

主养鲢鳙非鲫高产鱼塘的初级生产力 与能量转化效率的研究

姚宏禄

(江苏省水产局
江苏省水产技术推广站, 南京 210003)

S 964.3

摘要 分析测定了主养鲢鳙非鲫高产池塘浮游植物初级生产力的垂直、周日、周年变化及其与主要生态因素、鱼产量水平的关系。探讨了初级生产力在能量转化中的生态学效率,毛初级生产力对太阳辐射能的利用率为 0.84%—1.64%,鲢鳙非鲫净产量对浮游植物净产量的直接利用率为 8.46%—15.56%;太阳能转化为成产量的生态学效率为 0.058%—0.156%。

关键词: 初级生产力, 主养鲢鳙非鲫, 高产鱼塘, 生态因素, 生态学效率。

池塘养鱼;
鱼产量; 鱼产量

系统地研究综合养鱼池塘的初级生产力^[1-11],掌握其垂直、周日、周年变化规律,对于指导综合养鱼池塘的结构、环境、生物调控,实现半人工高产养鱼池塘生态系统的整体平衡、功能协调、良性循环、资源再生,是十分重要的。

笔者先后对主养青鱼和主养鲢鳙非鲫高产池塘的初级生产力进行了研究^[3-5,11]。本文报道 1979—1981 年对南京市刘家圩养鱼场主养鲢鳙非鲫高产池塘的浮游植物初级生产力与能量转化效率的研究。为综合养鱼生态工程提供有关技术参数和理论依据。

1 工作方法

各试验池的基本情况见表 1。浮游植物初级生产力的测定采用黑白瓶氧量法^[4,5]。每昼夜分层分段挂瓶测定,分析其垂直、日周期变化。每月选晴天、多云天、阴雨天进行对比观测,分析其年周期变化。同时观测记录了水温、水色、透明度、pH、P₂O₅、NH₄-N、NO₂-N、NO₃-N、SiO₂、天气等环境因素及浮游植物生物量。太阳辐射采用当地气象站资料。初级生产量用氧单位表示,如 mgO₂/l、gO₂/m² 等。以毛产氧的 80% 作为净产氧量^[12]。计算分析中采用下列计量: 1mgO₂ = 6.1mg 浮游植物(鲜重), 1mgO₂ = 14.68 J^[13]; 1g 鲜肉相当于 1.2kJ^[14], 依此换算出每 kg 鲢鳙非鲫鲜鱼折能为 5.0184MJ。

2 结果与讨论

2.1 初级生产力的垂直变化

综合养鱼高产池塘浮游植物初级生产力的垂直变化,主要受光合作用有效辐射量(Photosynthesis active radiation, PAR)即波长在 400—760nm 之间的可见光的影响。如在夏季晴天到达水平面的总太阳光的强度为 5.0—5.4 J/cm²·min,即 100 000 lx 左右。水表面对太阳辐

• 江苏省水产局和江苏省科委资助的重点科研项目。

本文于 1991 年 12 月 5 日收到,修改稿于 1992 年 4 月 20 日收到。

射的反射率随太阳的高度和水面波浪大小而变化,可依国际生物学规划(IBM)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%。由于水和水中微粒物质的吸收,其辐射强度随水的深度的增加而迅速下降,其关系式为:

$$I_z^1 = I_0^1 \cdot e^{-\epsilon Z} \quad (1)$$

式中 I_0^1 为水表处的太阳辐射强度; I_z^1 为水体某深度的太阳辐射强度; e 为自然对数的底; Z 为水体中离水面的深度; ϵ 为水体中垂直消光系数,可由(1)式及实测 I_0^1 、 I_z^1 的量计算得出,也可依透明度换算得出。用 Secchi 盘测量透明度(Z_s)时的可见深度处的光辐射量约为 I_0^1 的 15% 左右^[16],以此值代入为:

$$\epsilon = \frac{\ln I_0^1 - \ln 0.15 I_0^1}{Z_s} \quad (2)$$

设 I_0^1 为 100,综合养鱼高产池塘透明度常为 0.3m,代入(2)式则 ϵ 为 $1.9/0.3=6.32$,由此得出:

$$I_z^1 = I_0^1 \cdot e^{-6.32Z} \quad (3)$$

表 1 鱼池基本情况(南京刘家圩)

Table 1 General condition of fish ponds(Liujiawei fish farm, Nanjing)

池名 Pond number	年份 Year	面积 Area (hm ²)	水深 Water depth (m)	鱼净产量 Net fish yield (kg/hm ²)	其中鲢鳙非鲫产量占鱼净产比例 Percentage of silver carp, bighead and Tilapia in the net fish yield		初级生产力 The gross oxygen production (kg/hm ²)	Primary productivity 合浮游植物毛产量 The fresh weight of phytoplankton (t/hm ²)
					产量 Yield (kg/hm ²)	(%)		
Pond 7	1981	0.53	1.6	6398.10	5044.25	78.84	25673.0	155.6
pond 8	1980	0.60	2.7	9683.55	8587.37	88.68	32716.0	199.6
pond 1	1979	0.80	2.6	13536.00	10942.51	80.84	33034.0	201.5
pond 1	1980	0.80	2.6	14526.60	11709.90	80.61	41971.0	256.0
pond 1	1981	0.80	2.6	15798.60	13545.30	85.75	37339.0	227.8
pond 2	1979	0.33	2.7	14483.55	11514.42	79.50	37543.0	229.0

根据 1980 年 8 月 27 日对刘家圩 1 号池实测的浮游植物初级生产力垂直分布、 I_z^1 值及依(3)式换算的光合作用有效辐射量的垂直分布描绘成图 1。由图 1 可见:水表面下 8cm 水层吸收了进入水体的光合有效辐射量的 40%,30cm 水层吸收 85%,40cm 水层吸收 92%,1m 深处的光合有效辐射量只有 0.18%。1.5m 处近于零。图 1 还表明:光合有效辐射量(X , J/m²·s)的垂直梯度分布,直接限定了浮游植物初级生产力(Y , mg O₂/l·2h)的垂直梯度分布。两者之间的关系:

$$Y = 0.1910 + 6.6226 \cdot \log(X)$$

$$n = 7, \quad RR = 0.9890, \quad t \text{ 检验有差异, } p < 0.21$$

依此,可以称水表到 10cm 水层为光抑制层(Inhibition);10—35cm 深水层为光饱和层(Saturation),即浮游藻类适宜的有效辐射强度(5000—15000 lx)处;35—45cm 深水层为过渡层(Transition);45—150cm 深水层为光限制层(Limitation),其光合作用效率依 PAR 的下降而呈指数下降:

$$P_z = P_{lim} \cdot e^{-\epsilon(Z - Z_l)} \quad (4)$$

Z_l 为光限制层起始深度。

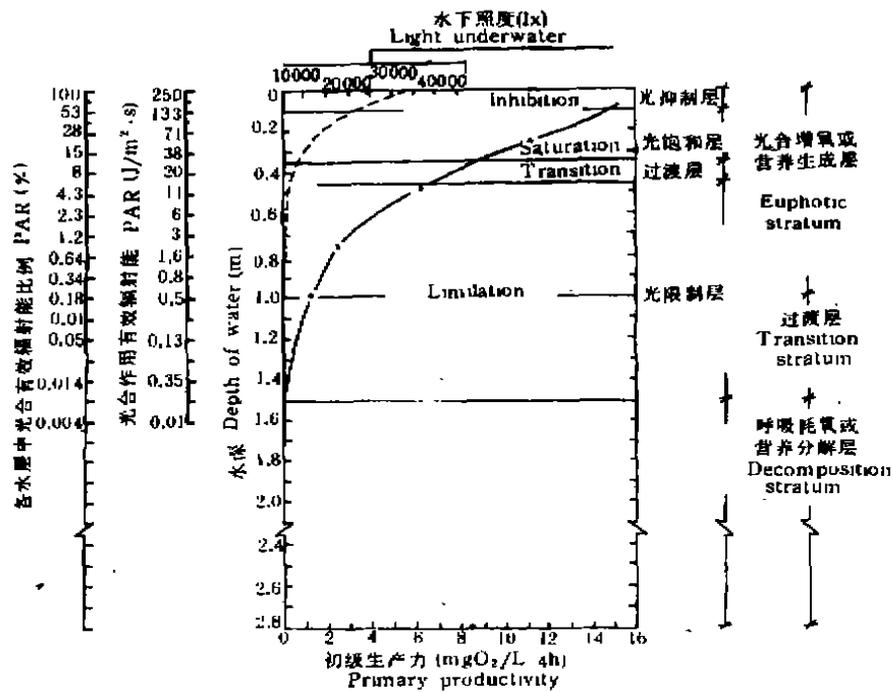


图 1 主养鲢鳙非鲫高产鱼塘初级生产力的垂直分布(中午)

Fig. 1 Vertical distribution of primary production at noon in high output pond (1500kg/hm²) with silver carp, bighead carp and tilapia as the major species in Nanjing China (clear, Aug. 27, 1980)

短线示水下照度; Short line shows light underwater. 长线示初级生产力; Long line shows primary productivity.

浮游藻类光合作用补偿点的光量为可见光能量的 1% 左右, 即 1.4J/m²·s 左右。亦即高产养鱼池塘晴天中午的光合补偿深度常在 90cm 深处上下变动。依浮游藻类群落及入射光量而变动。这些研究结果与 Westlake^[16], 王骥及作者以前的有关测定基本一致。

2.2 初级生产力的日周期变化

在水温、透明度、营养盐类及水生生物等基本条件相当的另一养鱼池塘(1号池)不同天气的浮游植物光合作用补偿深度日周期变化、浮游植物初级生产力垂直变化、日周期变化如图 2。由于高产养鱼池塘在主要饲养季节的透明度常为 30cm 上下, 因而其初级生产力的最高生产层常在 20cm 左右, 即光合有效辐射强度为 5000—15000 lx 或 40—130J/m²·s 的最适光照处(见图 1)。1m 以上水柱的初级生产量常占水柱总初级生产量的 87.5%—100%。

从图 1—2 还可看出, 基于太阳辐射能与初级生产力的垂直、周日变化, 可把高产养鱼池塘水体按营养生成与分解状况分层。即阴雨天中午最大光合补偿深度(Compensation depth)以上水层为营养生成层或透光层(Euphotic stratum), 其中光量可保证植物光合作用的净生产量大于零, 故亦称光合增氧层。一般为水表面下至 100cm 深度以上的水层; 晴天中午最大光合补偿深度以下水层为营养分解层(Decomposition stratum)或呼吸耗氧层, 一般为 150cm 以下至池底的水层; 100—150cm 深度的水层, 是营养生成 < 营养分解, 或光合产氧 < 呼吸耗氧的过渡层。综合养鱼高产池塘初级生产力的日周期变化, 就是以水柱营养生成、分解的消长状况为基

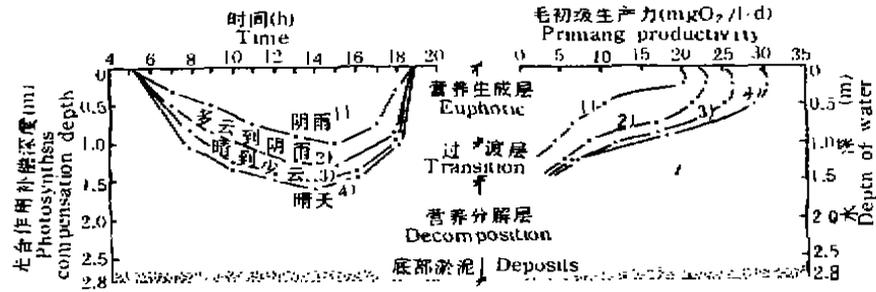


图 2 主养鲢鳙非鲫高产池塘不同天气浮游植物光合作用补偿深度及初级生产力的周日垂直变化曲线
 Fig 2 Diel vertical change of phytoplankton photosynthesis compensation depth and primary productivity in high-output pond (5000kg/hm²) with silver carp, bighead carp and tilapia as the major species in Nanjing China (Aug. 6—20, 1979)

- 1) 11 阴雨 Overcast and rain 2) 21 多云到阴雨 Cloudy to overcast and rain 3) 31 晴到少云 Clear to cloudy
 4) 41 晴天 Clear

表 2 主养鲢鳙非鲫高产池塘的周日毛产氧量与“水呼吸”耗氧量(南京刘家圩 1 号池)
 Table 2 Diel change of the gross oxygen production and “Water respiration” in high output pond (15000kg/hm²) with silver carp, bighead carp and Tilapia as the major cultured fish (Pond Liujiawei fish farm, Nanjing)

日期 Date	天气 Weather	水温 Water temperature (°C)	透明度 Transparency (cm)	补偿深度 Compensation depth (cm)	水柱毛产氧量 Gross oxygen production in water column (g · m ⁻² · d ⁻¹)	水柱呼吸耗氧量 Oxygen consumption due to water respiration in column (g · m ⁻² · d ⁻¹)	P _G /R _w
1979. 8. 6	晴天 ¹⁾	33	34	100—150	26.95	18.12	1.49
8. 7	晴到少云 ²⁾	33	36	100—150	22.60	13.77	1.64
8. 16	晴多云到阴雨 ⁵⁾	30	32	100—140	18.54	12.93	1.43
8. 20	阴到阴雨 ⁴⁾	28	32	80—100	10.69	11.99	0.89
1980. 1. 18	晴到少云 ²⁾	5	50	100—125	6.70	5.18	1.29
2. 28	晴天 ¹⁾	8	48	100—140	8.04	6.64	1.21
3. 15	晴到多云 ³⁾	8	54	100—160	6.67	5.36	1.24
4. 9	晴多云多云 ³⁾	15	34	80—125	9.76	7.45	1.31
5. 13	晴天 ¹⁾	24	30	50—125	12.49	14.14	0.88
6. 29	晴到多云 ³⁾	30	32	75—150	19.07	19.50	0.98
7. 27	晴少云晴 ²⁾	34	35	75—150	28.92	18.36	1.58
8. 27	晴天 ¹⁾	29	30	100—150	26.93	19.43	1.39
9. 30	晴天 ²⁾	22	26	75—150	14.74	9.03	1.63
10. 13	晴天 ¹⁾	20	25	75—150	16.06	11.03	1.46
11. 3	晴天 ¹⁾	16	23	75—125	7.86	5.12	1.55
12. 27	晴天 ¹⁾	4—5	52	100—160	3.00	1.86	1.61
1981. 7. 13	多云到晴 ³⁾	31	32	75—150	20.05	15.68	1.28
7. 27	阴有雨 ⁶⁾	31	30	75—100	14.45	18.58	0.78

1) Clear; 2) Clear, Clear to cloudy; 3) Clear to cloudy; 4) Cloudy to clear; 5) Cloudy to overcast and rainy; 6) Overcast and rainy.

础的。因之,在水温、营养盐类、悬浮有机物、浮游植物丰度、其它水生生物丰度、鱼产量水平、养殖结构类型等相当的情况下,其日周期变化主要受光合作用有效辐射能的限制,亦即受天气、透明度、补偿深度的直接影响。主养鲢鳙非鲫高产池塘的周日毛产氧量(P_G)与“水呼吸”耗氧量(R_w)情况列于表 2。通常水柱浮游植物日平均毛产氧量总是大于“水呼吸”(包括水中微型自

养、异养生物的呼吸耗氧,即含BOD)耗氧量,即 $P_G/R_W > 1$ 。而阴雨天和多云天,补偿深度变浅,水柱光合作用产氧层减缩,产氧量降低,同时呼吸耗氧层扩大, $P_G/R_W \leq 1$ 。由表2及作者对主养青鱼高产池塘的初级生产力的测定数据对比分析得出:浮游植物日初级生产量的高低,主要依养殖结构类型与鱼池富营养化程度而变化。如刘家圩渔场1号池主养鲢鳙非鲫,产量水平达 $15\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$,池水含盐量 $400\text{--}500\text{mg}/\text{l}$ 、有效氮含量 $1.47\text{--}7.78\text{mg}/\text{l}$ 、浮游植物生物量 $34.40\text{--}208.87\text{mg}/\text{l}$ 、总悬浮有机物 $120\text{--}800\text{mg}/\text{l}$,其水柱日毛产氧量在夏季晴天少云的日子里可高达 $28.9\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。而苏州申庄、西眼池主养青鱼,产量水平达 $15\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 池水含盐量为 $300\text{--}400\text{mg}/\text{l}$ 、有效氮含量 $0.66\text{--}4.13\text{mg}/\text{l}$ 、浮游植物生物量 $48.34\text{mg}/\text{l}$ 、浮游植物及悬浮有机碎屑总量为 $90\text{--}100\text{mg}/\text{l}$,其水柱日毛产氧量在夏季最高仅为 $17.049\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。同时可看出:水柱日毛产氧量和“水呼吸”耗氧量的季节变化,也呈现出施肥主养鲢鳙非鲫池塘的变化幅度明显地大于不施肥主养青鱼池塘的变化幅度。前者的水柱日毛初级生产量变动为 $3.0\text{--}28.9\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 、“水呼吸”耗氧量变动为 $1.86\text{--}19.5\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$;后者的水柱日毛初级生产量变动为 $5.00\text{--}17.04\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 、“水呼吸”耗氧量变动为 $3.42\text{--}12.10\text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ 。两者日初级生产量的高峰均出现在7—8月间(见表2、图3)。

2.3 初级生产力的年周期变化

根据3年(1979—1981)挂黑白瓶测定数据计算出主养鲢鳙非鲫年净产鲜鱼为7.5、11.25、 $15\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 的池塘浮游植物鲜鱼毛产量分别为156.6、199.6—201.5、 $227.8\text{--}256.0\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 。图3示出刘家圩1号池1980年(鱼产量为 $1.5\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ 级)的初级生产力与主要生态因子的年周期变化。

从图3看出:初级生产力的季节分布及产量高低是养殖结构类型、鱼产量水平及主要生态因子综合作用的结果。以1号池为例,其初级生产量的季节分布($Y, \text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)与辐射量的季节分布($X, \text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)的关系: $Y = 0.4454X + 6.1452, n = 28, r = 0.4711, t$ 检验差别不明显。这表明太阳辐射能对初级生产力的季节变化或周年变化有影响,是一个基本的生态因素。但具体的相关程度则不及水温明显。

初级生产量($Y, \text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)与水温(X, C)的关系: $Y = 2.7187X^{0.4641}, n = 28, RR = 0.7164, t$ 检验差别极显著, $p < 0.0001$ 。

初级生产量($Y, \text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)的季节分布与无机氮量($X, \text{mg}/\text{L}$)之间的关系: $Y = 13.877\exp(-0.0658X), n = 24, RR = 0.2432, t$ 检验差别极显著, $p < 0.0001$ 。

主养鲢鳙非鲫高产池塘三态氮含量平均为 $3.48\text{mg}/\text{l}$ ($1.47\text{--}7.78\text{mg}/\text{l}$)。而有效磷含量平均为 $0.024\text{mg}/\text{l}$ ($0.001\text{--}0.09\text{mg}/\text{l}$)、合磷0.01。因而N/P比值常在348左右,可见磷含量不足,它成为高产鱼塘初级生产力的一个重要限制因子,需要适时补施磷肥。

初级生产量($Y, \text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)的季节分布与总悬浮有机物质($X, \text{mg}/\text{l}$)之间的关系: $Y = 9.9465 \log x - 12.1585, n = 22, RR = 0.2755, t$ 检验差别极显著, $p < 0.0001$ 。

初级生产量($Y, \text{gO}_2/\text{m}^2 \cdot \text{d}$)的季节分布与叶绿素a含量($X, \mu\text{g}/\text{l}$)之间的关系: $Y = 4.5561X^{0.1437}, n = 15, RR = 0.1341, t$ 检验差别显著, $p < 0.001$ 。

由于施肥主养鲢鳙非鲫高产池塘生态系统的营养物质较丰富,各相关生态因子间的比量较平衡,故各月浮游植物日P/B(生产量/生物量)系数的变化幅度不大。

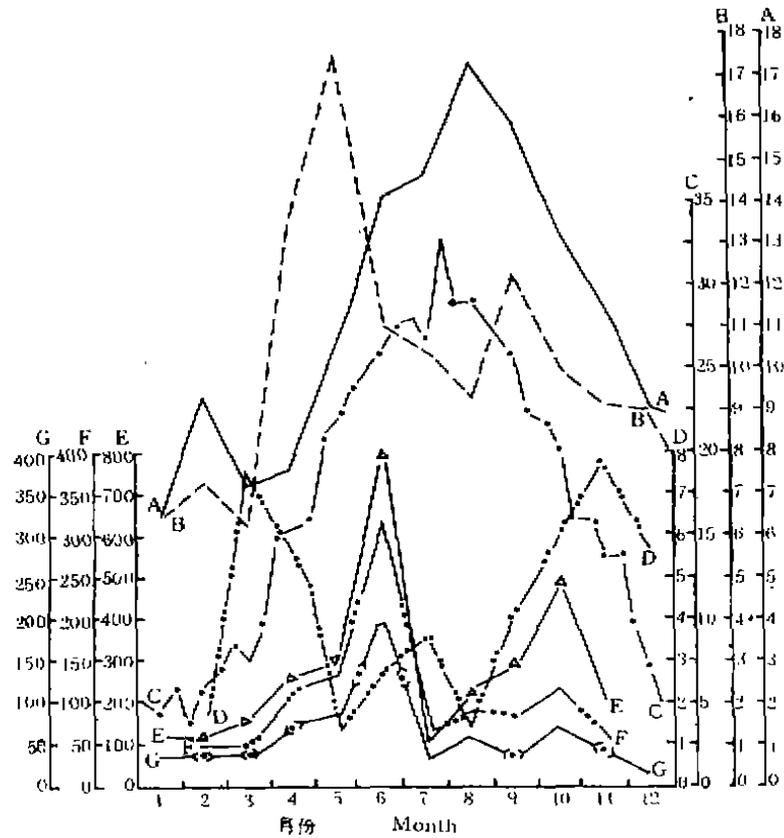


图3 初级生产力与辐射能、水温、无机氮、悬浮有机物、叶绿素a、浮游植物生物量的季节分布曲线

- A. 初级生产力 Primary productivity ($\text{g O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
 B. 辐射能 Radiation energy ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
 C. 平均水温 Average water temperature ($^{\circ}\text{C}$)
 D. 无机氮 Inorganic nitrogen (mg/l)
 E. 悬浮有机物 Suspended organic substances (mg/l)
 F. 叶绿素a Chlorophyll a ($\mu\text{g/l}$)
 G. 浮游植物生物量 Biomass of phytoplankton (mg/l)

Fig. 3 The seasonal distribution of radiation energy, water temperature, inorganic nitrogen, suspended organic substances, chlorophyll a, biomass of phytoplankton with primary productivity

2.4 初级生产力在能量转化中的生态学效率

南京市1979—1981年到达水面的总辐射量为:3757.75—4426.64 $\text{MJ/m}^2 \cdot \text{a}$ 。列举主养鲢鳙非鲫高产鱼塘浮游植物年毛或净初级生产量及鲢鳙非鲫净产量,换算成能量值,计算出各项能量转化效率(表3)。由表3看出:毛初级生产力对太阳辐射能的利用率为0.86%—1.64%,其最高值比主养青鱼池的最高值增48%;鲢鳙非鲫净产量对浮游植物净初级生产力的利用率为8.46%—15.50%,其最高值比主养青鱼池塘最高值增长1.4倍,主要是由于增加了非鲫、充分利用了腐屑(碎屑和细菌)饵料的缘故。太阳能转移为鱼产量的生态效率为

0.058%—0.156%，其最高值比主养青鱼池塘的最高值增长 1.8 倍。在综合养鱼各种养殖结构类型中，主养鲢鳙非鲫池塘的浮游植物初级生产力的能量转化效率是最高的。

表 3 主养鲢鳙非鲫高产池塘浮游植物初级生产力在能量转化中的生态效率(南京,刘家圩)

Table 3 Ecological efficiencies in high output ponds with silver carp, bighead and Tilapia as the major cultured fish (Liujiawei fish farm, Nanjing)

鱼池 Fish pond	毛产氧量 The gross oxygen production ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	合 能 量 Energy ($MJ \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	毛初级生产力对总 辐射能的利用率 Gross primary production/solar radiation(%)	鱼类净产量对净初 级生产力的利用率 Fish yield / Net primary production (%)	太阳能转化为鱼产 量的生态学效率 Fish yield / solar radiation(%)
I. 7500kg/hm ² · a Pond 7 (1981)	2567.3	37.6849	0.86	8.46	0.058
II. 11250kg/hm ² · a Pond 8 (1980)	3271.6	48.0230	1.28	11.22	0.115
Pond 1 (1979)	3303.4	48.4900	1.10	14.16	0.124
III. 15000kg/hm ² · a Pond 2 (1979)	3754.3	55.1087	1.25	13.11	0.130
Pond 1 (1980)	4197.1	61.6083	1.64	11.92	0.156
Pond 1 (1981)	3733.9	54.8092	1.26	15.50	0.156

参 考 文 献

- [1]何志辉,李永函.无锡市河埭口高产鱼池水质研究(Ⅰ.浮游生物).水产学报,1983,7(4):287—299
- [2]钟功甫,邓汉增等.珠江三角洲基塘系统研究.北京:科学出版社,1987,58—71
- [3]姚宏禄.综合养鱼高产池塘的溶氧变化周期.水生生物学报,1988,12(3):199—211
- [4]姚宏禄,吴乃骞等主养青鱼高产池塘的初级生产力及其能量转化为鲢鳙产量的效率,1990,水生生物学报,14(2):114—128
- [5]姚宏禄.主养 鲢鳙非鲫高产池塘的初级生产力.南京林业大学学报,1991,15(增刊——生态专辑):27—32
- [6]Boyd C E. Summer algal communities and primary productivity in fish ponds. *Hydrobiologia*, 1973 41:357—390
- [7]Boyd C E. *Water Quality Management for Pond Fish Culture*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1982, 78—83; 159—162
- [8]Hepher B. Primary production in fish ponds and its application to fertilization experiments. *Limnol. Oceanogr.* 1962, 7: 131—135
- [9]Norrieya—Curtis P. Primary productivity in manured fish ponds. *Aquaculture*, 1979, (14):335—344
- [10]Schroeder G L. Autotrophic and heterotrophic production of microorganisms in intensely—manured fish ponds, and related fish yield. *Aquaculture*, 1978, 17:303—325
- [11]Yan Jingsong and Yao Honglu. Integrated fish culture management in China. Chapter 17. In S. E. Jorgensen and W. J Mitsch, eds, "Ecological Engineering", A Introduction to Ecotechnology. J. Wiley Pub., New York 1989, 375—408
- [12]Winberg G G. Some interim results of Sovert IBP investigations on lake. In "Productivity problems of freshwaters". Warszawa—Krakow, 1972, 363—381
- [13]王 骥,沈国华.武汉东湖浮游植物的初级生产力及其与若干生态因素的关系.水生生物学集刊,1981,7(3):295—311
- [14]王祖熊,孙美娟等.池养白鲢生殖周期中卵巢生化组成变化的研究.水生生物学集刊,(1964),5(1):103—114
- [15]Vollenweider R A. (ed) A Manual on Methods for Measuring Primary Production in "Aquatic Environments" IBP Handbook No. 12. 1st edition. Oxford:Blackwell, 1969,157—177
- [16]Westlake D F. Primary production. In "The functioning of freshwater ecosystems (International Biological Programme 22)" Cambridge University Press, Cambridge, 1980,141—246

PRIMARY PRODUCTIVITY AND ECOLOGICAL EFFICIENCIES
OF ENERGY CONVERSION IN HIGH OUTPUT FISHPONDS
WITH SILVER CARP, BIGHEAD AND TILAPIA
AS THE MAJOR CULTURE SPECIES

Yao Hong-Lu

(*Jiangsu Provincial Bureau of Fisheries, Nanjing, 210003*)
(*Jiangsu Provincial Fisheries Technique Extension Center*)

The primary productivity by phytoplankton was determined during 1979—1981 for fishponds with the silver carp, bighead and tilapia as the major culture species. Tests were made on the vertical, diel and seasonal changes in primary productivity in relation to major ecological factors and overall fish yield with the mean daily O_2 production ranged from 3.0 to 28.9 $gO_2 \cdot m^{-2}d^{-1}$. The daily gross oxygen production usually exceeded oxygen respiration. The annual oxygen production was 2567—4197 $gO_2 \cdot m^{-2}d^{-1}$.

Monthly primary production showed only one peak which usually occurred in July—August. The relationship between primary productivity (Y , $gO_2 \cdot m^{-2}d^{-1}$) and temperature (X , $^{\circ}C$) was:

$$Y = 2.7187X^{0.4841}$$

The average phosphorus concentration was 0.01 mg/l and N/P ratio ranged from 147 to 778, indicating that phosphorus was the limiting factor for primary productivity.

The conversion efficiency of solar radiation to gross primary productivity ranged from 0.86% to 1.64%. The conversion efficiency of net primary productivity to yield of silver carp, bighead and tilapia ranged from 8.4% to 15.5%. The ecological conversion efficiency of solar radiation to fish yield was 0.058%—0.156%.

Key words: primary productivity, with silver carp, bighead and tilapia as the major cultured fish, high output fish ponds, ecological factor, ecological efficiency.