

不同单养和混养海水实验围隔 初级生产力的研究

王岩 张鸿雁

(青岛海洋大学水产学院, 266003)

摘要 1995年和1996年夏秋季进行的围隔实验表明投饵养殖时浮游植物毛初级生产力较低,水呼吸相对较高,多数围隔中毛初级生产力/水呼吸 < 1 ,其中混养中国对虾和台湾红罗非鱼的围隔中毛初级生产力较高,而混养中国对虾、台湾红罗非鱼和菲律宾蛤仔的围隔中毛初级生产力最低;在投饵基础上酌情施肥后围隔毛初级生产力明显高于投饵养殖时,毛初级生产力/水呼吸 > 1 ,但单养中国对虾、对虾与罗非鱼混养和对虾与海湾扇贝或缢蛭混养的围隔间毛初级生产力差别不明显。实验结果显示,养殖管理措施、放养的罗非鱼和贝类以及附生的丝状藻类都能对围隔初级生产力产生一定的影响,其中管理措施往往起到较重要的作用。

关键词 初级生产力,单养,混养,海水围隔

养殖池塘中浮游植物不仅构成放养种类饵料生物的基础,其光合作用和呼吸作用还直接影响到池水中溶氧(DO)的水平及变动。主养滤食性鱼类的淡水鱼池中鱼产量往往与初级生产力存在密切关系[雷衍之等 1983,何志辉 1989,Colman和Edwards 1987]。关于海水养虾池的初级生产力目前报道较少[臧维玲等 1995,阎喜武和何志辉 1997],而深入了解不同类型海水养殖池塘中初级生产力的变动规律及其对养殖产量和养殖生态系统稳定性的贡献对于完善海水池塘养殖技术具有重要的参考价值。本文报道了不同中国对虾(*Penaeus chinensis*)单养及其与台湾红罗非鱼(*Oreochromis mossambicus* × *O. niloticus*)或贝类混养海水实验围隔的初级生产力,探讨了影响围隔初级生产力的主要因素,并在此基础上初步估算了围隔浮游植物可能提供的鱼产量或贝产量,目的是为今后优化海水池塘养殖模式提供理论依据。

1 材料和方法

围隔实验分别于1995年6~10月和1996年6~8月在山东省黄海水产集团养虾场(北纬 $36^{\circ}40'$,东经 $120^{\circ}48'$)进行。实验所用围隔结构和面积见王岩等[1998]。1995年研究围隔为p2、pf1、pf2、pf3、pf4和pfc2号,其中p2号围隔中按 3.0 万尾/ hm^2 的密度单养中国对虾;pf1、pf2、pf3和pf4号围隔中对虾密度均为 1.5 万尾/ hm^2 ,混养台湾红罗非鱼的密度分别为 0.2 、 0.4 、 0.8 和 1.2 万尾/ hm^2 ;pfc2号围隔中鱼虾密度同pf2号围隔,另外按 18 万只/ hm^2 的密度混养菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)。1996年研究围隔为P2、PF21、PF22、PF23、PS1、PS2、PS3、PR1、PR2和PR3号,P2号围隔中按 6.0 万尾/ hm^2 的密度单养中国对虾,PF、PR和PS围隔系列中对虾密度同P2号围隔,其中PF21、PF22和PF23号围隔分别按 0.16 、 0.24 和 0.32 万尾/ hm^2

的密度混养台湾红罗非鱼, PS1、PS2 和 PS3 号围隔按 1.5、4.5 和 7.5 万只/hm² 的密度放养海湾扇贝 (*Argopecten irradians*), PR1、PR2 和 PR3 号围隔中按 10、15 和 20 万只/hm² 的密度放养缢蛭 (*Sinovacula constricta*)。两年实验中对虾均散养, 罗非鱼养在网箱中, 海湾扇贝以贝笼吊养, 菲律宾蛤仔和缢蛭撒播在底质上。

两年实验过程中围隔均不换水, 仅补充蒸发和渗漏的水量。1995 年实验期间每天向围隔定量投饵, 1996 年除投饵外还根据透明度酌情向围隔内施化肥。

浮游植物初级生产力以黑白瓶法测定, 所用黑白瓶容积为 250mL, 1995 年实验中隔 6 天或 12 天挂 1 次瓶, 共挂瓶 4 次; 1996 年隔 10 天挂 1 次瓶, 共挂瓶 5 次。每次在围隔内表层、1/2 透明度处和底层挂瓶 24 小时, 同时采样测定水温、水深、透明度、叶绿素 α (Chl-α)、COD、NO₂-N、NO₃-N、NH₃-N 和 PO₄-P。除 NO₃-N 以铜镉还原法测定外, 其余水质指标均按海洋调查规范中的方法测定。

两年实验围隔壁上均附生丝状藻类, 分别根据收获量方法测定其净生产力(简称 PANP), 并按 1g 附生藻鲜重=0.164 gO₂, 净生产力=80%毛生产力 [张觉民和何志辉 1991] 将 PANP 换算成附生藻毛生产力(简称 PAGP)。1996 年实验前期同时用黑白瓶法测定了 P2、PF21、PF22 和 PF23 号围隔中的 PAGP 及附生藻呼吸作用(简称 PAR), 方法是在 1/2 透明度处挂两组瓶, 一组瓶内置入面积约 2cm² 的附生藻片, 另一组瓶做对照, 挂瓶 24 小时。PAGPgO₂/(m²·d) 和 PARgO₂/(m²·d) 分别按下式计算:

$$PAGP = K \times [(DO_{PA1} - DO_{PA2}) - (DO_{CO1} - DO_{CO2})] / S$$

$$PAR = K \times (DO_{CO2} - DO_{PA2}) / S$$

其中, K=丝状藻附生面积/围隔面积, DO_{PA1} 为置藻白瓶中的 DO(mg), DO_{PA2} 为置藻黑瓶的 DO(mg), DO_{CO1} 为对照白瓶的 DO(mg), DO_{CO2} 为对照黑瓶的 DO(mg), S 为置藻瓶内附生藻片的面积(m²)。

2 结果

1995 年围隔毛初级生产力 (PPGP) 较低, PPGP/WR (WR 为水呼吸) 为 0.52 ~ 1.10, PPGP/Chl-α 为 0.15 ~ 0.36, 其中 pf 围隔系列 PPGP 相对较高, 为 (1.48 ± 0.51) gO₂/(m²·d) (平均值 ± 标准差, 下同), 并且该系列内随罗非鱼密度增加围隔 PPGP 呈升高趋势, pf2 号围隔中 PPGP 明显低于 pf 系列和 p2 号围隔。1996 年实验中围隔 PPGP 波动较大, PPGP/WR 为 1.82 ~ 3.23, PPGP/Chl-α 为 0.06 ~ 0.55, 其中 PS 围隔系列 PPGP 最高, 为 (5.02 ± 2.01) gO₂/(m²·d), 依次为 P2 号围隔 [3.16 gO₂/(m²·d)], PR 系列 [(2.98 ± 0.64) gO₂/(m²·d)] 和 PF 系列 [(1.87 ± 0.15) gO₂/(m²·d)]。相比之下, 1996 年围隔中 PPGP/Chl-α 变动较大, PPGP 和 PPGP/WR 明显高于 1995 年。1995 年除 pf1 和 pf4 号围隔外其余围隔 PANP 都超过 5g 藻/(m²·d), 其中 p2 和 pf4 号围隔中 PANP 超过 10 g 藻/(m²·d), pf 系列 PANP 平均为 (5.14 ± 3.87) g 藻/(m²·d), 与 pfc2 号围隔相近。1996 年围隔壁附生藻程度较 1995 年下降且各围隔间差别不大, 实验期间 PANP 为 1.91 ~ 4.76 g 藻/(m²·d), PAGP 约合 0.28 ~ 0.98 gO₂/(m²·d) (表 1)。

1996 年实验前期以黑白瓶法测出 P2 号围隔中 PAGP 为 1.52 gO₂/(m²·d), PAGP/PAR 为 4.17; PF 系列中 PAGP 为 (1.99 ± 0.58) gO₂/(m²·d), PAGP/PAR 平均为 3.33。与表 1 中同围隔的 PPGP/WR 相比, PAGP/PAR 明显高于前者。

表 1 1995 年和 1996 年实验围隔中浮游植物和附生藻生产力、水呼吸、PPGP/WR 和 PPGP/Chl- α

Tab. 1 Primary production of phytoplankton and periphery algae

respiration of water column. PPGP/WR and PPGP/Chl- α in experimental enclosures in 1995 and 1996

年份 (年)	围隔	PPGP [gO ₂ /(m ² ·d)]	WR [gO ₂ /(m ² ·d)]	PPGP/WR	PPGP/Chl- α	PANP [g 藻/(m ² ·d)]	PAGP [g 藻/(m ² ·d)]
1995	p2	1.42±0.49	1.54±0.96	0.93	0.36	11.04	2.26
	pf1	1.59±0.89	1.45±0.60	1.10	0.32	5.45	1.12
	pf2	1.65±0.27	2.17±1.15	0.76	0.22	1.75	0.36
	pf3	0.75±0.60	1.01±0.25	0.74	0.15	10.47	2.15
	pf4	1.94±0.98	2.29±0.67	0.85	0.29	2.90	0.59
	Pfc2	0.84±0.35	1.61±0.85	0.52	0.31	5.21	1.07
	P2	3.16±1.64	1.21±0.79	2.63	0.42	2.08	0.43
1996	PF21	1.72±1.54	0.95±0.39	1.82	0.37	1.91	0.39
	PF22	2.02±2.26	0.83±0.22	2.44	0.43	4.76	0.98
	PF23	1.88±1.07	0.86±0.54	2.17	0.37	2.37	0.49
	PS1	3.11±0.65	1.28±0.72	2.44	0.23	3.48	0.71
	PS2	4.83±1.34	1.49±0.52	3.23	0.32	3.37	0.69
	PS3	7.12±8.54	2.63±1.36	2.70	0.06	1.39	0.28
	PR1	3.64±2.86	1.65±1.51	2.22	0.55		
	PR2	2.36±1.06	0.76±0.37	3.13	0.35		
	PR3	2.95±1.06	1.25±0.77	2.38	0.49		

注:表中 PPGP 和 WR 为平均值±标准差; PAGP 根据 PANP 换算而来。1996 年实验期间 PS3 号围隔发生了严重的海洋原甲藻水华。

1995 年 pf 围隔系列 Chl- α 和 PO₄-P 分别平均为 (5.69±2.74)mg/m³ 和 (19.29±7.51) μ g/L, 高于 p2 和 pfc2 号围隔, 但 pf 系列总溶解无机氮浓度(简称 DIN)相对较低, pfc2 号围隔 Chl- α 和 PO₄-P 最低, DIN 最高; 该年实验中围隔 PPGP 与 Chl- α (r=0.630, n=6)、PANP (r=-0.569, n=6)、COD (r=0.680, n=6)、PO₄-P (r=0.746, n=6)、DIN (r=-0.789, n=6)、透明度 (r=0.099, n=6) 相关不显著。1996 年 PS 围隔系列 Chl- α 最高, 依次为 P2 号围隔, PR 系列和 PF 系列, PR 系列 PO₄-P 相对较低; 该年实验中围隔 PPGP 与 Chl- α (r=0.860, n=10) 和 COD (r=0.720, n=10) 相关显著, 但与 PANP (r=-0.366, n=8)、DIN (r=-0.482, n=8)、PO₄-P (r=0.249, n=10)、透明度 (r=0.438, n=10) 不相关。两年相比, 1995 年围隔中 Chl- α 和 PO₄-P 明显低于 1996 年, 但 DIN 高于 1996 年(表 2)。

3 讨论

养殖池塘初级生产力(简称 GP)变化很大, 国外淡水高产鱼池 GP 可达 10~20 gO₂/(m²·d), 我国的则多为 5~10 gO₂/(m²·d) [Colman 和 Edwards 1987, 何志辉 1989], 部分海水养虾池 GP 为 1.54~13.42 gO₂/(m²·d) [臧维玲等 1995, 闫喜武和何志辉 1997]。1995 年和 1996 年实验围隔中 PPGP 分别为 0.75~1.94 gO₂/(m²·d) 和 1.72~7.12 gO₂/(m²·d), 这低于早期报道中淡水或海水养殖池塘的 GP, 初步分析原因有三点: 1. 围隔内水相对静滞; 2. 围隔壁上附生大量丝状藻类; 3. 围隔内放养的罗非鱼和贝类滤食浮游植物。

表 2 1995 年和 1996 年实验期间围隔内透明度、Chl- α 、COD、DIN 和 PO₄-PTab. 2 Secchi depth, Chl- α , COD and concentration of total dissolved inorganic nitrogen and reactive phosphate in experimental enclosures in 1995 and 1996

年份 (年)	围隔	透明度 (cm)	Chl- α (mg/m ³)	COD (mg/L)	DIN (μ g/L)	PO ₄ -P (μ g/L)
1995	p2	61±15	3.89±3.76	3.43±0.22	216.68±168.61	7.76±12.63
	pf1	50±6	4.80±0.51	4.95±0.33	159.93±184.63	27.54±49.07
	pf2	72±13	7.42±6.80	3.96±0.36	75.52±37.55	17.50±31.26
	pf3	54±10	5.48±1.98	3.82±0.49	328.22±315.06	9.86±8.81
	pf4	47±12	7.32±3.77	4.89±0.35	171.81±223.37	22.30±34.31
	Pfc2	51±30	2.97±2.53	3.39±0.48	600.66±501.44	5.33±3.69
1996	P2	61±19	7.04±2.51	3.66±0.27	34.60±14.29	191.61±123.00
	PF21	65±15	3.92±1.36	3.38±0.38	41.41±18.98	145.47±104.26
	PF22	69±22	4.22±3.00	3.20±0.39	59.66±37.85	114.23±102.59
	PF23	67±27	4.58±3.29	3.46±0.45	35.94±2.98	63.95±56.07
	PS1	87±41	8.80±3.85	3.54±0.40	44.31±9.11	213.67±159.76
	PS2	85±41	9.60±2.56	3.37±0.81	42.45±6.07	203.85±211.07
	PS3	89±24	75.70±101.29	4.44±1.90	31.07±16.86	125.60±22.34
	PR1	54±18	5.94±2.00	3.07±1.02		68.05*
	PR2	54±26	6.18±1.35	2.99±0.75		64.27*
PR3	102±23	5.42±1.52	3.11±0.75		64.27*	

注: 表中数据除带 * 者外均为平均值±标准差。1996 年实验期间 PS3 号围隔内发生严重海洋原甲藻水华。

浮游植物是海洋或湖泊敞水区主要的初级生产者, 养鱼池中 PPGP 也往往占初级生产量的绝大部分, 而在水生维管束植物或丝状藻类大量发生的水体中浮游植物生物量通常很低, 如底栖藻类严重的鱼池水中 Chl- α 仅为 2.3 mg/m³ [Daniels 和 Body 1989], 此时 PPGP 显然已不能完全代表池塘 GP。1995 年围隔壁上附生藻生物量较高, 浮游植物现存量和 PPGP 均较低, 多数围隔 PPGP/WR<1 表明该年仅靠浮游植物光合作用已难维持围隔内群落的代谢需求, 围隔内混养的罗非鱼和菲律宾蛤仔生长需依赖外源性营养, 如以腐屑等做为食物。1996 年围隔附生藻生物量较 1995 年有所降低, 浮游植物现存量和 PPGP 相对较高, PPGP/WR>1 表明围隔浮游植物可为混养的罗非鱼、海湾扇贝和缢蛭提供部分食物。由于 PAGP/PAR 高于 PPGP/WR, 因此附生藻大量发生时围隔内溶氧水平并不能反映出 PPGP 的高低。

1995 年围隔 PAGP 为 0.36~3.79 gO₂/(m²·d), 占围隔 GP(GP=PPGP+PAGP) 的 18.5%~74.1%, 部分围隔 PAGP 甚至高于 PPGP; 1996 年围隔 PAGP 为 0.28~0.98 gO₂/(m²·d), 仅占 GP 的 3.8%~32.7%。两年实验中围隔 GP 分别为 (2.49±0.96) gO₂/(m²·d) [1.91~3.68gO₂/(m²·d)] 和 (3.98±1.88) gO₂/(m²·d) [2.11~7.40 gO₂/(m²·d)], 略低于半精养虾池的 GP [臧维玲等 1995, 闫喜武和何志辉 1997], 部分原因可能与丝状藻类 P/B 系数较浮游植物低有关。由于围隔附生藻与江篱等池塘养殖的海藻在生态位上有许多相似之处, 从本实验可推知虾池混养江篱等海藻后浮游植物生物量和 PPGP 将会有所下降, 但现有虾藻混养文献中尚未见对此方面问题的深入讨论。

影响浮游植物生产力的因素很多, 如浮游植物种类组成和生物量、水温、光照和营养盐状况等, 因此 PPGP 往往较浮游植物现存量变化更剧烈。早期研究认为滤食性鱼类对 P/B 系数较高的微型浮游植物有促进作用, 从而可提高 PPGP [Northcote 1988]。1995 年实验中围隔

PPGP 与 Chl- α 、PANP、COD、 PO_4 -P 和 DIN 等相关均不显著,说明该年影响 PPGP 的因素较多,相对而言, PO_4 -P 和 DIN 的影响较大;该年 pf 围隔系列中除 pf3 号外 PPGP 普遍较高,表明混养罗非鱼可通过改善水体的磷循环而提高 PPGP, pfc2 号围隔中 PPGP 和 Chl- α 均最低,但其 PANP 并未明显高于 p2 号围隔和 pf 系列,可见其 PPGP 较低的主要原因不是附生藻的影响,而是菲律宾蛤仔对浮游植物的强烈滤食。1996 年围隔 PPGP 与 Chl- α 和 COD 显著相关,与 PANP、DIN 和 PO_4 -P 不相关,表明附生藻和氮磷浓度对 PPGP 影响较小,PPGP 高低主要取决于浮游植物现存量的高低;该年 PS 和 PR 围隔系列 PPGP 相对较高,PF 系列却较低,此趋势与 1995 年实验结果正相反,这可能与 1996 年实验中采取的施肥措施有关,由于各围隔施肥时间和数量并不一致,对浮游植物的影响显然也不相同,结果施肥掩盖了罗非鱼和贝类下行效应对 PPGP 的影响。综合两年实验可见,管理措施、附生藻、罗非鱼和贝类的下行效应是影响围隔 PPGP 的主要因素。当围隔中 PO_4 -P 浓度较低时,混养罗非鱼可增加 PO_4 -P 在总磷中的比例,从而维持较高的浮游植物生物量和 PPGP,混养菲律宾蛤仔则因其大量滤食浮游植物导致 PPGP 降低(王岩和张鸿雁 1997);当通过施肥不断从外界向围隔补充 PO_4 -P 时,混养少量罗非鱼和贝类对 PPGP 的影响则变得模糊。1996 年围隔中 Chl- α 和 PPGP 均高于 1995 年,PPGP/Chl- α 变化较大也从侧面反映出施肥对浮游植物生物量和 PPGP 所产生的重要影响。根据本实验结果,作者初步认为海水养殖池塘中 PPGP 的水平和变动往往主要取决于投饵和施肥等管理措施的变化,放养种类的下行效应仅起到次要和协同的作用。

假定 1996 年围隔中 GP 完全由 PPGP 构成,并假定 GP 转化为罗非鱼或贝类产量的效率为 5%,根据 GP 平均值 [3.98 gO₂/(m²·d)] 以及 1gO₂=3 600 卡,1g 鱼鲜重=1 200 卡,1g 贝鲜重=477 卡来大致推算[张觉民和何志辉 1991],养殖 50 天从围隔浮游植物获得的罗非鱼产量最多不超过 300 kg/hm²,贝类产量不超过 750 kg/hm²,实际上围隔养殖罗非鱼和海湾扇贝的产量均远高于上述限值,这表明除浮游植物之外,外源性腐屑等在罗非鱼和海湾扇贝的营养中也发挥了重要作用,对围隔浮游生物研究也得出了同样的结论(王岩和张鸿雁 1997)。

王吉桥博士承担围隔的养殖日常管理,李德尚先生惠为审阅文稿,谨此致谢。

参 考 文 献

- 王 岩,张鸿雁,齐振雄. 1998. 海水养殖实验围隔中海洋原甲藻水华的发生及其影响. 水产学报, 22(3): 218~222
- 何志辉. 1989. 养鱼池的生态学. 中国池塘养鱼学. 北京: 科学出版社. 68~70
- 阎喜武,何志辉. 1997. 虾池浮游植物初级生产力的研究. 水产学报, 21(3): 288~296
- 张觉民,何志辉. 1991. 内陆水域渔业资源调查手册. 北京: 农业出版社. 32
- 雷衍之,徐 捷,于淑敏. 1983. 无锡市河埭口高产鱼池水质研究 I. 水化学和初级生产力. 水产学报, 7(3): 185~199
- 臧维玲,戴习林,朱正国等. 1995. 对虾池塘溶解氧收支平衡状态. 海洋学报, 17(4): 137~142
- Colman J A, Edwards P. 1987. Feeding pathways and environmental constraints in waste-fed aquaculture. Balance and Optimization. In: Moriaity D J W, Pullin R S V, eds. Detritus and microbial ecology in aquaculture. ICLARM conference Proceeding. International center for Living Aquatic Resources. Management. Manila. Philippines. 14, 420
- Danieh H V, Body C E. 1989. Chemical budgets for polyethylene-lined, brackish water ponds. Journal of the World Aquaculture Society, 20(2): 53~60
- Northcote T G. 1988. Fish in the structure and function of freshwater ecosystems: A "Top-down" view. Can J Fish Aquat Sci 45: 361~379

STUDIES ON PRIMARY PRODUCTION IN SEAWATER EXPERIMENTAL ENCLOSURES WITH DIFFERENT MONOCULTURE OR POLY CULTURE

WANG Yan, ZHANG Hong-Yan

(Fisheries College, Ocean University of Qingdao, 266003)

ABSTRACT The result of enclosure experiment carried out from summer to autumn in 1995 and 1996. It showed that during feeding period the gross primary production of phytoplankton (PPGP) was lower and respiration of water column (WR) relatively higher, in most enclosures $PPGP/WR < 1$, the PPGP in enclosures polycultured shrimps and a hybrid tilapia was higher, in opposite, the enclosure polycultured shrimps, tilapia and *Ruditapes Philippinarum* had the lowest PPGP. When suitable fertilization was adopted on the basis of daily feeding, PPGP in experimental enclosures was significantly higher than that as only feeding was adopted, $PPGP/WR > 1$, but there was not apparent difference in PPGP between enclosure monocultured shrimps, polycultured shrimps and tilapia, polycultured shrimps and bay scallop, and polycultured shrimps and *Sinonvacula constricta*. These results indicate that the cultural management measures, routine feeding and fertilization, stocked tilapia and bivalve and periphery algae all affect the gross primary production in enclosures, in which management measures usually play an important role.

KEYWORDS Primary production, Monoculture, Polyculture, Seawater enclosure