

曝气扰动促进高营养的饲料腐烂液中绿藻生长

王小冬, 车轩, 刘兴国, 顾兆俊, 丁艳青, 陈晓龙

Aeration disturbance promotes the growth of green algae at high nutrients level from fish feed decomposition

WANG Xiaodong, CHE Xuan, LIU Xingguo, GU Zhaojun, DING Yanqing, CHEN Xiaolong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12024/jsou.20210603489>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[上海青草沙水库生态护坡区浮游植物的群落结构](#)

Phytoplankton community structure of ecological slope protection area of Shanghai Qingcaosha reservoir

上海海洋大学学报. 2022, (2): 400 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203289>

[大型海藻对海水水族箱生态微宇宙结构及稳定性的影响](#)

Effects of macroalgae on the ecological microcosm's structure and stability of aquarium

上海海洋大学学报. 2022, (2): 421 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210203299>

[南江水库蓝藻水华应急处置前后浮游植物群落结构及环境因子变化](#)

Changes of phytoplankton community structure and environmental factors before and after emergency treatment of cyanobacteria bloom in Nanjiang reservoir

上海海洋大学学报. 2022, 31(6): 1467 <https://doi.org/10.12024/jsou.20210403387>

[扬中夹江浮游植物种群特征及其对环境因子的响应](#)

Phytoplankton community structure in Jiajiang in Yangzhong Estuary and its relation to environmental factors

上海海洋大学学报. 2019, 28(4): 607 <https://doi.org/10.12024/jsou.20180802372>

[上海市环城绿带休憩型河道浮游植物群落结构特征](#)

Structural characteristics of phytoplankton community in suburb rivers for leisure located in Green belt around City of Shanghai, China

上海海洋大学学报. 2020, 29(5): 734 <https://doi.org/10.12024/jsou.20200302960>

文章编号: 1674-5566(2023)01-0142-08

DOI:10.12024/jsou.20210603489

曝气扰动促进高营养的饲料腐烂液中绿藻生长

王小冬¹, 车 轩¹, 刘兴国¹, 顾兆俊¹, 丁艳青², 陈晓龙¹

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 为了研究饲料腐烂形成的高氮、磷营养盐条件下浮游植物的自发生长, 夏季在玻璃温室进行了以鱼类配合饲料腐烂液为营养源的实验。实验设 1 个对照组和 1 个处理组, 对照组中不曝气, 处理组在 12 d 起进行持续曝气扰动。结果表明, 曝气显著提高了水中溶解氧、pH、氧化还原电位、叶绿素 a 和浮游植物总生物量。对照组叶绿素 a 较低, 在第 10~17 天形成峰值, 处理组叶绿素 a 在第 27 天达到最高值($1\ 169.57 \pm 1\ 133.01$) $\mu\text{g/L}$, 藻生物量在第 25 天达到最高值(279.07 ± 339.83) mg/L 。第 21~31 天, 处理组中绿藻门的栅藻属(*Scenedesmus* spp.) 为优势种, 而对照组中绿藻门的衣藻属(*Chlamydomonas* spp.) 和绿球藻(*Chroococcus* sp.) 为优势种。在曝气条件下, 以鱼类配合饲料腐烂降解形成总氮、总磷质量浓度分别为 3.8~22.1、2.1~16.9 mg/L 的高营养水平, 出现绿藻门栅藻属优势。

关键词: 藻类水华; 蓝藻; 绿藻; 富营养化; 栅藻

中图分类号: X 52 **文献标志码:** A

数十年来藻类水华尤其是蓝藻门微囊藻属(*Microcystis*) 水华在全球产生了恶劣影响^[1-2]。能形成水华的藻类有多种, 除了影响广泛的蓝藻水华, 还有硅藻水华^[3]、裸藻水华^[4]等。目前可以确定多种因素相互作用导致了水华的形成^[1-2]。然而, 一定有关键因素影响和决定不同藻类水华的形成。其中得到广泛认同的是营养盐是影响不同藻类竞争的主要因素, 因为藻类水华的形成需要大量营养物质, 尤其是氮(N)和磷(P)元素用于维持足够的生物量^[1-2]。

水产养殖池塘也会大规模暴发微囊藻水华, 危害水产养殖^[5-8]。水产养殖中人工配合饲料的广泛应用存在污染水质的风险, 可能对蓝藻水华的发生起重要作用, 因此水产养殖在很多湖区、水库被限制。引起水产养殖水体富营养的主要物质来源是残余饲料和养殖对象的排泄物, 并且水产养殖水体经常利用增氧设备增氧, 对水体形成水动力扰动, 可能影响水中浮游植物。那么利

用水产配合饲料腐烂液形成高氮、磷营养盐条件时, 哪些浮游植物会自发生长? 曝气增氧会影响其中浮游植物的群落结构吗? 为了回答这 2 个问题, 在玻璃温室内利用鱼类配合饲料模拟高营养水平, 研究其中浮游植物的自发生长, 尤其在曝气扰动下形成的浮游植物优势种类, 为鱼类配合饲料引起的水体富营养及影响浮游植物生长提供基础数据, 有助于更好地调控水产养殖水体富营养及浮游植物群落结构。

1 材料与amp;方法

1.1 实验设计

2014 年 7 月 11 日至 8 月 11 日, 在一个玻璃温室中利用 6 个无色透明有机玻璃柱进行实验。玻璃温室面积为 220 m^2 , 温室顶部玻璃的遮光率约 70%。有机玻璃柱上部为直径 40 cm、高 100 cm 的圆柱体, 底部为半球体。

初始时对每个有机玻璃柱利用孔径 120 μm

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”专项(2020YFD0900502, 2019YFD0900305); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2020TD63)

作者简介: 王小冬(1981—), 女, 博士, 研究员, 研究方向为水生态环境与工程。E-mail: wangxiaodong@fmiri.ac.cn

通信作者: 刘兴国, E-mail: liuxingguo@fmiri.ac.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

的尼龙滤网包扎 260 g 鱼类沉性配合饲料和 150 g 粉碎后混合均匀的池塘干底泥混合物。其中池塘干底泥来源于上海市松江区主养团头鲂池塘的表层 10 cm 淤泥,自然风干后粉碎过 100 目筛。并各添加 1 个约 10 cm 长的鹅卵石,形成一个包裹,沉在有机玻璃柱底部。然后补充自来水,至有机玻璃柱的初始水量为 130 L。所用鱼类配合饲料为常用的蛋白质含量约 30% 的淡水鱼沉性配合饲料。

实验设 1 个对照组和 1 个处理组,每个组设 3 个重复。在实验开始时,在 6 个柱的外壁严实包裹铝箔以遮挡侧面光照。7 月 23 日(第 12 天)之前均不曝气,从 7 月 23 日(第 12 天)开始,对照组继续不曝气,处理组利用空气泵进行持续的空气曝气。处理组每个有机玻璃柱中的曝气量约 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。7 月 23 日下午将每个柱中饲料包裹取出。每个有机玻璃柱的铝箔于 7 月 24 日(第 13 天)下午移除后继续培养。

1.2 水质指标

测定的指标包括水温、溶解氧(DO)、pH、氧化还原电位(ORP)、总氮(TN)、总磷(TP)、溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)和可溶性活性磷(SRP)。

上午 09:00 左右和下午 14:00 左右分别测定水温、DO、pH 和 ORP,并且分表层(水面 5 ~ 10 cm)和底层(离底部约 15 cm)测定。用 YSI Professional plus (Yellow Springs Instrument Co., Ohio, USA) 对水温、DO、pH 和 ORP 进行原位测量。每 6 天取容器中上层水测定 N、P 指标。DTN、DTP、SRP 的测定为水样经过 $0.7 \mu\text{m}$ 孔径的 GF/F 玻璃纤维滤膜(Whatman, Maidstone, UK)过滤后与 TN、TP 一起按 GROSS 等^[9]的方法测定,SRP 用磷钼蓝法^[10]测定。

1.3 叶绿素 a 和浮游植物

实验期间用浮游植物荧光仪 Phyto-PAM (Walz GmbH, Germany) 每 2 ~ 3 天测定 1 次叶绿素 a (Chl. a)。每 3 ~ 4 天鉴定 1 次浮游植物组成,并计算生物量。浮游植物用 1% 鲁哥氏液固定,并经适当浓缩后使用奥林巴斯 CX31 (Olympus, Japan) 光学显微镜在 400 倍下进行浮游植物鉴定^[11]。使用 0.1 mL 浮游生物计数框计数浮游植物^[12]。根据细胞密度和测量的细胞大小计算浮游植物的体积,浮游植物的体积与湿质

量生物量的转换为 1 mm^3 体积等于 1 mg 湿质量生物量^[12]。

1.4 数据比较

各处理间数据的比较通过软件 SPSS 16.0 的一般线性分析模型(GLM)的针对两个因子变量(采样时间和处理)的方差分析进行。对实验各处理的水温、DO、pH、ORP、TN、TP、DTN、DTP、SRP、Chl. a 进行比较时,先开平方以增加数据齐性,浮游植物湿质量生物量进行 lg 转换后再比较^[13]。差异显著水平选择 $\alpha = 0.05$ 。采用软件 Sigmaplot 10.0 作图,其中各图所用数据形式是平均值 \pm 标准差。

2 结果

2.1 水温、DO、pH 和 ORP

实验过程中,对照组和处理组水温均为 26 ~ 36 $^{\circ}\text{C}$;上午和下午的底层水温方面,对照组和处理组之间均无显著差异($P > 0.05$);但是对照组的上午和下午的表层水温均明显高于处理组($P < 0.05$),见表 1。

对照组和处理组的 pH 范围分别为 4.76 ~ 7.59、4.71 ~ 10.42;对照组和处理组的 DO 分别为 0.02 ~ 2.34、0.06 ~ 8.90 mg/L。对照组和处理组 ORP 的范围分别为 -466 ~ -104、-489 ~ 25.8 mV。对照组的表层与底层的 DO、pH 和 ORP 无论是上午还是下午均显著低于处理组($P < 0.05$),见表 1。即曝气可以有效地增加处理组中 DO、pH、ORP,曝气促进了上下层水的均匀分布,表层的水温明显受到曝气的影响,见表 1。

2.2 氮、磷营养盐

实验期间 TN、TP、DTN、DTP 和 SRP 的范围分别为 3.8 ~ 22.1、2.1 ~ 16.9、0.8 ~ 16.6、0.2 ~ 16.3 和 0.1 ~ 15.9 mg/L(图 1)。方差分析显示对照组和处理组 TN、TP、TN: TP 之间无显著差异($P > 0.05$),而对照组的 DTN、DTN: DTP 显著低于处理组($P < 0.05$),对照组的 DTP、SRP 和 SRP: DTP 显著高于处理组($P < 0.05$)。

第 12 天对处理组开始曝气后,处理组的 DTN、DTP、SRP 和 SRP: DTP 显著高于对照组(图 1);而对照组和处理组之间的 TN、TP 质量浓度无显著差异($P > 0.05$),见图 1。

表 1 对照组和处理组的分层水温、DO、pH 和 ORP (平均值 ± 标准差)

Tab. 1 The water temperature, DO, pH, and ORP in the control and the aeration treatment in both the surface and bottom water at 09:00 A. M. and 14:00 P. M. (Mean ± SD)

指标 Index	对照组 Control	处理组 Treatment	指标 Index	对照组 Control	处理组 Treatment
09:00 表层水温 Surface water temperature at 09:00 /°C	30.1 ± 1.9 ^a	29.7 ± 1.7 ^b	09:00 表层 pH Surface pH value at 09:00	6.25 ± 0.62 ^a	7.75 ± 1.62 ^b
09:00 底层水温 Bottom water temperature at 09:00 /°C	29.8 ± 1.8 ^a	29.6 ± 1.8 ^a	09:00 底层 pH Bottom pH value at 09:00	6.20 ± 0.67 ^a	7.74 ± 1.66 ^b
14:00 表层水温 Surface water temperature at 14:00 /°C	32.4 ± 2.7 ^a	31.5 ± 2.3 ^b	14:00 表层 pH Surface pH value at 14:00	6.36 ± 0.78 ^a	7.85 ± 1.93 ^b
14:00 底层水温 Bottom water temperature at 14:00 /°C	31.0 ± 2.1 ^a	31.1 ± 2.2 ^a	14:00 底层 pH Bottom pH value at 14:00	6.22 ± 0.76 ^a	7.83 ± 1.97 ^b
09:00 表层 DO Surface DO at 09:00 /(mg/L)	0.33 ± 0.43 ^a	4.27 ± 3.05 ^b	09:00 表层 ORP Surface ORP value at 09:00 /mV	-250.20 ± 56.54 ^a	-101.06 ± 120.76 ^b
09:00 底层 DO Bottom DO at 09:00 /(mg/L)	0.29 ± 0.42 ^a	4.21 ± 3.04 ^b	09:00 底层 ORP Bottom ORP value at 09:00 /mV	-259.20 ± 56.89 ^a	-107.29 ± 127.17 ^b
14:00 表层 DO Surface DO at 14:00 /(mg/L)	0.30 ± 0.50 ^a	4.65 ± 3.13 ^b	14:00 表层 ORP Surface ORP value at 14:00 /mV	-231.74 ± 52.83 ^a	-90.29 ± 51.26 ^b
14:00 底层 DO Bottom DO at 14:00 /(mg/L)	0.28 ± 0.52 ^a	4.56 ± 3.10 ^b	14:00 底层 ORP Bottom ORP value at 14:00 /mV	-239.35 ± 48.55 ^a	-93.32 ± 54.45 ^b

注:对照组和处理组用不同字母标记时,表示差异性显著($P < 0.05$)。

Notes: The different letters between the control and the treatment indicate significant differences ($P < 0.05$).

2.3 *Chl. a* 和浮游植物

对照组的 *Chl. a* 含量在第 10 ~ 17 天达到峰值,而处理组的 *Chl. a* 含量从第 19 ~ 21 天开始持续升高。方差分析显示,对照组的 *Chl. a* 含量显著低于处理组($P < 0.05$),见图 2。

处理组的浮游植物总湿质量也显著高于对照组($P < 0.05$),见表 2,即曝气刺激了浮游植物生长(图 2、表 2)。对照组的浮游植物生物量(总湿质量)在第 12 ~ 31 天没有增加且呈下降趋势,第 12 天的量甚至高于第 21 ~ 31 天。处理组中浮游植物生物量在第 12 ~ 27 天处于持续增长状态。

对照组的优势属基本一直是四鞭藻属(*Carteria*)、衣藻属(*Chlamydomonas*)、空星藻属(*Coelastraceae*)和绿球藻属(*Chroococcus*),见表 3。而处理组第 12 ~ 17 天为衣藻属(*Chlamydomonas*)、球囊藻属(*Sphaerocystis*)、四鞭藻属(*Carteria*),第 21 ~ 31 天为栅藻属(*Scenedesmus*)、小球藻属(*Chlorella*)、衣藻属(*Chlamydomonas*),尤其以栅藻属的斜生栅藻和四尾栅藻占据明显优势(表 3)。实验中后期,对照组中出现了少量蓝藻门的平裂藻属(*Merismopedia*)细胞,处理组中也出现了少量蓝

藻,如平裂藻属、浮丝藻属(*Planktothrix*)、鱼腥藻属(*Anabaena*)等,其中浮丝藻在实验后期的处理组中还获得了一定的优势(表 3)。但对照组和处理组中均没有出现蓝藻门和绿藻门之外的种类。

3 讨论

以鱼类配合饲料为营养盐来源,当水中 TN、TP 含量分别达到 3.8 ~ 22.1、2.1 ~ 16.9 mg/L 的富营养水平时,曝气促进了饲料腐烂液中 DO、pH 和 ORP 的升高(表 1,图 2),表明曝气改变了饲料腐烂过程形成的低 DO、低 pH 的酸性环境;对照组和处理组 TN、TP、TN:TP 之间无显著差异($P > 0.05$),而对照组的 DTN、DTN:DTP 显著低于处理组($P < 0.05$),不曝气时逐渐出现绿藻生长,曝气后促进了绿藻门栅藻属大量生长(表 3),表明曝气改善了水环境的同时,还促进了溶解性氮、磷被浮游植物利用,获得更高的浮游植物生物量(表 2);对照和处理中均没有出现大量蓝藻,表明本实验条件下以鱼类配合饲料为营养盐来源时,无论是否曝气,自发生长的浮游植物优势种类均是绿藻。

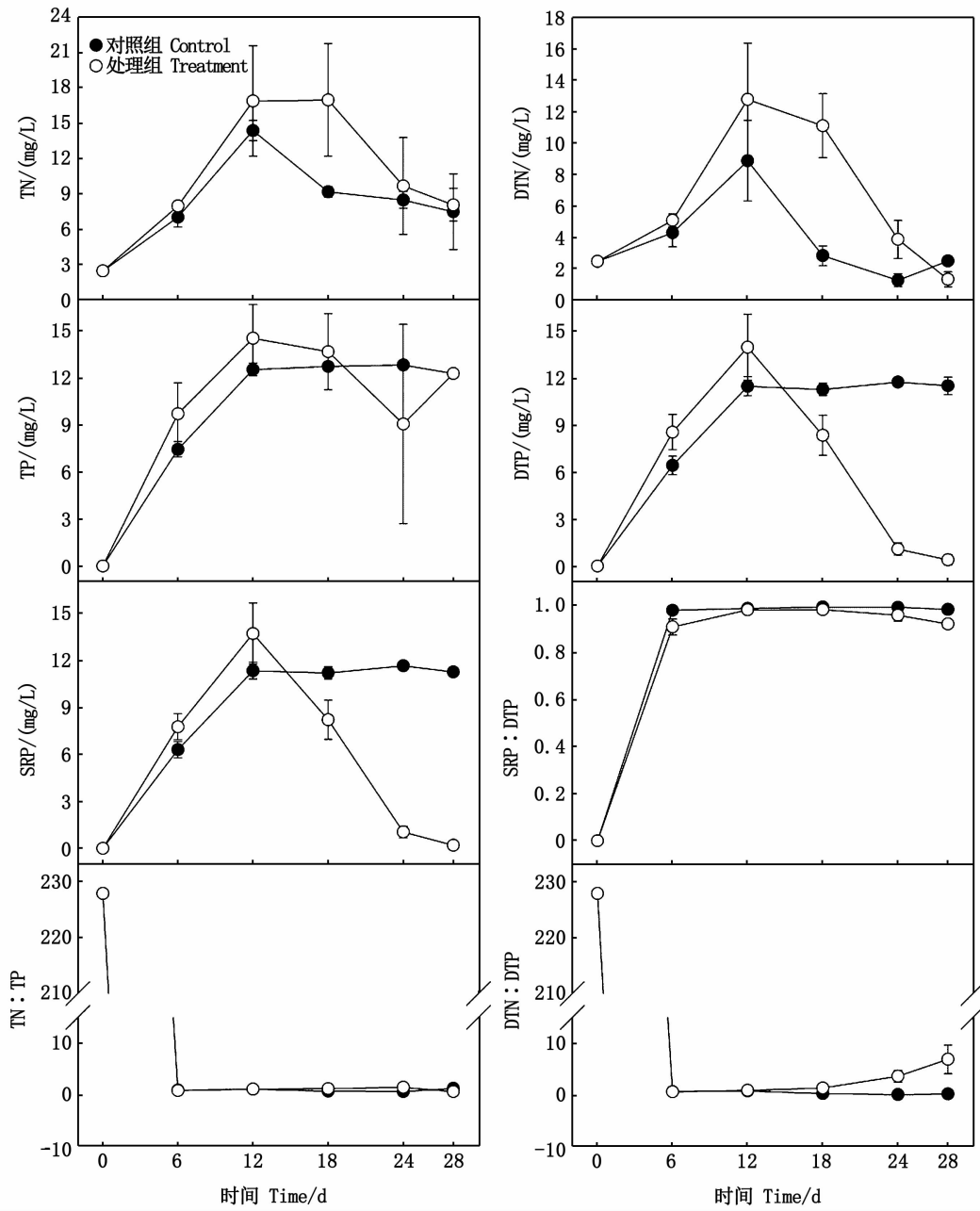


图 1 对照组和处理组的 TN、TP、DTN、DTP、SRP、SRP:DTP、TN:TP 和 DTN:DTP 含量变化
 Fig.1 Changes in TN, TP, DTN, DTP, SRP, SRP:DTP, TN:TP and DTN:DTP
 in the control and aeration treatment during the experiment

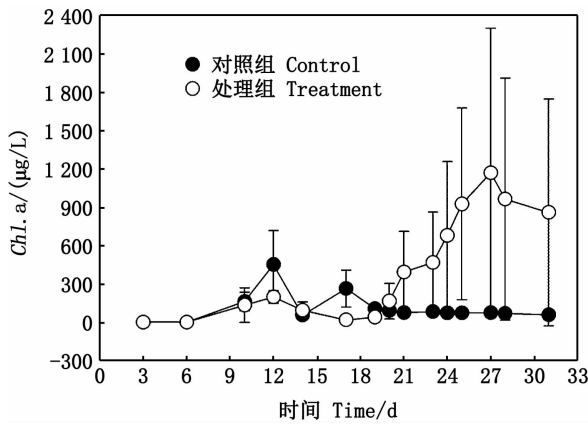


图2 对照组和处理组的 *Chl. a* 含量变化
Fig.2 Changes in *Chl. a* in the control and aeration treatment during the experiment

表2 对照组和处理组的浮游植物总湿质量
Tab.2 Total algal wet mass in the control and treatment during the experiment

时间 Day	对照组 Control / (mg/L)	处理组 Treatment / (mg/L)
0	0	0
12	16.09 ± 12.04	9.58 ± 7.93
17	8.87 ± 6.25	8.87 ± 9.67
21	5.01 ± 3.43	60.93 ± 57.11
25	3.21 ± 0.48	279.07 ± 339.83
27	3.22 ± 0.41	261.69 ± 310.27
31	3.44 ± 1.76	190.77 ± 225.92

表3 第12~31天对照组和处理组湿质量在前3位的优势属(种)及湿质量、湿质量百分比

Tab.3 The 3 dominant genera or species and the percentage of the dominant ones by wet mass in the control and the treatment from days 12 to 31

时间 Day	对照组 Control		处理组 Treatment	
	优势属(种)及湿质量 Dominant genera or species and its wet mass / (mg/L)	湿质量百分比 Percentage of the wet mass / %	优势属(种)及湿质量 Dominant genera or species and its wet mass / (mg/L)	湿质量百分比 Percentage of the wet mass / %
12	四鞭藻 <i>Carteria</i> spp. 11.81 ± 10.34,	66.00 ± 29.64	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 5.50 ± 5.00,	59.01 ± 22.15
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 3.86 ± 6.69,	15.87 ± 27.49	球囊藻 <i>Sphaerocystis</i> sp. 3.16 ± 2.88,	29.43 ± 28.95
	空星藻 <i>Coelastraceae</i> sp. 0.41 ± 0.71	18.13 ± 31.40	四鞭藻 <i>Carteria</i> spp. 0.78 ± 0.83	9.54 ± 9.88
17	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 8.09 ± 5.50,	93.70 ± 5.51	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 6.60 ± 9.26,	61.22 ± 49.25
	四鞭藻 <i>Carteria</i> spp. 0.78 ± 0.75	6.30 ± 5.51	四鞭藻 <i>Carteria</i> spp. 1.68 ± 1.63,	29.85 ± 44.15
21	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 4.77 ± 3.37,	94.37 ± 1.87	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i> 45.43 ± 66.19,	48.47 ± 44.34
	四鞭藻 <i>Carteria</i> spp. 0.17 ± 0.03,	4.57 ± 2.56	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 10.20 ± 14.01,	33.32 ± 28.86
	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp. 0.05 ± 0.04	0.80 ± 0.39	小球藻 <i>Chlorella</i> spp. 4.00 ± 4.95	15.36 ± 14.09
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 2.43 ± 0.83,	76.63 ± 26.20	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i> 230.38 ± 372.05,	61.76 ± 47.97
25	绿球藻 <i>Chroococcus</i> sp. 0.77 ± 0.98,	23.02 ± 26.65	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 32.73 ± 39.10,	21.57 ± 36.62
	栅藻 <i>Scenedesmus</i> sp. 0.01 ± 0.01	0.20 ± 0.35	小球藻 <i>Chlorella</i> spp. 3.66 ± 6.34	7.85 ± 13.60
27	绿球藻 <i>Chroococcus</i> sp. 1.61 ± 0.63,	50.03 ± 19.31	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i> 219.61 ± 340.25,	61.76 ± 47.97
	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 1.61 ± 0.63	49.97 ± 19.31	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 27.24 ± 42.70,	21.57 ± 36.62
31	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 1.54 ± 1.01,	43.31 ± 10.56	衣藻 <i>Chlamydomonas</i> spp. 4.89 ± 4.78	6.24 ± 5.58
	翼膜藻 <i>Pteromonas</i> sp. 0.96 ± 1.09,	22.37 ± 20.26	斜生栅藻 <i>Scenedesmus obliquus</i> 151.16 ± 251.03,	42.79 ± 49.52
	绿球藻 <i>Chroococcus</i> sp. 0.92 ± 0.32	34.00 ± 21.11	四尾栅藻 <i>Scenedesmus quadricauda</i> 32.93 ± 55.17,	30.83 ± 41.29
			浮丝藻 <i>Planktothrix</i> sp. 3.20 ± 5.54	2.58 ± 4.46

注:对照组中第17和27天浮游植物共有2个属。

Notes: The number of total genera in the control on day 17 and 27 was 2.

本实验没有设置不同营养盐梯度,用猪粪污水设置不同营养盐梯度的实验^[14](其没有设置曝气增氧的措施),发现不同营养盐含量处理中自发生长的均是绿藻,绿藻能在富营养的养猪废水中(其实验初始 TN、TP 含量分别为 10.8 ~ 44.27、0.67 ~ 2.37 mg/L)形成优势,优势种包括衣藻 (*Chlamydomonas* sp.)、小球藻 (*Chlorella*

sp.)和纤维藻 (*Ankistrodesmus* sp.),但无蓝藻出现^[14]。有研究认为,营养盐的比例决定了贫营养环境中浮游植物的物种组成,而营养盐含量决定了富营养环境中浮游植物的物种组成^[15]。本实验中对照和处理间 TN: TP 无显著差异 ($P > 0.05$),对照组的 DTN: DTP 显著低于处理组 ($P < 0.05$),因此难以发现氮、磷营养盐比例在本实验

中影响浮游植物的组成。

本实验的最大特点是氮、磷营养盐水平高,其中 TN、TP 质量浓度分别高达 3.8~22.1、2.1~16.9 mg/L,这种高营养盐含量的作用可能超过了营养盐比例及其他因素,而更有利于绿藻的生长。一般池塘养殖水体中 TN、TP 的含量低于本实验,比如主养草鱼池塘中 TN、TP 的质量浓度变化范围分别为 1~2、0.1~0.3 mg/L^[16]。随着水体氮、磷营养盐含量升高,往往更容易出现绿藻优势^[17-22]。在太湖进行的添加氮、磷的围隔实验表明,当 TN、TP 分别从 3.1、0.164 mg/L 提高到 49.6、2.624 mg/L 时,初始的蓝藻优势转变为绿藻优势^[17]。JENSEN 等^[18]报道绿藻在超富营养化湖泊中占优势。CHEN 等^[19]发现 1996 年和 1997 年太湖出现了不寻常的绿藻较多的现象,而这两年 TP (0.09~0.12 mg/L) 水平较高。富营养的上海城市公园人工湖泊中也是绿藻占优势^[20]。另外有研究认为绿藻往往对氮和光有较高的需求,在高氮含量和强光照条件下可以获得较高丰度^[21-22]。

本实验采取的水动力扰动措施——曝气促进了绿藻大量生长,就水动力扰动对蓝藻生长的研究比较多^[23-24],并主要针对湖泊蓝藻水华进行。水产养殖中,随着养殖密度提高,对普遍使用增氧机或其他水动力扰动的水产养殖池塘中浮游植物群落结构的研究也很多,但是对其中浮游植物群落结构变化的机制还不是很清楚。张晓蕾等^[25]研究了池塘循环流水养殖模式中浮游植物群落结构的时空变化,发现在循环水系统中 TN、TP 平均值分别高达 8~9.4 mg/L 时,水中绿藻门种类数量最多(54 种),其次为蓝藻门(18 种),再次为硅藻门(16 种);但是优势种类中是蓝藻门占比最大(9 种),绿藻门次之(5 种),绿藻门中的双尾栅藻和四尾栅藻是优势种类。而 2004—2005 年广州市一个富营养化浅水池塘的 TN、TP 平均质量浓度分别高达 4.230、1.456 mg/L 时,出现了蓝藻水华,其优势种类为微囊藻(*Microcystis*)^[26]。还有很多情况以绿藻为优势,如 NAPIÓRKOWSKA-KRZEBIETKE 等^[27]发现夏季的 2 个池塘(TN 平均质量浓度分别为 1.97 和 2.40 mg/L)中浮游植物以绿藻门的空星藻属(*Coelastrum*)、无胶集球藻属(*Coenococcus*)、盘星藻属(*Pediastrum*)、栅藻属(*Scenedesmus*)和隐藻

门为主。

本实验的营养盐来源为鱼类配合饲料,水中溶解性营养盐来源于细菌作用下腐烂降解的配合饲料,类似于猪粪污水腐烂降解释放营养盐^[14],引入曝气扰动后并没有促进蓝藻大量生长,这可能由于所处的阶段是有机态物质腐烂释放营养盐、并出现浮游植物生长的初级阶段,不同于野外水体中的浮游植物已经经历了较长时间的演替。这反映出鱼类配合饲料作为池塘水体营养盐来源时,鱼类配合饲料并不直接促成池塘中蓝藻大量生长。水产养殖池塘或者湖泊中生物因素和非生物因素均比本实验复杂,野外水体蓝藻水华的发生应该还与其他因素有关。本实验的高度富营养研究系统在曝气后出现大量栅藻生长,换个角度,这为高浓度栅藻的快速培养提供了一种方法。由于本实验持续的时间仅 1 个月,时间的长度不足以发现浮游植物的更多演替规律。实验中后期,处理组中也出现了少量蓝藻,其中浮丝藻在实验后期的处理组中还获得了一定的优势(表 3)。如果实验时间延长,可能会演替出其他藻类优势,比如对武汉市解放公园池塘的研究表明,该公园池塘的 TN、TP 的平均值分别为 6.1 和 1.79 mg/L,其在 2000 年 5 月中旬—10 月中旬暴发了微囊藻水华,但是在微囊藻水华发生之前的 2—4 月出现了绿藻生长^[28]。天然池塘中影响浮游植物群落结构演替的因素更多,更有利于浮游植物群落结构的演替。需要更多实验探索浮游植物在更长时间尺度上的演替。

4 结论

鱼类配合饲料腐烂分解形成 TN、TP 分别为 3.8~22.1、2.1~16.9 mg/L 的高营养盐水平时,曝气扰动改善了饲料腐烂过程形成的低 DO、低 pH 的酸性环境,促进了浮游植物生长和营养盐的循环利用,浮游植物以绿藻门栅藻属为优势。

参考文献:

- [1] PREPAS E E, CHARETTE T. Worldwide eutrophication of water bodies: causes, concerns, controls[M]//HOLLAND H D, TUREKIAN K K. Treatise on Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 2003: 311-331.
- [2] PAERL H W, OTTEN T G. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls[J]. Microbial Ecology, 2013, 65(4): 995-1010.

- [3] 李建, 尹炜, 贾海燕, 等. 汉江中下游硅藻水华研究进展与展望[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(5): 136-144.
LI J, YIN W, JIA H Y, et al. Research progress on diatom blooms in the Middle and Lower Hanjiang River: review and advances[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(5): 136-144.
- [4] 赵玉珩, 杨红生, 乔志刚, 等. 鱼池中一种裸藻水华的研究[J]. 水生生物学报, 1994, 18(2): 186-188.
ZHAO Y H, YANG H S, QIAO Z G, et al. Studies on the "water bloom" of *Euglena* sp. in fish ponds[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1994, 18(2): 186-188.
- [5] SEVRIN-REYSSAC J, PLETIKOSIC M. Cyanobacteria in fish ponds[J]. Aquaculture, 1990, 88(1): 1-20.
- [6] 姚雁鸿, 何文辉, 余来宁. 池塘蓝藻水华的产生及对养殖的危害[J]. 江西农业学报, 2007, 19(4): 98-100.
YAO Y H, HE W H, YU L N. Mechanism of forming of cyanobacteria bloom and its effects on aquaculture[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2007, 19(4): 98-100.
- [7] 孙志伟, 邱丽华, 曹煜成, 等. 蓝藻水华对水产养殖业影响的研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(1): 231-235.
SUN Z W, QIU L H, CAO Y C, et al. Research progress on the effect of cyanobacteria bloom on aquaculture [J]. Ecological Science, 2017, 36(1): 231-235.
- [8] 李大命, 周军, 唐晟凯, 等. 河蟹养殖池塘微囊藻水华毒性及其光合作用活性特征[J]. 湖泊科学, 2015, 27(1): 113-118.
LI D M, ZHOU J, TANG S K, et al. Toxicity and photochemical activity of *Microcystis* bloom in crab cultivation pond[J]. Journal of Lake Sciences, 2015, 27(1): 113-118.
- [9] GROSS A, BOYD C E. A digestion procedure for the simultaneous determination of total nitrogen and total phosphorus in pond water[J]. Journal of the World Aquaculture Society, 1998, 29(3): 300-303.
- [10] American Public Health Association (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater[M]. 19th ed. Washington, DC: American Public Health Association, 1995.
- [11] 胡鸿钧, 魏印心. 中国淡水藻类—系统、分类及生态[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 23-903.
HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006: 23-903.
- [12] WANG X D, QIN B Q, GAO G, et al. Nutrient enrichment and selective predation by zooplankton promote *Microcystis* (Cyanobacteria) bloom formation[J]. Journal of Plankton Research, 2010, 32(4): 457-470.
- [13] UNDERWOOD A J. Experiments in ecology: Their logical design and interpretation using analysis of variance[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 189-192.
- [14] 许海, 刘兆普, 杨林章, 等. 猪粪污水浮游植物群落与成因研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(6): 1576-1580.
XU H, LIU Z P, YANG L Z, et al. Development of phytoplankton community in pig manure wastewater and potential causes of algal dominance[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(6): 1576-1580.
- [15] BRAUER V S, STOMP M, HUISMAN J. The nutrient-load hypothesis: patterns of resource limitation and community structure driven by competition for nutrients and light[J]. The American Naturalist, 2012, 179(6): 721-740.
- [16] 季英杰, 邓岗, 陈杰玉, 等. 发酵有机肥对主养草鱼池塘水质调控效果研究[J]. 水生生物学报, 2018, 42(1): 171-181.
JI Y J, DENG M, CHEN J Y, et al. The effects of fermented organic fertilizer on water quality in polyculture ponds dominated with grass carp[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2018, 42(1): 171-181.
- [17] MA J R, QIN B Q, PAERL H W, et al. Green algal over cyanobacterial dominance promoted with nitrogen and phosphorus additions in a mesocosm study at Lake Taihu, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(7): 5041-5049.
- [18] JENSEN J P, JEPPESEN E, OLRİK K, et al. Impact of nutrients and physical factors on the shift from cyanobacterial to chlorophyte dominance in shallow Danish lakes [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1994, 51(8): 1692-1699.
- [19] CHEN Y W, QIN B Q, TEUBNER K, et al. Long-term dynamics of phytoplankton assemblages: *Microcystis*-domination in Lake Taihu, a large shallow lake in China[J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(4): 445-453.
- [20] 王寿兵, 孙娜, 陈建军. 上海城市公园人工湖泊浮游植物调查及其富营养化评价[J]. 复旦学报(自然科学版), 2004, 43(6): 972-976.
WANG S B, SUN N, CHEN J J. Phytoplankton investigation and eutrophication assessment of man-made lake in garden of Shanghai City [J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2004, 43(6): 972-976.
- [21] RICHARDSON K, BEARDALL J, RAVEN J A. Adaptation of unicellular algae to irradiance: an analysis of strategies [J]. New Phytologist, 1983, 93(2): 157-191.
- [22] LITCHMAN E, KLAUSMEIER C A. Trait-based community ecology of phytoplankton [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 615-639.
- [23] 王小冬, 刘兴国, 顾兆俊, 等. 曝气对蓝藻门微囊藻属水华形成过程的影响[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 29-37.
WANG X D, LIU X G, GU Z J, et al. Effect of aeration on formation of cyanobacterial (*Microcystis* spp.) blooms[J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(2): 29-37.
- [24] ZHU G W, QIN B Q, GAO G. Direct evidence of phosphorus outbreak release from sediment to overlying water in a large shallow lake caused by strong wind wave disturbance [J].

- Chinese Science Bulletin, 2005, 50(6): 577-582.
- [25] 张晓蕾, 王强, 张国奇, 等. 池塘循环流水养殖模式中浮游植物群落结构的时空变化研究[J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 36-45.
- ZHANG X L, WANG Q, ZHANG G Q, et al. Spatial variation of phytoplankton community structure of in-pond raceway system[J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(3): 36-45.
- [26] 蔡建楠, 潘伟斌, 王建华, 等. 鲢和奥尼罗非鱼对池塘蓝藻水华及水质的影响[J]. 水生态学杂志, 2008, 1(5): 56-61.
- CAI J N, PAN W B, WANG J H, et al. Impact on cyanobacteria blooms and water quality by Silver Carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and Tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) in one eutrophic shallow pond[J]. Journal of Hydroecology, 2008, 1(5): 56-61.
- [27] NAPIÓRKOWSKA-KRZEBIETKE A, HUTOROWICZ A, TUCHOLSKI S. Dynamics and structure of phytoplankton in fishponds fed with treated wastewater[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2011, 20(1): 157-166.
- [28] 程凯, 赵以军, 许敏, 等. 武汉市解放公园池塘的微囊藻水华及其毒性变化的生态研究[J]. 自然科学进展, 2001, 11(9): 921-928.
- CHENG K, ZHAO Y J, XU M, et al. Ecological study on *Microcystis* bloom and its toxicity in the pond of Jiefang Park in Wuhan city[J]. Progress in Natural Science, 2001, 11(9): 921-928.

Aeration disturbance promotes the growth of green algae at high nutrients level from fish feed decomposition

WANG Xiaodong¹, CHE Xuan¹, LIU Xingguo¹, GU Zhaojun¹, DING Yanqing², CHEN Xiaolong¹

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;
2. School of Resources and Geoscience, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study what kinds of phytoplankton can grow spontaneously at high nitrogen and phosphorus levels formed from compound fishing feed decomposition, an experiment was carried out in a greenhouse during summer. The experiment included a control group with no aeration and a treatment group aerated continuously from day 12. The results revealed that the aeration significantly improved dissolved oxygen, pH, oxidation reduction potential values, chlorophyll a, and total algal biomass in the water. Chlorophyll a in the control was low but formed a peak from days 10 to 17, while that in the treatment reached its highest value of $(1\ 169.57 \pm 1\ 133.01)$ $\mu\text{g/L}$ on day 27, and the highest algal biomass was (279.07 ± 339.83) mg/L on day 25. Green algae particularly *Scenedesmus* spp. dominated in the treatment, and green algae particularly *Chlamydomonas* spp. and *Chroococcus* sp. dominated in the control, from days 21 to 31. Therefore, green algae dominated under aeration at high nutrient level of 3.8–22.1 mg/L total nitrogen and 2.1–16.9 mg/L total phosphorus, which was derived from decomposing compound fish feed.

Key words: algal bloom; cyanobacteria; green algae; eutrophication; *Scenedesmus*