

2016年山东省15个海水增养殖区氮磷分布及其结构特征

刘爱英,于广磊,何健龙,程玲,付萍,苏博,马元庆

(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:氮、磷是海洋生物生长所需要的重要营养元素,其变化对海水增养殖区生态系统结构和功能有着重要影响。文章根据2016年3月、5月、8月及10月的监测资料,分析了山东省15个海水增养殖区氮、磷分布特征,结果表明:DIN浓度范围0.007 30~2.20 mg/L,平均值0.192 mg/L,68.0%的站次浓度介于0.05~0.2 mg/L之间,渤海湾、莱州湾养殖区浓度普遍高于黄海养殖区;PO₄-P浓度范围0~0.089 5 mg/L,平均0.005 98 mg/L,81.9%的站次浓度介于0.001~0.015 mg/L之间,约2/3水域为磷限制性贫营养状态。表层、底层海水DIN与PO₄-P浓度无明显差异;NO₃-N、NO₂-N、NH₄-N占比分别为68.91%、6.82%、27.27%,NO₃-N是DIN的主要存在形式;夏季NH₄-N形态比例最高,平均占比36.5%;N/P原子质量比范围1.6~2 532.3,主要范围在10~40,渤海养殖区N/P比明显高于黄海养殖区;DIN分布主要受陆源径流输入影响;PO₄-P水平分布无明显规律。

关键词:增养殖区;营养盐结构;无机氮;活性磷酸盐;氮磷比

Distribution and Structure of Nitrogen and Phosphorus Nutrients of 15 Seawater Culture Areas in Shandong Province, 2016

LIU Aiyong, YU Guanglei, HE Jianlong, CHENG Ling, FU Ping, SU Bo, MA Yuanqing

(Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology, Yantai 264006, China)

Abstract: Nutrient salt is the material basis of marine biological activities, and its change has an important influence on the structure and function of aquaculture ecosystem. Based on the monitoring data of March, May, August and October, 2016, the distribution characteristics of nitrogen and phosphorus of 15 seawater culture areas in Shandong were analyzed and discussed. The results showed that the concentrations of DIN ranged from 0.0073 mg/L to 2.20 mg/L with an average content of 0.192 mg/L. The DIN concentrations were between 0.05 mg/L and 0.2 mg/L

基金项目:山东省科技发展计划“山东近岸热点开发海域主要污染物环境容量及总量控制技术研究”(2014GSF11703);山东省农业重大应用技术创新项目“山东南部海域渔业绿潮灾害风险预警技术研究与应用”。

作者简介:刘爱英,研究员,研究方向为海洋环境

通信作者:马元庆,副研究员,研究方向为海洋环境

in 68% of the survey stations, and were generally higher in the culture areas of Bohai Bay and Laizhou Bay than that in Yellow Sea culture area. The concentrations of $\text{PO}_4 - \text{P}$ ranged from 0.0073 mg/L to 0.0895 mg/L with an average content of 0.00598 mg/L. The $\text{PO}_4 - \text{P}$ concentrations were between 0.001 mg/L and 0.015 mg/L in 81.9% of the survey stations. And about 66% of the survey area was in phosphorus restricted poor nutrient condition. No significant differences of the DIN and $\text{PO}_4 - \text{P}$ concentrations were detected between the surface and bottom layer. The proportions of $\text{NO}_3 - \text{N}$, $\text{NO}_2 - \text{N}$ and $\text{NH}_4 - \text{N}$ in DIN were 68.91%, 6.82% and 27.27%, respectively, and $\text{NO}_3 - \text{N}$ was the main form of DIN. The proportion of $\text{NH}_4 - \text{N}$ in DIN was the highest in summer, with an average proportion of 36.5%. Generally, the range of N/P ratios was from 1.6 to 2532.3, and the main N/P distribution range was from 10 to 40. The N/P ratios of the culture area in Bohai Sea were significantly higher than that in Yellow Sea. The distribution of DIN was mainly influenced by the terrestrial input. There was no obvious regularity in $\text{PO}_4 - \text{P}$ horizontal distribution.

Key words: Mariculture zone, Nutrient structure, Dissolved inorganic nitrogen, Soluble reactive phosphate, N/P ratios

氮、磷是海洋生物生长所需要的重要营养元素,也是海洋初级生产过程和食物链的基础,其在水体中含量会影响海洋生物生产力和生态系统结构,同时生物活动也会对其含量、分布产生明显影响^[1-2]。研究海水增养殖区营养盐分布与结构状况,探讨养殖生产过程中的营养盐限制因子,对了解养殖生态系统及近海环境状况具有重要价值^[3]。山东省近岸水域、滩涂已被充分利用于水产增养殖;截至 2015 年年底,山东省海水养殖面积达到 231.776 万 hm^2 ,占全国海水养殖面积的 24.3%^[4]。海水增养殖区氮、磷分布状况对近岸生态环境及海洋经济具有重要影响。以往对海水增养殖区营养盐研究多着重于单个或少数几个养殖区^[5-7];文章根据 2016 年监测资料,对山东省 15 个海水增养殖区、4 个季节的营养盐分布特征、结构状况进行研究,以期进一步了解山东省海水增养殖区的富营养化程度及限制情况,为养殖生产合理布局,控制陆源污染输入,促进养殖生态系统良性循环等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样站位与监测时间

根据地理位置将山东省海水增养殖区划分为 15 个区片(图 1),按照近岸密、远岸稀的站位布设原则,在 15 个增养殖区片共布设监测站位 311 个,站

位间距 $2' \sim 3'$, 于 2016 年 3 月、5 月、8 月及 10 月进行了 4 个航次的监测。



图 1 养殖区片及调查站位

1.2 监测项目与监测方法

监测项目有 NO_2-N 、 NO_3-N 、 NH_4-N 、 PO_4-P 、叶绿素 a、水温、透明度、盐度、pH 值、溶解氧、COD、悬浮物等。样品采集与检测依据《GB 17378—2007 海洋监测规范》、《GB/T 12763—2007 海洋调查规范》及《HY/T 147—2013 海洋监测技术规程》等。水深小于或等于 10 m 时仅采集表层水样,大于 10 m 时,分别采集表层与底层水样。无机氮为 NO_2-N 、 NO_3-N 、 NH_4-N 之和。数据分析采用 EXCEL 及 SPSS 17 软件数据分析模块。

2 监测结果

2.1 无机氮浓度与分布

2.1.1 无机氮浓度频率分布

山东省 15 个海水增殖殖区, 站次 DIN 浓度范围 0.007 30~2.20 mg/L, 平均值 0.192 mg/L。大多数(68.0%) 站次浓度介于 0.05~0.2 mg/L 之间, 小于 0.05 mg/L 及大于 0.5 mg/L 的站次分别占 6.5% 及 6.3%(表 1); 符合我国一类、二类、三类及四类海水水质标准的站次为 74.6%、87.2%、91.8% 及 93.7%。

表 1 山东省海水增殖殖区 DIN 站次浓度频率分布

浓度/(mg·L ⁻¹)	分布频率/%	累计频率/%
<0.05	6.5	6.5
0.05~0.10	22.6	29.1
0.10~0.15	30.9	60.0
0.15~0.20	14.6	74.6
0.20~0.25	8.0	82.6
0.25~0.30	4.6	87.2
0.30~0.35	3.0	90.2
0.35~0.40	1.6	91.8
0.40~0.45	0.9	92.7
0.45~0.50	1.0	93.7
>0.50	6.3	100

2.1.2 无机氮分布

营养盐浓度区域变化较大, 浓度变化范围及平均值如图 2 所示。3 月、5 月、8 月及 10 月的监测结果均显示, 渤海湾、莱州湾养殖区的无机氮浓度普遍高于黄海养殖区(图 3)。高值站位多分布于潍坊、滨州、垦利—广饶及东营河口区。位于莱州湾底部的潍坊区域无机氮浓度最高, 浓度范围 0.128~1.72 mg/L, 平均 0.655 mg/L, 其次为滨州、垦利—广饶区、东营河口区域, 年平均浓度 0.534 mg/L、0.506 mg/L 及 0.372 mg/L。除乳山及海阳—莱阳区域少量站位 DIN 较高外, 山东半岛东部养殖区(莱州—招远以东至日照)无机氮浓度相对较低, 年平均值 0.104~0.228 mg/L。

表底 DIN 差=表层 DIN—底层 DIN

表底层监测数据的 *t* 检验结果表明: 3 月份表、

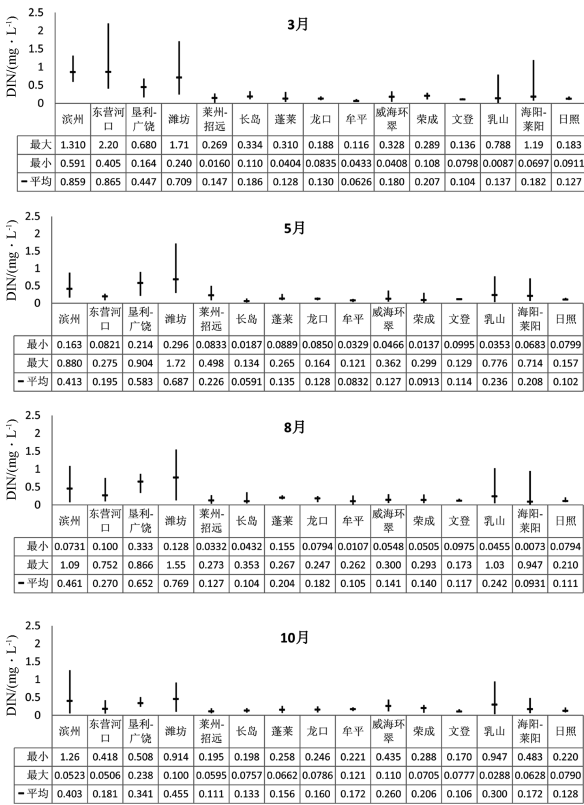


图 2 各增殖殖区 DIN 最低、最高及平均值

底层 DIN 浓度存在显著差异 ($P = 0.015 < 0.05$), 表层 DIN 浓度明显大于底层; 5 月、8 月及 10 月, 表、底层 DIN 浓度无明显差异 (*t* 检验, *P* 值分别为 0.91、0.73 及 0.78)。除春季外, 大部分站位表、底层 DIN 差在 0 值上下均匀分布(图 4); 3 月与 8 月, 少量站位表、底层差距较大, 分别有 12.1%、7.5% 的站次表、底层差大于 ± 0.1 mg/L, 最大差分别为 0.24 mg/L 和 0.26 mg/L。监测最大水深 48m, 大部分水深小于 30m, 表、底层 DIN 差与水深没有明显关系(图 4)。

15 个养殖区无机氮季节变化不尽一致(图 5), 位于渤海湾南部的滨州及东营河口区域冬季浓度分别为 0.859 mg/L 及 0.865 mg/L, 明显高于春季、夏季及秋季; 莱州湾西部黄河口以南的垦利广饶区片春季与夏季高于秋冬季; 莱州湾底部潍坊区域秋季低于春季、夏季及冬季; 长岛与荣成区片春季 DIN 浓度低于冬、夏、秋季, 其他区域季节变化不大, 其中龙口、文登及日照区片无机氮浓度范围分别为 0.128~0.182、0.104~0.117 及 0.102~

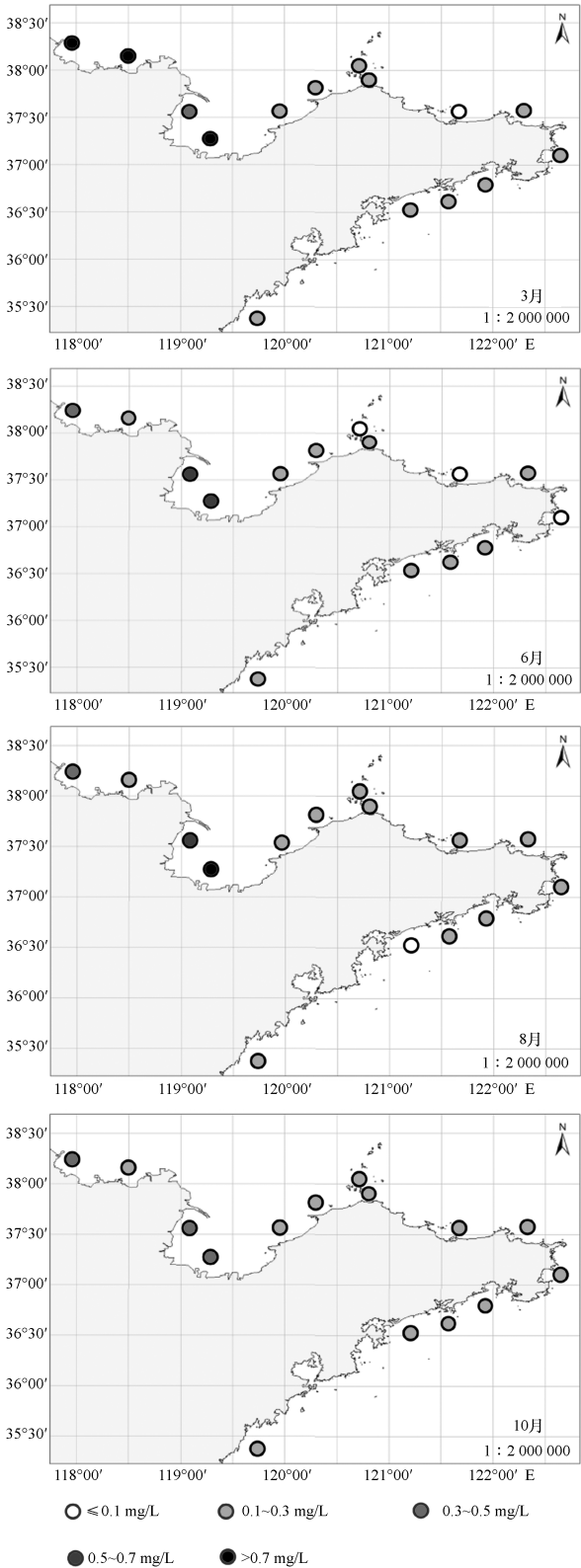


图3 各海水养殖区 DIN 平均浓度

0.128 mg/L,季节变化最小。

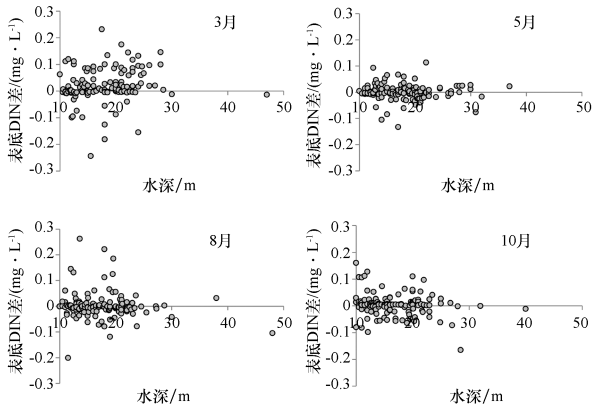


图4 不同水深表、底层 DIN 浓度差

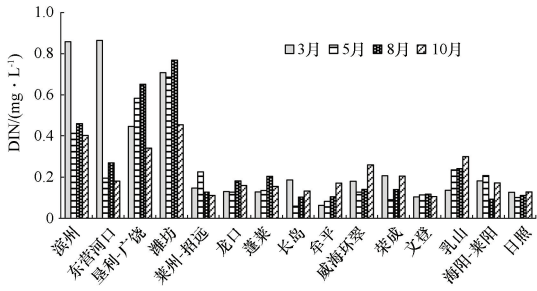


图5 养殖区 DIN 季节变化

2.2 磷酸盐浓度与分布

2.2.1 磷酸盐浓度频率分布

山东省15个海水养殖区 $\text{PO}_4\text{—P}$ 浓度范围为0~0.0895 mg/L,平均0.005 98 mg/L。活性磷酸盐站次监测值频率分布见表2,81.9%的站次活性磷酸盐浓度范围为0.001~0.015 mg/L,不大于0.001 mg/L与大于0.015 mg/L的站次分别占总监测站次数量的10.8%及0.8%,累计92.7%与99.2%的站次分别小于0.015 mg/L(一类海水水质标准)及0.030 mg/L(二类海水水质标准)。

表2 山东省海水养殖区 $\text{PO}_4\text{—P}$ 站次浓度频率分布

浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	分布频率/%	累计频率/%
<0.001	10.8	10.8
0.001~0.005	49.9	60.7
0.005~0.010	21.0	81.7
0.010~0.015	1.0	92.7
0.015~0.020	4.4	97.1
0.020~0.025	1.2	98.3
0.025~0.030	0.9	99.2
>0.030	0.8	100

2.2.2 磷酸盐分布

山东省海水增养殖区 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度范围及平均值见图 6,增养殖区浓度均普遍较低,少量相对高值站位(大于 0.4 mg/L)出现于东营河口、滨州、乳山及海阳—莱阳区片片,3 月、5 月、8 月及 10 月 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均浓度分别为 0.005 84 mg/L、0.005 12 mg/L、0.006 20 mg/L 及 0.009 57 mg/L,均于低水平波动,仅 10 月略高。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 表、底层浓度差异不大(图 7),仅 10 月表、底层差异略大于其他月份,但统计检验无显著差异。

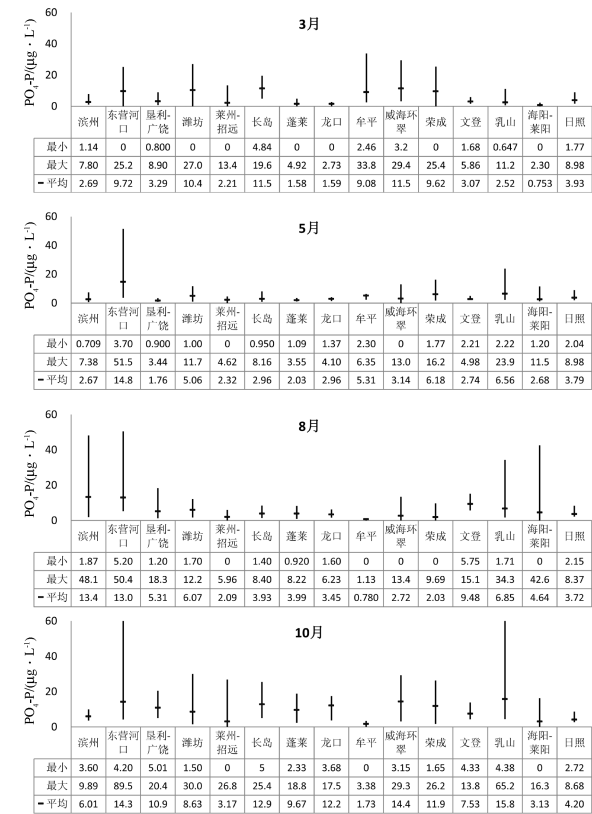


图 6 各增养殖区域 $\text{PO}_4\text{-P}$ 最低、最高及平均值
最小值 0 示值为未检出

2.3 DIN 形态特征

$\text{DIN} = \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$

山东近海海水增养殖区 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在 DIN 的平均占比为 68.91%、6.82%、27.27%。 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占比明显高于其他两种形式,是 DIN 的主要存在形式,其次是 $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 最低。图 8 为站次 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$

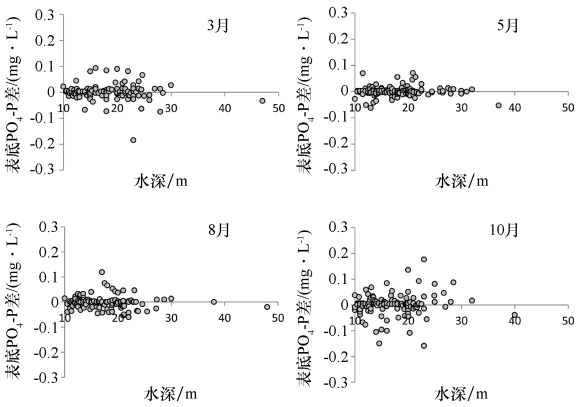


图 7 不同水深站位表、底层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度差

占 DIN 比例的频率分布。站次 $\text{NO}_3\text{-N}$ 占 DIN 比例范围为 0.9%~99.71%,占比大于 90%、80%、70%、60%、50% 的站次为 9.7%、28.1%、49.1%、67.5%、79.2%; $\text{NO}_2\text{-N}$ 占 DIN 比例范围为 0.6%~82.2%,绝大部分站次小于 20%,其中小于 10%、20% 的站次为 79.1%、92.1%; $\text{NH}_4\text{-N}$ 占 DIN 比例范围为 0.1%~94.7%,主要在 0~40% 区间,累计频率 78.1%。

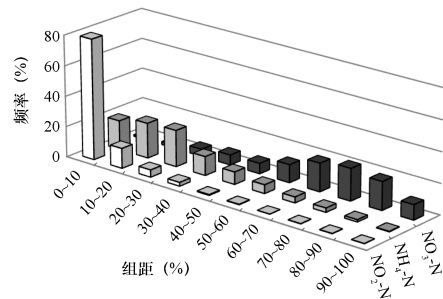


图 8 DIN 中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 占比的站次频率分布

$\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 3 种无机氮形式互相转化和循环受细菌、浮游生物、大型生物影响而呈季节变化。高温季节生物生长较快,代谢旺盛,与之相对应,夏季 $\text{NH}_4\text{-N}$ 各站位占比范围为 0.39%~94.7%,平均 36.5%,占比最高,春、秋季次之,冬季最低;与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 相反, $\text{NO}_3\text{-N}$ 夏季最低,冬季最高; $\text{NO}_2\text{-N}$ 在 DIN 中的比例由低到高依次为冬季、春季、夏季、秋季(图 9)。

2.4 N/P 比值及分布

N/P 比值指 DIN 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的原子质量比,

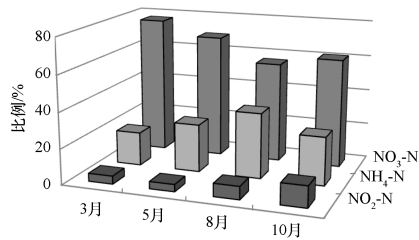


图9 DIN中NON₃-N、NO₂-N、NH₄-N占比的季节变化

PO₄-P未检出者本研究以检出限0.00062 mg/L参与计算。

2016年,山东省海水增殖区海水N/P值范围为1.6~2532.3,平均81.0,变化幅度极大,主要分布范围10~40(图10),大于40、100及200的站次比例为38.5%、17.1%及7.1%。山东海水增殖区总体表现为高N/P值的营养盐结构特征,且区域变化较大,呈西部高于东部、封闭海湾高于开阔水域的趋势;N/P高值主要出现于莱州湾西部垦利—广饶区片及莱州湾南部潍坊区片,其次是渤海湾西南部滨州区片,相对低值位于长岛、文登、乳山及日照区片。除4个低值区域外,N/P值均存在着明显的季节变化,其中,滨州至蓬莱的渤海区片、海阳—莱阳区片的黄海水域春季较高、秋季较低,威

海环翠、荣成水域夏季高于其他季节,牟平区片夏、秋季高于冬、春季。N/P与DIN、PO₄-P相关系数分别为0.486及-0.252,DIN对N/P比值增高的贡献大于PO₄-P。

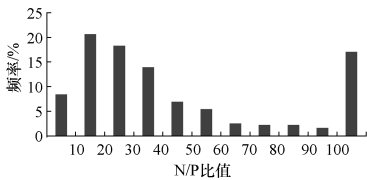


图10 N/P比值的站次频率分布

3 讨论

3.1 营养盐与其他环境因子的关系

利用SPSS统计分析软件“分析—相关—双变量”功能模块分析表层海水中营养盐与水深、盐度、COD及叶绿素-a间相关关系,Pearson相关系数见表3和表4。15个增殖区数据统计,在0.01水平上,DIN、PO₄-P与盐度显著负相关,低盐水氮、磷含量高于高盐水;DIN、PO₄-P与COD显著正相关,显示DIN、PO₄-P浓度受海水及悬浮物中存活或死亡的细菌、浮游植物、浮游动物、生物分泌物、聚合物等有机质影响,另一方面显示DIN、PO₄-P与有机污染物或有相同的来源。

表3 DIN与环境因子Pearson相关系数

增殖区	水深	盐度	COD	叶绿素a	PO ₄ -P	样本数/个
滨州	0.034	-0.669**	0.715**	-0.260	0.307*	56
东营河口	-0.245	-0.184	0.567**	-0.003	0.063	44
垦利—广饶	-0.286	-0.620**	-0.223	0.342	-0.481**	32
潍坊	-0.194	-0.527**	0.068	0.315*	0.108	64
莱州—招远	-0.392**	0.152	-0.230*	0.067	-0.087	112
龙口	-0.060	-0.135	0.043	-0.035	0.267	27
长岛	-0.081	-0.096	-0.266**	0.516**	0.472**	108
蓬莱	-0.334**	-0.260*	0.066	-0.130	0.379**	63
牟平	0.103	0.078	-0.632**	-0.557*	-0.424	20
威海环翠	-0.133	-0.145	0.103	-0.031	0.449**	144
荣成	-0.033	-0.185*	0.219*	0.076	0.518**	132
文登	-0.391**	-0.134	0.247	0.197	0.245	48
乳山	-0.321**	-0.343**	0.566**	-0.002	0.759**	108
海阳—莱阳	-0.325**	-0.619**	0.411**	0.342**	0.553**	128
日照	-0.373**	-0.563**	0.564**	0.256**	0.766**	160
全省	-0.337**	-0.480**	0.451**	0.158**	0.298**	1246

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关;**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

表 4 PO₄-P 与环境因子 Pearson 相关系数

养殖区	水深	盐度	COD	叶绿素 a	无机氮	样本数/个
滨州	-0.278 *	-0.790 **	0.786 **	0.261	0.307 *	56
东营河口	-0.215	-0.056	0.025	0.230	0.063	44
垦利广饶	0.116	0.103	0.366 *	-0.265	-0.481 **	32
潍坊	-0.165	-0.359 **	0.116	-0.146	0.108	64
莱州—招远	-0.161	0.107	0.136	-0.177	-0.087	112
龙口	0.132	0.680 **	-0.224	-0.273	0.267	27
长岛	0.128	0.370 **	-0.276 **	0.240 *	0.472 **	108
蓬莱	-0.120	0.373 **	-0.058	-0.329 **	0.379 **	63
牟平	0.224	0.208	0.258	0.092	-0.424	20
威海环翠	0.010	-0.139	0.051	0.016	0.449 **	144
荣成	-0.145	-0.067	0.302 **	0.096	0.518 **	132
文登	0.017	-0.341 *	0.152	0.126	0.245	48
乳山	-0.253 **	0.137	0.598 **	-0.071	0.759 **	108
海阳—莱阳	-0.263 **	-0.052	0.117	0.364 **	0.553 **	128
日照	-0.576 **	-0.490 **	0.334 **	0.379 **	0.766 **	160
全省	-0.051	-0.143 **	0.137 **	0.028	0.298 **	1 246

注：* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关；** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

大多数养殖区域,DIN 与盐度呈显著负相关关系(表 3),盐度越低,DIN 越高,显示陆源低盐水注入对增养殖区营养盐浓度影响较大,是营养盐主要来源之一。DIN 浓度高值主要出现在渤海湾滨州区片与东营河口区片、莱州湾西南部垦利—广饶区片及潍坊区片、山东南部的乳山—莱阳水片,这些水域恰好有套尔河、潮河、黄河、小清河、弥河及乳山河、五龙河等较大江河注入,且多为半封闭海湾,扩散缓慢,易形成低盐、高氮水团。莱州—招远、蓬莱、文登、乳山、海阳—莱阳、日照区片 DIN 与水深为显著负相关,滨州、东营河口、垦利—广饶、潍坊区片,DIN 与水深无显著相关关系,其原因可能是该区片属平原海岸,具广阔潮滩,海底地形十分平坦,水深变化较小,与岸线垂直的往复潮流为主要水动力,DIN 在水深梯度上不发生明显变化。

滨州、乳山、海阳—莱阳及日照区片,近岸浅水区 PO₄-P 高于深水区,其他区域与水深无明显关系(表 4)。滨州、潍坊、日照及文登区片,PO₄-P 与盐度呈显著负相关,龙口、长岛、蓬莱区片与盐度呈显著正相关,其他区域无显著相关关系。通常,磷进入海水主要通过河流输入及大气沉降等,迁出主要通过生物吸收、沉积物吸附与沉淀等。但龙口、长岛及蓬莱区片呈现出盐度越高,PO₄-P 越高的现象,其原因及机理尚不清楚,有待进一步研究。

DIN 与 PO₄-P 在黄海区域存在着显著正相关

关系,显示二者在生物吸收与再生中的一致关系;渤海区片的 DIN 与 PO₄-P 相关性较差,垦利—广饶区片甚至出现显著负相关关系。山东渤海段有黄河、小清河、潮河、套尔河等较大河流汇入,黄海段入海河流多为季节性,径流量远小于渤海段。这反映出在陆源径流量大的水域,氮、磷浓度分布由完全不同的因素控制,生物消耗与释放成为次要调控因素。结合渤海区片 N/P 比值远远高于黄海区片的调查结果,显示山东省海水增养殖区氮的水平分布主要受陆源径流输入的影响,同时亦受水动力及海洋生物的影响;磷水平分布无明显规律性,除陆源输入外,可能与水动力、生物作用等因素关系也较密切。

3.2 对海水增养殖活动的影响

贝类、海带为山东省主要海水养殖种类,其生长分别依靠滤食浮游植物及通过光合作用进行,海水中适量的氮、磷营养盐及 N/P 值有利于贝类及海洋大型藻类的生长和繁殖,反之可导致养殖生物死亡或产量下降^[8]。Fisher 等研究发现浮游植物生长的限制阈值为 DIN=0.03 mg/L,PO₄-P= 0.006 mg/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^[9]。2016 年,山东省海水增养殖区 PO₄-P 平均浓度为 0.005 98 mg/L,67.5 % 站次低于 0.006 mg/L; DIN 平均浓度为 0.192 mg/L,3.5 % 站次小于 0.03 mg/L,养殖区片 N/P 比值均

显著高于 Redfield 比值(原子质量比 7.2 : 1), 70.8%站次大于 20 : 1, 整个养殖区总体呈现低磷、高氮、高 N/P 比的营养盐结构特征。莱州—招远、日照、海阳—莱阳、蓬莱、龙口及垦利—广饶区片 PO_4 —P 年平均浓度为 0.002 45 mg/L、0.003 91 mg/L、0.003 90 mg/L、0.004 32 mg/L、0.005 04 mg/L、0.005 32 mg/L, 处于磷限制性贫营养盐状态。养殖生态系统依靠内部营养盐快速循环及外部营养盐持续供给来维持, 因而, 在人工鱼礁、筏架等养殖设施布设时, 必须考虑水动力对营养盐循环的影响, 并根据营养盐水平估算适宜的养殖容量。 NH_4 —N 过高时, 会对养殖贝类、虾蟹类及鱼类的生长产生抑制毒害作用^[10]。夏季, 海水底层易形成低氧水团, 缺氧条件下反硝化作用增强, 同时海洋生物代谢旺盛, 含氮排泄物释放量增大, NH_4 —N 常在该季节达到最高, 因而夏季需注意监测, 避免氨氮对养殖生物的有害影响。

3.3 营养盐历史变迁

1997 年春季, 莱州湾南部表层海水 DIN 为 0.151 mg/L, PO_4 —P 为 0.002 79 mg/L^[11], 本研究决定资料显示, 分布于同一水域的潍坊养殖区表层海水 DIN 为 0.655 mg/L, PO_4 —P 为 0.007 44 mg/L, DIN 在 19 年间约上升了 3 倍, PO_4 —P 约上升了 1.5 倍。受 DIN 增加的影响, N/P 比值显著升高; 2001 年莱州湾 N/P 比值平均为 31.4 : 1^[10], 2016 年升至 162.9 : 1。1995—2005 年, 渤海湾 DIN 浓度年变化范围为 0.304~0.99 mg/L, PO_4 —P 浓度年变化范围为 0.015~0.061 mg/L^[12]; 滨州及东营河口养殖区位于渤海湾南部, 2016 年, 该水域 DIN 与 PO_4 —P 浓度分别为 0.467 mg/L、0.009 22 mg/L, 与历史资料相比, DIN 变化不大, PO_4 —P 明显下降, N/P 比值由本世纪初的约 11.2 升至 2016 年的 50.7。

4 结论

(1) 山东省海水增殖区 DIN 营养盐分布和 N/P 比值分布离散度大, 区域特征明显, 渤海段 DIN 浓度及 N/P 比值明显高于黄海段养殖区; DIN 高值区分布于莱州湾湾底、黄河口邻近海域及渤海湾南部养殖区。

(2) 山东省海水增殖区 PO_4 —P 普遍很低, N/P 比值远远高于 Redfield 比值, 约 2/3 养殖水域呈磷限制性贫营养状态。

(3) 有较大河流注入养殖区片, DIN 与盐度呈显著负相关关系, 其他区域关系不明显。 PO_4 —P 水平分布无明显规律性, 个别区域与盐度负相关, 部分区域与盐度正相关或没有明显关系。陆源径流输入是 DIN 空间分布的主要调控因子。

(4) 水深大于 10m 海区, 冬季表层海水中 DIN 高于底层; 春、夏、秋季, 表、底层营养盐无明显差别。仅就营养盐而言, 近岸海域水深非海水增殖限制因素。

参考文献

- [1] JEAN-FRANÇOIS M, WAFAR M, MADEC C, et al. Nitrogen and phosphorus requirements of an *Alexandriumminutum* bloom in the Penzé Estuary, France [J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(4): 1108—1114.
- [2] HODGKISS I J, LU S H. The effects of nutrients and their ratios on phytoplankton abundance in Junk Bay, Hong Kong [J]. Hydrobiology, 2004, 512(1/3): 215—229.
- [3] 李洪波, 梁玉波, 袁秀堂, 等. 辽宁长海县海域营养状况季节分析与评价 [J]. 海洋环境科学, 2010, 29(5): 689—692.
- [4] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [5] 刘爱英, 马元庆, 李斌, 等. 山东省三个贝类增殖区营养盐季节分布及营养盐限制性分析 [J]. 海洋环境科学, 2013, 32(1): 54—57.
- [6] 孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物—水界面扩散通量研究 [J]. 海洋学报, 2010, 32(6): 109—117.
- [7] 过峰, 赵俊, 陈聚法, 等. 胶州湾贝类养殖区氮、磷污染现状及动态变化 [J]. 渔业科学进展, 2012, 33(5): 116—122.
- [8] FAO. Culture of kelp *Laminaria japonica* in China. RAS/86/024 Training Manual 89/L.p140.
- [9] FISHER TR, PEELE ER, AMMERMAN JW, et al. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay [J]. Mar Ecol-Progr Series, 1992, 82: 51—63.
- [10] JAYASANKAR P, MUTHU MS. Toxicity of nitrite to the larvae of *Penaeus indicus*. Indian Journal of Fish [J]. 1983, 30: 231—240.
- [11] 孙丕喜, 王波, 张朝辉, 等. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系 [J]. 海洋科学进展, 2006, 23(3): 329—335.
- [12] 张洁帆, 陶建华, 李清雪, 等. 渤海湾氮磷营养盐年际变化规律研究 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(7): 2063—2064.