

盐碱池塘围隔生态系统的悬浮物结构及有机碳库储量

赵 文¹, 董双林², 李德尚², 张兆琪²

(1. 大连水产学院养殖系, 大连 116023; 2. 青岛海洋大学教育部水产养殖开放实验室, 青岛 266003)

摘要:1998 年 4~7 月对高青盐碱池塘单养鲢和罗非鱼围隔生态系统颗粒悬浮物构成和各有机碳库储量及动态进行了研究。结果表明, 浮游生物的干重(PZ)占总颗粒悬浮物干物质(TS)的 4.26%~25.97%, 平均 12%。各国隔浮游植物干重(DWP)平均值变化范围为 0.16~0.70mg/L, 有鱼围隔均比无鱼围隔的大。浮游动物干重(DWZ)平均值变化范围为 0.32~2.81mg/L, 养鲢围隔中最小, 小于无鱼对照围隔, 养罗非鱼围隔明显高于养鲢围隔。颗粒悬浮物的灰分含量平均值为 42.38%。溶解有机碳(DOC)、颗粒有机碳(POC)库储量平均值分别为 $5.40 \pm 1.61 \text{ mgC/L}$ 和 $1.96 \pm 0.96 \text{ mg/L}$ 。各处理围隔间颗粒有机物的 C/N 比的平均值比较接近, 总平均值为 6.97 ± 0.24 。TOC、DOC 和 POC 比例为 1 : 0.73 : 0.27。浮游生物碳和腐质颗粒碳占 POC 的比例的平均值分别为 34.65% 和 65.35%。腐质颗粒碳、浮游动物碳与浮游植物碳的比例为 9.29 : 3.71 : 1。浮游生物碳中浮游动物碳占 78.8%, 浮游植物碳占 21.2%。浮游动物碳比浮游植物碳高, 这可能是内陆盐水的通性。盐碱池塘围隔生态系统颗粒有机碳(POC, mgC/L)与浮游植物叶绿素 a(Chla, $\mu\text{g/L}$)和悬浮颗粒有机物(SO, mg/L)之间存在显著的正相关关系, 其回归方程分别为: $\text{POC} = 1.00 + 0.10 \text{ Chla}$ 和 $\text{POC} = 1.26 + 0.08 \text{ SO}$ 。

关键词:颗粒悬浮物结构; 有机碳库; 单养鲢和罗非鱼围隔; 盐碱池塘

The Seston Structure and the Storage of Organic Carbon Pools in Enclosures of Saline-alkaline Ponds

ZHAO Wen¹, DONG Shuang-Lin², LI De-Shang², ZHANG Zhao-Qi² (1. Department of Aquaculture, Dalian Fisheries University, Dalian 116023, China; 2. China Ocean University, Qingdao 266003, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(12): 2133~2140.

Abstract: The particulate seston structure and the storage and dynamics of various organic carbon pools in enclosures with silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*) in saline-alkaline ponds were estimated, in order to provide information for increasing fish production and management scientifically water quality of this type of water bodies. The experiments were carried out in Daluhu Fish Farm (Latitude 37°17'N, Longitude 117°55'E), Gaoqing County, Shandong Province from April to July in 1998. The pond of which placed enclosure is 0.10 ha in area, and water depth was 1.4m. During the experiment, water temperature varied from 18.5 to 32.0°C, and conductivity ranged from 1000 to 2400 $\mu\text{S/cm}$. Total alkalinity ranged from 3.02 to 5.64 mmol/L. The experimental enclosures were the land-based enclosures in ponds. The enclosures were 20m² (4m×5m) in area, 2.0 m in height (1.4m in water depth), and was made of plastic-coated polyethylene woven cloth with a frame composed of wood and bamboo poles. The results indicated that the ratios of dry weight of plankton (PZ) to dry weight of total seston (TS) were 4.26%~25.97%, and the average value was 12%. The mean dry weight of phytoplankton (DWP) in various enclosures ranged from 0.16 to 0.70 mg/L, the DWP of enclosures with

基金项目:国家九五攻关资助项目(96-008-04-01); 国家杰出青年基金资助项目(39725023)

收稿日期:2001-09-07; **修订日期:**2002-03-04

作者简介:赵 文(1963~), 男, 吉林农安人, 博士, 教授。主要从事水生生物学、水产养殖生态学研究。E-mail: zhaowen@mail.dlptt.ln.cn

本文系在中国海洋大学完成, 修改过程中得到大连水产学院何志辉教授指导, 特此致谢。

fishes was higher than that of enclosure without fishes. The mean dry weight of zooplankton (*DWZ*) in various enclosures ranged from 0.32~2.81 mg/L, the *DWZ* of enclosures with silver carp was lowest, less than control enclosures without fishes, and significantly lower than that of enclosures with *Tilapia*. The mean ash contents of seston was 42.38%. The mean storage of dissolve organic carbon (*DOC*) and particulate organic carbon (*POC*) were 5.40 ± 1.61 and 1.96 ± 0.96 mgC/L, respectively. *POC* content of three enclosures with *Tilapia* (2.38 ± 1.20 mgC/L) was higher than that of three enclosures with silver carp (1.99 ± 0.78 mgC/L) ($p>0.5$). The *POC* content of control enclosures without fish was 1.28 ± 0.21 mgC/L. The *POC* content of enclosures with fishes higher than that of enclosure without fishes ($p<0.001$). The mean C/N ratio in various groups was similar, total mean C/N ratio was 6.97 ± 0.24 . The ratio of total organic carbon (*TOC*), *DOC* and *POC* was 1 : 0.73 : 0.27. The mean ratio of the planktonic carbon and detritus particulate carbon to the *POC* was 34.65% and 65.35%, respectively. The ratio of detritus particulate carbon, zooplankton carbon and phytoplankton carbon was 9.29 : 3.71 : 1. The ratio of the zooplankton carbon and phytoplankton carbon to the planktonic carbon was 78.8% and 21.2%, respectively. Zooplankton carbon contents exceeded phytoplankton carbon by an average of 3.71 times, this is possible the common characteristic of inland saline waters. The *POC* (mgC/L) of enclosures in saline-alkaline ponds have passive correlated significantly to the *Chl-a* ($\mu\text{g/L}$) and suspended particulate organic matter (*SO*, mg/L), the correlation function were: $\text{POC}=1.00+0.10 \text{ Chl-a}$ and $\text{POC}=1.26+0.08 \text{ SO}$.

Key words: seston structure; organic carbon pools; enclosure with silver carp and *tilapia*; saline-alkaline ponds

文章编号:1000-0933(2002)12-2133-08 中图分类号:Q148 文献标识码:A

水域生态系统的悬浮物包括无机质粒、浮游植物、浮游动物、浮游细菌和腐屑等,其中除无机质粒外,都是水生动物的饵料基础。弄清水域生态系统中悬浮物的含量和结构特点,对深入理解生态系统的能量流动和物质循环具有重要意义。关于湖泊和海洋及海水养殖池塘的悬浮物研究已有较多报道^[1~5],而盐碱池塘生态系统悬浮物尚未见到研究材料。本文对单养鲢和罗非鱼的围隔生态系统的悬浮物及各有机碳库储量进行了比较研究,旨在阐明盐碱池塘悬浮物结构特点和养鱼和施肥对各有机碳库含量的影响,也为提高盐碱池塘鱼产量和科学管理水质提供依据。

1 材料与方法

1.1 本实验于 1998 年 4~7 月在山东省高青县水产养殖公司进行。用 8 个围隔,其中 3 个单养鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) (S1, S2, S3), 3 个单养尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) (T1, T2, T3), 两个为无鱼对照 (S0, T0)。围隔面积为 $4\times5\text{m}^2$ 。实验期间水温为 $18.5\sim32.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 电导率为 $1050\sim2400\mu\text{S/cm}$ 。总碱度为 $3.02\sim5.64\text{mmol/L}$ 。池塘设置围隔前用生石灰彻底清塘, 设置围隔时同时进水, 保证放鱼前各围隔无鱼且浮游生物和水质基本一致。放鱼时间为 4 月 20 日, 收鱼时间为 7 月 13 日。鱼类放养量见表 1。施肥时有机肥料先是浸泡成液体肥料, 无机肥是先溶解后均匀泼洒。施肥量、无机肥中的 N : P 配比依水的透明度和限制性营养盐测定(生氧量法)而定。实验期间通过把地下井水注入池塘以补充水的蒸发和渗漏损失的方法, 保持围隔内水深为 1.4m 左右。

1.2 有机碳测定

1998 年 4~7 月份, 每月取实验围隔表、中和底层混合水样, 测定各有机碳库储量。

1.2.1 POC 将定量水样分别过滤在两张直径为 25mm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(预先经 450℃ 灼烧 2h 以去除滤膜中的有机碳)。以在滤液里浸过的空白滤膜中所含的有机碳作为空白, 校正过滤过程中滤膜上吸收的溶解有机碳。将两样品一空白计 3 张滤膜置于含浓盐酸蒸气的干燥器(干燥器底部放一培养皿, 内盛浓盐酸)中熏蒸 15min, 以去除其中的无机碳。之后取出滤膜, 置于电热恒温箱中, 60℃ 温度下烘干, 在 PE-240C 元素分析仪上测定 POC 含量, 用同样的方法测定 PON 含量。

从各围隔上中下层分别采水混合后取水样 1L, 用鲁哥氏液固定, 在实验室内静置 24h 以上, 浓缩至

50ml,常规法镜检计数浮游植物。小型浮游动物用浓缩至 20ml 的浮游植物水样,从中吸取 0.1ml 全片计数(2 片平均)原生动物,再吸取 1ml 全片计数轮虫。大型浮游动物分别从上中下层采水计 15L,用浮游生物网(孔径<64μm)过滤,将浓缩液用 5% 福尔马林固定,全部计数。按体积法计算生物量(湿重)^[6~11]。通过测量 20~50 个个体的大小以确定浮游生物优势种类的体积。

表 1 围隔鲢和罗非鱼的放养量、日产量和平均施肥量

Table 1 Stocking rates and daily production of silver carp and tilapia as well as the average amount of fertilizers applied in the enclosures

项 目 Item	围隔 Enclosures							
	S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
放养量 Stocking rates (ind/hm ²)		10000	10000	10000		10000	10000	10000
成活率 Survival rates(%)		100	100	100		100	100	100
放养规格 Size in beginning (g/ind)		33.2±9.3	33.2±9.3	33.2±9.3		75	75	75
收获规格 Size in harvest(g/ind)		102.2±9.2	109.0±16.2	72.6±5.6		133.5±42.0	95.0±21	147.5±26.9
日产量 Daily production (g/(m ² ·d)		0.82	0.90	0.47		0.93	0.32	1.15
施肥 Applied fertilizer (kg/(hm ² ·d)								
鸡粪 Chicken manure				18.75				18.75
NH ₄ H ₂ PO ₄			0.39		0.39	0.39		
NH ₄ Cl			1.23		1.23	1.23		

1.2.2 DOC DOC 测定用硫酸钾氧化法。取 POC 测定的滤过液 50ml,经酸化通氮气除去无机碳后,用过硫酸钾将有机碳氧化成 CO₂ 气体,用非色散红外二氧化碳气气体分析仪测定。

1.3 悬浮颗粒有机物含量 在测定有机碳的同时,取一定量(50~200ml)的实验围隔水样,过滤在直径为 25mm 的 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜(使用前经 450℃ 灼烧 2h 以除去滤膜中的有机质)上。60℃ 下烘干,在干燥器中冷却后称重。然后经 550℃ 灼烧 2h,冷却后再称量灼烧后的灰分。据空白滤膜重、样品滤膜烘干重、灼烧减重及过滤水样体积计算水样中悬浮颗粒有机物含量。

2 结果与讨论

2.1 颗粒悬浮物的结构

各围隔总颗粒悬浮物重量(TS)变化幅度为 7.81~25.56mg/L。平均值为 15.53mg/L。TS 有鱼围隔明显大于无鱼对照围隔,且一般以施肥组特别是施无机肥组的含量为高(表 2)。

表 2 实验围隔颗粒悬浮物的干物质构成

Table 2 Structure of the dry seston in experimental enclosures

围隔 Enclosure	DWP(mg/L)	DWZ(mg/L)	DWZ/DWP	TS(mg/L)	Ash(%)	PZ/TS(%)
S0	0.16	1.87	11.92	7.81±2.25	48.00	25.97
S1	0.38	0.34	0.91	14.06±6.91	37.78	5.11
S2	0.24	0.32	1.32	13.25±5.38	30.19	4.26
S3	0.70	0.32	0.45	18.00±8.51	47.22	5.65
T0	0.21	1.30	6.08	11.69±8.51	45.99	12.94
T1	0.56	1.47	2.60	25.56±11.30	32.27	7.94
T2	0.22	2.50	11.62	13.31±5.30	52.58	20.38
T3	0.24	2.81	11.78	20.56±8.96	44.98	14.81

颗粒悬浮物的灰分含量变化于 30.19%~52.58%之间,总平均值为 42.38%,与东湖的结果(45%)十分接近。本实验围隔由于水浅,风和鱼类活动可引起底泥再悬浮,因此灰分含量变化在各处理围隔中主要受底泥再悬浮影响。此外藻类组成也有一定影响^[12,13]。

浮游植物干重(DWP)平均值变化幅度为 0.16~0.70mg/L。有鱼围隔均比无鱼围隔(S0 和 T0)的大。施肥组与不施肥组的差别没有规律性,施肥的 T0、T1 比不施肥的 S0、T2 的大;但 T3 与 T2 并无显著差别,而 S1 则比无鱼对照围隔大。浮游动物干重(DWZ)平均值变化幅度为 0.32~2.81mg/L。养鲢围隔中浮游动物干重最小,甚至小于无鱼对照围隔。养罗非鱼围隔浮游动物干重明显高于养鲢围隔,且不比对照围隔的低。

研究期间,浮游生物的干重(PZ)占总颗粒悬浮物重量(TS)的 4.26%~25.97%,平均 12%。虽然本研究没有进行浮游细菌的定量,但富营养型水体中细菌在浮游生物现存量中所占比例有限,如东湖浮游生物现存量中,细菌仅占 1%^[4],因此未测定的浮游细菌量不会很大。本研究的盐碱池塘中浮游生物(不包括细菌)干重只占颗粒悬浮物的 12%,约 88%的颗粒悬浮物由非生命的颗粒物组成,这与东湖的研究结果是一致的。

2.2 POC、PON 和 C/N 比

从表 3 可见,各实验围隔 POC 含量波动于 0.83~4.03mgC/L,总平均为 1.96±0.96mgC/L。POC 含量明显高于 Parsons^[14]和孙作庆等^[15]天然海水的测定结果(0.02~2.30mgC/L),略低于刘国才的养虾围隔测定结果(3.10±1.60mgC/L),与林婉莲等^[3]的东湖研究结果(1.86~3.99mgC/L)相近。比较鲢和罗非鱼围隔的 POC 含量,可见 3 个罗非鱼围隔 POC 含量平均为 2.38±1.20mgC/L,3 个鲢围隔为 1.99±0.78mgC/L,两个无鱼对照围隔则为 1.28±0.21mgC/L。罗非鱼围隔的 POC 平均含量略高于鲢围隔,但差异不显著($p>0.05$),有鱼围隔的 POC 平均含量均显著高于无鱼对照围隔($p<0.001$)。

不同处理下各围隔颗粒有机氮(PON)含量变动于 0.08~0.72mg/L 之间,平均值为 0.19~0.39 mg/L,养鱼围隔大于无鱼围隔,罗非鱼围隔大于鲢围隔(表 3)。

各围隔颗粒有机物的 C/N 比变动于 4.11~10.38,各处理下围隔间 C/N 比的平均值比较接近,总平均值为 6.97±0.24。颗粒有机物的 C/N 比可用作显示水域生态系统中悬浮物有机碳来源和营养结构动向的指标。水草与落叶形成的 POC 中 C/N 比很高(>10~20);藻类的 C/N 多在 6~7 之间,甲藻可达 11,细菌平均 5.7。以外来有机质为主的腐植质湖 POC 中 C/N 平均达到 15.5±1.0^[16],一般水域则低得多,如东湖为 4.79~5.80,综合养虾生态系平均为 6.37±1.07^[5],东海春季平均为 7.63^[17]。本文的结果表明,盐碱池塘养殖滤食性鱼类的围隔生态系统颗粒有机物的 C/N 比在 7.0 左右,说明盐碱池塘围隔生态系统的 C/N 比是居中等水平。

表 3 各围隔水体 POC、PON 含量(mgC/L)和 C/N 比值

Table 3 The dynamics of the concentration of POC,PON in experimental enclosures															
围隔	22/4			10/5			21/6			7/7			Mean		
Enclosures	POC	PON	C/N	POC	PON	C/N	POC	PON	C/N	POC	PON	C/N	POC	PON	C/N
S0	1.12	0.14	8.00	1.18	0.17	6.94	1.23	0.17	7.24	1.54	0.34	4.53	1.27	0.21	6.68
S1	0.83	0.08	10.38	2.55	0.39	6.54	2.63	0.37	7.11	1.48	0.36	4.11	1.87	0.30	7.03
S2	0.94	0.10	9.40	2.76	0.38	7.26	2.65	0.41	6.46	2.17	0.34	6.38	2.13	0.31	7.38
S3	0.98	0.13	7.54	2.86	0.38	7.53	2.44	0.36	6.78	1.59	0.28	5.68	1.97	0.29	6.88
T0	1.12	0.14	8.00	1.62	0.20	8.10	1.38	0.21	6.57	1.03	0.21	4.90	1.29	0.19	6.89
T1	1.12	0.14	8.00	1.34	0.15	8.93	3.71	0.60	6.18	3.77	0.64	5.89	2.49	0.38	7.25
T2	1.12	0.14	8.00	1.63	0.20	8.15	3.90	0.68	5.74	2.36	0.46	5.13	2.25	0.37	6.75
T3	1.12	0.14	8.00	1.66	0.20	8.30	4.03	0.72	5.60	2.78	0.48	5.79	2.40	0.39	6.92

从表 3 可见,实验期间各实验围隔颗粒有机物 C/N 比随时间的推移呈下降趋势。Antia 等^[18]报道,当海水中 NO₃ 充足、浮游植物生长良好时,其 C/N 比仅是 3,而 NH₃ 耗尽,浮游植物生长不良时,其 C/N 比高达 15。具此推论,本实验期间,随时间推移颗粒有机物 C/N 比下降,表明围隔生态系统浮游植物生长良好,同时悬浮颗粒有机物中易为细菌吸收利用的有效成分增加。

2.3 浮游植物碳与浮游动物碳

各实验围隔浮游植物与浮游动物碳含量及随时间的变化列于表 4。从中可见,各实验围隔浮游植物碳的变化范围为 0.01~0.59mgC/L,总平均 0.14±0.14mgC/L。从平均值看,研究期间鲢围隔(0.18±0.16mgC/L)与罗非鱼围隔(0.14±0.12mgC/L)相近,均略高于无鱼对照围隔(0.07±0.09mgC/L)。但三者之间差异不显著。各实验围隔浮游动物碳变动于 0.03~3.55mgC/L 之间,总平均 0.53±0.86mgC/L。从平均值上看,鲢围隔最低,为 0.13±0.08mgC/L,显著低于罗非鱼围隔(0.90±1.28mgC/L)($p<0.001$)和无鱼对照围隔(0.56±0.39mgC/L)($p<0.01$)。

浮游动物碳与浮游植物碳占 POC 的比例分别为 27.04%和 7.14%,而 3 个鲢围隔、3 个罗非鱼围隔和两个空白对照围隔浮游植物碳占平均 POC 的比例分别为 9.05%、7.04%和 5.47%,而浮游动物碳则分别占 5.46%、37.82%和 43.75%。

表 4 各实验围隔浮游植物碳(PC)与浮游动物碳(ZC)的变动(mgC/L)

Table 4 Dynamics of phytoplankton carbon and zooplankton carbon in the experimental enclosures										
围隔 Enclosures	22/4		10/5		21/6		7/7		Mean	
	PC	ZC	PC	ZC	PC	ZC	PC	ZC	PC	ZC
S0	0.22	0.08	0.01	0.75	0.01	0.36	0.01	1.20	0.06	0.60
S1	0.31	0.03	0.20	0.14	0.06	0.13	0.04	0.26	0.15	0.14
S2	0.12	0.09	0.19	0.08	0.04	0.13	0.04	0.22	0.10	0.13
S3	0.29	0.05	0.59	0.09	0.18	0.09	0.06	0.28	0.28	0.13
T0	0.22	0.08	0.09	0.79	0.01	0.45	0.02	0.77	0.09	0.52
T1	0.22	0.08	0.02	0.18	0.37	1.68	0.29	0.41	0.23	0.59
T2	0.22	0.08	0.08	0.18	0.01	3.41	0.03	0.33	0.09	1.00
T3	0.22	0.08	0.03	0.18	0.03	3.55	0.10	0.68	0.10	1.12

2.4 浮游生物碳和腐质颗粒碳

将表 4 中浮游植物碳和浮游动物碳相加,得出研究期间各实验围隔浮游生物活体碳(PZC),再用 POC 含量减去 PZC 含量得出细菌和腐屑碳含量(BDC)。计算结果列于表 5。可见各实验围隔浮游生物活体碳(不包括浮游细菌)含量变动于 0.17~3.58mgC/L,总平均值为 0.66±0.84mgC/L;腐质颗粒碳含量变化于 0.49~3.03mgC/L,总平均值为 1.30±0.77mgC/L。由此可见,8 个实验围隔水体浮游生物碳和腐质颗粒碳各自占 POC 的比例的平均值分别为 34.65%和 65.35%,这与刘国才^[5]对养虾池的研究结果(35%和 65%)非常接近。SDC/PZC=1.97,这也与一般淡水养鱼池(1.5~3.3)的中间值相近。3 个鲢围隔浮游生物碳和腐质颗粒碳各自占 POC 的比例的平均值分别为 15.5%和 84.4%,但罗非鱼围隔这两项平均值分别为 44.0%和 56.0%,两个无鱼对照围隔此比值分别为 49.5%和 50.5%。

表 5 各实验围隔浮游生物碳(PZC)与腐质颗粒碳(BDC)的变动

Table 5 Dynamics of plankton carbon and detritus carbon in the experimental enclosures										
围隔 Enclosures	22/4		10/5		21/6		7/7		Mean	
	PZC	BDC	PZC	BDC	PZC	BDC	PZC	BDC	PZC	BDC
S0	0.30	0.82	0.76	0.42	0.37	0.86	1.21	0.33	0.66	0.61
S1	0.33	0.50	0.33	2.22	0.19	2.44	0.30	1.18	0.29	1.58
S2	0.20	0.74	0.27	2.49	0.17	2.48	0.27	1.90	0.23	1.90
S3	0.33	0.65	0.68	2.18	0.27	2.17	0.35	1.24	0.41	1.56
T0	0.30	0.82	0.88	0.74	0.46	0.92	0.78	0.25	0.60	0.68
T1	0.30	0.82	0.19	1.15	2.06	1.65	0.70	3.07	0.81	1.67
T2	0.30	0.82	0.25	1.38	3.42	0.48	0.36	2.00	1.09	1.17
T3	0.30	0.82	0.21	1.45	3.58	0.45	0.78	2.00	1.22	1.18

本实验围隔生态系统腐质颗粒碳、浮游动物碳与浮游植物碳的比例为 9.29 : 3.71 : 1,浮游生物碳中浮游动物碳占 78.8%,浮游植物碳占 21.2%。据 Hessen 的资料^[16],腐质湖腐质颗粒碳、浮游动物碳、浮游细菌碳和浮游植物碳的比例为 22 : 4 : 3 : 1,总浮游活体碳中浮游植物碳占 6%~19%,细菌碳占 11%~42%。对虾池腐质颗粒碳、浮游动物碳、浮游细菌碳和浮游植物碳的比例为 3.45 : 0.25 : 0.65 : 1^[5]。比较来看,本文结果在浮游动物碳与浮游植物碳的比例接近 4 : 1 及浮游植物碳占浮游生物碳的 21.2%上与腐质湖的结果相接近,较一般湖泊水库的(0.3~1)高得多。

2.5 溶解有机碳(DOC)

各围隔 DOC 含量及其变动示于表 6。从中可见,本实验期间各围隔 DOC 含量变动于 3.33~8.00mgC/L,总平均值为 5.49±1.61mgC/L。8 个实验围隔 DOC/POC 的平均值为 2.76,与海水养虾池相当(3.21)^[5];低于自然水体 6~23^[19,20];高于淡水高产池塘(1.3~2.1)^[21]。

本研究中 DOC 含量与浮游植物生物量呈负相关关系 ($r = -0.385, n = 32, p < 0.05$), Carpenter 等^[22]指出湖泊中 DOC 与浮游植物生物量和初级生产力呈负相关, 水体有色 DOC 的自然变化是初级生产力波动的主要原因。可见水体 DOC 含量与水生态系统营养水平有关。

2.6 POC 与水体浮游植物叶绿素-a、悬浮颗粒有机含量的关系

表 7 和表 8 列出了各国隔悬浮颗粒有机物含量和浮游植物叶绿素-a 含量的变化情况。将这两个指标与相应的 POC 含量进行相关分析表明, 盐碱池塘围隔生态系统颗粒有机碳(POC, mgC/L)与浮游植物叶绿素 a(Chla, $\mu\text{g/L}$)之间存在极显著的正相关(图 1), 其回归方程为:

$$\text{POC} = 1.00 + 0.10 \text{ Chla} (n = 32, r = 0.931, p < 0.001)$$

POC 与悬浮颗粒有机物(SO, mg/L)之间显著正相关(图 2), 其回归方程为:

$$\text{POC} = 1.26 + 0.08 \text{ SO} \quad (n = 32, r = 0.566, p < 0.01)$$

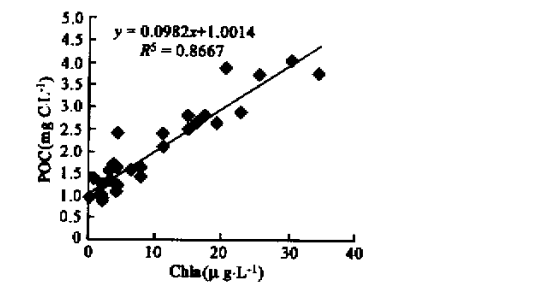


图 1 各实验围隔颗粒有机碳(POC)与浮游植物叶绿素 a 的关系

Fig. 1 The relationship between POC and chlorophyll a of phytoplankton in the experimental enclosures

表 6 各国隔水体 DOC 含量动态
Table 6 The concentration dynamics of DOC in experimental enclosures

日期 Date	围隔 Enclosures							
	S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
22/4	4.27	4.02	3.25	4.36	4.27	4.27	4.27	4.27
10/5	4.70	3.93	3.50	3.33	3.42	4.62	4.02	3.50
21/6	7.94	7.76	7.88	7.12	7.59	6.88	6.29	6.65
7/7	5.00	6.59	5.59	4.94	7.18	6.71	8.00	6.71
平均 Mean	5.48	5.58	5.06	4.94	5.62	5.62	5.65	5.28

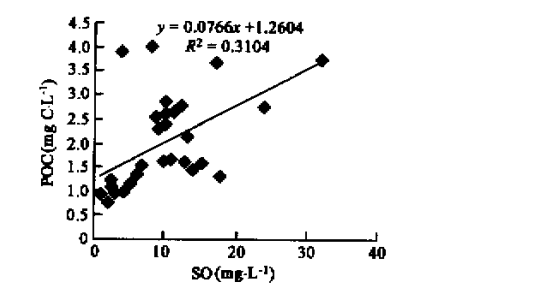


图 2 各实验围隔颗粒有机碳(POC)与悬浮有机物含量(SO)的关系

Fig. 2 The relationship between POC and SO in the experimental enclosures

表 7 各实验围隔悬浮颗粒有机物含量变化情况(mg/L)
Table 7 Dynamics of the suspended particular organic matter in the experimental enclosures

日期 Date	项目 Item	围隔 Enclosures							
		S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
22/4	TS	5.25	3.25	3.00	7.00	5.25	5.25	5.25	5.25
	IS	3.00	1.25	2.00	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00
	SO	2.25	2.00	1.00	3.00	2.25	2.25	2.25	2.25
10/5	TS	12.00	15.00	15.00	33.00	28.00	34.00	19.00	29.00
	IS	7.00	6.00	3.00	23.00	15.00	16.00	9.00	18.00
	SO	5.00	9.00	12.00	10.00	13.00	18.00	10.00	11.00
21/6	TS	7.00	13.00	18.00	14.00	8.50	25.00	10.00	18.00
	IS	4.50	3.00	7.00	4.00	2.50	8.00	6.00	10.00
	SO	2.50	10.00	11.00	10.00	6.00	17.00	4.00	8.00
7/7	TS	7.00	25.00	17.00	18.00	5.00	38.00	19.00	30.00
	IS	0.50	11.00	4.00	3.00	1.00	6.00	10.00	6.00
	SO	6.50	14.00	13.00	15.00	4.00	32.00	9.00	24.00

2.7 总有机碳数据

总有机碳(TOC)含量系由 POC 和 DOC 加和得出(表 9)。可见各国隔 TOC 含量变动于 4.19~

10.68mgC/L,平均为 $7.36\pm 2.17\text{mgC/L}$ 。TOC、DOC和POC比例为 $1:0.73:0.27$ 。这一比值与养虾池($1:0.76:0.24$)^[5]的接近。

表8 各实验围隔叶绿素a含量变化情况(μg/L)
Table 8 Dynamics of chlorophyll a of phytoplankton in the experimental enclosures

日期	围隔 Enclosures							
Date	S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
22/4	4.08	2.26	0.55	2.21	4.08	4.08	4.08	4.08
10/5	4.26	15.03	17.24	22.76	6.19	3.39	4.41	3.74
21/6	2.11	18.85	15.78	4.26	0.75	25.33	20.19	30.21
7/7	3.06	7.81	11.20	7.79	1.77	34.48	11.04	14.60
Mean	3.38	10.99	11.19	9.26	3.20	16.82	9.93	13.16

表9 各围隔水体 TOC 含量动态
Table 9 The concentration dynamics of TOC in experimental enclosures

日期	S0	S1	S2	S3	T0	T1	T2	T3
Date								
22/4	5.39	4.85	4.19	5.34	5.39	5.39	5.39	5.39
10/5	5.88	6.48	6.26	6.19	5.04	5.96	5.65	5.16
21/6	9.17	10.39	10.53	9.56	8.97	10.59	10.19	10.68
7/7	6.54	8.07	7.76	6.53	8.21	10.48	10.36	9.49
Mean	6.75	7.45	7.19	6.91	6.90	8.11	7.90	7.68

3 结语

水域中有机碳的含量和结构反映了水域的营养类型、生境特点、初级生产力大小和人类活动的影响。天然水体有机碳总量(TOC)一般在 $1\sim 30\text{mg/L}$ 之间,随着富营养化程度而增高。在TOC组成中DOC远多于POC。DOC/POC之比大洋海水中可达30以上,贫营养湖可达10,富营养湖降到 $5\sim 6$,肥水养鱼池可降到 $1\sim 2$ ^[24]。这是因为在富营养化过程中,随着初级生产力和浮游生物量的增高,POC不断积累而达到原有的2倍到几倍,而DOC由于周转率高,在进入和支出的动态平衡下其库储量变化不大。在POC中腐质颗粒碳(SDC)一般都超过浮游生物活体碳(PZC),BDC/PZC之比天然水体可达 $3\sim 5$,养鱼池亦在1.5以上,仅在富营养型水域的水华期或高度富营养化水体PZC会超过BDC。在浮游生物碳中,按照生态锥体的规律,浮游植物碳(PC)一般高于浮游动物碳(ZC),ZC/PC之比常在 $2\sim 32$ 之间,但在特殊水体或演替的某一阶段,这一比值可能小于1。

根据上面的研究结果,图3列出各围隔水柱有机碳库储量(mg/L)及其各组分百分比。从图可见,高青盐碱池塘TOC(7.36)、DOC/POC和BDC/PZC之比,都和上述养鱼池或富营养湖情况一致。浮游植物和浮游动物碳库的情况则完全相反,浮游动物碳远高于浮游植物碳,PC/ZC之比仅0.27。

浮游植物现存量和浮游动物相近甚至远低于浮游动物的情况在其他盐碱性水域中也常出现,如浮游植物量(mg/L)和浮游动物量(mg/L)之比内蒙的达里湖($S=5.5$)为0.83^[23],陕西的红碱沼($S=2.56$)为0.94,河口水库($S=3.75$)为0.81^[25]。前苏联的Bolshoy Shantropy湖($S=13\sim 16$)仅0.1^[26]。看来这种情况可能是很多盐碱性水域有机碳结构的一个特点。Hammer^[26]认为盐水湖浮游植物量降低与优势种的小型化有关。高青盐碱池塘也有这种情况,即 $<10\mu\text{m}$ 的浮游植物占优势^[12,13]。

放养滤食性鱼类肯定会影响到有机碳库的结构,但其作用是多方面的。鱼的滤食活动可减少一定粒级有机碳库的储量,但鱼的游泳又会促进底泥中碳的再悬浮而增加悬浮物中碳含量。围隔试验证明放养滤食性鱼类使浮游植物碳增加和浮游动物碳减少,并且鲢的作用比罗非鱼大。显然这是鲢对浮游动物的滤食压力大于罗非鱼的结果。

本实验对象是养殖鲢和罗非鱼的围隔,池水盐度不高,不投饵且少量施肥;东湖是高度富营养化的浅水湖,主养的也是鲢与滤食性鱼类,两者在灰分含量和

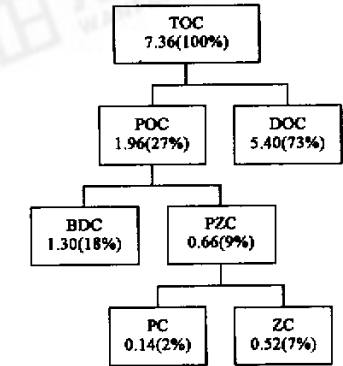


图3 池塘实验围隔各有机碳库储量(mgC/L)及其占总有机碳库储量的百分比(%)

Fig. 3 Storage of each organic carbon pool and the ratio of each pool to total organic carbon storage in the experimental enclosures

浮游生物碳占颗粒悬浮物的百分比方面相近是容易理解的。

养殖池条件和人工管理方式与盐碱鱼池有很多相似之处,两者在悬浮物结构上有些相似也很自然,但在浮游生物碳库组成上与东湖和养虾池的差异更突出了内陆盐碱池塘的特点。

参考文献

- [1] Lin W L (林婉莲), Liu X Z (林鑫洲). Elements content analysis of dominant zooplankton in Donghu Lake, Wuhan. *Acta Hydrobiologia Sinica* (in Chinese) (水生生物学报), 1985a, **9**(3): 258~263.
- [2] Lin W L (林婉莲), Liu X Z (林鑫洲). Compositions analysis of phytoplankton and in vivo determination of phytoplanktonic carbon, nitrogen and phosphorus in sediment in Donghu Lake, Wuhan. *Acta Hydrobiologia Sinica* (in Chinese) (水生生物学报), 1985b, **9**(4): 359~364.
- [3] Lin W L (林婉莲), Liu X Z (林鑫洲). Trophic structure of the seston in Donghu Lake ecosystem, Wuhan. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (In Chinese) (海洋与湖沼), 1990, **21**(5): 411~417.
- [4] Xie P (谢平). Structure and elements composition of particulate seston in Donghu Lake, Wuhan. *Acta Hydrobiologia Sinica* (in Chinese) (水生生物学报), 1996, **20**(3): 198~205.
- [5] Liu, G C (刘国才). *Metabolism and budget of organic carbon and numerical dynamics and productivity of bacteria in shrimp polyculture enclosure ecosystems* (in Chinese). Doctoral Thesis, Ocean University of Qingdao, 1998.
- [6] Zhang Z S (章宗涉), Huang X F (黄祥飞). *Study methods of freshwater plankton* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1991.
- [7] Zhang J M (张觉民), He Z H (何志辉). *Investigation Handbook of Fisheries Nature Resources inland waters* (in Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 1991.
- [8] Lawence S G, et al. Method for estimating dry weight of freshwater planktonic crustaceans from measure of length and shape. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 1987, **44**: 264~274.
- [9] Huang X F (黄祥飞), Hu C Y (胡春英). Regressive equation of body length-weight in common freshwater Cladocera. *Thesis Collections of Crustacea* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1986. **1**: 147~157.
- [10] Omori M. Weight and chemical composition of some important oceanic zooplankton in the North Pacific. *Ocean. Mar. Biol.*, 1969, **3**: 4~10.
- [11] Reynolds C S. *The ecology of freshwater phytoplankton*. London: Cambridge Univ., 1984.
- [12] Zhao W (赵文), Dong S L (董双林), Zheng W G (郑伟刚), et al. The effects of Nile tilapia on the plankton from different treatments of enclosures in saline-alkaline ponds. *Journal Zoological Research* (in Chinese) (动物学研究), 2000, **21**(2): 108~114.
- [13] Zhao W (赵文), Dong S L (董双林), Zhang Z Q (张兆琪), et al. The effects of silver carp stocking and fertilization on plankton community from enclosures in saline-alkaline ponds. *Chin. J. of Appl. Ecol.* (in Chinese) (应用生态学报), 2001, **12**(2): 299~303.
- [14] Parsons T R. Particulate organic carbon in the sea. In: Riley J P, Birkirk G eds. *Chemical Oceanography*. 2nd edit 1995, **2**: 556~573.
- [15] Sun Z Q (孙作庆), Yang H M (杨鹤鸣). Distribution and variation particulate organic carbon contents in marine water in Jiaozhou Bay. *Ocean Science* (in Chinese) (海洋科学), 1992, **2**: 52~55.
- [16] Hessen D O. Carbon metabolism in a humic lake: Pool sizes and cycling through zooplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 1990, **35**(1): 84~89.
- [17] Liu W C (刘文臣), Wang R (王荣). C/N ratio of particulate organic matters in Donghai, China. *Oceanologia et Limnologia Sinica* (in Chinese) (海洋与湖沼), 1998, **29**(5): 467~470.
- [18] Antia N J, et al. Further measurements of primary production using a large-volume plastic sphere. *Limnol. Oceanogr.*, 1963, **8**: 166~183.
- [19] Wetzel R G. *Limnology*. 2nd Edit. CBS College Publishing, The Dryden Press, 1983.
- [20] Guo L D (郭劳动), Hong H S (洪华生). Distribution and variation particulate organic carbon contents in South Taiwan Strait. In: Hong H S (洪华生), et al eds. *Study on ecosystem of upflow zone in shallow waterfront fishery between south Fujian and Taiwan* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1991. 231~239.
- [21] Lei Y Z (雷衍之), Yu S M (于淑敏), Xu J (徐捷). The studies of high production fish ponds in Heliekou, Wuxi: I aquatic chemistry and primary productivity. *Journal of fisheries of China* (in Chinese) (水产学报), **7**(3): 185~198.
- [22] Carpenter SR, et al. Impact of dissolved organic carbon, phosphorus, and grazing on phytoplankton biomass and production in experimental lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 1998, **43**(1): 73~80.
- [23] He Z H (何志辉), Xie Z H (谢祚浑), Lei Y Z (雷衍之). Studies on the hydrochemistry and hydrobiology of Dali Lake. *Acta Hydrobiologia Sinica* (in Chinese) (水生生物学报), 1983, **7**(3): 341~358.
- [24] He Z H (何志辉), Zhao W (赵文). *Aquatic Ecology for Aquaculture*. Dalian: Dalian Press, 2001.
- [25] He Z H (何志辉). *Investigation of Fisheries Resources in Yellow River Valley* (in Chinese). Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 1985.
- [26] Hammer U T. *Saline Lake Ecosystem of the World*. Junk, Dordrecht, 1986.