DOI: 10.5846/stxb201304220767

段丽琴,宋金明,袁华茂,李学刚,李宁,马继坤.北黄海獐子岛养殖海域营养水平与虾夷扇贝增殖渔获量评估.生态学报,2015,35(4):1004-1013. Duan L Q, Song J M, Yuan H M, Li X G, Li N, Ma J K.Estimation of nutrient level and fishery yield of *Patinopecten yessoensis* in mariculture area near the Zhangzidao Island of the north Yellow Sea.Acta Ecologica Sinica,2015,35(4):1004-1013.

北黄海獐子岛养殖海域营养水平与虾夷扇贝增殖渔获 量评估

段丽琴1,宋金明1,*,袁华茂1,李学刚1,李 宁1,马继坤2

1 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室,青岛 2660712 中国水产科学研究院黄海水产研究所财务条件处,青岛 266071

摘要:营养盐作为浮游植物生长的物质基础,对海洋生态系统的物质循环起着决定性作用。调查研究了獐子岛附近海域营养盐 含量水平、空间分布及营养盐结构,并据此估算了现有营养水平可支持的潜在生物量,评估了该海域虾夷扇贝增殖渔获量。结 果表明,獐子岛附近海域海水总体营养水平较低,底层水中的营养盐浓度是表层水的 2—3 倍,海水中的营养盐浓度基本高于浮 游植物生长的最低阈值,且溶解无机氮与磷酸盐的比值(DIN/PO₄-P)和硅酸盐与磷酸盐的比值(SiO₃-Si/PO₄-P)均>22,全海域 为磷营养限制。根据磷限制因子及食物链能流转移理论估算,该海域 1000 km²现有的营养水平可支持一个生长周期内虾夷扇 贝增殖的动态理论生产量为 3.8—6.1 万 t,如人为增加 5%—20%的水体磷,则虾夷扇贝增殖产量可增加 0.25—1.00 万 t。 关键词:营养水平;虾夷扇贝增殖;渔获量评估;獐子岛附近海域

Estimation of nutrient level and fishery yield of *Patinopecten yessoensis* in mariculture area near the Zhangzidao Island of the north Yellow Sea

DUAN Liqin¹, SONG Jinming^{1,*}, YUAN Huamao¹, LI Xuegang¹, LI Ning¹, MA Jikun²

Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China
 The Department of Finance and condition, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China

Abstract: Nutrients as the material basis for phytoplankton growth, play a decisive role in energy flow and matter cycling in marine ecological systems. In this study, the concentrations, spatial distributions and nutrient structure in seawaters near the Zhangzidao Island were studied. Besides, the potential biomass and fishery yield of *Patinopecten yessoensis* which could be supported by the current nutrient level also were estimated. Results suggested that the concentrations of phosphate (PO_4-P) , dissolved inorganic nitrogen (DIN) and silicate (SiO_3-Si) were in the ranges of 0—0.67, 0.77—9.91 and 1.62—18.77 µmol/L, with averages of 0.19, 4.50 and 7.00 µmol/L, respectively. Among them, DIN was mainly dominated by nitrate nitrogen (NO₃-N) with concentrations of 0.04—6.82 µmol/L (average of 2.12 µmol/L), followed by ammonium nitrogen (NH₄-N) with concentrations of 0.40—6.07 µmol/L (average of 1.95 µmol/L), and nitrite nitrogen (NO₂-N) was lowest with concentrations of 0.05—2.10 µmol/L (average of 0.42 µmol/L). Nutrients in the surface waters displayed a decreasing trend from coastal water to the middle area. This distribution was attributed to the riverine inputs (e. g., the Yalu River), which carried a certain amount of nutrients to the north Yellow Sea (NYS). In contrast, nutrients in the bottom waters presented higher values at the middle area and were 2—3 times higher than those in the surface waters. These distribution models were mainly influenced by the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM), biological activities and

收稿日期:2013-04-22; 网络出版日期:2014-04-11

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体科学基金(41121064);国家重点基础研究发展计划 973 项目课题 (2011CB403602)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jmsong@ qdio.ac.cn

Yellow Sea Warm Current (YSWC). In summer, due to the weak vertical mixing, a stable cold water mass having a large number of organic particles entrenched at the bottom layer in the central part of the NYS. By September, organic particles began to decompose, accompanied by the nutrient release to the bottom waters. These released nutrients were difficult to diffuse to the upper layers due to strong thermocline and pycnocline. Consequently, the nutrient values in the bottom waters at the central part of the NYS were higher. Besides the above reasons, biological activities were also an important factor causing the higher nutrient concentrations in the bottom waters than that in the surface waters. Phytoplankton activities in the euphotic layer were frequent and needed to absorb a lot of nutrients to sustain growth and reproduction, resulting in the loss of nutrients in the surface waters. Moreover, the YSWC could carry waters with high temperature and low nutrients to the surface waters of the NYS, diluting the nutrient concentrations in the bottom waters. In addition, nutrient concentrations in waters of the study area were higher than the minimum threshold values for the phytoplankton growth, and DIN/PO₄-P ratio (averages of 28.90) and SiO₃-Si/PO₄-P ratio (averages of 47.27) were >22, suggesting that PO₄-P was the limiting factor. Based on the current PO₄-P concentration and energy flow theory of food chain, the potential enhancement field of *Patinopecten yessoensis* at a growth cycle in 1000 km² sea area was estimated to be 3.8—6.1×10⁴ t. If 5%—20% of PO₄-P was added in this area, the yield of *Patinopecten yessoensis* would increase 0.25—1.00×10⁴ t.

Key Words: nutrient level; enhancement of *Patinopecten yessoensis*; yield estimation; mariculture area near the Zhangzidao Island

近年来,随着因过度捕捞、海洋环境污染造成的海洋渔获量的逐渐衰退,海水养殖的规模和产量日益增加,但海水养殖对生态环境造成的影响也逐渐被人们所认识,导致的直接结果是养殖产量和养殖效益的下降,因此,发展生态养殖、科学养殖、提高养殖生产效益已成为海水养殖产业的努力方向。滤食性贝类的养殖被称为绿色产业,源于贝类养殖不需投饵,以水体中天然的悬浮有机颗粒为食物。悬浮有机颗粒的主要来源为浮游植物通过光合作用而生长繁殖所再生的。因此,浮游植物初级生产能力是影响海域贝类食物供给的主要因素,将对养殖贝类的生长、产量以及海域的容量起决定性的作用^[1]。

营养盐是浮游植物生长和繁殖的物质基础,在浮游植物的光合作用过程中,营养盐为浮游植物所摄取,成 为浮游植物的组成部分,并成为其物质和能量代谢的来源^[2-3]。由此可知,作为浮游植物物质基础的营养盐 从根本上控制着海域渔业资源的容量。因此,研究营养盐的含量水平及其结构组成是探讨其营养物流水平和 其可支持的潜在生物量的基础。

獐子岛海域为我国最大的虾夷扇贝底播养殖基地,2005 年虾夷扇贝的产量达到 1.2 万 t,占全国底播虾夷 扇贝总产量的 46%^[4],该海域养殖产业的健康、可持续发展,已成为当前急待解决的问题。本文通过对獐子 岛附近海域营养盐含量水平和结构组成的分析,查明了獐子岛附近海域海水营养盐基本状况、营养盐水平、营 养结构及影响因子和浮游植物生长限制因子;并根据北黄海和獐子岛附近海域营养水平及结构等情况,依据 食物链能流转移理论,初步估算了北黄海和獐子岛海域各级潜在生物资源量,以期为未来的生态养殖发展提 供科学依据。

1 采样与分析

于 2012 年 9 月乘"科学三"号在北黄海獐子岛附近海域共布设的 36 个调查站位(图 1)进行了海水样品 采集。其中,在所有站位采集了表层(2 m)和底层(离底 2 m)水样,在 NYS1 和 BX-5 断面的 5 个站位采集了 各个深度(主要包括表层、5、10、20、30 m 和底层)水样。水样采集后立即用 0.70 μm GF/F 膜过滤,并用H₂SO₄ (1 mol/L)酸化保存。营养盐使用营养盐自动分析仪(Skalar[®] San Plus)测定,其中 NO₃-N 采用铜镉还原柱 法、NO₂-N 利用重氮偶氮法、NH₄-N 用次溴酸酸钠氧化法、PO₄-P 用磷钼蓝法、SiO₃-Si 用硅钼蓝法测定。DIN

为 NO₃-N、NO₂-N 和 NH₄-N 之和。



Fig.1 Sampling stations in mariculture area near the Zhangzidao Island

结果与讨论 2

2.1 营养盐水平

海水中的溶解无机氮、活性磷酸盐、活性硅酸盐是海洋浮游生物生长和繁殖所必需的营养盐,对海洋生态 系统的物质循环和能量流动有重要的意义。獐子岛附近海域海水中的 PO₄-P、DIN 和 SiO,-Si 的浓度范围分 别为 0-0.67、0.77-9.91 和 1.62-18.77 μmol/L,平均值分别为 0.19、4.50 和 7.00 μmol/L。溶解无机氮主要 以 NO₃-N 为主,含量范围为 0.04—6.82 μmol/L,平均值为 2.12 μmol/L; NH₃-N 次之,含量范围为 0.40—6.07 μmol/L,平均值为 1.95 μmol/L;NO₂-N 最低,含量范围为 0.05—2.10 μmol/L,平均值为 0.42 μmol/L。臧璐^[5] 曾对 2006—2007 年春、夏、秋、冬 4 个季节北黄海的营养盐进行了测定,浓度见表 1。对照本研究与其研究结 果表明,本研究中的 DIN 和 SiO₃-Si 浓度是介于其夏季和秋季浓度之间,而 PO₄-P 浓度接近其夏季浓度。

表1 各季节北黄海海水中磷酸盐(PO₄-P)、溶解无机氮(DIN)和硅酸盐(SiO₃-Si)的浓度范围和平均值

Table 1 Ranges (mean) of PO ₄ -P, dissolved inorganic nitrogen (DIN) and SiO ₃ -Si concentrations in each season in the north Yellow Sea						
季节 Season	PO_4 -P/(μ mol/L)	$DIN/(\mu mol/L)$	SiO_3 -Si/(μ mol/L)	文献 References		
春季 Spring	0-0.6(0.18)	0.24—11.12(3.46)	0.12—14.70(3.29)	[5]		
夏季 Summer	0-0.59(0.20)	0.45-23.68(3.32)	0.87—24.51(4.45)	[5]		
秋季 Autumn	0.01—1.07(0.40)	0.53—19.77(6.45)	0.56—18.80(7.64)	[5]		
冬季 Winter	0.04—1.01(0.56)	0.84—12.97(8.00)	0.93—19.12(12.32)	[5]		
全年 All year	0-1.07(0.34)	0.24—23.68(5.32)	0.12-2.30(6.93)	[5]		
9月 September	0-0.67(0.19)	0.77—9.91(4.50)	1.62—18.77(7.00)	本研究		

2.2 空间分布

2.2.1 平面分布

獐子岛附近海域表层海水中的 PO4-P、DIN 和 SiO3-Si 浓度范围分别为 0.01—0.32、0.93—7.65 和 1.62— 12.92 µmol/L,平均值分别为0.10、2.75 和4.70 µmol/L。其表层高值区出现在研究区域北部,即大长山岛和 獐子岛附近海域, PO₄-P、DIN和 SiO₃-Si 的最大值均出现在 B3-1 站位, 即大长山岛附近; 其表层低值区主要出 现在研究区域南部(图2),这种分布模式可能是由于辽南沿岸河流输入影响所致。北黄海的主要输入河流为 鸭绿江,其入海平均流量为1.1×10³m³/s,年总径流量约为3.47×10¹⁰m^{3[6]},9月是其丰水期和枯水期的过渡时 期,会携带一定量营养盐进入北黄海,从而造成表层海水营养盐近岸高远岸低的分布特点。



图 2 表层海水中磷酸盐(PO₄-P)、溶解无机氮(DIN)和硅酸盐(SiO₃-Si)(µmol/L)的平面分布

Fig.2 Horizontal distributions of PO4-P, dissolved inorganic nitrogen (DIN) and SiO3-Si (µmol/L) in the surface seawaters



图 3 底层海水中 PO₄-P、DIN 和 SiO₃-Si(µmol/L)的平面分布 Fig.3 Horizontal distributions of PO₄-P, DIN and SiO₃-Si (µmol/L) in the bottom seawaters

底层海水中的 PO₄-P、DIN 和 SiO₃-Si 浓度范围分别为 0.12—0.67、3.56—9.91 和 4.85—17.87 μmol/L,平 均值分别为 0.30、6.69 和 9.68 μmol/L,其浓度约为表层海水中的 2—3 倍。底层海水中营养盐的平面分布与 表层海水中的截然不同,其高值区主要出现在研究区域南部和獐子岛附近海域,PO₄-P 和 SiO₃-Si 的最大值均 出现在 B7-9 站位,DIN 的最大值出现在 B7-5 站位,即獐子岛附近(图 3),这种分布模式与黄海冷水团和生物 活动密切相关。

2.2.2 断面垂直分布

为了解獐子岛附近海域营养盐的垂直分布状况,本文选择了两个代表性断面 NYS1 和 BX-5 来进行系统分析研究。在断面 NYS1 中,PO₄-P 浓度呈现由表层到底层增加的趋势;DIN 浓度在表层和 10 m 层相近均小于 30 m 层和底层浓度;SiO₃-Si 浓度在 NYS1-2 和 NYS1-4 站位中的表层和 5 m 层相近,均小于 10 m 层至底层的浓度,在 NYS1-6、NYS1-8 和 NYS1-9 站位中的表层至 20 m 层相近,均小于 30 m 至底层的浓度(图 4)。在断面 BX-5 中,PO₄-P 和 DIN 在不同水层的垂直分布相似,均呈现出由表层到底层增加的趋势;SiO₃-Si 浓度在 10 m 层出现了一个次高值,但从表层到 30 m 层的浓度均低于底层浓度(图 5)。总的来说,獐子岛附近海域营养盐浓度的垂直分布呈现由 0-20 m 层向 30 m 和底层增加的趋势,这种分布特点是受温度跃层和浮游植物共同影响的结果。

2.3 分布影响因素

北黄海水体中营养盐的空间分布模式与黄海冷水团、浮游植物活动及黄海暖流密切相关。黄海冷水团是 一季节性水团,其形成、发展和消亡与温跃层的演变几乎是同步进行的。春季,水体逐渐开始层化,由于下层





水体升温的迟滞性,冷水团在黄海底层逐渐生成,温跃层也逐渐形成,导致 30 m 和底层营养盐浓度较高的低 温海水无法对跃层以上的海水进行补充,使营养盐和颗粒有机物在冷水团中积累,其浓度出现了分层现象;同 时,真光层中浮游植物开始生长繁殖,部分浮游植物未被摄食而直接沉降到底层水中,使有机质在底层海水中 积累。夏季,在北黄海底部形成明显冷水团中心,由于水体垂向混合作用小,便在黄海底部留下了一个稳定的 冷水团,其便盘踞在北黄海中部^[7],此时整个水体温差达到最大,表层、10 m 层水温平均值比 30 m、底层高出 7—10 ℃(图6),北黄海形成了全年中最强的温跃层,同时,夏季浮游植物将大量的无机营养盐转化为颗粒有 机物,大比重的颗粒有机物沉降到底部的冷水团区域,并大量积累储存。到 9 月份,底层颗粒有机物逐渐分 解,冷水团成为了营养盐贮库,释放营养盐到底层水体中,由于受到强的温、密跃层的阻隔难以向上层扩散而 在底层形成积累;加之,真光层中浮游植物活动频繁,需吸收表层大量营养盐来维持生长和繁殖。因而在很大 程度上造就了獐子岛附近海域真光层低营养盐浓度和底层高营养盐浓度,且底层营养盐浓度在研究区域中部 的高值区与北黄海冷水团所处的位置相吻合的特点。



图 5 BX-5 断面中 PO₄-P、DIN 和 SiO₃-Si 浓度(µmol/L)的垂直分布 Fig.5 Profiles of PO₄-P, DIN and SiO₃-Si concentrations (µmol/L) along transect BX-5

此外,黄海暖流也在一定程度上影响着海水中营养盐含量的分布。黄海暖流是黄海唯一的外海水源,主要是从对马暖流水和东海陆架水在济州岛南侧交汇所形成的锋区中衍生出来的^[8],因此黄海暖流水具有高温、高盐、低营养的特性。黄海暖流属于季节性海流,具有冬强夏弱的特点。尽管在本研究中的9月,黄海暖流相对较弱,但其在北上北黄海的过程中携带的高温低营养盐海水对獐子岛附近海域表层海水营养盐浓度的稀释也起到一定的作用。

2.4 营养盐结构

獐子岛附近海域海水中的 DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN 和 SiO₃-Si/PO₄-P 值范围分别在 5.86—176.25、0.67—11.00 和 20.71—290.83 之间,平均值分别为 28.90、1.92 和 47.27。几乎所有站位的 DIN/PO₄-P 和 SiO₃-Si/

PO₄-P 值均大于 Redfield 比值,大部分站位的 SiO₃-Si/DIN 值大于 Redfield 比值。营养盐限制因子的评价不仅 与它们之间的比值有关,而且与其在海水中的浓度密切相关。综合考虑这两种因素,能够判断限制浮游植物 生长的限制因子的标准为^[9-10]:

(1)若 SiO₃-Si/PO₄-P 和 DIN/PO₄-P 均>22,则磷为限制因子;

(2)若 DIN/PO₄-P<10 和 SiO₃-Si/DIN>1,则氮为限制因子;

(3)若 SiO₃-Si/PO₄-P<10 和 SiO₃-Si/DIN<1,则硅为限制因子;

(4)SiO₃-Si=2 μmol/L、DIN=1 μmol/L 和 PO₄-P=0.1 μmol/L 可作为浮游植物生长的最低阈值^[11]。

由此可以看出,本研究海域海水中的营养盐平均浓度均高于浮游植物生长的最低阈值,且SiO₃-Si/PO₄-P和DIN/PO₄-P值均>22,则獐子岛附近海域整体水平上为潜在磷限制。

此外,由于黄海冷水团、生物活动、温跃层、河流输入和黄海暖流的综合影响,DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN和SiO₃-Si/PO₄-P比值和其空间分布在表层海水和底层海水之间也存在着一定的差异。其中,表层海水中的DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN和SiO₃-Si/PO₄-P值范围分别在11.21—176.25、0.67—6.16和25.90—290.83之间,平均值分别为35.55、2.12和60.78。表层海水中DIN/PO₄-P比值的最大值出现在B11-1站位,SiO₃-Si/DIN的最大值在NYS1-6站位,SiO₃-Si/PO₄-P的最大值在B5-7站位;其中,DIN/PO₄-P和SiO₃-Si/DIN值分别以B11-1和NYS1-6站位为中心向四周降低,SiO₃-Si/PO₄-P值呈现西南区域较高而东北区域相对较低的趋势(图7)。

底层海水中 DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN 和 SiO₃-Si/PO₄-P 值的变化范围相对于表层海水中的较小,分别在 11.73—60.79、0.90—2.86 和 20.71—77.65 之间,平均值分别为 24.39、1.47 和 34.47。底层海水中这些比值的 分布趋势与表层海水中的完全不同。底层海水中的 DIN/PO₄-P 和 SiO₃-Si/PO₄-P 比值的最大值出现在 B3-1 站位,SiO₃-Si/DIN 的最大值在 B3-9 站位;其中,DIN/PO₄-P 和 SiO₃-Si/PO₄-P 值基本呈现由大长山岛附近海 域为高值中心向中部海域扩展的趋势,而 SiO₃-Si/DIN 值呈现由獐子岛附近海域为高值中心向四周降低的趋势(图 8)。

2.5 潜在渔获量估算

2.5.1 一次完整水交换期的渔获量

初级生产力是海洋生物生产的基础,初级生产力的高低在一定程度上决定着海洋生物的丰度、储量和分





图 7 表层海水中 DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN 和 SiO₃-Si/PO₄-P 比值的平面分布





图 8 底层海水中 DIN/PO₄-P、SiO₃-Si/DIN 和 SiO₃-Si/PO₄-P 比值的平面分布 Fig.8 Horizontal distributions of DIN/PO₄-P, SiO₃-Si/DIN and SiO₃-Si/PO₄-P ratios in the bottom seawaters

布,最终决定生物资源量。初级生产力(Primary Productivity)是指绿色植物利用太阳光进行光合作用,即太阳 光+无机物质+H₂O+CO₂→热量+O₂+有机物质,把无机碳(CO₂)固定、转化为有机碳(如葡萄糠、淀粉等)这一 过程的能力。固碳方程式如下:

由方程式可以看出,营养盐作为浮游植物生长的营养物质,其限制因子的浓度对浮游植物的生物量起着 决定性作用。所以,可根据营养盐限制因子的总量来估算其可以负担的浮游植物初级生产力总量,从而依据 初级生产力的高低进一步对獐子岛附近海域潜在的次级和终级海洋生物生产做一个大致的估算。

结合本研究和以往研究^[5]结果可知, 獐子岛附近海域 DIN/PO₄-P 和 SiO₃-Si/PO₄-P 全年平均值分别为 24.74 和 47.27, 均>22, 獐子岛海域全年主要为磷限制。以本研究航次獐子岛附近海域的面积($3.0 \times 10^3 \text{ km}^2$)、 真光层平均水深(30 m)及獐子岛附近海域全年 PO₄-P 平均值($0.31 \mu \text{mol/L}$), 可计算获得一次完整水交换期 内獐子岛附近海域磷酸盐和有机碳总量为 2.79×10⁷ mol, 初级生产力为 1.00×10⁵ tC。

根据估算所得的初级生产力水平,依据食物链能流转移理论,对獐子岛海域各级生产的潜在产量进行估算,结果见表 2。估算应用公式为^[12]:

$$F = P \cdot E'$$

式中,F为现在资源量;P为初级生产量;E为营养转换效率(取15%);n为营养阶级的级数。有机碳与生物 量鲜重之比为1:20。 然后,根据渔获产量估算最大持续渔获量,计算公式为[13]:

 $W_{\rm max} = 0.5 F_f$

式中,W_{max}为最大持续渔获量;F_f为渔获产量。

结果表明,以限制因子磷酸盐浓度估算得出,一次完整水交换期獐子岛海域现有的营养水平可支持的潜在渔获产量为 6.75×10³ t,最大持续渔获量,即可捕获量为 3.38×10³ t(表 2)。

表 2 獐子岛附近海域潜在生物量的估算

Table 2	Estimation of potential	biomasses in	mariculture area	a near the	Zhangzidao Island
---------	-------------------------	--------------	------------------	------------	-------------------

初级生产力 Primary productivity/tC	浮游植物产量 Phytoplankton production/t	食植动物产量 Phytozoon production/t	初级食肉动物产量 Primary carnivore/t	渔获产量 Fishery yield/t	最大持续渔获量 Maximum sustaining yield/t
1.00×10 ⁵	2.00×10^{6}	3.00×10 ⁵	4.50×10^{4}	6.75×10 ³	3.38×10 ³

表中除初级生产力外,均以鲜重计

2.5.2 虾夷扇贝一个生长周期内的渔获量

獐子岛海域为我国最大的虾夷扇贝底播养殖基地,重点估算其虾夷扇贝的潜在渔获量对优化獐子岛养殖 投放密度和生产量预测具有重要的科学价值。虾夷扇贝生长温度范围 5—20 ℃,15 ℃左右为最适宜生长温 度,低于 5 ℃生长缓慢,到 0 ℃时运动急剧变慢直至停止;水温升高到 23 ℃时生活能力逐渐减弱,超过 25 ℃ 以后运动很快就会停滞。北黄海底层海水温度在春、夏、秋、冬 4 个季节分别为 5.26—9.7、5.79—21.11、 8.77—19.07、0.66—9.08 ℃^[5]。由此得出,夏季和秋季温度为虾夷扇贝生长的最适宜温度,冬季生长缓慢。 此外,獐子岛海域底播养殖虾夷扇贝的生长周期约为 2a,则一个生长周期内最适合虾夷扇贝生长的时间约 为 1a。

北黄海獐子岛养殖区的营养盐主要通过水交换进行补充,其更新该海域所有水体所需的时间约为 8.45 d (6.8—11.1 d)^[4],则生长期内水可交换约 43 次(33—54 次)。如营养盐补充被利用的效率以 50%计,则一个 生长周期内,可完全补充 PO₄-P 22 次(17—27 次),约为 1.90×10⁴ t(1.47×10⁴—2.34×10⁴ t)。如果本研究区域 (3.0×10³ km²)全部用来增殖虾夷扇贝,则一个生长周期内虾夷扇贝的动态理论生产量应为 11.5—18.2 万 t。 目前獐子岛海域投苗面积近 1000 km²,其一个生长周期内虾夷扇贝理论生产量应在 3.8—6.1 万 t 之间。

磷酸盐作为浮游植物生长的限制因子,从根本上控制着虾夷扇贝的食物供给。如果在磷酸盐作为限制因子的范围内增加其浓度为 5%、10%、15%和 20%,则在獐子岛海域投苗面积近 1000 km²内,虾夷扇贝的动态理论生产量可分别增加 0.25、0.50、0.75 和 1.00 万 t(表 3)。

Table 3 Increased yields of <i>Patinopecten yessoensis</i> at different added PO ₄ -P concentrations						
PO ₄ -P浓度增加率	现有水平	5%	10%	15%	20%	
Increasing ratio	Current level					
PO_4 -P/(µmol/L)	0.310	0.356	0.341	0.357	0.372	
一次完整水交换期 A complete water exchange period						
渔获量 Fishery yield/(×10 ³ t)	6.75	7.09	7.43	7.76	8.10	
渔获增产量 Increased yield/t	0	337	675	1013	1350	
增产率 Growth ratio/%	0	5.0	10.0	15.0	20.0	
一个生长周期内 A growth cycle						
渔获量 Fishery yield/(×10 ⁴ t)	4.95	5.20	5.45	5.69	5.94	
渔获增产量 Increased yield/(×10 ⁴ t)	0	0.25	0.50	0.75	1.00	
增产率 Growth ratio/%	0	5.0	10.0	15.0	20.0	

表 3 水体不同 PO₄-P 浓度的增加率下虾夷扇贝的渔获增产量

3 结论

(1) 獐子岛附近海域营养盐浓度总体水平较低。其在表层海水中呈现由近岸向海域中心降低的趋势; 而 底层海水营养盐在海域中部出现高值区,且底层海水中的营养盐浓度较表层中的高。这种分布模式与河流输 入、北黄海冷水团和生物活动有关。

(2) 獐子岛附近海域营养盐浓度均高于浮游植物生长的最低阈值,且 DIN/PO₄-P 和 SiO₃-Si/PO₄-P 比均 大于 22,磷是该海域浮游植物生长的限制因子。

(3)根据限制因子 PO₄-P 的浓度及食物链能流转移理论估算得出獐子岛附近海域现有的营养水平可支持一个生长周期内虾夷扇贝的动态理论生产量为 3.8—6.1 万 t;如人为增加 5%—20%的 PO₄-P 浓度,则虾夷扇贝的动态理论生产量可增加 0.25—1.00 万 t。

参考文献(References):

- [1] Gibbs M T. Sustainability performance indicators for suspended bivalve aquaculture activities. Ecological Indicators, 2007, 7(1): 94-107.
- [2] Lagus A, Suomela J, Weithoff G, Heikkilä K, Helminen H, Sipura J. Species-specific differences in phytoplankton responses to N and P enrichments and the N:P ratio in the Archipelago Sea, northern Baltic Sea. Journal of Plankton Research, 2004, 26(7): 779-798.
- [3] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment. American Scientist, 1958, 46(3): 205-221.
- [4] 张继红,方建光,王诗欢.大连獐子岛海域虾夷扇贝养殖容量.水产学报,2008,32(2):236-241.
- [5] 臧璐. 北黄海生源要素的季节特征及冷水团对其影响的研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [6] 沈焕庭. 黄海沿岸河口过程类比. 海洋与湖沼, 1990, 21(5): 449-457.
- [7] 于非,张志欣,刁新源,郭景松,汤毓祥.黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析.海洋学报,2006,28(5):26-34.
- [8] Song J M. Biogeochemical Processes of Biogenic Elements in China Marginal Seas. New York: Springer-Verlag, Hangzhou: Zhejiang University Press, 2009: 1-662.
- [9] Justić D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(1):
 41-46.
- [10] Dortch Q, Whitledge T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? Continental Shelf Research, 1992, 12(11): 1293-1309.
- [11] Fisher T R, Peele E R, Ammerman J W, Harding L W Jr. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. Marine Ecology Progress Series, 1992, 82(1): 51-63.
- [12] 金显仕,赵宪勇,孟田湘,崔毅.黄、渤海生物资源与栖息环境.北京:科学出版社,2005:1-405.
- [13] 杨纪明. 海洋渔业资源开发潜力估计. 海洋开发与管理, 1985, 4: 40-46.