissolved inorganic nitrogen (DIN), followed by ammonium nitrogen ( $\text{NH}_4^+$ -N), while nitrite nitrogen ( $\text{NO}_2^-$ -N) had the lowest concentration. The DIN concentration in winter was significantly higher than that in other seasons. For phosphate phosphorus ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P), its concentrations in summer and autumn were higher than those in spring and winter, with the minimum concentration recorded in winter; The concentration of silicate silicon ( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si) in summer and autumn was significantly lower than that in spring and winter. In terms

收稿日期: 2025-09-25; 修订日期: 2026-01-23

作者简介: 刘晓丹, 高级工程师, 硕士, 研究方向为海域海岛空间规划与保护利用

通信作者: 刘淑君, 高级工程师, 研究方向为海洋环境调查

of spatial distribution, the high-concentration zones of DIN,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , and  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  across different seasons were mainly distributed in the nearshore area, the outer entrance of Rushan Bay, and the offshore region 10 ~ 15 km from the shore, with concentrations exhibiting a decreasing trend from nearshore to offshore areas. Analysis of nutrient potential limitation revealed that the coastal waters of Haiyang were basically oligotrophic, except for being moderately phosphorus-limited in winter. This study systematically elaborated on the spatial distribution characteristics and potential limiting effects of nutrients in the coastal waters of Haiyang, providing fundamental data support for water quality monitoring and management in this sea area.

**Keywords:** Nutrients, Spatial distribution, Limiting factors

## 0 引言

海水营养盐是海水中溶解的、为海洋浮游植物生长和繁殖所必需的各种无机盐类,是海洋食物链的基础和起点。受陆源输入、大气沉降、海水内部循环、海洋中生命活动、有机物分解等影响,海水中营养盐的分布和浓度随近岸与远海、高纬度与低纬度、垂直深度以及季节变化会发生较大的变化。营养盐在海水中的分布和浓度反过来也会对生物量、生物多样性和生态系统结构,特别是浮游植物的群落结构产生影响<sup>[1-3]</sup>。海水中营养盐的来源包括大陆径流的输入、海底热液作用、大气沉降、海洋生物的分解等<sup>[4]</sup>。近海生态系统受到陆源输入和人类活动的强烈影响,水体中营养盐含量及结构的变化可较好地反映海区内的生态环境状况<sup>[5-6]</sup>。近岸海域营养盐的分布和变化不仅直接影响海洋生物生产力和生物资源的变动,还能够直接反映海域受人类影响的富营养化状况,是评价海域环境状况的重要指标。

关于山东近岸海域营养盐的研究文献很多,目前主要集中于胶州湾<sup>[7]</sup>、莱州湾<sup>[8]</sup>、丁字湾<sup>[9]</sup>等典型海湾。阐明海水中营养盐的含量和分布规律,对生态保护、修复和海域资源环境管理方面起重要作用,可为海域水质监测和水产养殖管理提供科学依据。

本研究的核心目的是系统了解海阳海域营养盐的时空分布特征及其生态效应。主要采用了现场调查与数据分析相结合的方法,探究了以下3个方面的内容:营养盐的浓度与形态、空间分布特征和限制性因素评价。通过上述研究,为海阳海域的水质监测与管理提供翔实、系统的第一手基础数据,揭示该海域营养盐的时空分布格局和富营养化水平;

通过识别关键限制因子,为当地制定针对性的赤潮防治、污染物排放控制及海洋生态保护政策提供科学参考和理论支持。

## 1 研究海域

### 1.1 研究海域范围及特点

海阳市所辖海域面积为 1 829 km<sup>2</sup>,海岸线长 229.4 km,渔业资源丰富,发展有大量的滩涂养殖、池塘养殖、底播养殖以及人工渔礁等养殖模式,养殖品种以鱼、虾、蟹、贝类(花蛤、文蛤、沙蛤等)为主。本海区海流以潮流为主,潮流性质为正规半日潮,水深从西北向东南逐渐变深,等深线呈东北—西南走向。本研究海域范围为 36.31°N—36.72°N, 121.01°E—121.86°E。

### 1.2 采样站位和时间

2019年5月、8月、10月和12月在海阳海域30 m以浅的海域共设置49个调查站位(S1~S49)(图1)。

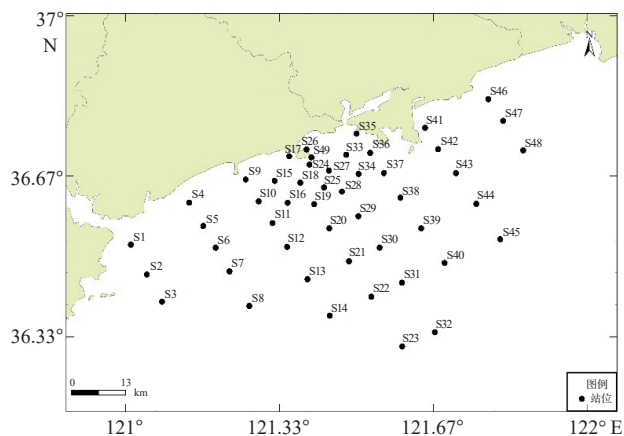


图1 调查站位

Fig.1 Location of the investigation stations

## 2 材料与方法

调查指标包括温度、盐度、硝酸氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N)、氨氮 ( $\text{NH}_4^+$ -N)、亚硝酸氮 ( $\text{NO}_2^-$ -N)、无机磷酸盐 ( $\text{PO}_4^{3-}$ -P)、硅酸盐 ( $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si) 等环境参数。用 2.5 L 有机玻璃瓶采水器采集水样。用孔径为  $0.45 \mu\text{m}$  的玻璃纤维滤膜过滤水样, 滤液放入  $500 \text{ cm}^3$  高密度聚乙烯瓶中进行现场测量分析 (溶解无机氮、活性磷酸盐); 硅酸盐采集水样后立即过滤, 存于冰箱 (低于  $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 中, 24 h 内分析完毕。采用镉柱还原法、盐酸萘乙二胺分光光度法、次溴酸钠氧化法、硅钼蓝分光光度法、磷钼蓝分光光度法分别测定  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N、活性硅酸盐、活性磷酸盐的质量浓度。溶解无机氮 (DIN) 的质量浓度为  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 的质量浓度之和。按照《海洋监测规范》<sup>[10]</sup> 相关要求对各营养盐参数的测定。

## 3 结果与分析

### 3.1 海阳海域营养盐时空变化

#### 3.1.1 海阳海域营养盐季节变化差异

##### 3.1.1.1 DIN 季节变化

研究海域 2019 年表层水体 DIN 的年平均质量浓度为  $0.193 \text{ mg/L}$ 。5 月、8 月、10 月、12 月表层水体 DIN 平均质量浓度分别为  $0.174$ 、 $0.175$ 、 $0.167$ 、 $0.256 \text{ mg/L}$ , 其中 12 月的 DIN 质量浓度显著高于其他三个月, 这可能与各个季节海阳海域的浮游植物丰度有关: 冬季浮游植物种群密度最低, 水体中的无机氮基本不被消耗, 因而 DIN 质量浓度相对较高<sup>[11]</sup>。

从季节性变化来看 (表 1), 春季表层水体  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度的平均占比分别为 2%、95% 和 3%, 夏季分别为 6%、83% 和 11%, 秋季分别为 3%、65% 和 32%, 冬季分别为 10%、79% 和 11%, 说明全年代表性月份  $\text{NO}_3^-$ -N 均为 DIN 的主要存在形式, 其次是  $\text{NH}_4^+$ -N。秋季  $\text{NH}_4^+$ -N 对 DIN 质量浓度的贡献平均达到 32%。4 个季节中表层水体  $\text{NO}_2^-$ -N 质量浓度占比最小, 依次为 2%、6%、3%、11%。赵晨英<sup>[12]</sup> 在 2009 年

夏季对乳山附近海域溶解氧、有机碳、氮和磷的循环与收支的关键过程研究中观测到  $\text{NO}_3^-$ -N 是 DIN 的主要形态 (57%~76%), 其次是  $\text{NH}_4^+$ -N (13%~32%),  $\text{NO}_2^-$ -N 的贡献最低 (2%~24%), 这与本文的研究结果一致。

表 1 海阳海域四季表层水体  $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 质量浓度占比

Table 1 Proportion of  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NO}_2^-$ -N, and  $\text{NH}_4^+$ -N concentrations in the coastal waters of Haiyang in four seasons

	%			
无机氮	春季	夏季	秋季	冬季
$\text{NO}_3^-$ -N	95 (78~98)	83 (47~99)	65 (9~85)	79 (28~95)
$\text{NO}_2^-$ -N	2 (0~19)	6 (1~25)	3 (1~11)	10 (1~65)
$\text{NH}_4^+$ -N	3 (0~13)	11 (0~50)	32 (13~83)	11 (0~11)

##### 3.1.1.2 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的季节变化

研究海域 2019 年表层水体  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 年平均质量浓度为  $0.007 \text{ mg/L}$ 。5 月、8 月、10 月、12 月表层水体  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 平均质量浓度分别为  $0.007$ 、 $0.008$ 、 $0.008$ 、 $0.005 \text{ mg/L}$ 。夏秋季  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 质量浓度高于冬春季, 冬季表层  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 质量浓度最低。总体来说,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 质量浓度的分布差异与沿岸陆源输入、海水的混合过程以及研究区域底界面磷的释放有关<sup>[12]</sup>。

##### 3.1.1.3 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 的季节变化

研究海域 2019 年表层水体  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 年平均质量浓度为  $0.520 \text{ mg/L}$ 。5 月、8 月、10 月、12 月表层水体  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 平均质量浓度分别为  $0.633$ 、 $0.298$ 、 $0.533$ 、 $0.620 \text{ mg/L}$ 。 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 的变化规律与 DIN 和  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 不同, 可能受地表径流输入影响较大<sup>[13]</sup>。调查海区营养盐分布是营养盐输入和海洋生命活动消耗之间动态平衡的结果。本海域是重要的贝类养殖区, 营养盐水平受多种因素影响。

##### 3.1.1.4 与邻近海域调查结果的对比

与 2015 年威海北部近岸调查结果<sup>[14]</sup> 相比, 本次调查 DIN 质量浓度除秋季低于威海北部调查结果 ( $0.190 \text{ mg/L}$ ) 外, 其余季节均高于威海北部; 与 2013 年威海南部近岸<sup>[15]</sup>、2006—2007 年山东近岸<sup>[16]</sup>、2009 年胶州湾<sup>[17]</sup>、2006—2007 年威海湾<sup>[18]</sup> 调查

结果相比, 本次调查除夏季 DIN 质量浓度高于威海湾(2006—2007年)外, 其他季节 DIN 质量浓度均低于上述调查结果(表2)。

$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度在春、秋季调查结果高于2015年威海北部近岸调查结果, 低于其他区域调查结果; 本次夏季调查结果高于2015年威海北部近岸、2006—2007年山东近岸、2006—2007年威海湾调查结果, 低于其他区域调查结果; 本次冬季调

查结果低于其他区域调查结果。

$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度在春、冬季调查结果高于其他区域调查结果; 夏季调查结果低于其他区域调查结果; 秋季调查结果低于2009年胶州湾调查结果, 高于其他区域调查结果。总体来看, DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度基本低于山东南部近岸调查海区, 高于山东北部近岸;  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度相比其他海区较高。

表2 与邻近海域调查结果比较

Table 2 Comparison with the survey results of coastal waters

邻近海区	春季			夏季			秋季			冬季		
	DIN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	DIN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	DIN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	DIN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$
威海北部近岸 <sup>[14]</sup> (2015年)	0.110	0.003	0.190	0.100	0.007	0.470	0.190	0.007	0.290	0.220	0.013	0.210
威海南部近岸 <sup>[15]</sup> (2013年)	0.203	0.010	—	0.210	0.012	—	0.196	0.012	—	—	—	—
山东近岸 <sup>[16]</sup> (2006—2007年)	0.294	0.017	—	0.371	0.006	—	0.357	0.012	—	0.345	0.030	—
胶州湾 <sup>[17]</sup> (2009年)	0.354	0.022	0.322	0.349	0.040	1.173	0.301	0.023	0.679	—	—	—
威海湾 <sup>[18]</sup> (2006—2007年)	0.220	0.009	0.355	0.048	0.004	0.544	0.402	0.013	0.336	0.463	0.059	0.030
本次调查 (2019年)	0.174	0.007	0.633	0.175	0.008	0.298	0.167	0.008	0.533	0.256	0.005	0.620

注: “—”代表无数据资料。

### 3.1.2 海阳海域营养盐空间分布

#### 3.1.2.1 DIN 质量浓度的水平分布特征

2019年四季表层水体 DIN 质量浓度由近岸向远岸总体呈递减趋势, 其高值区主要分布在乳山湾口外及海阳核电站近岸海域(图2)。夏季和秋季, 在海阳市与乳山市交界处的近岸海域、风城镇的离

岸海域 10 km 处出现 DIN 质量浓度高值区。DIN 质量浓度高值区集中在湾口外, 反映出陆源输入显著影响了近岸水体无机氮的浓度分布。此外, 海上大量养殖区的存在明显影响了水体无机氮的分布情况。

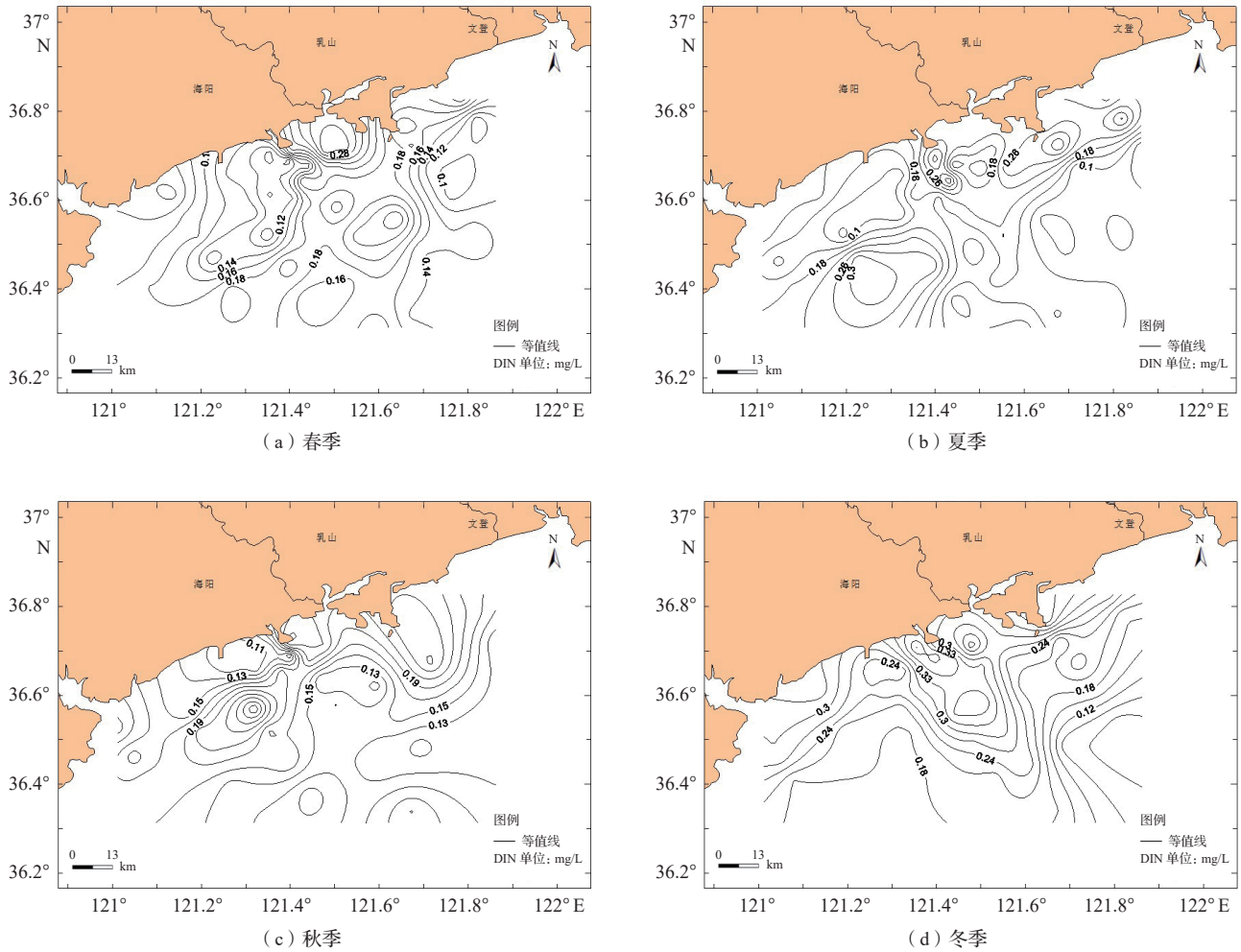


图 2 DIN 质量浓度水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of DIN concentration

### 3.1.2.2 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的水平分布特征

春季, 表层水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度在离岸 10 ~ 15 km 海域区间分布着两个质量浓度高值区; 夏季, 表层水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度分布比较均匀, 在近岸、离岸出现 3 处舌状高值区; 秋季, 表层水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度在凤城镇近岸海域出现两处高值区, 乳山湾外区域  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度呈现由近岸向远岸递减的趋势; 冬季, 表层水体  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  质量浓度在留格庄河口外离岸海域出现一处明显高值区, 乳山湾外区域呈现由近岸向远岸质量浓度递减的趋势 (图 3)。

### 3.1.2.3 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 的水平分布特征

2019 年四季表层水体中  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度分布规律差异较大 (图 4)。春季, 表层水体  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度在凤城镇离岸海域 10 km 处出现一处高值区, 乳山湾外离岸海域  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度呈现由西向东递增趋势, 最大质量浓度 (1.89 mg/L) 出现在 S46 站; 夏季, 表层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度在乳山湾口外出现一处明显高值区 (0.56 mg/L); 秋季, 表层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度分布比较均匀, 无明显高值区; 冬季, 表层  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度均在近岸海域及离岸 10 km 处出现 3 处高值区。

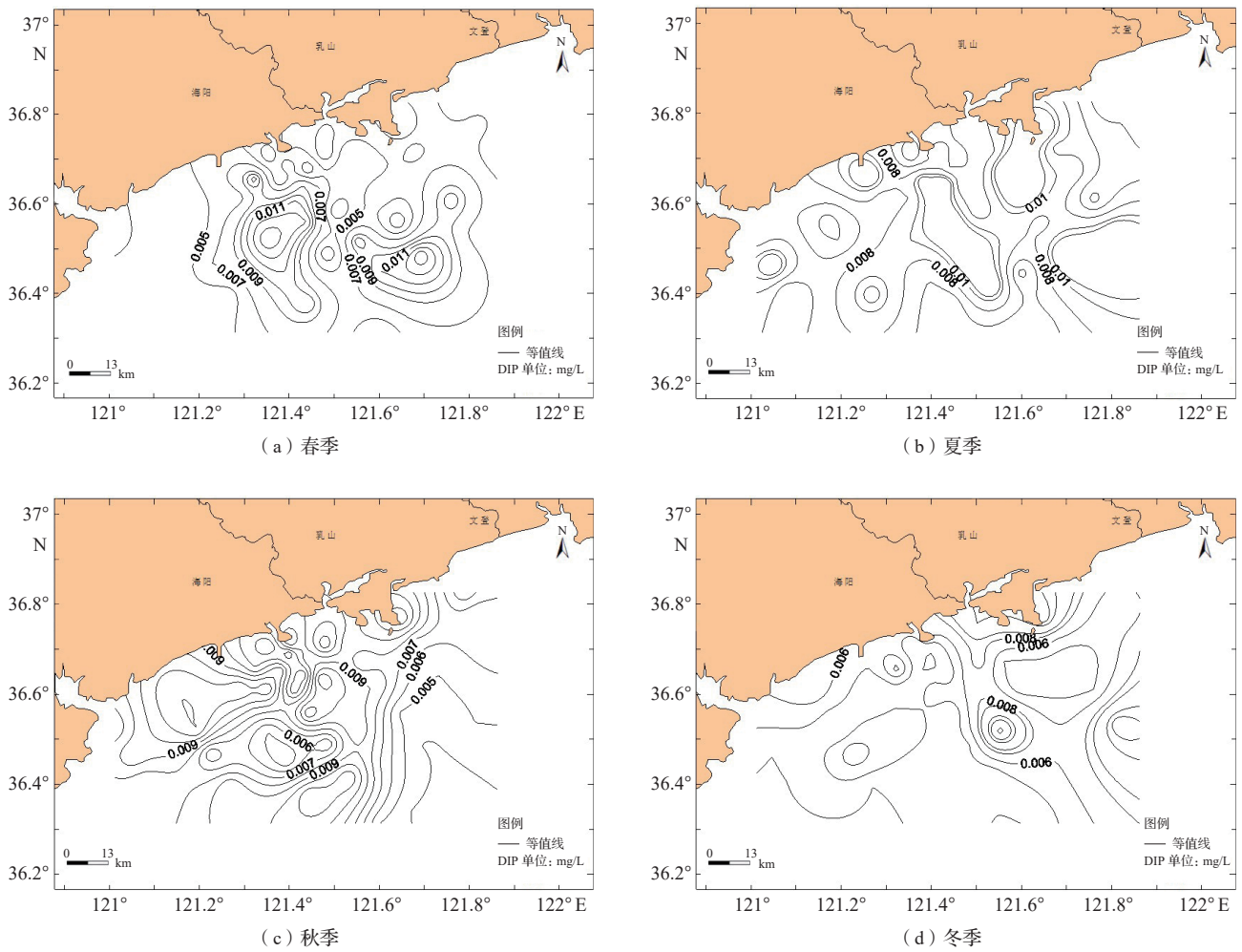
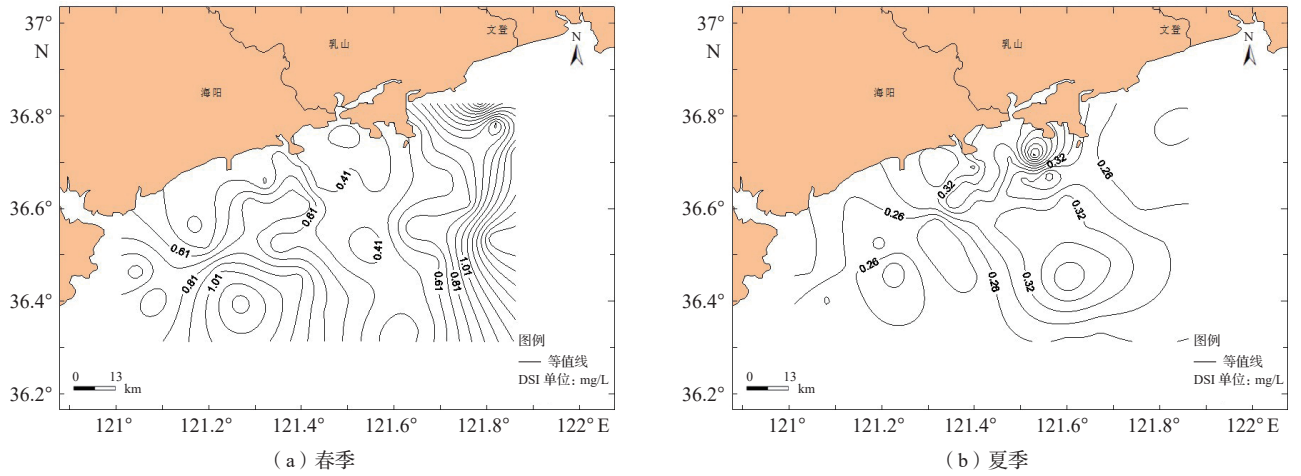
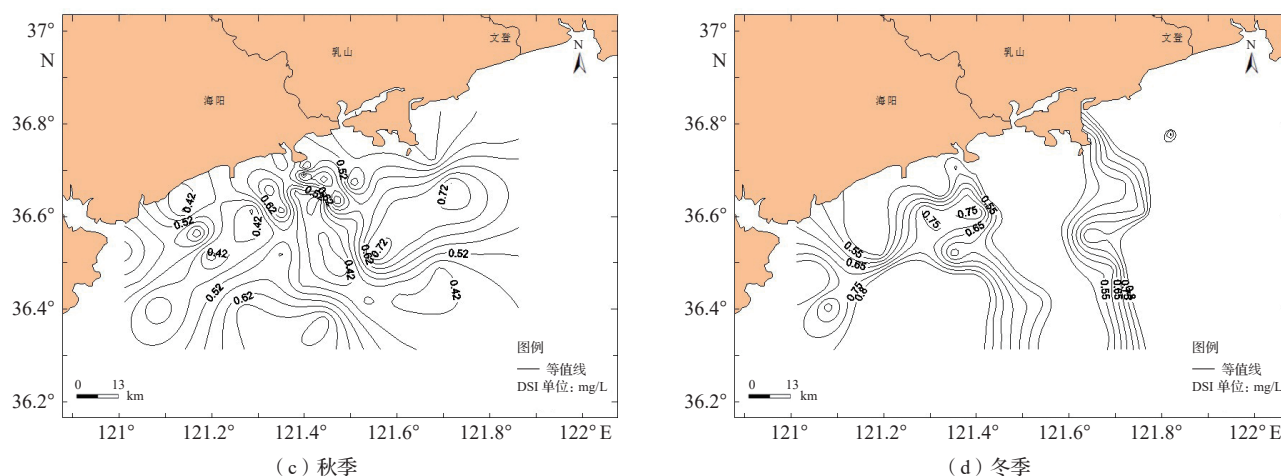


图 3  $PO_4^{3-}-P$  质量浓度平面分布  
 Fig.3 Horizontal distribution of  $PO_4^{3-}-P$  concentration



图4  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  质量浓度平面分布 (续图)Fig.4 Horizontal distribution of  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  concentration

### 3.2 营养盐的潜在限制性分析

根据营养盐吸收动力学的研究结果,浮游植物的生长受营养盐浓度限制的阈值为溶解  $\text{Si}=2 \mu\text{mol}$ 、 $\text{DIN}=1 \mu\text{mol}$  和溶解  $\text{P}=0.1 \mu\text{mol}$ , 称为营养盐浓度的绝对限制法则<sup>[19]</sup>。若海水中所含某种营养盐的质量浓度低于其对应的浮游植物生长所需最低阈值,则表明该种营养盐是该海区海洋初级生产力的限制因子。根据 Justic 等<sup>[20]</sup>建立的浮游植物生长的化学计量比和营养盐限制因子标准。若  $\text{N/P} < 10$  且  $\text{Si/N} > 1$ , 则  $\text{DIN}$  为限制因子;若  $\text{Si/P} > 22$ , 且  $\text{N/P} > 22$ , 则  $\text{PO}_4^{2-}\text{-P}$  为限制因子;若  $\text{Si/P} < 10$  且  $\text{Si/N} < 1$ , 则  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  为限制因子。因此,要确定浮游植物生长限制的营养盐要素,只有同时满足绝对限制法则和相对限制法则,才能确定其限制营养盐要素<sup>[19]</sup>。因此,本研究选取了营养盐限制因子的判断标准,如表3所示。

表3 氮、磷、硅无机营养盐作为单一限制因子的判断标准

Table 3 Diagnostic criteria for single-nutrient (N, P, or Si) limitation

单一限制因子	无机营养盐作为单一限制因子的判断标准
DIN	$\text{N/P} < 10$ 且 $\text{Si/N} > 1$ , $C_{\text{DIN}} < 1 \mu\text{mol/L}$
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	$\text{Si/P} > 22$ , 且 $\text{N/P} > 22$ , $C_p < 0.1 \mu\text{mol/L}$
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	$\text{Si/P} < 10$ 且 $\text{Si/N} < 1$ , $C_{\text{si}} < 2 \mu\text{mol/L}$

从海阳海域水体海洋初级生产力限制因子计算结果(表4)来看,海阳海域四季整体基本处于磷的相对限制状态。调查结果显示,四季表层多个站位呈现磷的绝对限制( $C_p < 0.1 \mu\text{mol/L}$ ),以春季和冬季较为明显:春季表层49个站位中有20个站位;冬季49个站位中有27个站位。这反映出浮游植物的生长已受到一定程度的限制。

表4 营养盐限制因子判断结果

Table 4 Determination results of the nutrient limiting factor

季节	N/P	Si/N	Si/P	相对限制因子	绝对限制站位 ( $C_p < 0.1 \mu\text{mol/L}$ )
春季	13.42 ~ 467.86 (95.84)	0.41 ~ 6.03 (2.13)	33.95 ~ 750.00 (179.05)	$\text{PO}_4\text{-P}$	20 (41%)
夏季	8.48 ~ 261.40 (65.53)	0.33 ~ 5.26 (1.35)	16.89 ~ 197.81 (55.92)	$\text{PO}_4\text{-P}$	11 (22%)
秋季	18.18 ~ 114.25 (52.85)	0.66 ~ 4.49 (1.81)	31.11 ~ 157.33 (82.48)	$\text{PO}_4\text{-P}$	4 (9%)
冬季	6.64 ~ 433.71 (160.42)	0.66 ~ 7.41 (1.57)	40.85 ~ 393.43 (189.84)	$\text{PO}_4\text{-P}$	27 (55%)

注:括号内为平均值。

### 3.3 对浮游植物生长的潜在限制评价方法

富营养化的发生通常由多种因素共同驱动, 其中营养盐过剩是必要条件。只有当物理、化学、生物和气候等多种环境因子共同作用时, 才会构成富营养化的充分条件<sup>[19]</sup>。对于部分过剩的 N 或 P, 并不能被浮游植物完全利用, 实质上这些营养盐并没有对富营养化作出贡献, 只是具有一定的潜在性, 只有当水体中的 N/P 值接近 Redfield 值时, 才能对富营养化真正作出贡献, 这就是潜在性富营养化<sup>[19]</sup>。本文采用郭卫东<sup>[21]</sup>提出的营养级分级模式(表5)进行评价。

表5 潜在性富营养化评价标准  
Table 5 Assessment criteria of potential eutrophication

级别	营养级	DIN/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PO <sub>4</sub> -P/( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	N/P
I	贫营养	< 14.28	< 0.97	8 ~ 30
II	中度营养	14.28 ~ 21.41	0.97 ~ 1.45	8 ~ 30
III	富营养	> 21.41	> 1.45	8 ~ 30
IV <sub>P</sub>	磷限制中度营养	14.28 ~ 21.41	—	> 30
V <sub>P</sub>	磷中等限制潜在性富营养	> 21.41	—	30 ~ 60
VI <sub>P</sub>	磷限制潜在性富营养	> 21.41	—	> 60
IV <sub>N</sub>	氮限制中度营养	—	0.97 ~ 1.45	< 8
V <sub>N</sub>	氮中等限制潜在性富营养	—	> 1.45	4 ~ 8
VI <sub>N</sub>	氮限制潜在性富营养	—	> 1.45	< 4

海阳海域水体潜在富营养化评价结果显示, 该海域整体处于贫营养和磷限制中度营养(表6)。黄海近岸海域长期呈现氮富集、磷限制的典型生态特征, 与本研究海阳市近岸海域贫营养及磷限制中度营养的评价结果高度一致。首先, 海阳水系不甚发达, 向南流入黄海的仅有留格庄河, 位于海阳核电厂岸段的西侧, 因此该岸段水质受留格庄河一定的影响, 夏季汛期留格庄河径流量变大, 携带了大量的营养盐, 入海后造成近岸海域营养盐浓度增加。

陆源输入以氮为主, 磷补给不足, 导致浮游植物生长受磷制约。其次, 海阳海域近岸以往复半日潮流为主, 作用范围局限于浅水区, 陆源营养盐入海后被快速稀释, 难以向远岸有效输送。冬季强垂向混合受季风驱动, 水体垂直交换充分, 温盐与营养盐分布均匀, 底层营养盐被抬升至表层, 既补充浮游植物消耗, 又促进近岸与外海物质交换。季节性陆源输入的变化不会明显影响远岸的水质, 远海一般情况下处于相对贫营养状态。

表6 潜在性富营养化评价

Table 6 Assessment of potential eutrophication

季节	DIN/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> -Si/ ( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	N/P	Si/N	Si/P	营养级
春季	12.43	0.21	22.60	95.84	2.13	179.05	贫营养
夏季	12.50	0.26	10.66	65.53	1.35	55.92	贫营养
秋季	11.97	0.26	18.97	52.85	1.81	82.48	贫营养
冬季	18.32	0.17	22.12	160.42	1.57	189.84	磷限制 中度 营养

## 4 结论

(1) 在季节变化特征方面, 海阳海域表层水体中 DIN 的主要存在形式为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, 其次是 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N, 整个调查海域 12 月 DIN 质量浓度最高, 显著高于其他 3 个代表性月份。夏秋季 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 质量浓度高于冬春季, 冬季表层 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度最低。夏秋季 SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 质量浓度显著低于冬春季节。研究表明, 海阳海域各类营养盐的含量与海洋生命活动的消耗、陆地输入、渔业养殖以及有机物分解释放活动息息相关。

(2) 在空间分布特征方面, 不同季节, DIN、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P、SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 质量浓度均明显呈由近岸向远岸递减趋势, 其高值区均主要分布在近岸海域、乳山湾口门以及离岸 10 ~ 15 km 区域。海阳海域分

布着大量的底播养殖区,养殖过程中人为投放的饵料和养殖物种的排泄物,会影响水体中氮、磷等的分布。本次调查中,营养盐质量浓度高值区的分布反映了陆源输入、底播养殖区分布、海水的混合过程对海水水质的影响。

(3) 在年际变化特征方面,研究区域表层无机氮含量在 0.160~0.260 mg/L 之间,均值变化不大;

磷酸盐均值低于 0.010 mg/L,总体来看年际波动幅度不大;硅酸盐均值总体来看年际波动幅度不大,有下降趋势。

(4) 营养盐的潜在限制性分析表明海阳海域的潜在富营养级基本处于贫营养;冬季处于磷限制中度营养。控制活性磷酸盐输入可有效防止水体富营养化及赤潮等现象发生。

### 参考文献 (References):

- [1] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, 46(3): 205-221.
- [2] HARRIS G P. Phytoplankton ecology: structure, function and fluctuation[M]. New York: Chapman and Hall Press, 1986.
- [3] LAGUS A, SUOMELA J, WEITHOFF G, et al. Species-specific differences in Phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea[J]. Journal of Plankton Research, 2004(26): 779-798.
- [4] 陈敏. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009.  
CHEN Min. Chemical oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
- [5] 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.  
HUANG Xiaoping, HUANG Liangmin. Temporal and spatial variations of inorganic nitrogen and reactive phosphate concentrations in the Pearl River Estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2002, 21(4): 416-421.
- [6] 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.  
SUN Jun, LIU Dongyan, YANG Shimin, et al. A preliminary study on the phytoplankton community structure in the central Bohai Sea, Bohai Strait and adjacent waters[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(5): 461-471.
- [7] 沈志良. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 322-331.  
SHEN Zhiliang. Long-term changes in nutrient structure of Jiaozhou Bay and their impacts on the ecological environment[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2002, 33(3): 322-331.
- [8] 李广楼, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 秋季莱州湾及附近水域营养现状评价[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 45-57.  
LI Guanglou, CUI Yi, CHEN Bijuan, et al. Assessment of nutrient status in Laizhou Bay and adjacent waters in autumn[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(1): 45-57.
- [9] 孙耀, 于宏, 杨琴芳, 等. 丁字湾养殖海域化学指标与营养状况的分析与评价[J]. 水产学报, 1990, 14(1): 33-39.  
SUN Yao, YU Hong, YANG Qinfang, et al. Analysis and evaluation of chemical indices and nutritional status in the mariculture area of Dingzi Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 1990, 14(1): 33-39.
- [10] 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范: GB 17378—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
National Technical Committee for Oceanographic Standardization. Specifications for marine monitoring: GB 17378—2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2008.
- [11] 周斌, 王悠, 王进河, 等. 山东半岛南部近岸海域富营养化状况的多元评价研究[J]. 海洋学报, 2010, 32(2): 128-137.  
ZHOU Bin, WANG You, WANG Jinhe, et al. Multivariate evaluation of eutrophication status in the coastal waters of southern Shandong Peninsula[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(2): 128-137.
- [12] 赵晨英. 乳山湾近海与黄渤海溶解氧、有机碳、氮和磷的循环与收支的关键过程研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2017.  
ZHAO Chenying. Key processes of cycling and budget of dissolved oxygen, organic carbon, nitrogen and phosphorus in the coastal waters of Rushan Bay and the Bohai and Yellow Seas [D]. Qingdao: First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2017.
- [13] 宋秀贤, 俞志明. 胶州湾东北部养殖海域夏季营养盐分布特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 2007, 38(5): 446-452.  
SONG Xiuxian, YU Zhiming. Distribution characteristics of nutrients and their effects on phytoplankton growth in the mariculture area of northeastern Jiaozhou Bay in summer[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2007, 38(5): 446-452.
- [14] 董晓晓, 王立明, 齐延民, 等. 2015年威海近岸海域营养盐的时空分布特征[J]. 海岸工程, 2018, 37(4): 53-61.

- DONG Xiaoxiao, WANG Liming, QI Yanmin, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of nutrients in the coastal waters of Weihai in 2015[J]. *Coastal Engineering*, 2018, 37(4): 53-61.
- [15] 李洪涛, 刘阳, 于国庆, 等. 威海南部近岸海域表层海水化学要素时空变化及富营养化研究[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(3): 356-363.
- LI Hongtao, LIU Yang, YU Guoqing, et al. Temporal and spatial variations of chemical elements in surface seawater and eutrophication in the coastal waters of southern Weihai[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2016, 35(3): 356-363.
- [16] 王育红, 杨秀兰, 吕振波, 等. 山东近岸海湾微型浮游植物分布及其丰度与营养盐相关性研究[J]. *海洋与湖沼*, 2008, 39(6): 643-649.
- WANG Yuhong, YANG Xiulan, LYU Zhenbo, et al. Distribution of picophytoplankton in coastal bays of Shandong and their correlation between abundance and nutrients[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2008, 39(6): 643-649.
- [17] 董兆选, 娄安刚, 崔文连, 等. 胶州湾海水营养盐的分布及潜在性富营养化研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(3): 149-154.
- DONG Zhaoxuan, LOU Angang, CUI Wenlian, et al. Distribution of nutrients and potential eutrophication in Jiaozhou Bay[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2010(3): 149-154.
- [18] 陈玮, 吕振波. 威海湾营养盐季节变化特征及与环境因子的相关性分析[J]. *水生态学杂志*, 2012, 33(3): 41-45.
- CHEN Wei, LYU Zhenbo. Seasonal variation characteristics of nutrients in Weihai Bay and their correlation with environmental factors[J]. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(3): 41-45.
- [19] 杨东方, 张经, 陈豫, 等. 营养盐限制的唯一性因子探究[J]. *海洋科学*, 2001, 25(12): 49-51.
- YANG Dongfang, ZHANG Jing, CHEN Yu, et al. Exploration of the unique limiting factor of nutrients[J]. *Marine Sciences*, 2001, 25(12): 49-51.
- [20] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(3): 339-356.
- [21] 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.
- GUO Weidong, ZHANG Xiaoming, YANG Yiping, et al. Evaluation of potential eutrophication degree in coastal waters of China [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(1): 64-70.