

滩涂池塘生态系统的光合能量利用及其影响因子

韩士群, 严少华*, 张建秋, 李国锋

江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 210014

摘要:研究了江苏沿海滩涂不同养殖模式下初级生产力特征、能量利用率及其影响因子。结果表明, 滩涂养殖水体浮游植物的初级生产力存在垂直分布、日变化和季节的动态变化, 这种变化与太阳辐射强度有直接的关系。滩涂养殖水体净初级生产量平均值为 $(7.58 \pm 2.52) \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 只占毛产量的 55.41%, 太阳能转化为鲢、鳙鱼产量的生态效率为 0.020% ~ 0.029%, 这些指标低于我国高产养殖塘, 鱼塘生态系统结构有待进一步优化。浮游植物生物量、透明度、N/P 值、 Mg^{2+} 浓度等因素显著影响水体初级生产力的变化, 多元逐步回归表明浮游植物叶绿素含量和到达水体表面的太阳辐射强度是初级生产力的最主要因子, 其回归方程为: $P_g = 0.0785\text{Cha} + 0.0577 I^{A0} + 1.346; n = 22, F_{\text{Cha}} > F_{I^{A0}} > F_{0.1}$, 而盐度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度影响不显著。

关键词:沿海滩涂; 鱼塘生态系统; 光合能量利用; 影响因子

文章编号: 1000-0933(2009)02-1038-10 中图分类号: Q142, Q178, Q945 文献标识码: A

Impact factors of photosynthesis energy utilization in the coastal fish ponds of Jiangsu Province

HAN Shi-Qun, YAN Shao-Hua*, ZHANG Jian-Qiu, LI Guo-Feng

Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, 210014, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 1038 ~ 1047.

Abstract: The characteristics of primary productivity, utilization of solar energy efficiency and their impact factors under the different culture models were studied in the coastal fish ponds of Jiangsu. The results showed that there existed dynamic changes of the primary productivity (such as vertical distribution, daily variation and seasonal changes) in the water of fish ponds, and thus changes were directly related to the solar radiation intensity. The average net primary productivity (P_n) was $(7.58 \pm 2.52) \text{ gO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, which was only about 55.41% of gross primary productivity (P_g). The ecological efficiency of transforming solar radiation energy to carp products was from 0.020% to 0.029%, the ecological indexes were lower in the coast fish ponds than the high-yield ponds, indicating that the ecosystem structure needs to be further optimized. The primary productivity of the water was significantly affected by the phytoplankton chlorophyll, solar radiation intensity, phytoplankton biomass, transparency, N/P ratio, Mg^{2+} concentration, but not significantly influenced by the contents of total salts and concentrations of Na^+ and Cl^- in the water.

Key Words: coastal fish ponds ecosystem; nutrients; phytoplankton biomass; primary productivity; elements of salts; solar radiation intensity

沿海滩涂通过围塘水产养殖, 将原来荒滩生态系统人工地改变为较大水面 ($100 \sim 300 \text{ hm}^2$) 或大水面 ($1000 \sim 2000 \text{ hm}^2$) 的养殖水体生态系统。在水产养殖生态系统中, 太阳能以初级生产力的形式蕴藏在生态系统中; 同时, 鱼塘生态系统的能量与水体藻类生物量、藻类群落、生态系统的结构和功能互相影响。关于湖泊、

基金项目: 江苏省海洋渔业资助项目; 太湖专项资助项目 (BS2007116); 江苏省重点领域资助项目

收稿日期: 2008-02-18; 修订日期: 2008-05-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shyan@jaas.ac.cn

鱼塘等水体初级生产力及能量转化有大量的报道^[1-3],但是关于滩涂鱼塘水体太阳能利用和转化的研究不多,系统地研究滩涂养鱼池塘初级生产力的垂直分布,周日、季节(月份)动态变化,太阳能转化效率以及和其它水体进行对比,对于指导滩涂鱼塘的生物调控、生态结构优化,实现滩涂资源的充分利用,整体平衡、功能协调、良性循环、资源再生等具有十分重要的意义。

1 试验材料与方法

1.1 供试材料

试验地点在江苏省大丰市江苏省农科院滩涂盐土改良试验场,表 1 是围塘养鱼之前盐土的主要化学性状,表 1 可见,表层土壤盐分达到 25.34 g/kg,已超过作物的耐受极限。

表 1 滩涂荒地土壤化学性状

Table 1 Properties of coastal barrens soil

土壤层次 Soil layer(cm)	盐分 Salt content(g/kg)	pH	离子组成 Ion composition(mol/kg)				
			CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Na ⁺
0~5	25.34	8.6	0.000	0.371	71.194	1.608	63.060
5~20	8.30	8.62	0.000	0.366	14.769	0.430	14.612
20~40	6.77	8.64	0.000	0.322	11.063	0.399	10.826
40~60	6.03	8.60	0.000	0.363	9.750	0.415	9.861
60~100	6.80	8.60	0.000	0.368	11.281	0.661	11.397

1.2 试验设计

选取不同放养结构、不同围垦时间的大水体鱼塘。试验设 6 个鱼塘,除 3#塘外,其他均在 166.67hm²以上,1#塘围塘后作为放养和投料的空白对照,2#、3#、5#、6#各塘施肥和投料相同,即每公顷施用尿素 30kg(折合纯 N 13.8kg)、过磷酸钙 45kg(折合 P 3.1 kg),投料 15510kg,4#塘每公顷施用尿素 45kg(折合 N 20.7kg)、过磷酸钙 68kg(折合 P 4.7 kg),投料 19552kg,具体情况见表 2。

表 2 滩涂鱼池水体基本性状和放养情况

Table 2 The basic characters of coastal fishpond water and piscicultural status

项目 Items	塘号 No.					
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
建塘年数 Pond built ages	1year	1year	1year	1year	3years	7years
面积 Area(hm ²)	166.67	166.67	3.33	1666.67	466.67	233.33
水深 Water depth(m)	1.3	1.4	1.7	1.3	1.3	1.5
主养鱼类 Main fish cultured	未放养 No stocking	鲢+鳊* S + B	鲢+鳊 S + M	鲢+鳊+鳊 S + B + M	鲢+鳊+鲫+鳊 S + B + C + M	鲢+鳊+鲫+鳊 S + B + C + M
放养重量 Stocking(kg/hm ²)		1230	1230	1250	1260	1340
总产量 Total yield(kg/hm ²)		4950	5380	5990	6015	5988
净增产 net yield increased(kg/hm ²)		3720	4150	4740	4755	4648
净增鲢鳊 S,B net yield increased(kg/hm ²)		2670	180	2940	3132	2856
pH	8.31	8.56	8.57	8.69	8.89	8.91
盐分 Salinity(g/L)	3.19 ± 0.13	3.18 ± 0.14	3.02 ± 0.13	3.06 ± 0.21	2.24 ± 0.11	1.52 ± 0.11
TN(mg/L)	0.31 ± 0.03	2.56 ± 0.53	2.98 ± 0.46	3.35 ± 0.53	4.23 ± 0.89	5.56 ± 0.78
TP(mg/L)	0.08 ± 0.03	0.25	0.21	0.55	0.45	0.57

* S,B,C 和 M 分别表示鲢,鳊,异育鲫鱼和鳊鱼 Letters in the table S, B, C and M means respectively Silver carp, Bighead, *Carassius auratus gibelio* and *Megalobrama amblycephala* Yih

1.3 测定方法

1.3.1 常规测定

盐度、电导率用 DDS-307 型电导率仪测定;透明度用 Secchi 盘测定;pH 用 pHS-25 型酸度计测定;光照强

度用照度计(GZD-01型)测定。藻类种群及计数,每个塘取样用5点采样法,上、中、下3层水样等量混合,再取混合水样1L用鲁哥氏液固定,用0.1ml计算框在显微镜下计数,用常规方法换算^[4]。总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法;钼酸铵分光光度法;氨氮,纳氏试剂比色法;硝态氮,酚二磺酸分光光度法;叶绿素a(chla),分光光度法^[5]。

1.3.2 黑白瓶法测定初级生产力

采用黑白瓶测氧法测定浮游植物光合作用生成的氧气量,依水深和透明度不同,各测点挂黑、白瓶6层,即表层、透明度四分之一层、透明度一半层、透明度层、透明度2倍层、底层。采各层水样分别装入黑白瓶及原初氧瓶,进行分时段7次挂瓶法测定初级生产力,即每天在6:00、8:00、10:00、12:00、14:00、16:00挂瓶,间隔2h测定,以及18:00至次日6:00测定;同时还采用24h间隔测定法,即10:00挂瓶,次日10:00测定。挂瓶用碘量法测定氧溶解量;并换算成水柱产量^[4],计算每次曝光2h占全天累积生产量的百分比。

叶绿素法测定初级生产力 Chl-a 含量用95%丙酮做萃取液的分光光度计法测定;计算方法^[6]:

$$P = 1/2 \cdot r \cdot \text{Chla} \cdot E \cdot DH \quad (1)$$

$$P = K \cdot r \cdot \text{Chla} \cdot DH \cdot SD \quad (2)$$

式中, P 为水柱日生产量 $[g C / (m^2 \cdot d)]$; r 为同化系数或相对光合作用速率,即单位叶绿素在光饱和情况下在单位时间内同化的碳量 $[mg C / (mg Chla \cdot h)]$,净同化碳量为同化系数,毛同化碳量为相对光合作用速率; E 为真光层厚度,即补偿深度(m), DH 为日出到日落的时间(h); SD 为Secchi盘透明度(m)。

K 为经验常数,一般晴天为2.0,阴天为1.5,经验常数 K 值由ByllboH公式($P = K \cdot P_{\max} \cdot SD$)^[4]推算,则 $K = P / (P_{\max} \cdot SD)$,其中 P 为水柱日产量 $[gO_2 / (m^2 \cdot d)]$; P_{\max} 为最高生产层生产量 $[gO_2 / (m^3 \cdot d)]$ 。

Chla为表层叶绿素a含量 (mg/m^3) 。 r 和 r' 的计算公式如下^[6]:

$$r = P_n / (\text{Chla} \cdot T_i) \quad (3)$$

$$r' = P_g / (\text{Chla} \cdot T_i) \quad (4)$$

式中, r 为同化系数, r' 为相对光合作用速率; P_n 和 P_g 分别为10:00~14:00挂瓶4h内净初级产量和毛初级产量 (mgC/m^3) ; Chla为表层叶绿素a含量 (mg/m^3) ; T_i 为挂瓶时间。产生的氧气换算为碳及能量的关系为: $1mg O_2 = 0.375mg C$; $1mg O_2 = 14.68J$ 。鲢、鳙鲜重的能值为5.02MJ/kg。太阳辐射采用当地气象站资料。

2 结果

2.1 滩涂水体初级生产力动态变化

2.1.1 初级生产力的垂直变化

总体来说,初级生产力的垂直分布是极不均匀的(图1),一般上层显著高于下层,光合作用最大值往往不出现在表层,而是出现在水下一定深度,即在浮游植物光合作用过程中出现了光抑制现象。不同鱼塘初级生产力垂直分布不同,1#、2#、3#、4#、5#塘最大初级生产力出现在透明度一半层;1#塘未放养鱼,未投料和施肥与其它放养及饲料塘口差异极大,1#塘透明度较大,虽然初级生产力总体水平较低,但是上下层初级生产力的差别不明显。净产量等于零的水层称为补偿层,其深度为补偿深度(即图1中两条曲线交点处水深),它主要受浮游植物光合强度和群落呼吸强度所影响。沿海滩涂鱼塘水体的平均补偿深度为62.55cm,而平均透明度值为28.22cm,补偿深度是透明度的2.22倍。6~8月份出现在2倍透明度左右,而4~5月份补偿深度高于2倍透明度,这主要是4~5月份水温较低,群落呼吸强度较弱的缘故。

导致初级生产力相对较低,随深度增加光强的减弱,下层初级生产力极低;6#塘透明度为18cm,水色浓,光线不易透过,最高生产力出现在表层,底层呼吸量(R)远大于其它塘,如果采用24h测定,底层氧气出现负值,出现了和鱼“争氧”现象,说明藻类光合作用不足以供应浮游生物呼吸及有机质分解,底层有机质和营养盐丰富。7月份和8月份5#塘和6#塘都暴发过水华,由于缺氧,导致清晨鱼类浮头。

2.1.2 初级生产力的日变化

在7月21~28日,选取1#、4#、6#塘为代表,将分时段方法测定的初级生产力累计量与24h连续测定量进

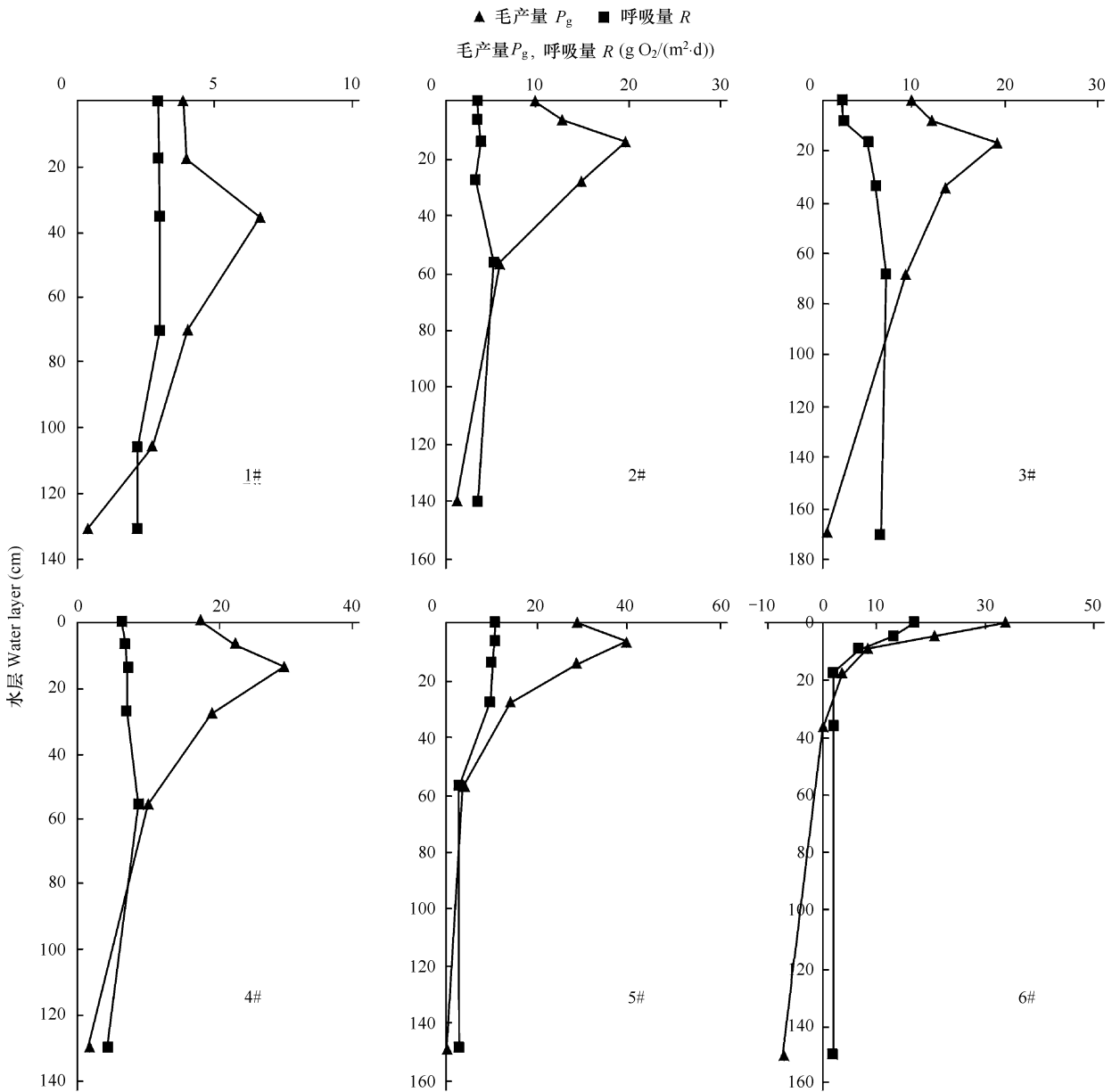


图1 鱼塘初级生产力垂直分布
 Fig.1 The vertical distribution of primary productivity in the fish ponds

行比较(表3)。3个鱼塘累计法测定值分别为3.98、12.84、8.99 $gO_2/(m^2 \cdot d)$,结果表明,每次曝光2 h的全天累积值显著高于连续曝光24 h测定值,24h连续测定值分别为,3.13、6.58、5.06 $gO_2/(m^2 \cdot d)$;1#塘累积值是其连续测定值的127.16%,4#是195.14%,6#是177.67%。因此在高度富营养化的养鱼塘采用长周期曝光法明显低估了浮游植物生产量。

中午之前,每个鱼塘浮游植物初级生产量处于上升趋势,峰值出现在中午前后,即在10:00~12:00为一天中最大初级生产量;从初级生产力平均值来看,上午大于下午的,下午衰减幅度大于上午增幅。由于浮游植物在夜间不能进行光合作用,1#、4#塘18:00到次日6:00夜间水柱生产力极低,而6#塘表现为负值,说光合作用产生的氧气不够浮游植物呼吸消耗。

2.1.3 初级生产力月份动态变化

4~10月份,每月测定2次的浮游植物水柱毛初级产量、生物量(B)和叶绿素a含量分别进行平均,得到

该月数据,作图为月份变化图(图2)。总体而言,水柱毛产量、浮游植物生物量以及叶绿素变化均呈4月、10月低,中间月份高的状态。不同池塘浮游植物的初级生产力变动较大,1#池塘水柱毛产量总体水平最低,变化幅度不大,与其同步变化的生物量和叶绿素含量均在7月份达高峰;4#、5#、6#塘水柱毛产量在6月份就达到高峰,

表3 鱼塘水柱毛产量日变化

Table 3 The daily dynamics of column gross primary production

塘号 No.	水柱毛产量 及百分比 P_{g2h} and $P_g\%$	挂瓶时刻 Time of hanging bottle							合计 Total
		6:00 ~8:00	8:00 ~10:00	10:00 ~12:00	12:00 14:00	14:00 ~16:00	16:00 ~18:00	18:00 ~6:00	
1	P_{g2h}	0.23	0.64	1.98	0.45	0.36	0.21	0.11	3.98
	$P_{g2h}\%$	5.78	16.08	49.75	11.31	9.05	5.28	2.76	100
	$P_{g2h}/P_{24h} \cdot 100$	7.35	20.45	63.26	14.38	11.50	6.71	3.51	127.16
4	P_{g2h}	0.64	2.21	5.35	2.71	1.34	0.28	0.31	12.84
	$P_{g2h}\%$	4.98	17.21	41.67	21.11	10.44	2.18	2.41	100
	$P_{g2h}/P_{24h} \cdot 100$	9.73	33.59	81.31	41.19	20.36	4.26	4.71	195.14
6	P_{g2h}	0.09	2.74	6.63	1.29	0.86	0.48	-3.1	8.99
	$P_{g2h}\%$	1.00	30.48	73.75	14.35	9.57	5.34	-34.48	100
	$P_{g2h}/P_{24h} \cdot 100$	1.78	54.15	131.03	25.49	17.00	9.49	-61.26	177.67

P_{g2h} 为 2h 水柱毛产量 ($gO_2/m^2 \cdot d$), $P_{g2h}\%$ 为 2h 内水柱毛产量占累计量的百分比; $P_{g2h}/P_{24h} \cdot 100$ 为 2h 内水柱毛产量占 24h 测定值的百分比
 p_{g2h} is 2hours column gross primary production ($gO_2/m^2 \cdot d$) and $p_{g2h}\%$ is its percentum in total. $p_{g2h}/p_{24h} \cdot 100$ is the percentum of 2hours column gross primary production to 24hours

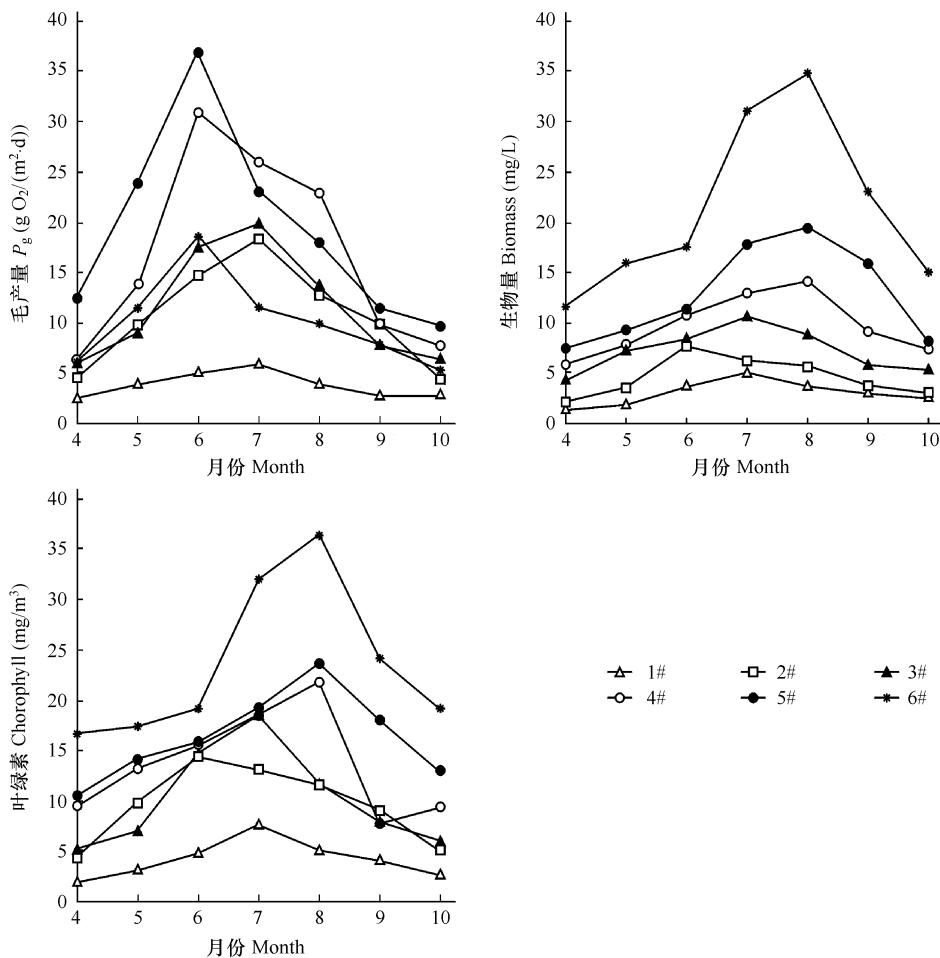


图2 浮游植物水柱毛产量、生物量及叶绿素的月动态变化

Fig.2 The monthly dynamics of column gross primary production, biomass and chlorophyll

而浮游植物生物量和叶绿素 a 含量都是在的 7 或 8 月达到最高峰。初级生产力的月份变动虽然与叶绿素 a 和生物量的季节变动有相同趋势,但其峰值并不同步。

2.2 滩涂鱼塘水柱日毛产量、净产量

各塘毛产量(P_g)、净产量(P_n)、呼吸量(R)、生物量(B)、毛产量和呼吸量比值(P_g/R)、毛产量和生物量比值(P_g/B)等参数的平均值列于表 4。

表 4 各塘浮游植物参数

Table 4 Parameter of phytoplankton of each pond

塘号 No.	毛产量 P_g ($gO_2/m^2 \cdot d$)	净产量 P_n ($gO_2/m^2 \cdot d$)	呼吸量 R ($gO_2/m^2 \cdot d$)	P/R	生物量 B (mg/L)	P/B	透明度 SD (m)	K	太阳能利用率 solar ratio (%)	r	r'
1	3.62 ± 1.11	0.89 ± 1.13	2.73 ± 0.36	1.33 ± 0.36	15.21 ± 3.15	0.24 ± 0.03	0.70 ± 0.03	1.67 ± 0.5	0.55 ± 0.03	5.76 ± 0.56	7.77 ± 0.36
	10.67 ± 1.54	6.87 ± 1.22	3.8 ± 0.57	2.81 ± 0.53	22.89 ± 4.23	0.46 ± 0.05	0.28 ± 0.03	1.99 ± 0.5	2.17 ± 0.57	3.45 ± 0.33	11.87 ± 1.23
3	11.56 ± 1.68	6.88 ± 1.13	4.68 ± 0.73	2.47 ± 0.62	35.97 ± 5.15	0.32 ± 0.06	0.34 ± 0.03	1.98 ± 0.4	1.58 ± 0.36	4.67 ± 0.76	19.56 ± 1.37
	16.85 ± 2.90	10.18 ± 1.06	6.67 ± 0.89	2.53 ± 0.83	48.70 ± 7.15	0.36 ± 0.06	0.28 ± 0.02	2.25 ± 0.5	2.68 ± 0.13	2.45 ± 0.96	23.85 ± 2.11
5	19.34 ± 3.11	11.27 ± 1.45	8.07 ± 1.95	2.40 ± 0.90	63.70 ± 8.32	0.30 ± 0.05	0.25 ± 0.02	2.12 ± 0.6	2.87 ± 0.34	2.45 ± 0.23	11.56 ± 1.00
	9.97 ± 2.36	2.70 ± 1.32	7.27 ± 3.99	1.37 ± 0.57	106.31 ± 11.35	0.09 ± 0.02	0.18 ± 0.02	1.98 ± 0.5	1.46 ± 0.44	1.78 ± 0.31	9.87 ± 0.96

表 4 显示浮游植物水柱日毛产量以 5 号塘 $19.34 gO_2/(m^2 \cdot d)$ 最大,其次 4 号塘 $16.85 gO_2/(m^2 \cdot d)$,总体来看,养鱼塘初级生产力高于对照(1#塘),这是由于 1#塘没有施肥和投料,水体浮游生物的生物量最小,因此初级生产力也最小;2#、3#、4#、5#、6#养鱼塘的水柱毛初级生产量平均的平均值为 $(13.68 \pm 3.53) gO_2/(m^2 \cdot d)$,可以粗略代表本区滩涂鱼塘水体生产力水平。

滩涂养鱼池塘浮游植物的日净生产量变化范围在 $2.70 \sim 11.27 gO_2/(m^2 \cdot d)$,平均值为 $(7.58 \pm 2.52) gO_2/(m^2 \cdot d)$ 。滩涂水体没有放养鱼的 1#塘净初级生产力仅仅是毛产量的 24.58%,2#、3#、4#、5#、6#养鱼塘的浮游植物净产量分别为 64.39%、59.52%、60.42%、58.27%、29.13%。显然,当水体藻类生物量太低(1#塘)其净初级生产力较小,而水体藻类生物量太高,其毛初级生产力中很大一部分用于浮游植物本身的呼吸,导致其净初级产量减小。Christophe^[7]认为浮游植物净产量约为毛产量的 80%,何志辉等^[8]认为是 70%~90%。滩涂鱼塘测定结果表明,净初级产量的平均值只占毛产量的 55.41%,与一般水体情况相差达 25%,可能与过量投饵导致水体富营养化下层藻类耗氧有关。

如果按 1mg 氧气相当于 6.1mg 浮游植物鲜重^[6]将其换算成浮游植物的鲜重,则 5 个养鱼塘分别为 911.43、1199.52、1337.78、1534.09、913.89 $kg/(m^2 \cdot d)$,平均 1337.78 $kg/(m^2 \cdot d)$ 。

2.3 光合有效辐射量

水表面对太阳辐射的反射率随太阳的高度和水面波浪大小而变化,依国际生物学规划 (IBP) 测试结果,把水面反射率按平均为 10% 计算。进入水表下的有效辐射能占全部辐射能的 39%~49%。由于水和水中颗粒物质的吸收,其辐射强度随水的深度的增加而迅速下降,其关系式为^[8]:

$$I_z^{\lambda} = I_0^{\lambda} \times e^{-\varepsilon Z} \quad (5)$$

式中, I_0^{λ} 为水表面的太阳辐射强度; I_z^{λ} 为水体一定深度的太阳辐射强度; e 为自然对数的底; Z 为水层中距离表面的深度; ε 为水体中垂直消光系数,可由(2~5)式及实测 I_0^{λ} 、 I_z^{λ} 的量计算得出,也可依透明度换算得出。用 Secchi 盘测量透明度(SD)时的可见深度处的光辐射量约为 I_0^{λ} 的 15% 左右,以此值代入为:

$$\varepsilon = \frac{\ln I_0^{\lambda} - \ln 0.15 I_0^{\lambda}}{SD} \quad (6)$$

根据测定滩涂鱼塘平均透明度约为 0.26m,代入(2~6)式则 ε 为 7.31,由此得出:

$$I_z^{\lambda} = I_0^{\lambda} \times e^{-7.31 Z} \quad (7)$$

同一天内,温度、营养盐、浮游植物现存量、滤食性动物差异较小,初级生产力的日变化受光照的影响最大。就整个水柱而言,初级生产力随光照增强而增大,在 10:00~14:00 光照最强,此阶段初级生产力占一天累积总量的份额也最大,1#塘占全天的 70.11%,4#塘为 73.22%,而 6#塘高达 97.67%(表 3)。

3 讨论

3.1 滩涂水体与其它水体的初级生产力比较

3.1.1 产碳量、P/R 值

采用 1mgO_2 相当于 $0.375\text{mgC}^{[4]}$,根据滩涂鱼塘浮游植物平均净产量,换算后平均日产碳量为 $2842.5\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。虽然关于浮游植物初级生产力的研究国内外已有大量报道,但把不同水体的资料比较仍有困难,因为不同研究者往往采用不同方法,获得结果难以精确对比。为了粗略比较不同地区,不同水体的产碳量,将已有的资料报道材料列于表 5。

表 5 滩涂鱼池日碳生产量、P/B 值与其它水体比较

Table 5 Comparison of daily carbon production and P/B value in costal fish pond with the other water body

水体 Waters	P(mgC/(m ² ·d))	P/R	P/B	参考文献 References
高产力湖泊 High yield lakes	3719	0.93	0.40	[8]
高产力鱼塘 High yield fishponds	3719	1.24	0.36	[8]
主养鲢鳙罗非鱼塘 Main cultured silver carp, bighead and tilapia ponds	1987.5	1.39	0.49	[11]
主养青鱼高产塘 Main cultured herring ponds	990	1.37	0.21	[11]
盐碱地鱼塘 Saline-alkaline fishponds	2013.8	2.36	0.24	[10]
南汇渔场成鱼塘 Mature fishing grounds of Nanhui	4440	3.41	0.45	[10]
滩涂鱼塘 Coast fishponds	2842.5	2.32	0.31	本文 This paper

从表 5 可见,我国淡水鱼池日产碳量在 $990 \sim 4440\text{mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 之间。滩涂鱼池浮游植物的日产碳量虽然比上海南汇渔场的成鱼塘、高产力鱼池及高产力湖泊水平低,但是比主养鲢、鳙、罗非鱼池塘以及主养青鱼的池塘高,这与赵文^[9]报道的高青盐碱地鱼塘较为接近。

滩涂水体中,1#塘 P/R 为 1.33,其它 5 个养鱼塘的变化范围在 1.37~2.81;养鱼塘的 P/R 值平均为 2.32 ± 0.38 ,与高青盐碱池塘最为接近,而远高于高产力鱼池及高产力湖泊(表 5);主施化肥的南汇渔场成鱼塘高达 3.41。水体 P/R 值反映了初级净产量和外来有机质量的大小,天然水体 P/R 值通常接近 1。我国精养鱼塘由于投入大量有机肥料和人工饵料,水体生物学过程中,外来有机质起很大的作用,细菌生产量较高 P/R 通常小于 1^[9];国外施无机肥料的鱼池 P/R 值一般在 1~2 之间,最高可达 4^[10]。P/R 过大表明水体中分解过程弱和物质循环速率不高,初级生产力没有被充分利用;P/R 过小说明外来有机质作用很大,浮游植物生产力低。滩涂塘 P/R 在 2.0 左右时,滩涂鱼塘的饵料系数较低,而鱼塘总产量最大,水体溶氧状况良好,因此生产上以 P/R 在 2.0 较为适中并长期作为滩涂鱼塘生产衡量指标。

从 P/B 系数来看,滩涂鱼池接近我国高产力鱼塘,比主养鲢鳙罗非鱼塘、上海南汇渔场成鱼塘的值小。

3.1.2 太阳能利用率

在晴朗天气条件下,滩涂鱼塘水面的光强可达 20000~35000 lx,由于光强过大,出现光抑制现象。透入池塘水体的光能受到强烈的吸收和散射,光强随水深的增加而迅速减弱,当水深按算术级数增加时,光强度呈指数递减。图 1 初级生产力垂直分布情况也可以表示晴朗天气条件下光照强度的垂直分布情况。可以看出,光辐射基本上分布在池塘水体 0.5m 以上,而在 0.5m 以下基本上被吸收掉。

1m²水面中浮游植物的毛产量与同一时间内所接受的太阳有效辐射(按太阳辐射强度的50%计算)的百分比,即浮游植物对太阳有效辐射的利用率。滩涂1#塘浮游植物对太阳有效辐射的利用率为0.55%最低,其它5个鱼塘水体在1.46%~2.87%范围,平均值2.15%±0.51%。

浮游植物的同化系数 r 值以对照塘5.76最高,6#塘1.78最低,养鱼塘的变化范围在1.78~4.46之间,平均为2.96±0.88。相对光合作用速率 r' 值以1#塘最低,4#塘最高,养鱼塘的平均为15.342±5.1。鱼塘的 r' 顺序为与该塘水体的叶绿素a含量顺序正好相反,从而说明养鱼塘浮游植物叶绿素a含量增大并不能使水体净初级生产力随之增加。

根据盐城市气象资料,沿海滩涂地区4~10月份,到达水面太阳辐射能量为301369.86MJ/(m²·d),现将滩涂鱼塘生长季节浮游植物毛初级生产力,鱼类净增产量及滤食性鲢、鳙净增产量,换算成能量值,根据相关关系,计算出各项转换效率(表6)。水体毛初级生产力对太阳能利用率为0.18%~0.94%,没有养鱼的1#塘太阳能的利用率明显低于养鱼塘;其它5个鱼塘为0.49%~0.94%,低于主养鲢、鳙、罗非鱼和鲫鱼的淡水高产池塘(0.86%~1.64%)。鱼类净增总产量占毛初级生产力的百分比4.67%~8.66%,平均6.46%±1.17%。除了1#、3#塘没有放养鲢、鳙,其它各塘鲢、鳙的净产量对浮游植物毛初级生产力的利用率为3.08%~4.75%,与赵文^[11]报道的盐碱地鱼塘相近,比何志辉^[9]报道的我国湖泊和水库值高的多,但比姚宏禄^[8]等的报道值(8.46%~15.5%)低;与我国淡水高产池中鲢鳙产量通常达毛初级产量的5%~15%相比,滩涂鱼塘初级生产力转化为鲢鱼和鳙鱼产量的水平较低,这可能和滩涂鱼塘投料和施肥等有直接关系。太阳能转化为鲢、鳙鱼产量的生态效率为0.020%~0.029%,谷孝鸿^[12]报道的低洼盐碱地鱼塘相近。

表6 滩涂鱼塘浮游植物毛初级生产力的能量转化效率

Table 6 Ecological efficiency of primary productivity in the coastal ponds

塘号 No.	毛初级 生产力 P_g (gO ₂ / hm ² d)	合成能量 Synthesize energy (MJ/ hm ² d)	生产期 合成能量 Yield period Synthesize energy (MJ/hm ²)	鱼净增能量 Net energy of fish (kg/hm ²)	鲢鳙净 增能量 Net energy of S, B (MJ)	初级生产力 占总辐射 能比率 P_g /solar ratio (%)	鱼产量占初级 生产力比率 Net fish yild/ P_g (%)	鲢鳙产量 占初级生产 力比率 Net S, B/ P_g (%)	太阳能转 为鲢鳙生态 学效率 Fish yield / solar radiation (%)
1#	3.62	531.42	95654.88			0.18			
2#	10.67	1566.36	281944.08	18674.40	13403.40	0.52	6.62	4.75	0.025
3#	11.56	1697.01	305461.44	20833.00	903.60	0.56	6.82	0.30	0.002
4#	16.85	2473.58	445244.40	23794.80	14758.80	0.82	5.34	3.31	0.027
5#	19.34	2839.11	511040.16	23870.10	15722.64	0.94	4.67	3.08	0.029
6#	9.97	1463.60	263447.28	23333.00	10823.12	0.49	8.86	4.11	0.020

3.2 滩涂水体初级生产力的影响因子

为了探讨水体初级生产力的影响因子,本文根据实验数据,应用线性回归,将浮游植物的生物量、叶绿素含量,水体透明度、光照强度, TN、NH⁴⁺、TP、Mg²⁺、Na⁺、Cl⁻等分别与浮游植物的初级生产力进行了回归。

3.2.1 浮游植物生物量和叶绿素含量

虽然很多学者研究湖泊、鱼塘研究水体初级生产力和生物量、叶绿素的关系,但由于不同水体,不同季节浮游植物的群落结构、功能以及各种物理、化学和地理学等环境因素的差异等原因,浮游植物光合作用放出氧气的的能力存在较大的差异。滩涂鱼塘水体浮游植物生物量(B)和初级生产力(P_g)回归方程为: $P_g = 8.747 + 0.0676B$; $r = 0.312^*$, $n = 42$,二者之间达到显著的相关性($P < 0.05$)。叶绿素和初级生产力的回归方程为: $P_g = 5.865 + 0.160Chla$; $r = 0.461^{**}$, $n = 42$,二者之间达到极显著的相关性($P < 0.01$)。两者与初级生产力之间均呈显著的正相关,但叶绿素a含量与初级生产力的相关性更强,因此采用叶绿素来估算水体初级生产力具有较高的可信度,而由水柱层平均叶绿素浓度来估算水体初级生产力比用表层叶绿素浓度估算初级生产力更为精确。

浮游植物生物量是初级生产力的物质基础,一般情况下现生物量大生产力也高,但生物量超过一定范围,由于自荫作用反而使生产量降低。试验期间,6#鱼塘浮游植物生物量最高,在7~8月份出现大量水华,其初级生产力小于其它鱼塘。

3.2.2 透明度、光合有效辐射量

由于水层吸收的进入水体光合有效辐射量逐渐减少,即光合有效辐射量($X, J/m^2 \cdot s$)出现了垂直梯度分布,直接导致了浮游植物毛初级生产力($P_g, mgO_2/(L \cdot h)$)的垂直梯度分布,两者之间达到极显著相关性,其回归方程为:

$$P_g = 0.089 + 6.793 \log X; n = 44, r = 0.776^{**}, P < 0.01$$

毛初级生产力和透明度呈极显著的负相关性,其回归方程为:

$$P_g = 18.947 - 20.404SD; n = 44, r = -0.689^{**}, P < 0.01$$

本试验结果,阴天的初级生产力平均为晴天的70%,而6#塘更低,仅为44%,这也水体浮游植物生物量太大的池塘阴天更容易引起鱼类浮头的原因。

3.2.3 水体矿物质离子浓度

浮游植物初级生产力与水体中 Mg^{2+} 浓度呈极显著正的线性相关,其相关方程为:

$$P_g = 0.6112 Mg^{2+} - 1.684; n = 12, r = 0.898^{**}$$

说明水体中 Mg^{2+} 的浓度对浮游植物初级生产力有影响, Mg 是浮游植物生命过程的必需元素,它不仅是体液及细胞结构的组分,还参与体内新陈代谢的调节, Mg 是叶绿素的组分,关系到细胞内碳水化合物的积累即有机碳的合成,因此在一定条件下水体初级生产力随着 Mg^{2+} 离子浓度的增加而增加。

TN、 NH_4^+ 、TP 等与浮游植物初级生产力的回归结果表明,只有1#塘 TP 和初级生产力达到显著水平,相关方程为: $P_g = 16.237 TP + 5.684; n = 12, r = 0.656^*$ 。其它各塘相关性均不显著。

海洋中初级生产力第一限制因子通常是氮,磷是第二限制因子,而淡水湖泊、鱼塘中磷通常是第一限制因子。Hammer^[13]根据大量研究结果,总结了世界范围的内陆盐水水体(盐度 $> 3.0g/L$)的生态特征表明,内陆盐水通常是氮限制。Caraco^[14]等研究了盐度在 $0 \sim 31g/L$ 之间的沿海池塘浮游植物生长的营养限制,指出盐度较低时($0 \sim 6.5g/L$)为磷限制,仅在高盐组($31g/L$)表现氮限制。本文研究养鱼塘的结果似乎和上述结论矛盾,可能是鱼塘水体氮、磷整体水平较高引起的。但是, N/P 值与初级生产力回归结果表明相关性达到极显著水平,其回归方程为: $P_g = 2.563N/P + 0.375; n = 12, r = 0.848^{**}$ 。说明滩涂养殖水体初级生产力水平决定于 N/P 值,那么如何采用调解水体 N/P 值增加初级生产力,对于养殖生产上施肥以及制定颗粒饲料配方具有重要意义。

同样,水体盐度、 Na^+ 、 Cl^- 浓度与初级生产力的回归结果表明这3个因素与初级生产力没有显著的相关性。

为了揭示滩涂养殖水体初级生产力的主要影响因子,将各种环境因子与初级生产力进行多元逐步回归。由于在逐步回归中单个因子的作用变小,为了保留较多因子,采用较低的显著性水平(0.1),结果如下: $P_g = 0.0785Chla + 0.0577 I^{A0} + 1.346; n = 22, F_{Chla} > F_{I^{A0}} > F_{0.1}$ 。结果表明,浮游植物叶绿素含量和到达水体表面的太阳辐射强度是影响滩涂鱼塘初级生产力水平的两个最主要因子。

References:

- [1] Corine Glé, Yolanda Del Amo, Benoît Sautour, *et al.* Variability of nutrients and phytoplankton primary production in a shallow macrotidal coastal ecosystem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76 (3), 2008: 642 - 656.
- [2] Fatimah M Yusoff, McNabb C D. Effects of nutrient availability on primary productivity and fish production in fertilized tropical ponds. *Aquaculture*, 78(3-4), 1989: 303 - 319.
- [3] Dang K Nhan, Ana Milstein, Marc C J Verdegem, *et al.* Food inputs, water quality and nutrient accumulation in integrated pond systems: A multivariate approach. *Aquaculture*, 261(1), 2006: 160 - 173.

- [4] Zhang J M, He Z H. Inland water area fishery nature resources research enchiridion. Beijing: Agricultural Press,1991. 24—71.
- [5] Liu H L, Jin X C. Research criterion for Eutrophic lakes(NO. II). Beijing: Chinese Environmental Science Press,1990. 142—215.
- [6] Wang J, Wang J. Some questions for conversion with phytoplankton chlorophyll, biomass and production. Botany Research,1984,2(2):249—258.
- [7] Christopher F Knud-Hansen, Ted R Batterson, Clarence D, *et al.* Nitrogen input, primary productivity and fish yield in fertilized freshwater ponds in Indonesia. Aquaculture, 94(1), 1991: 49—63.
- [8] Honglu Yao. Phytoplankton production in integrated fish culture high-output ponds and its status in energy flow. Ecological Engineering, 1993, 2(3): 217—229.
- [9] He Z H. Primary productivity and energy transform ratio in Chinese lakes and reservoirs. Fisheries Science, 1987,2(1):4—30.
- [10] David J W Moriarty. The role of microorganisms in aquaculture ponds. Aquaculture, 151(1-4), 1997: 333—349.
- [11] Zhao W, Dong S L, Li S D, *et al.* The primary productivity of phytoplankton in saline alkaline-ponds. Acta Hydrobiologica Sinica, 2003, 27(1): 47—54.
- [12] Gu X H, Hu W Y. Ecology study of energy in fish pond of different culturing structure. Journal of Fisheries of China, 1999,23(1):33—39.
- [13] Hammer U T. Saline lake ecosystem of the World. Junk, Dordrecht 1986: 1—261.
- [14] Caraco N. Nutrient limitation of phytoplankton growth in brackish coastal ponds. Can. J. Fish. Aquat. Sci.,1988,44(2): 473—476.

参考文献:

- [4] 张觉民,何志辉. 内陆水域渔业自然资源调查手册. 北京:农业出版社,1991.
- [5] 刘鸿亮,金相灿主编. 湖泊富营养化调查规范(第二版). 北京:中国环境科学出版社,1990. 142—215.
- [9] 何志辉. 中国湖泊水库的初级生产力及其能量转化效率. 水产科学,1987,2(1):4—30.
- [11] 赵文,董双林,李德尚,等. 盐碱池塘浮游植物初级生产力的研究,水生生物学报,2003,27(1):47—54.
- [12] 谷孝鸿,胡文英. 不同养殖结构鱼塘能量生态学研究. 水产学报,1999,23(1):33—39.