乳山近岸养殖区初级生产力时空分布及其与环境因子相关关系

于广磊[1,2]，张明亮[1]，程玲[1,2]，尚国栋[3]，张娟[1,2]，宋秀凯[1,2]

（1. 山东省海洋资源与环境研究院　烟台　264006；2. 山东省海洋环境监测中心　烟台　264006；
3. 乳山市海洋与渔业监督监察大队　威海　264500）

摘要：于 2017—2018 年 3 月、5 月、8 月、10 月在乳山海水增养殖海域进行了水文、气象、化学、浮游植物等要素的综合调查，文章分析了该海域初级生产力和主要环境因子间的相关关系并探讨了其相互影响。结果表明，2017—2018 年调查区域水体初级生产力的波动范围为 9.2～3 504.0 mg/(m^2 · d)(以碳计)，各年度均为 8 月最高，3 月比 5 月、10 月略高，5 月和 10 月相当。3—5 月乳山湾东汉和乳山东与文登交界处要高于其他区域，8 月近岸外海整体较高，从近岸区到远岸初级生产力先逐渐增大后逐渐减小，10 月的初级生产力普遍偏低。2018 年 3 月和 8 月初级生产力与温度、pH 值、无机氮、N/P 值和盐度等相关环境因素有一定的显著相关关系，而在 5 月和 10 月相关关系则都不显著。此次调查结果能够反映出陆源输入、季节变化等生境改变对水体初级生产力的时空分布的影响。

关键词：乳山；海水养殖；初级生产力；环境因子；相关关系

中图分类号：X55；P76　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1005－9857(2019)11－0069－06

Spatio-Temporal Distribution of Primary Productivity and Its Correlation with Environmental Factors in Rushan Nearshore Aquaculture Areas

YU Guanglei[1,2]，ZHANG Mingliang[1]，CHENG Ling[1,2]，SHANG Guodong[3]，ZHANG Juan[1,2]，SONG Xiukai[1,2]

（1. Shandong Marine Resource and Environment Research Institute，Yantai 264006，China；2. Shandong Marine Environment Monitor Center，Yantai 264006，China；3. Rushan Marine and Fishery Supervision and Supervision Brigade，Weihai 264500，China）

Abstract：Comprehensive surveys of hydrological，meteorological，chemical and phytoplankton factors were carried out in Rushan seawater in March，May，August and October of 2017 to 2018，and

收稿日期：2019-04-22；**修订日期**：2019-10-25

基金项目：山东省农业重大应用技术创新项目(2017－2020)；国家重点研发计划(2016YFC1400606－2).

作者简介：于广磊，助理研究员，研究方向为海洋生物生态

通信作者：张明亮，助理研究员，研究方向为养殖水域生态

the influence relationship of the primary productivity and main environmental factors were analyzed. The results showed that the primary productivity in the survey area ranged from 9.2 to 3504.0 mgC/(m2 · d) in 2017 to 2018, which the highest in August, slightly higher in March, equivalent in May and October (i.e. August > March > May ≈ October). The primary productivity of Dongcha in Rushan Bay and the junction of eastern Rushan and Wendeng were higher than other areas in March to May, the offshore area was overall higher in August, gradually increasing from the coast to far-shore area and then decreasing, and generally low in October. It was significantly correlated between primary productivity and the environmental factors such as temperature, pH, inorganic nitrogen, N/P value and salinity in March and August 2018, while not significantly between that in May and October. The results of the surveys could reflect the impacts of habitat changes such as terrigenous input and seasonal variation on the spatial and temporal distribution of primary productivity.

Key words: Rushan, Mariculture, Primary productivity, Environmental factors, Relation

0 引言

浮游植物、底栖植物(包括定生海藻和红树、海草等植物)以及自养细菌等生产者,通过光合作用或化学合成制造有机物和固定能量的能力,称为初级生产力。海洋初级生产力,也称海洋原始生产力,初级生产力的大小决定了浮游动物等饵料生物的多寡,从而直接影响该海域的渔业资源量,是海洋渔业资源评估、水质评价、洋流跟踪及整个生态系统的生态功能研究中不可缺少的内容[1]。乳山是著名的"水产之乡",其近海是海洋捕捞与养殖的重要区域,盛产牡蛎、文蛤、对虾、蓝点马鲛、梭鱼等百余种海洋经济生物,其中乳山牡蛎养殖面积、产量居全国首位,乳山文蛤、鹰爪虾享誉国内外[2]。乳山近岸有乳山河、母猪河、黄垒河等诸多河流注入,其中乳山河贯穿乳山市全境,是影响乳山湾最大的河流。乳山河携带大量泥沙,冲击形成了以往复潮流为特征的狭长溺谷河口海湾,湾内滩宽水浅[3]。特殊的海洋生态地质环境使乳山湾成为多种海洋经济种类的优质养殖场、繁育场。本研究调查了该海域表层叶绿素 *a* 浓度和初级生产力的时空变化特征并分析了其与环境因子的关系,以期为乳山增养殖区海域制订适宜的增养殖计划,合理控制生产规模,适度利用生态资源提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

笔者于 2017—2018 年 3 月、5 月、8 月、10 月在乳山增养殖海域进行了水文、气象、化学等要素的综合调查,共布设 29 个站位,选取代表性强的 3 个站位于 8 月采集浮游植物,调查站位见图 1(图中★为浮游植物监测站位)。水文、气象和化学要素的采集和分析均按《海洋监测规范》(GB17378—2007)[4]执行,调查项目包括水体的水温、盐度、水深、透明度、叶绿素 *a*、pH 值、无机氮、硅酸盐和磷酸盐等。浮游植物采样利用浅水Ⅲ型浮游生物网(网口直径 37 cm,网口面积 0.1 m^2,网长 140 cm,网目孔径 77 μm)自底至表垂直拖网采集,样品用体积分数为 5%的甲醛固定和保存。采集的浮游植物样品于显微镜下进行分类鉴定,具体操作按照《海洋监测规范》(GB17378.7—2007)执行。

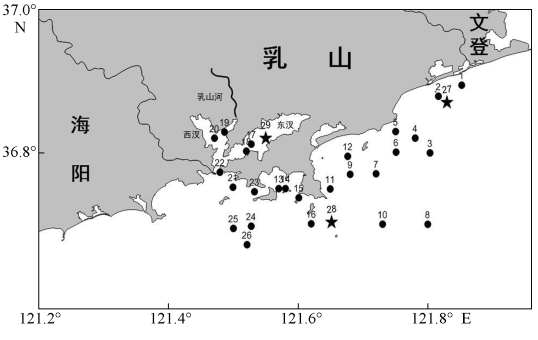


图 1 样品采集监测站位

1.2　数据分析

本研究中初级生产力的计算采用叶绿素 a 法，按照 Cadée 等[5]提出的简化计算真光层初级生产力公式估算：

$$P=\frac{PsED}{2} \tag{1}$$

式中：P 为每日现场的初级生产力[mg/(m^2 · d)(以碳计)]；P_s 为表层初级生产力[mg/(m^3 · h)(以碳计)]；E 为真光层的深度(m)；D 为昼长时间(h)。其中，表层水(1 m 以内)初级生产力 P_s 根据表层水中叶绿素 a 的含量计算：

$$P_s=C_aQ \tag{2}$$

式中：C_a 为表层叶绿素 a 的含量，单位：mg/m^3；Q 为同化系数，单位：mg(以碳计)/(mg · h)(叶绿素 a)。

真光层的深度 E 取透明度的 3.05 倍，同化系数 Q 采用 3.7，光照时间为 12 h。

用 SPSS19.0 软件分析水体初级生产力与环境因子间进行 Person 相关性，采用 Surfer11.0 软件绘制初级生产力的平面分布图。

2　结果与分析

2.1　初级生产力时空分布特征

2017—2018 年乳山近岸海域初级生产力的波动范围为 9.2～3 504.0 mg/(m^2 · d)(以碳计)。2017 年 4 个航次的初级生产力均值介于：180.1～852.7 mg/(m^2 · d)(以碳计)，2018 年 4 个航次的初级生产力均值介于：165.3～995.0 mg/(m^2 · d)(以碳计)，从各航次的均值看，8 月最高，3 月比 5 月、10 月略高，5 月和 10 月大致相当。从图 2 可以看出 2017 年和 2018 年，调查区域水体的初级生产力变化趋势近乎相同。以 8 月初级生产力水平最高，其他航次的初级生产力变动幅度不大。

由 2017 年和 2018 年初级生产力平面分布可以看出，3—5 月相对高值点较为集中的位于乳山湾东汊和乳山东与海阳交界区域。乳山湾东汊主要是海参池塘养殖区，海参以底栖微藻和沉积有机质为食，其摄食活动对水体初级生产力影响不大；乳山湾西汊是乳山河河口区域，由于淡水的冲流，各航次水体初级生产力总体都不高；而东汊湾口狭窄，

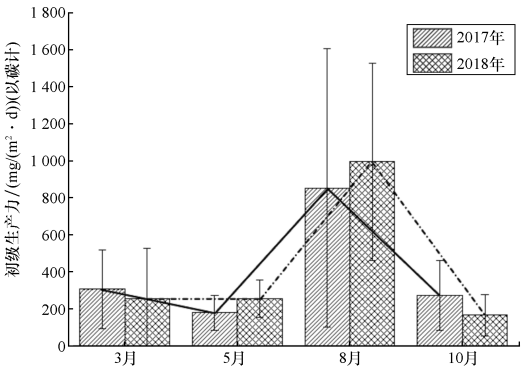


图 2　2017—2018 年乳山养殖区水体初级生产力动态变化

湾内水体交互能力弱，受淡水汇入影响较小，加之受两岸人为活动影响大，水体中营养盐高，从而使初级生产力处于相对较高水平[3]。乳山东与文登交界区域是黄垒河入海口邻近海域，受陆源营养盐输入影响，生产力处于较高水平，是牡蛎养殖较为集中的区域[6]。乳山近岸外海 8 月初级生产力整体较高，从近岸区到远岸初级生产力先逐渐增大后逐渐减小，在近岸区，受夏季降雨影响，导致海水和入海冲淡水的混合，悬浮泥沙的输入和海底沉积物的再悬浮导致海水浑浊，光照成为浮游植物生长的主要限制因子[7]；随着冲淡水向外海方向扩散，悬浮泥沙迅速沉降，透明度增大，在河口输入的营养盐较好地满足浮游植物快速增长，因此出现了初级生产力的高值区；在冲淡水区的东部，由于向外海方向陆源营养盐被稀释，尽管水体透明度很高，初级生产力会出现下降，形成低值区[8]。10 月营养盐的陆源输入少，导致浮游生物量下降，是乳山海水养殖区该时期生产力低的主要原因[9]。

2.2　初级生产力与各环境因子的相关关系

2018 年初级生产力与各环境因素的积矩 Pearson 相关关系结果显示(表 1)，3 月水体的初级生产力与温度、pH 值、无机氮、磷酸盐等环境要素呈极显著正相关关系，与氮磷比呈极显著负相关关系，与盐度呈显著负相关关系；8 月水体的初级生产力与 pH 值、盐度呈极显著正相关关系，与无机氮、磷酸盐、硅酸盐呈极显著负相关关系，与温度呈显著负相关关系；5 月和 10 月初级生产力与各环境要

素的相关关系都不显著。

2.2.1 温度

2018 年初级生产力与表层水温相关关系结果显示,3 月和 8 月乳山增养殖区初级生产力与表层海水温度有一定的相关关系($r=0.557$,$P<0.01$ 和 $r=-0.452$,$P<0.05$)。本研究海域中硅藻门在浮游植物结构组成上占绝对优势[10-11]。硅藻为低温种,其最佳生长温度很少超过 25℃[12],最适合生长温度通常低于 18℃[13]。乳山养殖区水温在 3 月的变化范围为 3.5℃～ 7.2℃,8 月的变化范围为 28.7℃～33.0℃,8 月调查站位水温都超过 25℃,不利于硅藻的生长。从水温与初级生产力的相关性可以看出,3 月水温与初级生产力呈正相关,极显著,温度升高,初级生产力升高,8 月水温与初级生产力呈正负相关,显著,温度升高,初级生产力降低。说明在一定的温度范围内,水温的增加有利于浮游植物的生长,但超过这个范围,水温的增加会对浮游植物生长产生抑制作用,这与沈国英等[14]、刘杰等[15]、杨俊丽等[16]的研究结果较一致。

表 1 2018 年乳山增养殖区初级生产力与各环境因素的积矩 Pearson 相关关系

因素	3 月		5 月		8 月		10 月	
	pearson	双尾 t	pearson	双尾 t	pearson	双尾 t	pearson	双尾 t
温度	0.557	0.001 7**	−0.255	0.182	−0.452	0.013 9*	0.358	0.057
pH 值	0.942	0.000**	0.183	0.343	0.570	0.001 2**	0.400	0.031
盐度	−0.386	0.038 5*	−0.062	0.751	0.603	0.000 5**	0.321	0.089
DIN	0.479	0.008 6**	−0.120	0.534	−0.632	0.000 2**	−0.367	0.050
DIP	−0.815	0.000**	−0.062	0.750	−0.614	0.000 4**	−0.340	0.071
硅酸盐	−0.089	0.648	−0.120	0.536	−0.588	0.000 8**	−0.379	0.043
N/P 值	0.779	0.000**	−0.030	0.876	0.131	0.497	−0.004	0.985
浮游植物	—	—	—	—	−0.688	0.312	—	—

注:Pearson 系数,n 为 116,** 表示相关置信度水平小于 0.01,* 表示相关置信度水平小于 0.05,其余表示没有明显相关关系。

2.2.2 pH 值

3 月和 8 月,pH 值与初级生产力间都成极显著正相关性($r=0.942$,$P<0.01$ 和 $r=0.570$,$P<0.01$),3 月 pH 值变化范围为 8.06～8.51,8 月 pH 值变化范围为 7.96～8.23,说明 pH 值在一定的范围内升高对浮游植物等初级生产者生长有促进作用[17]。

2.2.3 盐度

3 月盐度与初级生产力间呈显著负相关($r=-0.386$,$P<0.05$),盐度变化范围为 28.4～32.3,均值为 31.7;8 月,盐度与初级生产力间呈极显著正相关($r=-0.603$,$P<0.05$),盐度变化范围为 29.8～31.1,均值为 30.9。说明盐度接近浮游植物等初级生产者最适盐度生态阈值区[25.24,27.00]时,对生长有促进作用[18]。

2.2.4 主要营养盐及 N/P 比值

结果表明,3 月 DIN 与初级生产力间呈极显著正相关($r=0.479$,$P<0.01$),DIN 范围为 7.8～92.1 μmol/L,均值为 24.9 μmol/L,DIN 与初级生产力间呈极显著负相关($r=-0.815$,$P<0.01$),DIP 范围为 0.032～0.279 μmol/L,均值为 0.169 μmol/L,N/P 范围为 38.6～2082.8;8 月,DIN 与初级生产力间呈极显著负相关($r=-0.632$,$P<0.01$),DIN 范围为 1.32～54.6 μmol/L,均值为 16.2 μmol/L,DIP 与初级生产力间呈极显著负相关($r=-0.815$,$P<0.01$),DIP 范围为 0.025～2.03 μmol/L,均值为 0.320 μmol/L,N/P 范围为 6.5～300.6。王俊[19]指出浮游植物对 DIN 和 DIP 需求的最适浓度下限 5.71 μmol /L 和 0.58 μmol /L,JUSTIC 等[20] 提出当海水中 DIN 的浓度小于

1 μmol /L 时，浮游植物会受到绝对氮限制，当海水中 DIP 的浓度小于 0.1 μmol /L 时，浮游植物受到绝对磷限制。本次调查中，3 月所有站位都没有受到氮限制，少数站位磷受到限制，8 月部分站位受到氮限制，DIN 总体含量下降，个别站位磷受到限制，但 DIP 总体含量增加，供给充足。结果表明，8 月受陆源输入影响，营养盐总体输入比 3 月增加，但由于浮游植物等初级生产者消耗水体中的 DIN 量相对较多，DIN 支出大于收入，导致 DIP 的累积大于 DIN。

调查结果分析表明，8 月硅酸盐与初级生产力间呈极显著负相关（$r=-0.588$，$P<0.01$），研究海域 8 月硅藻的大量增殖，导致水体中的硅酸盐被大量消耗，硅藻门在浮游植物数量组成上占绝对优势，导致硅酸盐与初级生产力间呈极显著的负相关关系；浮游植物数量与初级生产力间相关关系并不显著，这是由于网采浮游植物只占水体中浮游植物总量的很少一部分，而占浮游植物总量多数的是微型浮游植物，这部分微藻对叶绿素 *a* 含量的贡献很大[21]，是水体初级生产力的基础，所以网采浮游植物数量并不能直接反应水体的初级生产力水平[22]。

3　结论

（1）2017—2018 年乳山海水增养殖海域水体的初级生产力 8 月最高，3 月次之，5 月和 10 月较低。3—5 月初级生产力相对高值点较为集中的位于乳山湾东汊和乳山东与文登交界区域，8 月近岸外海整体较高，从近岸区到远岸初级生产力先逐渐增大后逐渐减小，10 月的初级生产力普遍偏低。

（2）3 月的水温低，陆源径流少，营养盐输入少，初级生产者的生长环境处于较为不利的时期，初级生产力与相关环境因素也呈现显著相关关系，2018 年 3 月，水体的初级生产力与温度、pH 值、无机氮、磷酸盐等环境要素呈极显著正相关关系（$P<0.01$），与氮磷比呈极显著负相关关系（$P<0.01$），与盐度呈显著负相关关系（$P<0.05$），由于浮游植物等初级生产者数量上较少，硅酸盐的供给相对充足，并未表现出一定的相关关系。

8 月水温高，陆源径流大，营养盐输入多，加之浮游植物等初级生产者数量激增，营养盐消耗，各环境因素与初级生长者间的相互影响，也表现出相当的显著相关性，2018 年 8 月水体的初级生产力与 pH 值、盐度呈极显著正相关关系（$P<0.01$），与无机氮、磷酸盐、硅酸盐呈极显著负相关关系（$P<0.01$），与温度呈显著负相关关系（$P<0.05$）。

5 月和 10 月，各环境因素与初级生长者间供求关系相对稳定，营养盐供给充足，且初级生产者的数量较少，初级生产力与各环境要素的相关关系都不显著。

参考文献

[1] 吕瑞华.叶绿素 *a* 与初级生产力[C]//金显仕，赵宪勇，孟田湘等主编.黄渤海生物资源与栖息环境.北京：科学出版社，2005：75—90.

[2] 宋文豪.乳山湾及邻近海域渔业生物群落结构及季节变化的研究[D].青岛：中国海洋大学，2013：1－68.

[3] 王燕飞，王庆，战超，等.最近 40 年来人类活动影响下乳山湾海岸变迁与冲淤变化[J].海洋地质与第四季地质，2013，33(2)：41－50.

[4] 国家质量技术监督局.GB 17378.7－2007 海洋监测规范(第 7 部分)：近海污染生态调查和生物监测[S].北京：中国标准出版社，200.

[5] CADÉEG C，HEGEMAN J.Primary production of phytoplankton in the Dutch Waddensea[J].Netherlands Journal of Sea Research，1974，8(2/3)：240－259.

[6] 战超，王庆，夏艳玲，等.胶东半岛南部典型海湾地貌过程对滩涂养殖的响应[J].海洋与湖沼，2013，44(2)：283－291.

[7] 刘华健，黄良民，谭烨辉，等.珠江口浮游植物叶绿素 *a* 和初级生产力的季节变化及其影响因素[J].热带海洋学报，2017，36(1)：81－91.

[8] NING X R，VAULOT D，LIU Z S，et al.Standing stock and production of phytoplankton in the estuary of Changjiang(Yangtse River) and the adjacent East China Sea[J].Marine Ecology Progress Series，1988，49：141－150.

[9] 陈辰，李琪，慕翠敏，等.乳山牡蛎养殖海域水质状况季节分析与评价[J].海洋湖沼通报，2013(1)：39－44.

[10] 高凤翔，李琪，刘文广，等.乳山湾养殖海区浮游植物群落结构及数量变动的研究[J].中国海洋大学学报，2006，36(增刊)：93－98.

[11] 钟熙，宫相忠，高伟，等.2011 年秋季乳山湾及邻近海域网采浮游植物生态特征的初步研究[J].中国海洋大学学报，2013，43(9)：60－66.

[12] MITROVIC S M，HITCHCOCK J N，DAVIE A W，et al.Growth responses of Cyclotellameneghiniana(Bacillariophyce-

ae)to various temperatures[J].Journal of Plankton Research,2010,32(8):1217－1221.

[13] WASMUND N, TUIMALA J. Long-term trends in phytoplanktoncomposition in the western and central Baltic Sea[J]. Journal of Marine Systems,2011,87(2):145－159.

[14] 沈国英,黄凌风,郭丰,等.海洋生态学[M].北京:科学出版社,2010:50－53.

[15] 刘杰,李丽,贺娟.南海海域浮游植物分布特征及研究进展[J].海洋地质与第四纪地质,2010(3):133－142.

[16] 杨俊丽,李希磊,于潇,等.莱州湾扇贝养殖区环境因子的变化特征及其对浮游植物的影响[J].烟台大学学报(自然科学与工程版),2019,32(1):38－46.

[17] 赵光强,毕蓉,南春蓉,等.3 种赤潮微藻生长过程中 pH 的变化及其耐受力研究[J].海洋环境科学,2010,29(5):679－682.

[18] 杨旖祎,李轶,叶属峰.乐清湾盐度环境梯度下浮游植物生态阈值研究[J].海洋环境科学,2018,37(4):499－504.

[19] 王俊.渤海近岸浮游植物种类组成及其数量变动的研究[J]..海洋水产研究,2003,24(4):44－50.

[20] JUSTIC D,RABALAIS N N,TURNERR E et al.Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters:stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. EstCoast Shelf Sc,1995,40(3):339－356.

[21] 郑重,等.海洋浮游生物生态学文集[M].厦门:厦门大学出版社,1986:103

[22] 陈怀清,钱树本.青岛近海微型、超微型浮游藻类的研究[J].海洋学报,1992,14 (3):105－113.