



3种水质调控方式下刺参池塘初级生产力的周年变化

孙广伟¹, 周 玮¹, 党子乔², 魏亚南¹, 林 青¹,
雷兆霖¹, 陈济丰¹, 郭 超¹, 张东升^{1,3*}

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116023;

2. 全国水产技术推广总站, 中国水产学会, 北京 100000;

3. 大连海洋大学农业部北方海水增养殖重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要: 通过对自然纳潮、微孔曝气、养水机池塘不同水层初级生产力及其相关参数的研究, 分析养水机对初级生产力的影响。结果表明, 3种水质调控方式池塘, 初级生产力年均值、P/R值均以养水机池塘最高, 微孔曝气池塘次之, 自然纳潮池塘最低。养水机池塘、微孔曝气池塘、自然纳潮池塘的初级生产力年均值分别为(6.22±0.54)、(5.37±0.60)、(4.69±0.53) gO₂/(m²·d)。3种水质调控方式下, 养水机池塘30~50 cm水层和50~100 cm水层初级生产力差异不显著, 而微孔曝气池塘和自然纳潮池塘这两水层之间初级生产力差异显著, 且养水机池塘50~100 cm的水层初级生产力显著高于微孔曝气和自然纳潮池塘。研究表明, 养水机能显著提高刺参池塘50 cm以下水层的初级生产力, 缩小上层和下层初级生产力之间的差距, 从而提高池塘水体总初级生产力, 为刺参饵料和池塘物质快速循环提供基本保障。

关键词: 刺参; 初级生产力; 水质调控; 养水机; 微孔曝气

中图分类号: S 967.4

文献标志码: A

近年来, 刺参 (*Apostichopus japonicus*) 养殖已成为我国北方重要的渔业产业之一, 2018年, 全国海水养殖面积为2 043 070 hm², 其中刺参养殖面积达238 183 hm², 占海水养殖总面积的11.66%, 全国刺参总产量为174 340 t, 其中辽宁省产量为47 096 t, 达总产量的27%^[1]。刺参养殖超过一定时间的池塘(旧池塘), 刺参易发病和死亡, 导致产量逐年下降, 经济效益下滑^[2], 主要原因在于旧池塘积累大量沉积有机物, 导致夏季高温期水质变坏, 大型藻类丛生, 而刺参养殖池塘的一般常规水质调控方法难以消除沉积有机物积累和大型藻类生长, 如自然纳潮控水, 该法仅在海水大潮期间换水, 不能根据池塘水质的具体状况及时换水, 难以人为调

控; 微孔曝气水质调控技术可以提高池塘溶解氧, 但建设、维护成本较高, 使用一段时间后管道易堵塞, 难以清理^[2], 上述两种刺参池塘水质调控技术均不能打破温、盐跃层, 不能抑草, 效果具有一定的局限性, 而作者单位研制的养水机除了能给水体提供充足的溶解氧外, 还能很好地打破温、盐跃层, 使上、下层水混合良好, 将表层水溶解氧输入到底层, 促使池塘沉积有机物快速分解, 且具有明显的抑草效果, 为刺参生长提供优质环境。

初级生产力是指自养生物在单位时间、单位面积水域中吸收太阳能, 将无机物合成为有机物的能力, 因此, 初级生产力常被用来反映养殖池塘物质循环和能量流动速度及评价池塘

收稿日期: 2019-05-16 修回日期: 2019-11-10

资助项目: 辽宁省科学计划项目(2018104009); 辽宁省“兴辽英才”项目(XLYC1808029); 大连市第二批领军人才资助项目

通信作者: 张东升, E-mail: zhangds0415@126.com

的营养状态^[3]和预测水域渔业生产力^[4]。目前, 对于刺参养殖池塘初级生产力周年变化研究较少, 仅见姜森颖等^[5]对刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构变化进行过报道, 但水质调控方式对刺参池塘初级生产力的影响尚未见报道。

为了解养水机池塘净化机理及效能, 本实验以自然纳潮池塘和微孔曝气池塘为对照, 研究养水机对池塘初级生产力的影响, 为养水机净化机理和进一步研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验池塘

实验在大连宝发海珍品有限公司刺参养殖池塘(大连庄河)进行。池塘长600 m, 宽85 m, 水深变化在1.2~2.0 m之间, 选择9口位置相近池塘作为实验池塘。在各池塘进水口、池中、出水口用YSI多参数水质分析仪(professional plus, 美

国)即时测定水温、溶解氧、温度、盐度、pH, 其他指标如水中活性磷酸盐、氨态氮、亚硝酸盐、硝酸盐、底泥有机质含量, 采用郭超^[6]的数据; 水、沉积物中异养菌和弧菌数量, 采用陈济丰^[7]的数据(表1)。

养水机池塘, 在池塘最深处放置一台功率为750 W的养水机, 每日21:00至次日9:00连续工作12 h; 微孔曝气池塘, 在池塘底部铺设1套微孔曝气系统, 由空压机(7.6 kW/池塘)、总供气管和微孔曝气盘组成, 池塘缺氧时, 开始工作; 自然纳潮池塘, 无任何调水装置。各池塘刺参规格、密度相同, 不投饵、不投药, 实验期间统一管理。

1.2 养水机结构及机理

养水机是本团队针对刺参养殖池塘水体温度、盐跃层问题, 自主研发的新型水质调控设备(图1)。养水机主要分为4部分, 分别为进水组

表 1 刺参养殖池塘基本状况和水化学特征

Tab. 1 Basic situation and physical chemistry features in the ponds of *A. japonicus*

池塘 ponds	养水机池塘 jet water mixer	微孔曝气池塘 submerged aerator	自然纳潮池塘 natural water exchange
面积/hm ² area	5.1	5.1	5.1
水深/m water depth	1.2~2.0	1.2~2.0	1.2~2.0
投苗密度/(个/hm ²) seeding density	152 125	151 627	151 123
苗种规格/(g/个) seeding size	47.13	46.87	47.01
温度/°C temperature	-2.1~27.5	-2.1~27.5	-2.1~27.5
盐度 salinity	29.9~36.3	29.9~36.3	29.9~36.3
pH	7.3~8.5	7.1~8.3	7.2~8.2
透明度/m transparency	1.0~1.1	1.0~1.1	1.0~1.1
活性磷酸盐/(mg/L) PO ₄ ⁻ -P	0.012~0.058	0.009~0.051	0.011~0.048
氨态氮/(mg/L) NH ₄ ⁺ -N	0.029~0.379	0.055~0.380	0.096~0.469
亚硝酸盐/(mg/L) NO ₂ ⁻ -N	0~0.019	0~0.010	0.001~0.029
硝酸盐/(mg/L) NO ₃ ⁻ -N	0.155~0.507	0.132~0.766	0.232~0.688
水中异养菌数量/(CFU/mL) WNHB	8 967~128 833	6 500~191 500	6 817~168 167
水中弧菌数量/(CFU/mL) WNV	0~646	0~952	2~2 899
泥中异养菌数量/(CFU/g) SNHB	115 037~410 291	62 634~247 309	94 400~377 626
泥中弧菌数量/(CFU/g) SNV	0~3 037	35~5 412	2~3 291
底泥有机质含量/[mg/(m ² ·d)] SOM	633~696	666~711	711~996

注: WNHB, 水中异养细菌的数量; WNV, 水中弧菌数量; SNHB, 沉积物中异养细菌数量; SNV, 沉积物中弧菌数量; SOM, 沉积物中有机物含量

Notes: WNHB, number of heterotrophic bacteria in the water; WNV, number of *Vibrio* in the water; SNHB, number of heterotrophic bacteria in the sediment; SNV, number of *Vibrio* in the sediment; SOM, organic matter content in the sediment

件、生物包、水循环动力装置和输出喷头，养水机在工作时，通过水循环动力装置系统抽取表层溶解氧丰富的水体进入进水口，再流入提前接种过不同种类有益菌的生物包进行过滤，最后由养水机上的出水喷头将过滤后的水向池塘对面喷射出去，实现垂直方向水体快速交换，打破温、盐跃层，起到净化水质的作用。

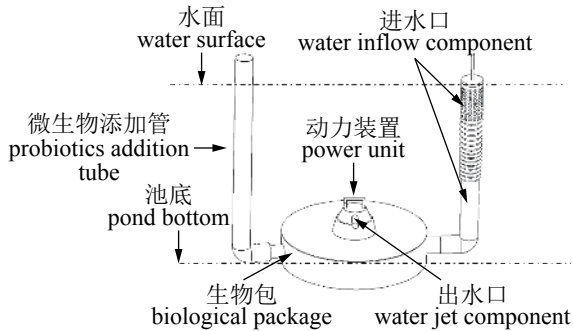


图1 养水机模拟图

Fig. 1 Simulation diagram of jet water mixing (JWM) unit

1.3 实验方法

实验时间为2015年10月至2016年9月每月满月大潮前3~5天测定1次，而在8月测定2次(由于8月7日是秋季的开始，以后水温变凉，所以采样2次)。初级生产力的测定采用黑白瓶法^[8]，黑白瓶的容积约为150 mL。在刺参池塘中心处，按照水体透明度的0、0.3、0.5、1.0、1.5倍于上午10时左右分层采集水样和挂瓶，挂瓶时间为24 h，用Winkler法测定溶解氧变化。

初级生产力的计算：各挂瓶水层日产量 $[gO_2/(m^3 \cdot d)] = \text{白瓶溶解氧} - \text{黑瓶溶解氧}$ ；呼吸量 $= \text{初始溶解氧} - \text{黑瓶溶解氧}$ ；群落净产量 $= \text{白瓶溶解氧} - \text{初始溶解氧}$ ；水柱日产量即水体初级生产力 $(gO_2/(m^2 \cdot d))$ 的计算：水体初级生产力 $= \sum \text{各挂瓶水层日产量}$ ；P/R值 $= \text{初级生产力} / \text{呼吸量}$ ；P/B值 $= \text{初级生产力} / \text{生物量}$ 。

1.4 数据统计

初级生产力的试验数据以平均数 \pm 标准差(mean \pm SD)表示，同一池塘不同月、不同水层之间或不同池塘同一月同一水层的数据之间的差异采用SPSS 17.0中的单因素(One-Way ANOVA)方差分析；各池塘初级生产力和水质之间的相关性采用SPSS 17.0软件进行双变量相关性分析，以皮尔逊系数表示相关性的大小， $P < 0.05$ 为

显著性相关， $P < 0.01$ 为极显著性相关， $P > 0.05$ 为显著性不相关。

2 结果

2.1 3种水质调控方式下各池塘初级生产力及相关参数

3种水质调控方式下初级生产力、呼吸量的年均值，初级生产力与呼吸量的比值(P/R值)均以养水机池塘最高、其次是微孔曝气池塘，自然纳潮池塘最低。养水机、微孔曝气、自然纳潮池塘初级生产力的年均值分别为 (6.22 ± 0.54) ， (5.37 ± 0.60) ， $(4.69 \pm 0.53) gO_2/(m^2 \cdot d)$ ；呼吸量的年均值分别为 (2.35 ± 0.12) ， (2.10 ± 0.16) ， $(1.91 \pm 0.23) gO_2/(m^2 \cdot d)$ ；初级生产力与呼吸量的比值(P/R值)分别为 (3.31 ± 0.08) ， (3.12 ± 0.02) ， (2.83 ± 0.15) 。但P/B值以微孔曝气池塘最高 (0.32 ± 0.04) ，养水机池塘次之 (0.29 ± 0.03) ，自然纳潮池塘最低 (0.28 ± 0.03) ，群落净产量约占初级生产力的60%。

同一种水质调控方式下，池塘各月之间初级生产力均有一定的差异，高温期显著高于低温期间的初级生产力，从上年的10月至次年的5月初级生产力较低，而6—9月初级生产力较高。不同水质调控方式下各池塘同月初级生产力均存在差异，但在10、1、2、4、5月差异不显著，而在11、12月，养水机池塘显著高于微孔曝气池塘，而在3、7、8、9月养水机池塘显著高于自然纳潮池塘(表2)，与微孔曝气池塘差异不显著，这可能是造成养水机池塘初级生产力年均值显著高于自然纳潮池塘的原因。

2.2 各池塘不同水层初级生产力的周年变化

各池塘各水层周年变化趋势基本一致，均在8月最高，2月最低，6—9月50~100 cm水层养水机池塘显著高于另外两种水质调控池塘($P < 0.05$)，7—9月100~150 cm水层养水机池塘显著高于另外两种水质调控池塘($P < 0.05$)(图2)。各水层初级生产力除8月份的0~30 cm低于30~50 cm外，其他月份均是随水深的加深而递减(表3)。自然纳潮池塘和微孔曝气池塘50 cm以上水层和50 cm以下水层初级生产力差异均显著($P < 0.05$)，但养水机池塘30~50 cm和50~100 cm初级生产力差异不显著($P > 0.05$)，且养水机池塘50~100 cm水层的初级生产力显著高于微孔曝气和自然纳潮池塘($P < 0.05$)。

表 2 3种水质调控方式下刺参池塘的初级生产力及有关参数

Tab. 2 Primary productivity of *A. japonicus* ponds by three water quality regulations

池塘 ponds	日期 date	初级生产力/ [gO ₂ /(m ² ·d)] gross output	呼吸量/[gO ₂ /(m ² ·d)] breath consumption	群落净产量/[gO ₂ /(m ² ·d)] net production of community	P/R值 ratio of gross yield to respiration	P/B值 ratio of gross yield to biomass
养水机池塘 jet water mixer	10-15	3.84±0.95 ^{chA}	0.66±0.14	3.18±0.16	5.79±0.22	0.16±0.03
	11-15	2.77±0.23 ^{bcA}	0.77±0.15	2.00±0.05	3.65±0.42	0.12±0.02
	12-15	2.00±0.14 ^{abhA}	0.57±0.11	1.43±0.22	3.57±0.45	0.17±0.03
	01-16	1.26±0.25 ^{abA}	0.45±0.13	0.81±0.06	2.85±0.28	0.20±0.03
	02-16	0.61±0.15 ^{ea}	0.24±0.06	0.37±0.11	2.54±0.02	0.36±0.01
	03-16	2.70±0.34 ^{bcA}	0.54±0.08	2.16±0.21	5.01±0.12	0.35±0.05
	04-16	2.77±0.26 ^{abdA}	0.52±0.10	1.75±0.10	4.41±0.36	0.25±0.03
	05-16	4.45±0.24 ^{ca}	1.37±0.16	3.08±0.07	3.27±0.21	0.35±0.04
	06-16	8.38±0.26 ^{ca}	3.72±0.11	4.66±0.64	2.25±0.01	0.42±0.03
	07-16	11.35±0.20 ^{fa}	5.08±0.12	6.27±0.11	2.23±0.02	0.36±0.02
	08-16上	14.82±1.57 ^{fa}	5.68±0.17	9.14±0.08	2.60±0.20	0.34±0.03
	08-16下	16.68±1.27 ^{fa}	6.65±0.13	10.03±0.08	2.51±0.15	0.40±0.02
	09-16	9.77±1.10 ^{efa}	4.28±0.12	5.49±0.28	2.28±0.20	0.35±0.03
mean±SD		6.22±0.54 ^A	2.35±0.12	3.87±0.17	3.31±0.08	0.29±0.03
微孔曝气池塘 submerged aerator	10-15	3.69±0.98 ^{bcA}	0.66±0.15	3.03±0.06	5.56±0.23	0.17±0.05
	11-15	1.85±0.53 ^{abb}	0.79±0.19	1.06±0.10	2.32±0.12	0.11±0.02
	12-15	1.11±0.29 ^{ab}	0.54±0.11	0.57±0.14	2.04±0.12	0.11±0.02
	01-16	1.21±0.25 ^{aa}	0.44±0.14	0.17±0.12	2.82±0.35	0.45±0.09
	02-16	0.58±0.26 ^{aa}	0.21±0.04	0.37±0.13	2.67±0.74	0.46±0.05
	03-16	2.11±0.02 ^{abAB}	0.45±0.10	1.66±0.09	4.86±1.15	0.37±0.05
	04-16	2.18±0.22 ^{abA}	0.42±0.06	1.76±0.14	5.21±0.22	0.28±0.02
	05-16	4.59±0.40 ^{ea}	1.28±0.22	3.31±0.09	3.62±0.31	0.43±0.03
	06-16	7.43±0.44 ^{da}	3.59±0.17	3.84±0.12	2.07±0.03	0.42±0.03
	07-16	9.76±0.64 ^{eaB}	4.63±0.39	5.13±0.12	2.11±0.04	0.37±0.02
	08-16上	12.80±1.61 ^{eaB}	4.94±0.23	7.93±0.81	2.60±0.21	0.33±0.03
	08-16下	14.30±1.17 ^{eaB}	5.81±0.10	8.57±0.15	2.47±0.16	0.37±0.02
	09-16	8.04±1.03 ^{deAB}	3.56±0.15	4.48±0.17	2.25±0.19	0.29±0.02
mean±SD		5.37±0.60 ^{AB}	2.10±0.16	3.27±0.17	3.12±0.02	0.32±0.04
自然纳潮池塘 natural water exchange	10-15	3.19±0.38 ^{bcA}	0.67±0.18	2.52±0.21	4.90±0.77	0.14±0.03
	11-15	1.74±0.20 ^{abb}	0.69±0.17	1.05±0.11	2.58±0.35	0.13±0.02
	12-15	1.61±0.29 ^{abAB}	0.56±0.15	1.05±0.10	2.93±0.27	0.21±0.04
	01-16	0.91±0.26 ^{aa}	0.47±0.16	0.44±0.13	1.97±0.12	0.18±0.03
	02-16	0.55±0.34 ^{aa}	0.24±0.09	0.31±0.10	2.13±0.66	0.46±0.04
	03-16	1.33±0.42 ^{abb}	0.40±0.08	0.93±0.08	3.27±0.41	0.24±0.03
	04-16	2.11±0.12 ^{abcA}	0.46±0.10	1.65±0.11	4.70±0.78	0.27±0.02

· 续表2 ·

池塘 ponds	日期 date	初级生产力/ [gO ₂ /(m ² ·d)] gross output	呼吸量/[gO ₂ /(m ² ·d)] breath consumption	群落净产量/[gO ₂ /(m ² ·d)] net production of community	P/R值 ratio of gross yield to respiration	P/B值 ratio of gross yield to biomass
	05-16	3.70±0.74 ^{ca}	1.17±1.10	2.53±0.21	3.16±1.20	0.38±0.03
	06-16	6.34±0.43 ^{ab}	3.14±0.12	3.20±0.11	2.02±0.06	0.40±0.02
	07-16	8.31±1.06 ^{ab}	3.50±0.34	4.81±0.09	2.37±0.08	0.32±0.03
	08-16上	11.14±0.88 ^{ab}	4.67±0.16	6.47±0.15	2.38±0.11	0.29±0.02
	08-16下	13.51±1.25 ^{ab}	5.33±0.12	8.18±0.12	2.53±0.18	0.35±0.04
	09-16	6.51±0.57 ^{ab}	3.47±0.24	3.04±0.08	1.88±0.04	0.27±0.03
	mean±SD	4.69±0.53 ^b	1.91±0.23	2.78±0.12	2.83±0.15	0.28±0.03

注: 同列中, 上标小写字母表示同一池塘各月初级生产力之间的差异; 上标大写字母表示不同池塘相同月份初级生产力之间的差异; 当有相同字母时, 表示初级生产力之间差异不显著($P>0.05$), 当无相同字母时, 表示初级生产力之间差异显著($P<0.05$)。下表同

Notes: In a column, the upper lowercase letters mean difference of the primary productivity among months at the same pond. The superscript capital letters mean difference of primary productivity in the different pond in the same month. The same letter means no significant difference between the primary productivity ($P>0.05$). The different letters mean there is significant difference between the primary productivity ($P<0.05$), the same below

2.3 池塘初级生产力与水质参数的相关性

3种水质调控方式下池塘初级生产力与水温、浮游植物量呈极显著正相关, 与活性磷酸盐呈显著正相关(除自然纳潮池塘外), 与溶解氧、盐度呈显著负相关, 与其他水质指标(氨态氮、亚硝酸盐、硝酸盐、总无机氮、水、泥中异养菌数量、氮磷比)无相关性(表4)。

3 讨论

3.1 养水机对池塘初级生产力的影响

池塘初级生产力的高低反映了池塘产生有机物质的能力以及浮游生物在池塘中的物质循环和能量转换效率, 闫喜武等^[3]认为虾池浮游植物初级生产力与我国近海海区(渤海除外)和我国中营养型湖泊的初级生产力均处于同一水平, 低于我国施有机肥的高产鱼池和以色列施化肥为主的鱼池而高于其他各类水体。本实验测定的刺参池塘初级生产力与姜森颖等^[5]测定的刺参池塘初级生产力均与虾池初级生产力处于同一级别, 可见刺参池塘初级生产力较高, 较高的水体浮游植物生物量在下沉成为表面沉积物后, 为刺参生长提供了充足饵料。相比自然纳潮池塘和微孔曝气池塘, 养水机池塘初级生产力更高, 说明养水机更有利于池塘饵料生物的生长, 为刺参生长提供充足的饵料。

影响浮游植物初级生产力的主要理化因子有温度、光强、营养盐浓度, 然而对于不同水体, 影响浮游植物初级生产力的主要理化因子并不相同^[9], 一般情况下, 水中浮游植物初级生

产力与温度呈正相关^[10-15], 与盐度呈负相关^[16], 与水深呈负相关^[17], 本实验测定的3种水质调控方式下刺参池塘浮游植物初级生产力均与文献报道一致。温度影响酶活力, 温度高, 酶的活性高^[18], 因此初级生产力也高; 盐度高低可能与初级生产力高低无直接关系, 暨卫东等^[16]认为盐度与营养盐呈负相关, 而本实验显示盐度与温度呈负相关, 营养盐和温度是影响初级生产力的直接因素, 因此, 盐度高低对初级生产力大小是否有直接影响需进一步验证。水深加深, 光强度降低, 光合作用减少, 导致浮游植物初级生产力降低, 而在夏天30~50 cm处的光合作用大于0 cm处的光合作用, 这与夏季表面光太强, 出现光抑制有关^[10]。本实验3种水质调控方式下各池塘温度、盐度、光强除了呈季节变化较大以外, 相同月份不同池塘相同水质指标差异很小, 因此这3种水质指标并非影响3种水质调控方式下初级生产力差异的原因。除了温度和光强以外, 营养盐是直接影响水域浮游植物生产力的主要因素, 是寡营养水域初级生产力的限制因子^[10-11, 19-20]。朱树屏等^[21]指出, N的浓度在0.26~1.3 mg/L以下, P的浓度在0.018~0.098 mg/L以下, 分别会限制藻类生长。本次测定的3种水质调控方式下各池塘总无机氮(DIN)变化在0.084 5~0.440 4 mg/L^[6]之间, 而活性磷酸盐在变化在0.003 4~0.017 9 mg/L之间, 说明本实验池塘中N、P含量均限制了藻类生长, 但N/P值(自然纳潮池塘N/P值为39.53, 微孔曝气池塘N/P值为31.77, 养水机池塘N/P值为24.6)均高于藻类生长所需要redfield的N/P值(7.2:1重量比)的要求, 可见本实

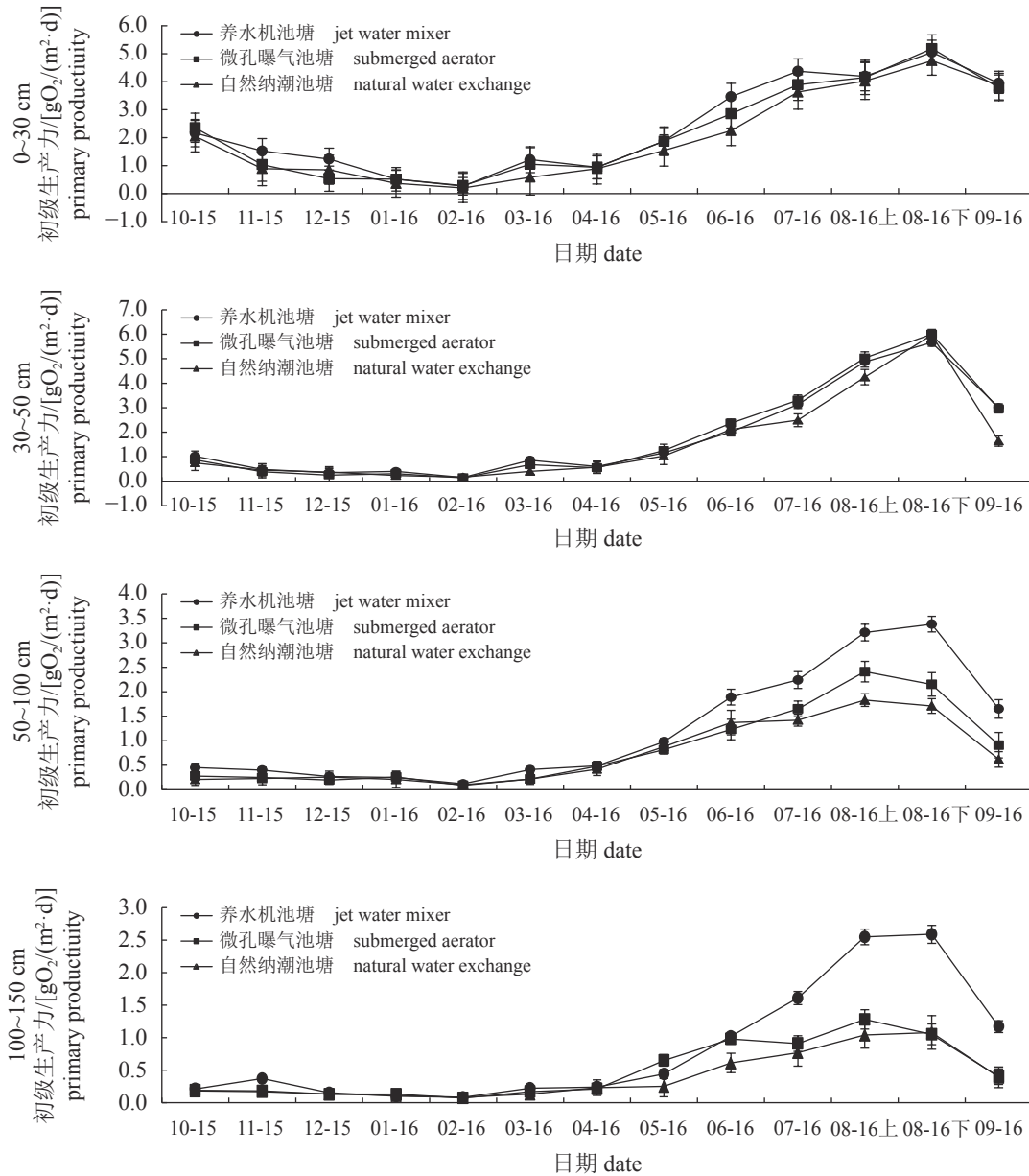


图 2 3种水质调控方式下各池塘各水层初级生产力年动态变化

Fig. 2 Annual dynamic change of primary productivity of different water layers of ponds by three water quality regulations

表 3 3种水质调控方式下池塘不同水层初级生产力的年均值

Tab. 3 Annual average of primary productivity of different water layers of ponds by three water quality regulations

池塘的初级生产力/[gO ₂ /(m ² ·d)] primary productivity of ponds	水深/cm water depth			
	0~30 cm	30~50 cm	50~100 cm	100~150 cm
养水机池塘 jet water mixer	2.36±0.64 ^{aA}	1.82±0.47 ^{bAB}	1.21±0.79 ^{bBC}	0.83±0.48 ^{bC}
微孔曝气池塘 submerged aerator	2.19±0.63 ^{aA}	1.85±0.47 ^{bA}	0.84±0.45 ^{ab}	0.49±0.48 ^{ab}
自然纳潮池塘 natural water exchange	1.99±0.56 ^{aA}	1.57±0.52 ^{aA}	0.73±0.48 ^{ab}	0.40±0.45 ^{ab}

注: 上标小写字母a、b表示不同池塘相同水层初级生产力的差异(同列比较); 上标大写字母A、B、C表示同一池塘不同水层初级生产力之间的差异。(同行比较)

Notes: The superscript lowercase letters a, b indicate the difference of primary productivity in the same water layer in different ponds (the same column). The superscript capital letters A, B, and C denote the difference in primary productivity between different layers of water in the same pond, the same row

表4 3种水质调控方式下初级生产力与水质指标的相关性

池塘 ponds		温度 temperature	盐度 salinity	溶解氧 DO	活性磷酸盐 PO ₄ -P	浮游植物量 biomass of phytoplankton
养水机池塘	jet water mixer	0.822**	-0.623*	-0.676*	0.592*	0.929**
微孔曝气池塘	submerged aerator	0.864**	-0.511	-0.764**	0.569*	0.924**
自然纳潮池塘	natural water exchange	0.822**	-0.738**	-0.021*	0.513	0.933**

注：“*”表示在0.05水平上显著相关，“**”表示在0.01水平上显著相关

Notes: * means significantly correlated at the level of 0.05, and ** means significantly correlated at the level of 0.01

刺参养殖池塘，P比N更加限制了浮游植物生长，但3种池塘中出现P限制水平不同，其中养水机池塘P限制最小，而自然池塘P限制最大，这可能与养水机运转，打破温盐跃层，底部溶解氧充足，导致池塘沉积物中某些细菌种群释放较多的活性磷含量有关，因而养水机池塘N/P值比较低，为养水机池塘初级生产力的提高提供了物质基础，其次由于温盐跃层的破坏，养水机为池塘50 cm以下水层提供了充足的无机营养成分，提高了藻类生长空间，也为养水机池塘生产力的提高奠定了基础。

3.2 养水机对池塘P/R值的影响

水体P/R值反映了初级生产力和呼吸量的大小，通常变化在0~4之间，自然水体一般为1，施有机肥的鱼池一般小于1，施用无机肥的鱼池一般为1~2，P/R值过大表明水体中分解过程弱和物质循环速率不高，P/R值过低则可能导致氧气状况恶化^[3]，养水机池塘、微孔曝气池塘、自然纳潮池塘P/R值的年均值分别3.31±0.08，3.12±0.02，2.83±0.15。本实验测定自然纳潮池塘P/R值与姜森颖等^[5]测定的刺参池塘的P/R值接近，这可能与测定的池塘位置相近有关(都在庄河)，而微孔曝气池塘和养水机池塘均显著高于自然纳潮池塘，养水机池塘最高，这可能与测定初级生产力的时间有关，养水机的运转加快了池塘沉积有机质的快速降解，因此测定初级生产力时，沉积物中有机质含量较低，细菌代谢活力低下，致使养水机池塘P/R值较大，说明养水机运转到再次换水时，易于细菌代谢的有机质已很少，为充分利用养水机继续降解难降解有机物，可在池塘中添加刺激细菌的活性物质，效果有待进一步研究。

3.3 养水机对池塘P/B值的影响

P/B值代表了浮游植物量周转率，其大小与

浮游植物种类组成密切相关，淡水浮游植物日P/B值变动于0.1~5.0之间^[22-23]，虾池P/B值为2.39、3.32^[3,24]，而刺参池塘的P/B值较小，仅为0.39±0.35^[5]，本实验与之相似，养水机池塘、微孔曝气池塘、自然纳潮池塘分别为0.29±0.03，0.32±0.04，0.28±0.03，说明刺参池塘的浮游植物的周转率很低，可能与浮游植物现存量过大导致自荫作用(shading effects)以及较低的可利用营养盐限制了光合作用有关，此时养水机池塘比自然纳潮池塘高，而比微孔曝气池塘低，可能与养水机池塘藻类生物量最高有关。

养水机能显著提高刺参池塘50 cm以下水层的初级生产力，缩小上层和下层初级生产力之间的差距，从而提高了池塘水体总初级生产力，为刺参提供较高的饵料资源，是刺参池塘物质循环较快的原因之一。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
Ministry of Agriculture Fisheries and Fisheries Administration. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019(in Chinese).
- [2] 于东祥, 燕敬平, 孙慧玲, 等. 刺参养殖水质的变化特点和调控[J]. 齐鲁渔业, 2008, 25(3): 1-7.
Yu D X, Yan J P, Sun H L, *et al.* Controlling of water quality during sea Cucum-Bercultivation[J]. Shandong Fisheries, 2008, 25(3): 1-7(in Chinese).
- [3] 阎喜武, 何志辉. 虾池浮游植物初级生产力的研究[J]. 水产学报, 1997, 21(3): 288-295.
Yan X W, He Z H. Studies on primary production of phytoplankton in shrimp ponds[J]. Journal of Fisheries of China, 1997, 21(3): 288-295(in Chinese).
- [4] 王骥, 梁彦龄. 用浮游植物的生产量估算武昌东湖鲢鳙生产潜力与鱼种放养量的探讨[J]. 水产学报, 1981, 中国水产学会主办 sponsored by China Society of Fisheries

- 5(4): 343-350.
- Wang J, Liang Y L. An estimation of the potential productivity and stocking rate of fingerlings of silver and bighead carps in Dong Hu by means of phytoplankton production[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1981, 5(4): 343-350(in Chinese).
- [5] 姜森颢, 周一兵, 唐伯平, 等. 刺参养殖池塘初级生产力及其粒级结构周年变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(7): 1698-1706.
- Jiang S H, Zhou Y B, Tang B P, *et al.* Annual variations of the primary productivity and its size-fractioned structure in culture ponds of *Apostichopus japonicus* Selenka[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1698-1706(in Chinese).
- [6] 郭超, 陈济丰, 魏亚南, 等. 仿刺参养殖池塘三氮一磷及硫化物周年变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2018, No. 714(04): 223-225+231.
- Guo C, Chen J F, Wei Y N, *et al.* Analysis of the annual variation characteristics of triazine, phosphorus and sulfide in imitation sea cucumber pond[J]. *Modern Agriculture Science and Technology*, 2018, No. 714(04): 223-225+231(in Chinese).
- [7] 陈济丰, 郭超, 魏亚南, 等. 海参养殖池塘异养菌与弧菌数量变化特征分析[J]. *现代农业科技*, 2018, No. 713(03): 240-241.
- Chen J F, Guo C, Wei Y N, *et al.* Variation characteristics of heterotrophic bacteria and *Vibrio* species in sea cucumber culture ponds[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2018, No. 713(03): 240-241(in Chinese).
- [8] 中华人民共和国水利部. SL354-2006水质初级生产力测定-“黑白瓶”测氧法[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. SL354-2006 Water quality-determination of Primary productivity-“Black and white bottle”dissolved oxygen method[S]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2007(in Chinese).
- [9] 熊倩, 黄立成, 叶少文, 等. 三峡水库浮游植物初级生产力的季节变化与空间分布[J]. *水生生物学报*, 2015, 39(5): 853-860.
- Xiong Q, Huang L C, Ye S W, *et al.* The seasonal variations and spatial distribution of the primary productivities of phytoplankton in the Three Gorges Reservoir[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2015, 39(5): 853-860(in Chinese).
- [10] 王悠, 窦勇, 唐学玺, 等. 山东近岸黄海海域初级生产力的时空分布变化研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2009, 39(4): 633-640.
- Wang Y, Dou Y, Tang XX, *et al.* The spatial and temporal distribution of primary production in the Yellow Sea nearshore area of Shandong Province[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2009, 39(4): 633-640(in Chinese).
- [11] 孙松, 张永山, 吴玉霖, 等. 胶州湾初级生产力周年变化[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 481-486.
- Sun S, Zhang Y S, Wu Y L, *et al.* Annual variation of primary productivity in Jiaozhou Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6): 481-486(in Chinese).
- [12] 蔡琳琳, 朱广伟, 李向阳. 太湖湖岸带浮游植物初级生产力特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2013, 33(22): 7250-7258.
- Cai LL, Zhu G W, Li X Y. Characteristic of phytoplankton primary productivity and influencing factors in littoral zone of Lake Taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(22): 7250-7258(in Chinese).
- [13] 潘友联, 郭玉洁, 曾呈奎. 胶州湾口内初级生产力的周年定点观测[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(3): 309-316.
- Pan Y L, Guo Y J, Zeng C K. Annual primary production in the inlet of Jiaozhou Bay, China[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1995, 26(3): 309-316(in Chinese).
- [14] Postma H, Rommets J W. Primary production in the WaddenSea[J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1970, 4(4): 470-493.
- [15] Ryther J H. Photosynthesis and fish production in the sea[J]. *Science*, 1969, 166(3901): 72-76.
- [16] 暨卫东, 黄尚高. 福建海岸带海水营养盐消长与温、盐、浮游植物的关系[J]. *热带海洋*, 1989, 8(2): 55-64.
- Ji W D, Huang S G. Relationship between nutrients, salinity and phytoplankton in Fujian coastal water[J]. *Tropic Oceanology*, 1989, 8(2): 55-64(in Chinese).
- [17] 卢迈新, 黄樟翰, 吴锐全, 等. 养鳗池塘的初级生产力和能量转换效率[J]. *水产学报*, 2000, 22(1): 37-40.
- Lu M X, Huang Z H, Wu R Q, *et al.* Primary productivity and energy conversion efficiency in eel pond[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2000, 22(1): 37-

- 40(in Chinese).
- [18] 张瑞. 蓝藻状态转换分子运动机制研究[D]. 北京: 中国科学院化学研究所, 2008.
Zhang R. Study of molecular motion mechanism of cyanobacterial state transition[D]. Beijing: Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, 2008(in Chinese).
- [19] 焦念志, 王荣, 李超伦. 东海春季初级生产力与新生产力的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1998, 29(2): 135-140.
Jiao N Z, Wang R, Li C L. Primary production and new production in spring in the East China Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1998, 29(2): 135-140(in Chinese).
- [20] 王玲. 富营养化条件下太湖梅梁湾藻类初级生产力的光、温影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
Wang L. Study on the effect of phytoplankton primary productivity from light intensity and water temperature in Meiliang Bay of Lake Taihu at the condition of eutrophication[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016(in Chinese).
- [21] 朱树屏, 刘卓, 向葆卿, 等. 土壤浸出液、维生素B12及钴对新月尼氏藻 *Nitzschia closterium* W. Smith 生长繁殖的影响[J]. *水产学报*, 1964, 1(1): 19-38.
Zhu S P, Liu Z, Xiang B Q, *et al.* Effects of soil extract, its microelements and different concentrations of Vitamin B₁₂ and cobalt on the growth of *Nitzschia closterium* W. Smith[J]. *Journal of Fisheries of China*, 1964, 1(1): 19-38(in Chinese).
- [22] 董双林, 赵文. 养殖水域生态学[M]. 中国农业出版社, 2004.
Dong S L, Zhao W. Aquatic ecology for aquaculture[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2004.
- [23] Walters C J, Park R A, Koonce J F. Dynamic models of lake ecosystems[M]//LeCren E D, McConnel R H. The Functioning of freshwater ecosystems. Cambridge: Cambridge University Press, 1980: 455-479.
- [24] 刘国才, 李德尚, 董双林. 对虾养殖围隔生态系统浮游细菌的呼吸与生产[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 2079-2080.
Liu G C, Li D S, Dong S L. Respiration and production of bacterioplankton in shrimp cultural enclosure ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11): 2079-2080(in Chinese).

Annual change of primary productivity in *Apostichopus japonicus* ponds by three water quality regulations

SUN Guangwei¹, ZHOU Wei¹, DANG Ziqiao², WEI Yanan¹, LIN Qing¹,
LEI Zhaolin¹, CHEN Jifeng¹, GUO Chao¹, ZHANG Dongsheng^{1,3*}

(1. College of Fisheries and Life Sciences, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2. National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries, Beijing 100000, China;

3. Key Laboratory of Mariculture and Stock Enhancement North China's Sea,
Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract: The traditional water quality regulations could not break up thermocline and inhibit macroalgae growth, which result in poor water quality and *Apostichopus japonicus* growing poorly and even death. Jet water mixing (JWM) can break up thermocline and inhibit the growth of macroalgae. To study the purification efficiency and mechanism of JWM, the primary productivity in the ponds with a jet water mixer (JWM), a submerged aerator (SA) or without any artificial mixing (control) were studied. The results showed that the annual average primary productivity and P/R values of the pond with JWM were the highest, followed by SA pond, and the lowest in the pond without any artificial mixing (control). The mean annual primary productivity in the ponds with JWM, SA and Control pond were 6.22 ± 0.54 , 5.37 ± 0.60 and 4.69 ± 0.53 $\text{gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively. The primary productivity in the ponds decreased with the depth of water. There was no significant difference in primary productivity between 30-50 cm water layer and 50-100 cm water layer in JWM pond, while there was significant difference between the SA pond and Control pond ($P < 0.05$). In addition, the primary productivity of the water layer of 50-150 cm in JWM pond was significantly higher than that of the SA and control pond ($p < 0.05$) from June to September. Conclusion: compared with SA facility, JWM can improve significantly the primary productivity of the lower water layer, which can significantly improve the total primary productivity of the pond and facilitate the rapid circulation of the pond substances.

Key words: *Apostichopus japonicus*; primary productivity; methods of water quality control; jet water mixing (JWM); submerged aerator (SA)

Corresponding author: ZHANG Dongsheng. E-mail: zhangds0415@126.com

Funding projects: Liaoning Science Program(2018104009); Liaoning Province "Xingliao Talents" Project(XLYC1808029); Dalian Second Group of Leading Talents Project