

2018年山东近岸养殖区营养盐结构及限制特征

赵玉庭, 苏博, 马元庆, 谷伟丽, 邢红艳,
李佳蕙, 董晓晓, 孙珊

(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, 山东烟台 264006)

摘要:本研究依据 2018 年山东近岸养殖区调查资料, 采用营养盐限制法则评价方法, 对 DIN、PO₄-P、SiO₃-Si 的平面分布、结构及限制特征进行了分析。结果显示, 2018 年, 山东近岸养殖区 DIN、PO₄-P 和 SiO₃-Si 年平均浓度分别为 (0.253±0.048) mg/L、(0.00743±0.00238) mg/L 和 (0.269±0.089) mg/L, 渤海养殖区片的 DIN、SiO₃-Si 浓度总体高于黄海养殖区片, 高值站位多分布于莱州湾等半封闭海湾; PO₄-P 浓度均普遍较低。N/P、Si/N 和 Si/P 的年平均值分别为 131±47、0.92±0.47 和 90±60。N/P 高值区多分布于渤海养殖区及海阳—莱阳片区; Si/N、Si/P 高值区多分布于牟平片区及渤海的潍坊、龙口及莱州—招远片区。对营养盐限制状况的分析表明, 山东近岸养殖区营养盐结构表现为明显的磷限制和枯水期的硅限制。4 个季节磷限制状况都较为明显, 枯水季节的冬季、春季和秋季硅限制较为明显。建议滩涂贝类养殖区片合理规划放养密度, 充分利用海洋初级生产力, 净化水质; 筏式养殖贝类、藻类养殖区片积极推广贝藻兼养、轮养, 开展时空立体养殖, 调整养殖品种结构, 改善因营养结构改变导致的贫营养状况。

关键词: 山东近岸养殖区; DIN; PO₄-P; SiO₃-Si; 营养盐结构; 限制特征

中图分类号: X132

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)05-0714-09

Characteristics of nutrient structures and limitation of coastal aquaculture area in Shandong province, 2018

ZHAO Yu-ting, SU Bo, MA Yuan-qing, GU Wei-li, XING Hong-yan,
LI Jia-hui, DONG Xiao-xiao, SUN Shan

(Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai 264006, China)

Abstract: Based on field data of nutrients observed in coastal aquaculture area in Shandong province, 2018, using the methods of nutrient limitation, the distribution characteristics of nitrogen, phosphorus and silicate were analyzed and discussed. The results showed that the average annual concentrations of DIN, PO₄-P and SiO₃-Si in Shandong coastal culture areas were (0.253±0.048) mg/L, (0.00743±0.00238) mg/L and (0.269±0.089) mg/L, respectively. The concentrations of DIN and SiO₃-Si in Bohai aquaculture area were generally higher than those in Yellow Sea aquaculture area, and the high-value stations were mostly distributed in the semi-closed bay, such as Laizhou Bay, Dingzi Bay. The concentration of PO₄-P was generally low. The annual mean ratios of N/P, Si/N and Si/P were 131±47, 0.92±0.47 and 90±60, respectively. The areas with high N/P ratio were mainly distributed in Bohai and Haiyang-Laiyang area. Most Si/N, Si/P high-value stations were distributed in Muping area in the east of Shandong Peninsula and Weifang, Longkou and Laizhou-Zhaoyuan

收稿日期: 2021-06-08, 修订日期: 2021-07-26

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2020CXGC011404); 国家重点研发计划项目(2018YFC1407601, 2018YFC1407605)

作者简介: 赵玉庭(1986—), 男, 山东诸城人, 硕士, 工程师, 研究方向为海洋环境监测与评价, E-mail: zhaoyutingnihao@126.com

通讯作者: 马元庆, 正高级工程师, 研究方向为海洋环境监测与评价, E-mail: erma0402@163.com

area. The analysis of the nutrient structure showed that the nutrient structure of Shandong coastal culture area was obviously limited by phosphorus and limited by silicon in dry season. The phosphorus limitation was obviously in four seasons, and the silicon limitation was obviously during dry season. It is suggested that the reasonable planning of stocking density can not only effectively increase the amount of shellfish resources, but also make full use of marine primary productivity to purify water quality. It should actively promote the simultaneous cultivation and rotation of shellfish and algae in raft aquaculture shellfish and algae aquaculture areas, adjust the structure of culture products, and improve the poor nutritional status caused by the change of nutritional structure.

Key words: aquaculture area; inorganic nitrogen; phosphorus; silicate; characteristics of nutrient structures; limitation

海水中的营养盐是海洋浮游植物生长繁殖必需的成分,其含量是影响初级生产力的重要因子,营养盐浓度、形态和结构的变化会引起初级生产力的变化,进而产生相应的生态环境效应,影响整个海洋生物资源^[1-5]。山东濒临渤海与黄海,海岸线曲折漫长,其广阔水域可供海水增殖的面积达到2.3万平方千米,占全国海水养殖面积的24.3%^[6]。山东省主要海水养殖种类为贝类和海带,海水中合适的氮、磷、硅有利于贝类及大型藻类的生长,反之可导致其死亡^[7]。近年来,无机氮污染及营养盐结构失衡已成为海洋环境的突出问题^[7-9],但对于指导海水养殖业生产的研究较少,因此,研究山东近岸养殖区营养盐结构特征及限制状况分布区域对了解山东省近岸养殖生态系统具有重要的指导意义。

本研究基于2018年3月(冬季)、5月(春季)、8月(夏季)和10月(秋季)山东近岸养殖区的生态调查资料,分析了4个季节营养盐浓度分布,并对其结构状况及限制特征进行了探讨,旨在了解山东近岸养殖区营养盐状况及养殖风险区域,为海水养殖业的可持续发展及海域养殖空间的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查时间与站位

本研究于2018年3月(10日—30日)、5月(3日—25日)、8月(1日—27日)和10月(8日—31日)开展4个航次调查。根据地理位置及增殖特点将山东海水增殖区划分为15个区片(图1),滨州至潍坊4个区片以滩涂贝类为主,兼池塘养殖;莱州—招远至威海环翠6个区片以筏

式贝类、刺参底播养殖为主;荣成区片主要为筏式藻类、筏式贝类养殖;文登、乳山、海阳—莱阳3个区片以筏式牡蛎为主,兼有池塘养殖;日照区片以筏式贝类为主。按照近岸站位密、离岸站位疏的原则,网格式布设监测站位320个,其中,滨州—潍坊区片海岸带高潮线和低潮线之间距离较大,故在此区域内未设置调查站位(图1),监测站位覆盖面积约1.2万平方千米。

1.2 调查项目与分析方法

样品采集按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《海洋调查规范》(GB 12763—2007)进行。样品分析按照《海洋监测技术规程》(GB/T 147—2013)进行。分析项目包括氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)和硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$),均采用流动分析法测定(德国SEAL, QuAAtro营养盐自动分析仪),其中,无机氮(DIN)= $\text{NO}_3\text{-N}+\text{NO}_2\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$,数据均采用表层水样数据。

1.3 数据统计及评价方法

本文采用杨东方^[10]提出的营养盐限制法则对山东近岸养殖区营养状况进行评价。依据其对营养盐限制的判断方法,只有绝对限制法则^[11]和相对限制法则^[12]同时满足,才可以确定浮游植物生长限制的营养盐。营养盐限制的判断方法如表1所示。

2 结果与讨论

2.1 营养盐浓度与分布

2.1.1 DIN浓度与分布

各养殖区之间的DIN浓度变化较大,不同季节DIN浓度变化如图2所示,冬季、春季、夏季

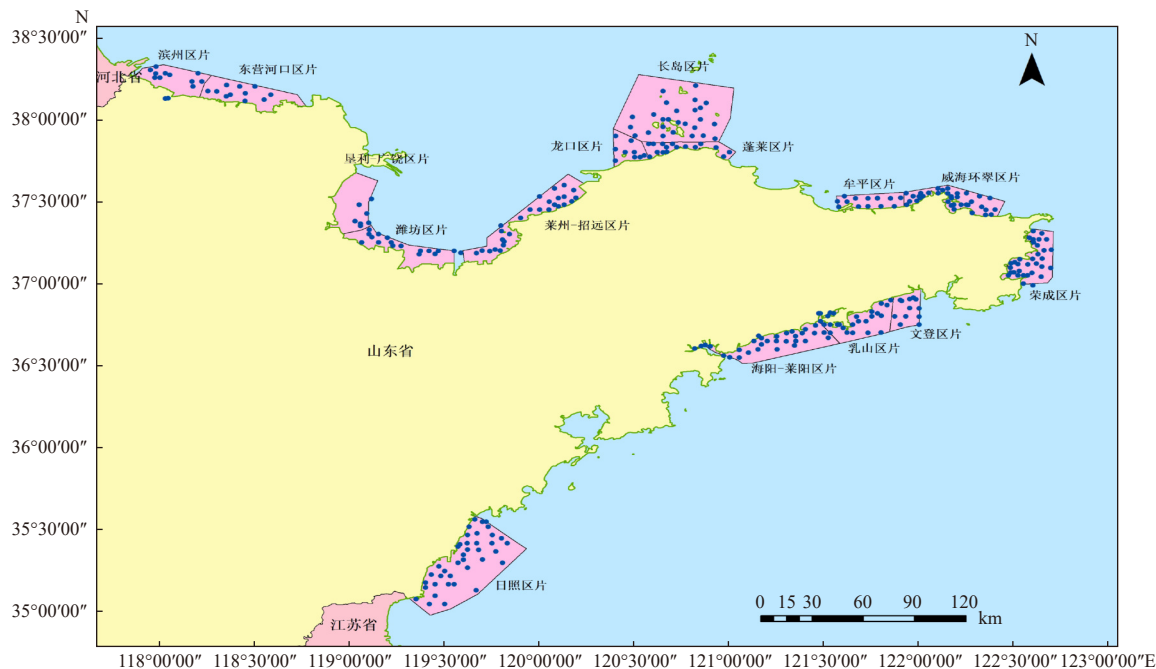


图 1 山东省海水养殖区地理位置及调查站位

Fig. 1 Location of sampling stations of culture zones

表 1 营养盐限制的判断方法

Tab.1 Methods of nutrient limitation

限制因子	DIN/mg·L ⁻¹	PO ₄ -P/mg·L ⁻¹	SiO ₃ -Si/mg·L ⁻¹	N/P	Si/N	Si/P
DIN限制	<0.014	/	/	<10	>1	/
PO ₄ -P限制	/	<0.0031	/	>22	/	>22
SiO ₃ -Si限制	/	/	<0.056	/	<1	<10

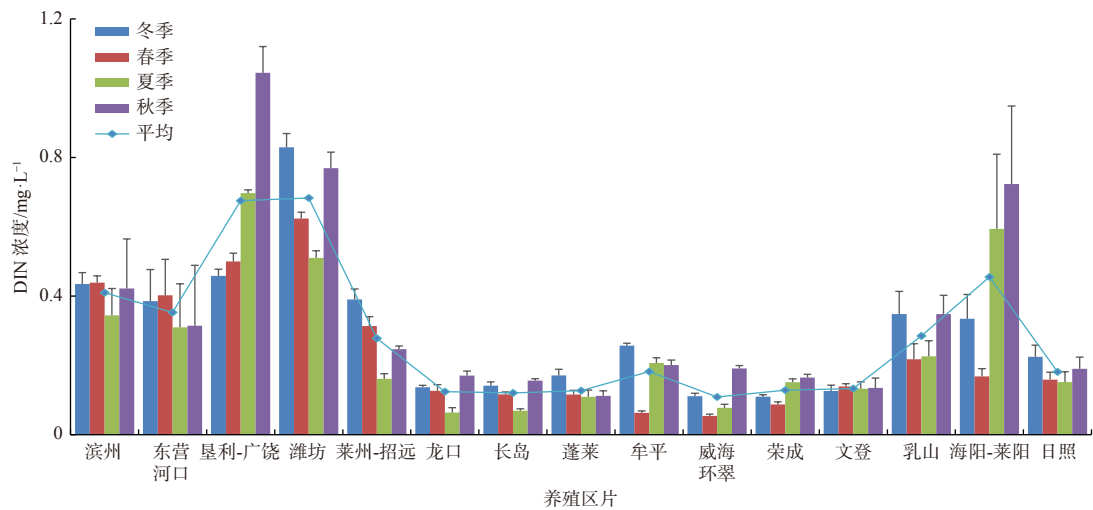


图 2 不同区片、不同季节 DIN 浓度变化

Fig. 2 Variation of DIN concentration in different areas during 4 seasons

和秋季 DIN 浓度分别为 0.273 mg/L、0.200 mg/L、0.228 mg/L 和 0.310 mg/L, 季节变化特征表现为春、夏季较低, 秋、冬季较高, 年平均浓度为 (0.253±0.048) mg/L。渤海养殖区片的 DIN 浓度总体高于黄海养殖区片, 有江河汇入的半封闭海湾高于开敞水域。高值站位多分布于莱州湾的

潍坊、垦利—广饶及莱州—招远区片; 渤海湾的滨州及东营河口区片; 山东半岛南部的海阳—莱阳区片。潍坊区片 DIN 浓度范围为 0.0420 ~ 1.75 mg/L, 年平均值为 0.683 mg/L, 垦利—广饶、海阳—莱阳、滨州区片的年平均浓度分别为 0.675 mg/L、0.455 mg/L 及 0.410 mg/L。山东半岛东部养殖区片(龙口往东至文登)及日照区片 DIN 浓度相对较低, 年平均值为 0.109 ~ 0.181 mg/L。

2.1.2 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度与分布

不同区片、不同季节 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度变化如图 3 所示。山东海水增养殖区 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度普遍较低,

仅 1.6% 的站位超过二类海水水质标准, 高值站位多出现于垦利—广饶、文登、潍坊及海阳—莱阳区片。冬季、春季、夏季和秋季, 山东省养殖区海水 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均浓度分别为 0.00718 mg/L、0.00450 mg/L、0.00773 mg/L 及 0.0103 mg/L, 季节变化特征表现为春季较低、秋季较高, 年平均浓度为 (0.00743 ± 0.00238) mg/L, 仅 10 月略高。

2.1.3 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度与分布

各养殖区之间 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化情况与 DIN 相似, 不同季节 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化如图 4 所示, 冬季、春季、夏季和秋季 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度分别为 0.203 mg/L、

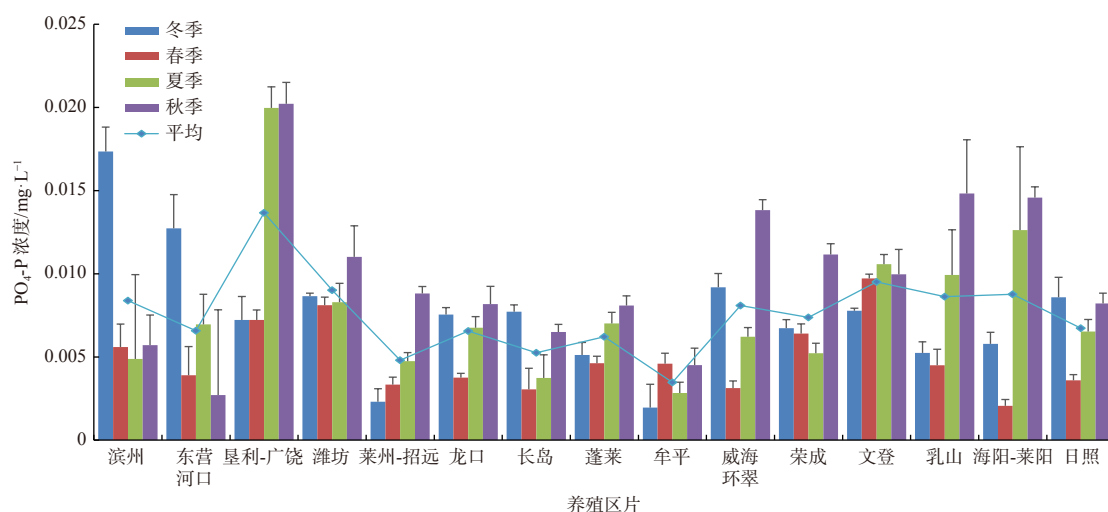


图 3 不同区片、不同季节 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度变化

Fig. 3 Variation of $\text{PO}_4\text{-P}$ concentration in different areas during 4 seasons

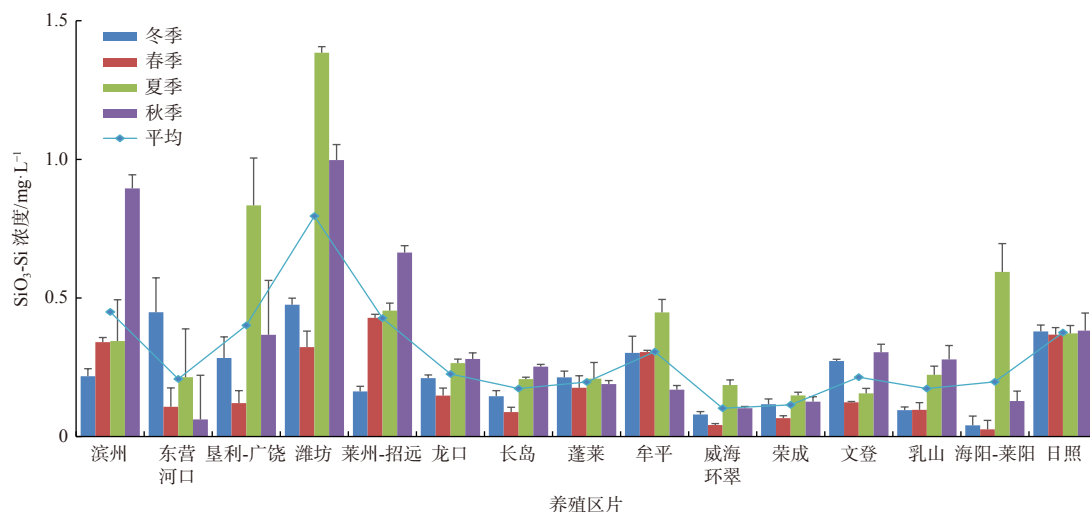


图 4 不同区片、不同季节 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化

Fig. 4 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in different areas during 4 seasons

0.183 mg/L、0.368 mg/L 和 0.321 mg/L, 季节变化特征表现为春、冬季较低, 夏、秋季较高, 年平均浓度为 (0.269 ± 0.089) mg/L。春季, 因浮游植物(多为硅藻)大量繁殖, 硅酸盐浓度明显降低; 夏季, 由于水温升高, 硅藻繁殖受到抑制, 再加上径流影响, 硅酸盐浓度有一定升高。渤海养殖区片的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度总体高于黄海养殖区片。高值站位多分布于莱州湾的潍坊、莱州—招远区片、垦利—广饶; 渤海湾的滨州区片; 山东半岛南部的日照区片。潍坊区片 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度范围为 0.0440 ~ 2.21 mg/L, 年平均浓度为 0.795 mg/L, 滨州区片、莱州—招远区片、垦利—广饶和日照区片的年平均浓度分别为 0.450 mg/L、0.427 mg/L、0.401 mg/L 及 0.375 mg/L。山东半岛东部养殖区片(龙口往东至莱阳) $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度相对较低, 年

平均浓度为 0.102 ~ 0.306 mg/L。

2.2 营养盐结构分布特征

2.2.1 N/P 分布特征

各养殖区间 N/P 变化较大, 不同季节 N/P 值变化如图 5 所示。冬季、春季、夏季和秋季 N/P 分别为 209、178、170 和 97, 年平均值为 131 ± 47 。渤海养殖区片的 N/P 值总体高于黄海养殖区片, 有江河汇入的半封闭海湾高于开敞水域。高值站位多分布于山东半岛南部的海阳—莱阳区片及渤海的莱州—招远区片、潍坊、垦利—广饶区片。海阳—莱阳区片 N/P 年平均值为 406, 莱州—招远区片、垦利—广饶区片年平均值分别为 399 和 390。山东半岛东部养殖区片(龙口往东至乳山)及日照区片 N/P 相对较低, 年平均值为 33 ~ 210。

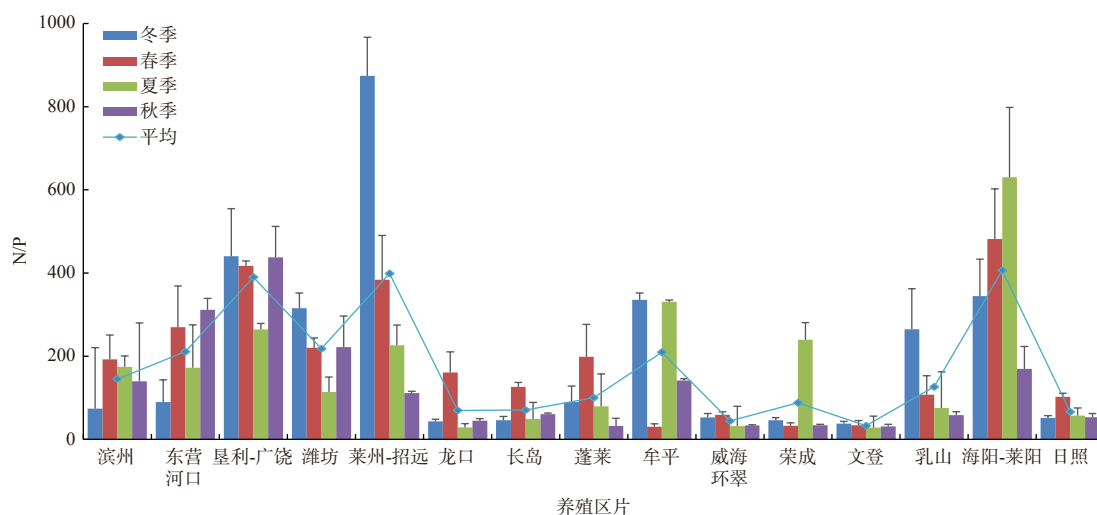


图 5 不同区片、不同季节 N/P 变化

Fig. 5 Variation of N/P value in different areas during 4 seasons

2.2.2 Si/N 分布特征

各养殖区间 Si/N 变化较大, 不同季节 Si/N 值变化如图 6 所示。冬季、春季、夏季和秋季的 Si/N 分别为 0.51、0.83、1.60 和 0.75, 年平均值为 0.92 ± 0.47 。高值站位多在山东半岛东部的牟平区片及渤海的潍坊、龙口、莱州—招远区片。牟平区片年平均值为 2.70, 潍坊、龙口及莱州—招远区片年平均值分别为 2.55、1.30 及 1.23。山东半岛养殖区片(威海环翠至海阳—莱阳区片)相对较低, 年平均值为 0.13 ~ 0.82。

2.2.3 Si/P 分布特征

各养殖区间 Si/P 变化较大, 不同季节 Si/P 变化如图 7 所示。冬季、春季、夏季和秋季 Si/P 分别为 54、66、181 和 62, 年平均值为 90 ± 60 。高值站位多分布于渤海湾的潍坊、莱州—招远区片、海阳—莱阳、牟平区片。潍坊区片年平均值为 285, 海阳—莱阳、莱州—招远及牟平区片年平均值分别为 202、183 及 136。山东半岛东、南部养殖区片(威海环翠至乳山区片)相对较低, 年平均值为 20 ~ 39。

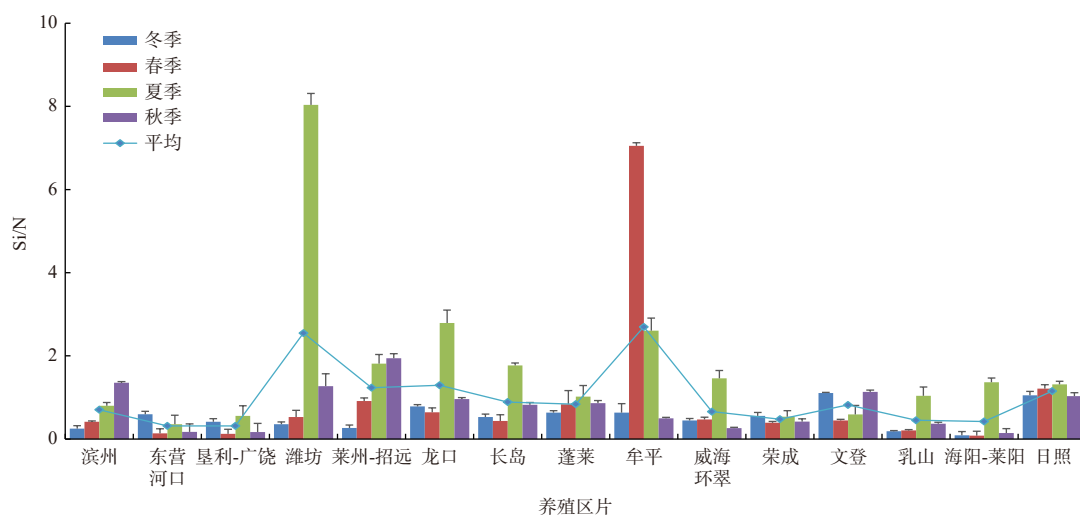


图6 不同区片、不同季节 Si/N 变化

Fig. 6 Variation of Si/N value in different areas during 4 seasons

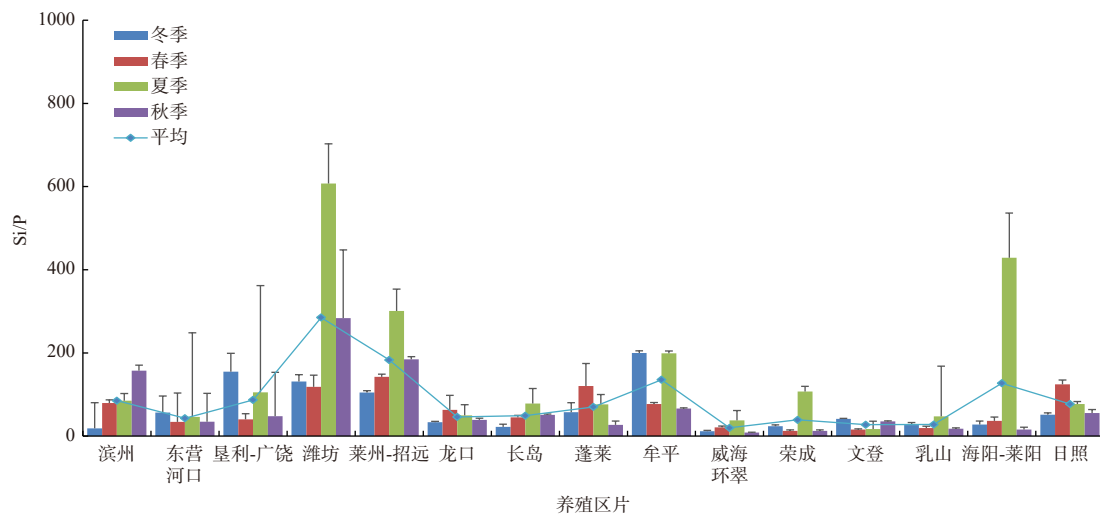


图7 不同区片、不同季节 Si/P 变化

Fig. 7 Variation of Si/P value in different areas during 4 seasons

2.3 营养盐限制特征

依据营养盐限制法则, 山东近岸养殖区营养盐限制状况如表2所示, 各站位营养盐限制状况如图8所示。冬季, 213个站位无限制, 占比为66.56%, 从渤海至黄海均有分布, 58个站位为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 限制, 占比为18.13%, 主要分布在莱州—招远区片和牟平区片, 49个站位为 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 限制, 占比为15.31%, 主要分布在威海环翠区片和海阳—莱阳区片; 春季, 186个站位无限制, 占比为58.13%, 从渤海至黄海均有分布, 88个站位为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 限制, 占比为27.50%, 分布区域较广, 主要分布在黄海南部的日照区片、海阳—莱阳

区片; 烟台的长岛区片、莱州—招远区片; 威海环翠区片, 46个站位为 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 限制, 占比为14.38%, 主要分布在山东半岛东南部的威海环翠区片、海阳—莱阳区片、荣成区片和乳山区片; 夏季, 213个站位无限制, 占比为66.56%, 分布区域较广, 从渤海至黄海均有分布, 98个站位为 $\text{PO}_4\text{-P}$ 限制, 占比为30.63%, 主要分布在黄海南部的乳山区片、海阳—莱阳区片及烟威海域的莱州—招远至荣成区片, 9个站位为 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 限制, 占比为2.81%, 主要分布在威海环翠区片和东营河口区片; 秋季, 272个站位无限制, 占比为85.00%, 从渤海至黄海均有分布, 23个站位为

PO₄-P 限制, 占比为 7.19%, 主要分布在渤海的东营河口—潍坊区片, 25 个站位为 SiO₃-Si 限制, 占比为 7.81%, 主要分布在黄海南部的海阳—莱阳区片及东部的威海环翠区片。

表 2 山东近岸养殖区营养盐限制状况

Tab.2 Nutritional status of 15 seawater culture area in Shandong province

限制因子	冬季		春季		夏季		秋季	
	站位数/个	占比/(%)	站位数/个	占比/(%)	站位数/个	占比/(%)	站位数/个	占比/(%)
无限制	213	66.56	186	58.13	213	66.56	272	85.00
PO ₄ -P限制	58	18.13	88	27.50	98	30.63	23	7.19
DIN限制	0	0	0	0	0	0	0	0
SiO ₃ -Si限制	49	15.31	46	14.38	9	2.81	25	7.81

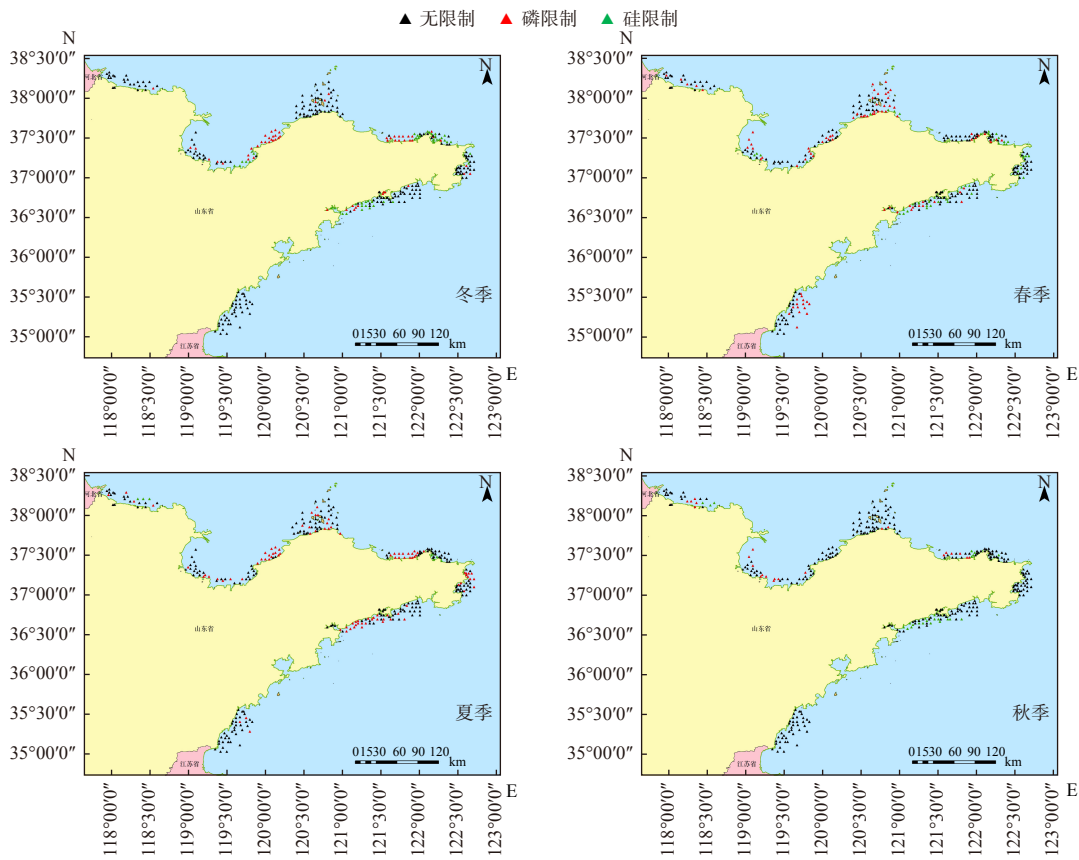


图 8 山东近岸养殖区营养盐限制特征

Fig. 8 Characteristics of nutrient limitation of coastal aquaculture area in Shandong province

通过营养盐限制法则判断, 营养盐结构表现为明显的磷限制和枯水期的硅限制。4 个季节磷限制状况都较明显, 春季、夏季磷限制状况较重, 分布区域较广, 从渤海的滨州区片至黄海的日照区片均有分布; 冬季、秋季磷限制状况有所缓解, 冬季主要分布在莱州—招远、牟平区片, 秋季主要分布在渤海的东营河口—潍坊区片。

枯水季节的冬季、春季和秋季, 硅限制较为明显, 主要分布在山东半岛东部的环翠区片至南部的乳山区片, 随着夏季陆源输入的增加, 硅限制状况有所减轻, 只在威海环翠区片有零星分布。

2.4 营养盐地区性差异及历史变迁

山东濒临渤海与黄海, 渤海养殖区位于相对封闭的渤海湾与莱州湾近岸水域, 且该水域具有

较大的河流汇入,如黄河、小清河、套尔河等,流入渤海的河流年径流量为 $476.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13];山东黄海海域相对开放,水动力较强,入海径流量小,流入黄海的河流年径流量为 $25.8 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[13]。受陆源输入及水动力影响,营养盐含量及分布呈现明显的地区性差异,其中,渤海区片明显高于黄海区片,封闭内湾明显高于开放水域。DIN 与 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在莱州湾湾底最高,其次是莱州湾西部与渤海湾南部的近岸水域。海阳—莱阳、乳山养殖区位于丁字湾及乳山湾,且五龙河及乳山河在此汇入,DIN 高于其他黄海养殖区。

山东各海水增养殖区的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 年均值为 $0.00347 \sim 0.0137 \text{ mg/L}$,存在一定的区域差异,但含量均较低。整个山东海水增养殖区年均值为 0.00743 mg/L ,与北黄海 (0.0076 mg/L)^[14] 相近,低于渤海中部 (0.0155 mg/L)^[15]、江苏近海 ($0.01 \sim 0.03 \text{ mg/L}$)^[16]、浙江象山港 ($0.0189 \sim 0.0531 \text{ mg/L}$)、广东深澳湾 (0.020 mg/L)^[17] 等养殖区。辽河、黄河、长江、珠江年入海总磷分别为 0.33 万吨、0.18 万吨、15.4 万吨、4.3 万吨,渤海与北黄海通过径流补充的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 远低于南黄海及东海、南海^[18]。山东海水增养殖区磷含量普遍偏低,其原因是该海域以贝、藻类养殖为主,藻类光合作用从自然海区吸收大量 $\text{PO}_4\text{-P}$,且陆源补充较少。

1995—2005 年,渤海湾 DIN 浓度年变化范围为 $0.304 \sim 0.99 \text{ mg/L}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度年变化范围为 $0.015 \sim 0.061 \text{ mg/L}$ ^[19]。滨州及东营河口养殖区位于渤海湾南部,2018 年,该水域 DIN 与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度分别为 0.343 mg/L 、 0.00759 mg/L ,与历史资料相比,DIN 变化不大, $\text{PO}_4\text{-P}$ 明显下降,N/P 由 21 世纪初的约 11.2 升至 2018 年的 174。

1997 年春季,莱州湾南部表层海水 DIN 浓度为 0.151 mg/L , $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度为 0.00279 mg/L ^[20],本文调查数据显示,分布于同一水域的潍坊养殖区表层海水 DIN 浓度为 0.683 mg/L , $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度为 0.00902 mg/L ,DIN 浓度在 21 年间上升了约 4.5 倍, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度上升了约 3 倍。受 DIN 增加的影响,N/P 显著升高,2001 年莱州湾 N/P 平均值为 31.4^[19],2018 年升至 131。

2.5 对海水增养殖活动的影响

渤海湾、莱州湾海域的滨州至潍坊区片,营

养盐结构基本为无限制或磷限制状态, $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度较低,DIN、 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度较高。环渤海地区的滨州、东营、潍坊三市海上养殖主要为底播养殖^[21],目前,该海域滩涂贝类的底播养殖多为企业或养殖户的自主行为,一方面,养殖方式粗放,有效养殖面积较低,对滩涂贝类资源的利用与开发缺乏统一规划;另一方面,养殖贝类单一,而且放苗密度、放苗规格、苗种质量等没有统一的标准,放养量往往超出海域生态容纳量,导致贝类摄食不足,成活率较低。建议探讨放苗规格、放苗密度、放苗的不同潮带对其生长的影响,合理规划该海域滩涂贝类放养密度,建立高效养殖模式,既能有效提高贝类资源量,促进贝类资源可持续发展,又能充分利用海洋初级生产力,通过贝类产品将营养盐特别是无机氮由海洋转运至陆地,起到净化水质的作用,改善渤海水域生态环境。

莱州—招远至威海环翠养殖区片,主要养殖方式为筏式贝类养殖,贝类属于滤食性海洋生物,主要滤食浮游植物。营养盐及营养盐结构不仅影响浮游植物的密度,还会影响浮游植物的群落结构。浮游植物是海洋中的生产者,对生态系统的物质循环和能量流动具有重要作用,同时也是扇贝的天然饵料,但为追求局部经济利益,贝类养殖面积和养殖密度越来越大,饵料摄食量增大,破坏了海水中浮游植物群落结构,使浮游植物密度降低,又会导致扇贝饵料不足,收益减少。研究发现,一定海域内扇贝养殖密度与养殖收益成反比,浮游植物密度与养殖收益成正比^[22]。该区片海上养殖主要为筏式栉孔扇贝养殖,养殖周期为 4 月—翌年 1 月,随着栉孔扇贝的生长,海区磷限制状况加重,到扇贝收获季节,磷限制状况有所缓解。因此,在养殖过程中,监测各养殖区的营养盐及营养盐结构状况,可以及时发现浮游植物密度及群落结构变化,从而对养殖密度及海域进行及时调整,保障海域扇贝养殖的可持续发展。

荣成区片海上养殖方式主要为筏式海带养殖,海带养殖周期一般为 10 月—翌年 5 月^[23],海带生长初期(10 月)营养盐结构状况较好,基本为无限制站位,海带在生长过程中吸收大量的营养盐,营养盐浓度降低,至翌年 5 月,随着海带收

获,水体中的营养盐转化到海藻中,在一定程度上降低了水体营养盐的浓度^[24-25],营养盐结构状况转为贫营养(硅限制);8月,由于海带生长过程的消耗及海带的收获,浮游植物的竞争压力减少,浮游植物大量繁殖,磷酸盐几乎消耗殆尽,营养盐结构状况转为磷限制;10月,水体混合加强,沉积物吸附的 DIN、PO₄-P 在波浪、海流等动力因素的作用下不断释放到水体中^[26],同时随着降雨增多,陆源输入的增加也对上层水体营养盐进行补充,海水中营养盐的浓度增高,水体营养盐结构状况良好。

文登区片至海阳—莱阳区片,主要养殖方式为筏式养殖贝类、牡蛎等,养殖区基本属磷限制状态,其海域贝类养殖主要集中在近海区域,呈现明显的空间集聚特征。建议调整养殖结构,改变单一品种养殖模式,在实行多品种综合养殖的基础上,积极推广贝藻兼养、轮养,开展时空立体养殖。可以利用不同类型贝类所需海域条件不同的特点,开发不同距离、不同层次的海域养殖,实现生产海域专门化、空间层次化,并充分利用深海区域,从而解决贝类养殖区域有限、养殖密度大的问题,同时形成自净能力强、生物间相互利用的稳定的海洋生态系统。

日照区片营养盐结构基本为磷限制状态,PO₄-P 浓度较低, DIN、SiO₃-Si 浓度处于中等水平。日照海域属于开敞海域,水体交换能力较强,污染物扩散速度也较快^[27],且底质环境多为砂泥质、岩礁型,水质较好且相对稳定。海水养殖生态系统依靠外部营养盐持续供给及内部营养盐快速循环来维持,日照浅海养殖主养品种为贻贝,可考虑逐步压缩贻贝养殖规模,适量增加网箱养殖、人工鱼礁数量,调整养殖品种结构,增强内部营养盐供给能力,提高 PO₄-P 含量。同时,在网箱、筏架、人工渔礁等养殖设施布设时,分析考虑水动力对营养盐循环的影响,增强外部 PO₄-P 供给能力,并根据营养盐水平估算适宜的养殖容量。

3 结论

(1)2018年,山东近岸养殖区 DIN、PO₄-P

和 SiO₃-Si 年平均浓度分别为(0.253±0.048)mg/L、(0.00743±0.00238)mg/L 和 (0.269±0.089)mg/L,渤海养殖区片的 DIN、SiO₃-Si 浓度总体高于黄海养殖区片,有江河汇入的半封闭海湾高于开敞水域,高值站位多分布于半封闭海湾的莱州湾、渤海湾、丁字湾及乳山湾等海域;PO₄-P 浓度普遍较低,仅 1.6% 的站位超二类海水水质标准,整体表现为渤海海域高于黄海海域。

(2)N/P、Si/N 和 Si/P 年平均值分别为 131±47、0.92±0.47 和 90±60。N/P 高值区多分布于渤海的莱州—招远、潍坊、垦利—广饶区片及山东半岛南部的海阳—莱阳区片;Si/N 高值站位多分布于山东半岛东部的牟平区片及渤海的潍坊、龙口、莱州—招远区片;Si/P 高值区多分布于山东半岛东部的牟平区片及渤海的潍坊、龙口、莱州—招远区片。

(3)营养盐限制状况的分析表明,山东近岸养殖区营养盐结构表现为明显的磷限制和枯水期的硅限制。4 个季节磷限制状况均较明显,枯水季节的冬季、春季和秋季硅限制较明显。

(4)建议滩涂贝类养殖区片合理规划放养密度,既能有效提高贝类资源量,又能充分利用海洋初级生产力,净化水质;筏式养殖贝类、藻类养殖区片应积极推广贝藻兼养、轮养,开展时空立体养殖,适量增加网箱养殖数量,调整养殖品种、结构,改善因营养结构改变导致的贫营养状况。

参考文献:

- [1] 颜秀利,翟惟东,洪华生,等. 九龙江口营养盐的分布、通量及其年代际变化[J]. 科学通报, 2012, 57(17): 1575-1587.
- [2] NING X R, LIN C L, SU J L, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960–1996[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2010, 57(11/12): 1079-1091.
- [3] 孙萍,李瑞香,李艳,等. 2005年夏末渤海网采浮游植物群落结构[J]. 海洋科学进展, 2008, 26(3): 354-363.
- [4] MAGUER J F, WAFAR M, MADEC C, et al. Nitrogen and phosphorus requirements of an *Alexandrium minutum* bloom in the Penzé Estuary, France[J]. Limnology and Oceanography, 2004, 49(4): 1108-1114.

(下转第 730 页)