

碳源添加方式对循环水养殖系统中微生物悬浮生长反应器水处理的影响

刘文畅¹, 谭洪新^{1,2,3*}, 罗国芝^{1,2,3}, 陈伟¹, 张南南¹,
于永霞¹, 姚妙兰^{1,2}, PIMPRON Pronapinyakun¹

(1. 上海海洋大学, 上海水产养殖工程技术研究中心, 上海 201306;

2. 上海海洋大学, 农业农村部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;

3. 上海海洋大学水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 采用中试规模的循环水养殖系统, 对比研究碳源连续添加的微生物悬浮生长反应器(SGR-Con)和碳源分次添加反应器(SGR-Sev)的水处理效果。典型反应周期内的溶解性有机碳浓度变化, SGR-Con反应区处于较高的稳定水平, SGR-Sev在反应周期的第0小时至碳源瞬时添加时快速上升至SGR-Con的水平, 并且在反应周期的第4小时以后降至较低的稳定水平。实验期间, SGR-Sev反应区和沉淀区的溶解氧含量分别显著高于SGR-Con的反应区和沉淀区; 2个反应器的反应区pH无显著差异, 沉淀区pH在2个反应器之间亦无显著差异。碳源分次添加的方式显著提高了反应器的脱氮效果, SGR-Sev对硝氮和总氮的去除率、出水碱度分别可达 $63.91\% \pm 14.31\%$ 、 $64.07\% \pm 12.11\%$ 和 (278.18 ± 80.33) mg/L。相较于SGR-Con, SGR-Sev的出水总氨氮和亚硝氮浓度较高。反应器采用碳源分次添加的方式可使絮团具有良好的沉降性能。研究表明, 微生物悬浮生长反应器宜采用碳源分次添加的方式。

关键词: 碳源添加方式; 微生物悬浮生长反应器; 循环水养殖系统; 水处理

中图分类号: S 959

文献标志码: A

水产养殖为人类供应了一半以上的水产品, 并且需求量仍在增长, 因此水体的重复使用和饵料资源的节约受到可持续水产养殖发展的广泛关注^[1-3]。生物絮团技术(biofloc technology, BFT)使进行水处理的微生物悬浮式的生长, 与养殖对象处于同一空间, 亦可称为原位生物絮团养殖技术^[4-5]。BFT额外添加碳源, 将养殖污染物转化为微生物生物量(絮团), 通过养殖对象的摄食实现营养物质的重复利用, 进而节约饵料资源^[4-6]。不同于BFT, 在传统的循环水养殖系统(recirculating aquaculture systems, RAS)中, 反应器的微生物膜附着在填料上生长和处理污染物, 与养殖对象处于不同空间(异位), 养殖水体可以长期重

复使用^[7-9]。BFT和RAS养殖系统及模式均被认为是可持续水产养殖发展的可选方向^[1,8]。

近年的研究表明, BFT亦可向养殖单元减少或者不额外添加碳源, 通过硝化作用将对养殖动物有毒有害的总氨氮(total ammonia nitrogen, TAN)和亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)转化为硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)^[10-13]。原位BFT养殖系统, 单个养殖周期的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 终末浓度可达250 mg/L以上^[6], 在未经脱氮前处理的、水体重复使用的第二个养殖周期中可高达800 mg/L以上^[10]。虽然低浓度的硝氮对鱼虾几乎无毒, 但是中等以上的浓度(30~60 mg/L)可对某些养殖对象产生慢性毒性^[9]。由于异养的厌氧反硝化与养殖对象生存所需的好氧条件相悖, 因此原位BFT

收稿日期: 2018-04-24 修回日期: 2018-11-20

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701700)

通信作者: 谭洪新, E-mail: hxtan@shou.edu.cn

适宜借鉴RAS,采用异位的生物反应器进行脱氮处理^[7,9]。相关实验室规模的研究表明,基于BFT的微生物悬浮生长反应器可以处理RAS废水中的TAN和NO₃-N,可以用收获的絮团投饲水产动物^[14-15]。本课题组在前期实验室规模的研究基础上^[14],构建了中试规模的基于BFT反应器的RAS(BFT-RAS),反应器主要通过同化作用去除TAN,通过好氧反硝化和厌氧反硝化去除NO₃⁻-N^[16]。

碳源的添加方式是反应器运行效果的影响因素之一。相较于连续添加,分次添加碳源的方式促进了胞内物质在微生物体内的积累^[17]。分次添加碳源能够提高有机物质的反应速率和总氮(TN)去除率,同时保持较高的硝化反硝化速率^[18]。在处理以氨氮为主的人工配水时,采用连续添加碳源的方式,序批式反应器(sequencing batch reactor, SBR)中氨氮的下降速率大于分次添加碳源的方式,表明采用分次添加碳源的方式有利于提高反硝化效率^[19]。

实验采用中试规模的BFT-RAS系统,在养殖单元维持一定浓度的微生物生物量和悬浮物质,在不额外添加碳源的条件下进行原位硝化水处理。比较碳源连续添加(suspended growth reactor under continuous carbon resource feeding, SGR-Con)和碳源分次添加反应器(suspended growth reactor under several steps carbon resource feeding, SGR-Sev)对以硝氮为主的实际养殖污水的处理效果,为提高BFT-RAS中微生物悬浮生长反应器的脱氮效果和稳定运行提供参考。

1 材料与方法

1.1 基于微生物悬浮生长反应器的RAS

中试规模的实验系统设有1个碳源连续添加的微生物悬浮生长反应器和1个碳源分次添加的微生物悬浮生长反应器(图1)。反应器高225 cm,内径120 cm。反应器中部设有1个宽120 cm,高210 cm的中隔板,中隔板距离反应器底部15 cm,将反应器分为反应区和沉淀区2个部分。在反应器底部的沉淀区设置导泥板,导泥板与反应器底部呈30°夹角。反应器工作水位高205 cm,工作体积为2.21 m³。其中,反应区工作体积1.16 m³,沉淀区工作体积1.05 m³。反应区底部设有1个直径为20 cm的刚玉曝气石,曝气流量1.0 m³/h,为

生物絮团提供搅拌水流和氧气。反应器由1台离心泵(0.75 kW,总流量4 m³/h)提供进水,离心泵的进水管与养殖单元的缓冲池连接,出水管分为3路支管,其中2路支管分别连接在2个反应器的进水口(进水流量均为0.18 m³/h),另外的1路支管直接连接上层养殖槽,每路支管均设有流量调节阀和流量计。养殖槽和反应器的反应区预先接种生物絮团,反应区的浑浊反应液经沉淀区沉淀后,絮团污泥通过导泥板自动回流或者使用刷子推动重回反应区,上清液经出水口流到上层养殖槽。如此,养殖用水经过反应器的处理后实现循环使用。

养殖单元由上层养殖槽、中层养殖槽和下层缓冲池组成,通过管道串联。养殖槽和缓冲池分别长1 000 cm和180 cm,宽100 cm,高45 cm。每个养殖槽设有4个直径为1 m的纳米曝气盘,缓冲池设有1个曝气盘,为养殖单元提供氧气和搅拌水流,防止颗粒物质沉淀积累。养殖槽工作水深22 cm,缓冲池工作水深20~40 cm,养殖槽和缓冲池的工作体积总和为4.76~5.12 m³。

1.2 实验设计与养殖管理

接种生物絮团 实验开始前2天,向每个养殖槽和反应器的反应区接种500 L收集自本系统前期运行过程中的多余絮团。接种絮团的初始特征:总悬浮固体物质(total suspended solids, TSS)3 979 mg/L、污泥体积指数(sludge volume index, SVI30)162 mL/g、TN 197.45 mg/L、NO₃⁻-N 75.48 mg/L、NO₂⁻-N 0.65 mg/L、TAN 2.74 mg/L。随后,向各区域加入经过曝气处理的自来水至工作水位。实验正式开始前,循环泵工作,但是反应器进水阀门关闭而没有进水,仅使养殖单元上中下层的水体循环,各曝气装置正常供气。

实验期间养殖管理 实验开始前1天,上层和中层养殖槽放养花鳗鲡(*Anguilla marmorata*)总计332尾。花鳗鲡个体质量(814.59±202.09) g,每个养殖槽鱼体总质量一致,放养密度为61.46 kg/m³。实验正式开始后,每个养殖槽每天分2次投喂总质量0.5 kg的鳗鲡配合饲料(水分10%、粗蛋白40%、粗脂肪4%、粗灰分17%,福建高农特种饲料有限公司)。实验期间,养殖单元的水温为(29.54±1.75) °C,溶解氧为(6.94±0.35) mg/L, pH为7.90±0.26。实验期间养殖单元为反应器提

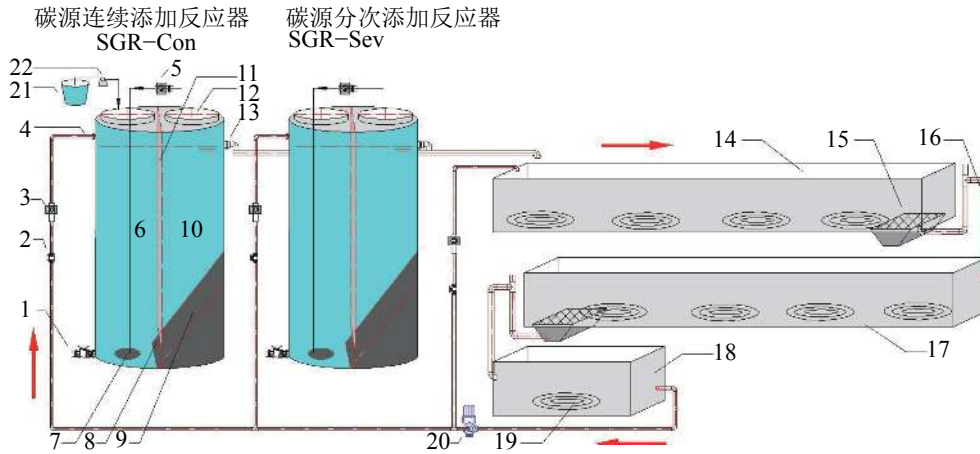


图1 循环水养殖系统中碳源连续添加和碳源分次添加的微生物悬浮生长生物反应器示意图

1. 絮团排放口, 2. 阀门, 3. 流量计, 4. 进水口, 5. 气体阀门和流量计, 6. 反应区, 7. 刚玉曝气石, 8. 絮团回流口, 9. 导泥板, 10. 沉淀区, 11. 中隔板, 12. 观察孔, 13. 出水口, 14. 上层养殖槽, 15. 格栅, 16. 连接管, 17. 中层养殖槽, 18. 底层缓冲池, 19. 曝气盘, 20. 循环泵, 21. 碳源桶, 22. 蠕动泵

Fig. 1 Schematic diagram of suspend growth reactors under continuous (SGR-Con) and several steps (SGR-Sev) carbon resource feeding methods in a recirculating aquaculture system

1. bioflocs outlet, 2. valve, 3. flowmeter, 4. water influent, 5. gas flowmeter and valve, 6. reaction zone, 7. diamond spar airstone, 8. bioflocs backing orifice, 9. bioflocs guiding plate, 10. settling zone, 11. clapboard, 12. observation port, 13. water effluent, 14. upper culture tank; 15. fence, 16. connection pipe, 17. middle culture tank, 18. bottom buffer tank, 19. aeration plate, 20. pump, 21. carbon bucket, 22. peristaltic pump

供进水。

实验设计 SGR-Con设有1个工作容积为12 L的碳源桶和1个蠕动泵(型号KCP3, 卡默尔流体科技有限公司), 调节蠕动泵的工作流量为1 L/h, 实验期间始终连续地向反应区添加碳源。碳源桶每日一水葡萄糖(有机碳含量35.69%)作为碳源, 分2次, 每次用12 L水体溶解后加入碳源桶。SGR-Sev无上述碳源连续添加的装置, 仅在每个水处理周期的进水期结束后, 一次性瞬时地向反应区添加碳源。在前期研究中, 反应器在采用连续进出水运行的过程中, 会发生絮团从出水口流出的“洗出”现象^[16], 本次研究期间为减少其发生, 采用序批式进出水的方式。反应器运行周期为24 h: 第0~2小时为进水期, 打开反应器进水阀门(0.18 m³/h)向反应区进水, 同时出水自沉淀区流出; 第2小时, 关闭2个反应器的进水阀门, 快速地向SGR-Sev的反应区添加碳源; 第2~24小时为反应期, 进行水处理。实验期间, 监测和计算反应器进水总无机氮(dissolved inorganic carbon, DIN)的浓度及质量, 即TAN、NO₂-N和NO₃-N之和, 参考近年的报道^[12, 16, 20], 按溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)与DIN之比为12(W/W)额外添加碳源。2个反应器在每个水处理周期的进水总体积和碳源添加总质量一致。

实验期间控制SGR-Con和SGR-Sev的反应区絮团浓度TSS分别为(1251±204) mg/L和(1 326±272) mg/L($P>0.05$, $n=30$)。具体调控方法: 当TSS超过1 200 mg/L, 从反应器的反应区泵出适量生物絮团浑浊液至聚丙烯桶(400 L), 静置1 h, 取上清液泵回反应区。实验期间系统水温(T)如表1所示。

1.3 指标测定方法

实验期间的每周第1小时取水样; 实验第57、58和59天监测反应器在典型周期的水质动态, 分别在每个周期的第0、1、2(碳源已分次添加)、4、6、8、12、18、24小时取水样。TSS、TN、碱度(以CaCO₃计)直接采样测定^[21], TSS采用重量法测定; 以英霍夫锥形管取1 000 mL反应区絮体浑浊液, 静置沉淀30 min, 测定絮体体积(FV30), 以FV30与TSS之比计算污泥体积指数(sludge volume index, SVI30)。水样经过滤(0.45 μm)后, 测定TAN、NO₂-N和NO₃-N; 采用元素分析仪(型号Multi N/C 2100, 德国耶拿分析仪器集团公司)测定DOC。

T、DO和pH直接使用Multi 3430多参数水质测量仪测定(德国WTW公司)。测定时间: 实验期间的每周第1小时; 实验第57、58和59天的

表 1 基于微生物悬浮生长生物反应器的循环水养殖系统中的温度(T)、溶解氧(DO)和pH 值

Tab. 1 Overall statistics of water temperature (T), dissolved oxygen (DO) and pH of recirculating aquaculture system based on suspended growth reactors

项目 parameters	进水 influent	反应器反应区 reaction zone		反应器沉淀区 settling zone	
		碳源连续添加 SGR-Con	碳源分次添加 SGR-Sev	碳源连续添加 SGR-Con	碳源分次添加 SGR-Sev
温度/°C T	29.59±1.76	29.76±1.95	29.49±2.24	29.75±1.98	29.66±2.22
溶解氧/(mg/L) DO	6.85±0.60 ^a	5.02±1.05 ^c	5.96±0.92 ^b	2.97±1.68 ^c	3.89±1.72 ^d
pH	7.84±0.31 ^a	7.41±0.90 ^c	7.76±0.17 ^b	7.33±0.17 ^c	7.57±0.15 ^b

注: 数值表示为平均值±标准差, 同行不同上标小写字母表示数值差异显著(P<0.05)

Notes: values represent mean±SD. Values in the same row with different lowercase superscript letters are significantly different (P<0.05)

每周期第0、1、2(碳源未添加)、2(碳源已分次添加)、4、6、8、12、18、24 h。

1.4 数据分析

使用SPSS 19.0软件对实验期间的数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA), 当差异显著时再使用Duncan氏法进行多重比较, 显著性水平取P<0.05。

2 结果

2.1 DOC、DO和pH的变化

反应器各区域的DO和pH均显著低于进水(养殖单元)(表1)。SGR-Sev反应区的DO显著高于SGR-Con, 沉淀区同样如此。2个反应器反应区的pH无显著差异, 沉淀区pH在反应器之间亦无显著差异。

在典型周期内, SGR-Con的反应区的溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)处于较高的稳定水平, 并且在水处理周期的第4~24小时高于SGR-Sev的反应区(图2); SGR-Sev的反应区DOC在第0小时至碳源瞬时添加时快速上升至SGR-Con的水平, 第4小时后降至较低的稳定水平。与SGR-Con相比, SGR-Sev的DO和pH波动的范围较大(图3)。碳源分次添加的瞬间, 反应区DO快速降至缺氧水平, 随后在2 h内快速回升, 在水处理周期的第18小时回升至原有水平。反应区pH亦在碳源分次添加的瞬间从7.64±0.04快速下降至7.25±0.03, 随后回升至原有水平。除此之外, SGR-Sev的各区域DO和pH均高于SGR-Con的相同区域。

2.2 水处理效果

实验期间的水处理统计结果表明, 反应器

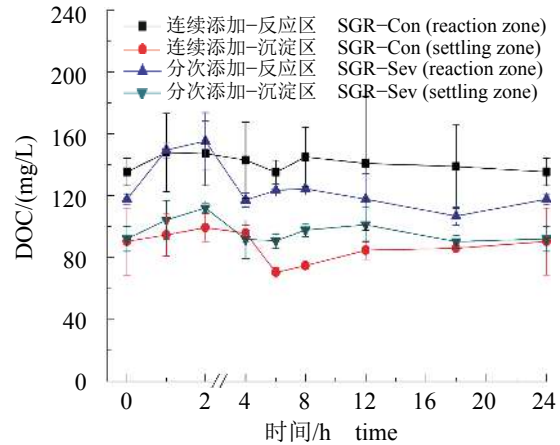


图 2 典型周期内反应区和沉淀区DOC的动态变化

Fig. 2 Dynamics of DOC in the reaction zone and settling zone during typical cycles (n=3)

对NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TAN和TN均有去除效果, 并且反应器出水的碱度显著高于进水(表2)。反应器出水的TSS浓度显著低于进水、出水DOC低于进水(P>0.05), 上述结果表明反应器有利于控制养殖单元TSS处于较低的水平, 添加碳源不会向养殖单元额外引入有机污染。SGR-Sev对NO₃⁻-N的去除率、TN的去除率和出水碱度分别为63.91%±14.31%、64.07%±12.11%和(278.18±80.33) mg/L, 并且都显著高于SGR-Con。实验期间, 花鳉可以较好的生长, 养殖槽内其终末密度为66.61 kg/m³, 成活率为95.48%(表3)。

典型周期内, SGR-Con反应区的NO₃⁻-N和TN在进水阶段持续上升, 随后在反应期下降, 同时NO₂⁻-N持续处于较低的水平(图4)。SGR-Sev的反应区NO₃⁻-N在进水期首先上升; 碳源分次添加后, DO和NO₃⁻-N快速下降, 并且NO₂⁻-N快速上升, 为反硝化的第一阶段; 从反应期第4小时开始, NO₂⁻-N浓度降低, 并且伴随着TN的下降, 表现为

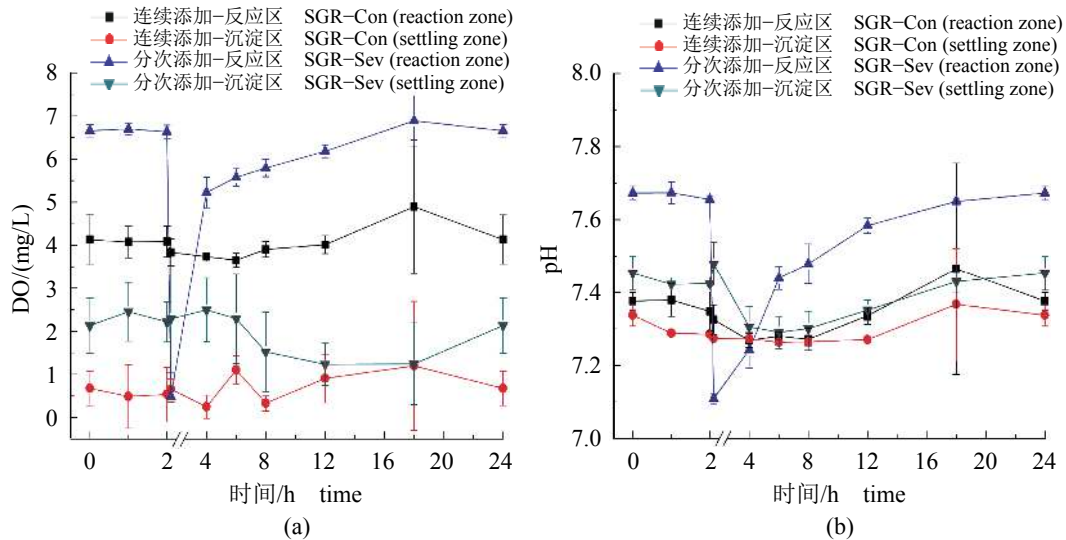


图3 典型周期内反应区和沉淀区的DO(a)和pH(b)的动态变化

Fig. 3 Dynamics of DO(a) and pH (b) in the reaction zone and settling zone during typical cycles (n=3)

表2 实验期间微生物悬浮生长反应器的水处理效果

Tab. 2 Overall statistics of water treatment of suspended growth reactors (n=30)

项目 parameters	进水 influent	出水 effluent		去除率/% removal rate	
		碳源连续添加 SGR-Con	碳源分次添加 SGR-Sev	碳源连续添加 SGR-Con	碳源分次添加 SGR-Sev
硝氮/(mg/L) NO_3^- -N	42.98±20.01 ^a	21.94±7.91 ^b	15.37±10.55 ^b	45.71±13.18 ^B	63.91±14.31 ^A
亚硝氮/(mg/L) NO_2^- -N	1.42±0.85 ^a	0.62±0.42 ^b	0.76±0.93 ^b	75.36±48.72 ^A	35.20±41.66 ^B
总氨氮/(mg/L) TAN	1.31±0.46 ^a	0.69±0.38 ^b	0.76±0.63 ^b	41.70±37.81 ^A	20.40±19.60 ^B
总氮/(mg/L) TN	51.92±25.50 ^a	24.51±7.11 ^b	18.07±9.99 ^b	49.36±12.11 ^B	64.07±12.11 ^A
碱度/(mg CaCO_3 /L) alkalinity	122.35±44.46 ^a	207.37±43.12 ^b	278.18±80.33 ^a	-87.57±70.52 ^A	-145.46±83.46 ^B
溶解性有机碳/(mg/L) DOC	42.83±24.66	34.42±19.19	38.32±22.42	14.95±28.80	7.88±24.47
总悬浮固体物质/(mg/L) TSS	203±47 ^a	47±34 ^b	48±20 ^b	75.58±20.07	75.91±9.84

注: 数值表示为平均值±标准差, 同行不同上标小写字母表示进水出水物质浓度差异显著($P<0.05$), 同行不同上标大写字母表示去除率差异显著($P<0.05$)

Notes: values represent mean±SD. Values of influent and effluent in the same row with different lowercase superscript letters are significantly different ($P<0.05$). Values of removal rate in the same row with different capital superscript letters are significantly different ($P<0.05$)

反硝化的第二阶段。沉淀区相关的变化趋势与反应区一致, 并且较之延后发生。

但是, 在反应周期的第6小时后, SGR-Sev的DOC浓度已处于相对稳定的阶段(图2), 而 NO_2^- -N在好氧条件下(图3)仍然下降, 并且伴随着 NO_3^- -N的少量上升(图4), TN不再降低, 这是反硝化第一阶段积累的 NO_2^- -N有一部分被硝化作用转化为 NO_3^- -N的现象。此外, 实验期间SGR-Sev的出水TAN和 NO_2^- -N浓度高于SGR-Con($P>0.05$)(表2)。

2.3 絮团的沉降性能

SGR-Con的SVI₃₀在实验初期快速上升, 随后始终高于445 mL/g。SGR-Sev的SVI₃₀最初降低, 在第9天以后始终低于61 mL/g(图5)。本实验中反应器因采用序批式进出水, SGR-Con在发生“洗出”现象时并未在进水期关闭反应器的进出水。

3 讨论

有机物一部分被微生物氧化降解, 另一部分被微生物转化为胞内能量物质而储存^[17]。微生

表3 实验期间花鳗鲡的生长性能

Tab. 3 Growth performance of *A. marmorata* during the experimental period

项目	parameters	数值	values
初始个体质量/g	initial individual weight	814.59±202.09	
初始养殖密度/(kg/m ³)	initial stocking density	61.46	
初始尾数/尾	initial number	332	
终末个体质量/g	final individual weight	924.55±282.76	
终末养殖密度/(kg/m ³)	final stocking density	66.61	
成活率/%	survival rate	95.48	
饵料系数	feed conversion rate	1.35	

物在降解有机物的过程中消耗溶解氧, 碳源分次添加的瞬间溶解氧大量被消耗, 代谢产物大

量增加, 从而导致DO和pH瞬间下降; SGR-Con反应区的DOC浓度持续处于较高的水平, 微生物持续代谢有机物, 从而使反应器的溶解氧浓度持续处于较低的水平, 该结果与相关研究一致^[17-18]。BFT原位养殖系统在大量添加碳源时会导致DO的快速下降和pH的剧烈变化, 从而影响养殖动物的正常生长, 被认为是该养殖技术的主要缺点之一^[5]。本研究依照BFT向反应器的反应区添加碳源, 反应器各区域的DO和pH显著低于养殖单元, 使这种剧烈变化在无鱼虾生存的反应器内发生, 从而避免了上述缺点, 可以在反应器中实现养殖单元不宜采取的某些生化进程所需的条件(例如异养反硝化所需的厌氧环境)。

实验期间反应器可以处理TSS, 并且不会向养殖单元引入有机污染, 该结果与前期研究一

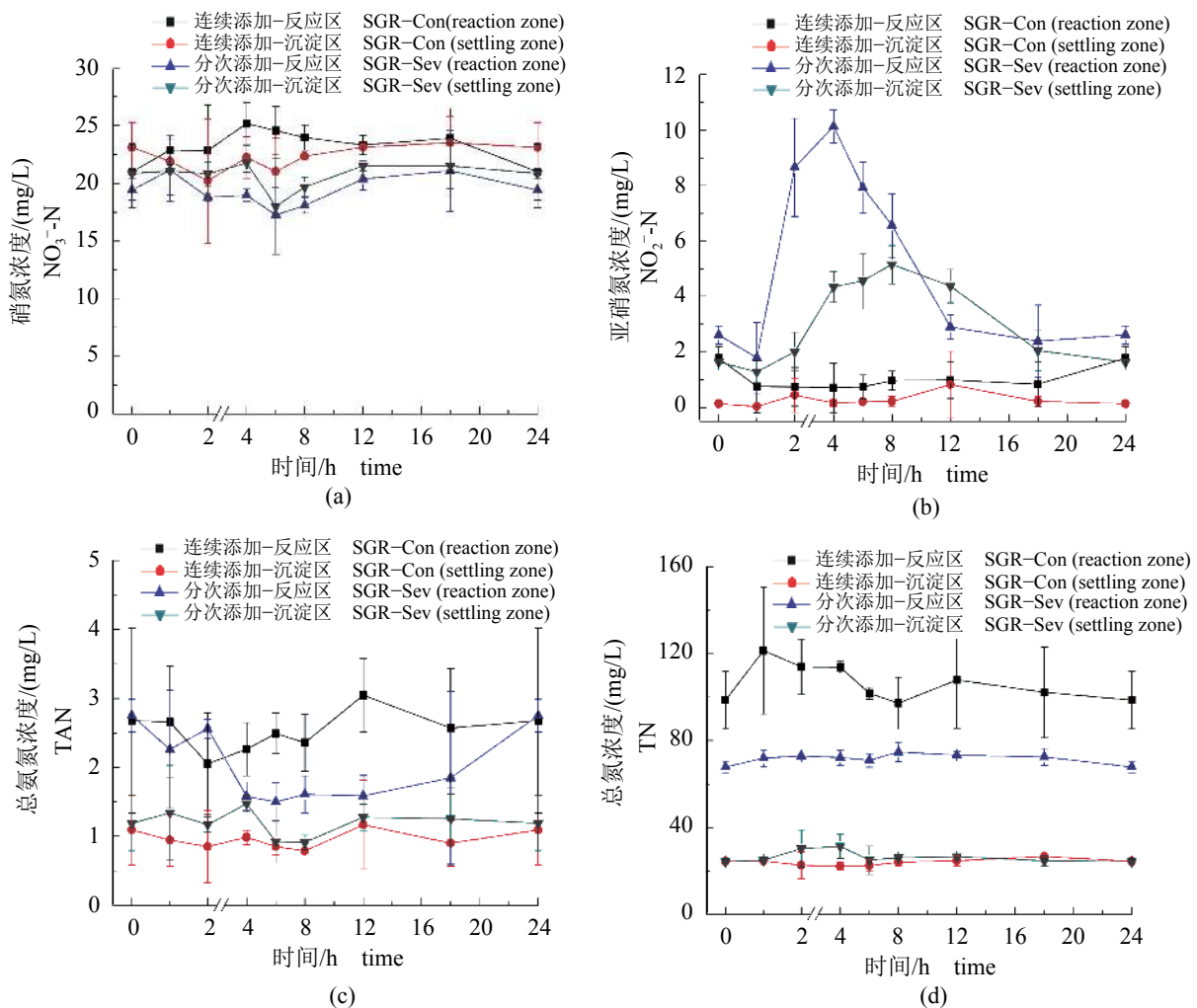


图4 典型周期内反应器硝氮(a)、亚硝氮(b)、总氨氮(c)和总氮(d)的动态变化

Fig. 4 Dynamics of nitrate (a), nitrite (b), total ammonia nitrogen (c) and total nitrogen (d) in the reaction zone and settling zone during typical cycles (n=3)

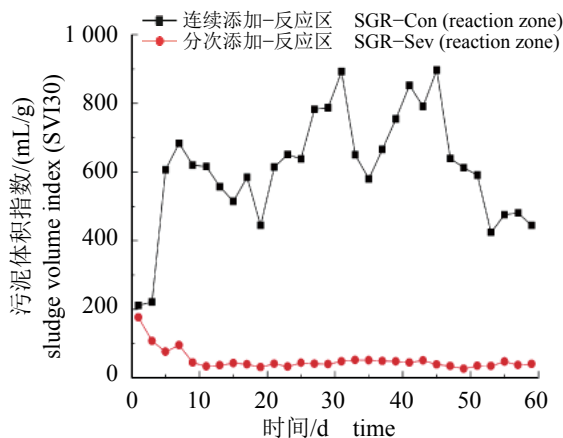


图5 实验期间反应区絮团的污泥体积指数(SVI30)变化

Fig. 5 Overall statistics of sludge volume index (SVI30) in the reaction zone during the experimental period

致^[16]。前期研究证实反应器主要通过反硝化作用去除 NO_3^- -N^[16]，反硝化作用可以产生碱度^[9]；本实验中，SGR-Sev对 NO_3^- -N和TN的去除率、出水碱度都显著高于SGR-Con，表明碳源分次添加的方式提高了脱氮效果。

典型周期内，SGR-Sev反应区的 NO_2^- -N浓度在添加碳源后开始上升，为反硝化的第一阶段；随后， NO_2^- -N浓度降低，并且伴随着TN的下降，为反硝化的第二阶段^[9]。为了使微生物同化吸收氨氮，本实验反应器的溶解氧浓度处于较高水平，但是絮团的多孔结构有利于向絮团核心逐渐形成缺氧或者厌氧的微环境^[22-23]，从而能够获得好氧反硝化和异养反硝化脱氮效果^[16]。研究表明，一次性添加碳源的方式能够得到较高的 NO_2^- -N累积率和 NO_3^- -N还原率^[24]。采用实验室规模的SBR反应器处理以氨氮为主的人工废水，碳源连续添加的脱氮效果依次劣于碳源一次性添加和分次多次添加^[19]。本实验在中试规模上处理以硝氮为主的实际养殖废水时获得了同上述文献^[19, 24]一致的结果。与碳源连续添加的反应器相比，碳源分次添加到反应器后，反应器瞬时获得了溶解氧浓度较低的缺氧环境，在具有一定底物浓度的 NO_3^- -N和碳源(DOC)条件下，SGR-Sev反应器获得了更好的异养反硝化效果：较高的 NO_2^- -N积累浓度、较高的出水碱度、较高的 NO_3^- -N去除率和较高的TN去除率。同时，碳源分次添加的方式有利于为RAS提供硝化作用所需的碱度^[9]。

研究表明，反应器主要通过同化作用去除TAN^[16]。一定浓度的氨氮，在碳源添加量较高时具有更高的同化速率^[20]。但是，SGR-Sev在反应期的DOC浓度较低(图2)，导致了沉淀区具有较高的TAN浓度和出水浓度(表2)。 NO_2^- -N是反硝化和硝化过程的中间物质，较高浓度的DO和较少的碳源有利于硝化作用而不利于反硝化作用的进行^[9, 25]。反应周期的第6小时后，SGR-Sev的DOC浓度已处于相对稳定的低水平阶段，而此时反硝化第一阶段积累的 NO_2^- -N有一部分被硝化。这是因为碳源不足导致反硝化过程中产生的 NO_2^- -N在进一步脱氮过程中有残余^[26]，随后 NO_2^- -N在好氧条件下被硝化。因此，相较于碳源连续添加的反应器，作为中间物质的 NO_2^- -N在SGR-Sev中的动态变化范围较大，出水的平均浓度值和标准差较大。

生物絮团具有良好的沉降性能是微生物悬浮生长反应器稳定运行的必须条件之一^[16]。SVI30>150 mL/g时，絮团通常被认为沉降性能差，发生了膨胀现象^[27]。实验期间，SGR-Sev的SVI30远低于SGR-Con，并且在第9天以后始终稳定地保持在良好水平(61 mL/g以下)。前期研究在碳源连续添加的方式下采用连续流进出水，实际运行过程中的“洗出”现象导致反应器进出水关闭^[16]。本实验，反应器因采用序批式进出水，SGR-Con的“洗出”现象不至于必须关闭反应器的进出水。膨胀产生的原因：易降解的有机物含量过高、低溶解氧、低pH、营养物质比例不平衡、低水温、不良的污染物负荷和水体流态等^[28]。本研究中，SGR-Con的DOC浓度较高、DO较低，使丝状细菌更易成为优势菌属，从而导致絮团发生膨胀现象^[16, 28]。碳源分次添加的反应器具有良好的沉降性能，比碳源连续添加的方式更适用于微生物悬浮生长反应器。

4 结论

采用碳源分次添加的方式可以显著提高循环水养殖系统中微生物悬浮生长反应器的脱氮效果，对 NO_2^- -N和TN的去除率、出水碱度分别可达 $63.91\% \pm 14.31\%$ 、 $64.07\% \pm 12.11\%$ 和 (278.18 ± 80.33) mg/L。相较于碳源连续添加的方式，采用碳源分次添加方式的反应器出水TAN和 NO_2^- -N浓度较高。碳源分次添加的方式可使反应器中的絮团具有良好的沉降性能。

参考文献:

- [1] Crab R, Avnimelech Y, Defoirdt T, *et al.* Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production[J]. *Aquaculture*, 2007, 270(1-4): 1-14.
- [2] FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nation). The state of world fisheries and aquaculture[M]. Rome: FAO, 2016: 18-122.
- [3] Naylor R L, Goldberg R J, Primavera J H, *et al.* Effect of aquaculture on world fish supplies[J]. *Nature*, 2000, 405(6790): 1017-1024.
- [4] Avnimelech Y. Biofloc technology - a practical guide book[M]. 2nd ed. Baton Rouge, Louisiana, United States: The World Aquaculture Society, 2012: 15-110.
- [5] Hargreaves J A. Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 344-363.
- [6] Azim M E, Little D C. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Aquaculture*, 2008, 283(1-4): 29-35.
- [7] Badiola M, Mendiola D, Bostock J. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges[J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 51: 26-35.
- [8] van Rijn J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2013, 53: 49-56.
- [9] van Rijn J, Tal Y, Schreier H J. Denitrification in recirculating systems: theory and applications[J]. *Aquacultural Engineering*, 2006, 34(3): 364-376.
- [10] Liu W C, Luo G Z, Chen W, *et al.* Effect of no carbohydrate addition on water quality, growth performance and microbial community in water-reusing biofloc systems for tilapia production under high-density cultivation[J]. *Aquaculture Research*, 2018, 49(7): 2446-2454.
- [11] Ray A J, Lotz J M. Comparing a chemoautotrophic-based biofloc system and three heterotrophic-based systems receiving different carbohydrate sources[J]. *Aquacultural Engineering*, 2014, 63: 54-61.
- [12] Xu W J, Morris T C, Samocha T M. Effects of C/N ratio on biofloc development, water quality, and performance of *Litopenaeus vannamei* juveniles in a biofloc-based, high-density, zero-exchange, outdoor tank system[J]. *Aquaculture*, 2016, 453: 169-175.
- [13] 谭洪新, 庞云, 王潮辉, 等. 驯化硝化型生物絮体养殖南美白对虾的初步研究[J]. *上海海洋大学学报*, 2017, 26(4): 490-500.
- Tan H X, Pang Y, Wang C H, *et al.* Preliminary study on domesticating nitrifying bio-flocs to rear *Litopenaeus vannamei*[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2017, 26(4): 490-500(in Chinese).
- [14] Liu W C, Luo G Z, Tan H X, *et al.* Effects of sludge retention time on water quality and bioflocs yield, nutritional composition, apparent digestibility coefficients treating recirculating aquaculture system effluent in sequencing batch reactor[J]. *Aquacultural Engineering*, 2016, 72-73: 58-64.
- [15] Schneider O, Sereti V, Eding E H, *et al.* Heterotrophic bacterial production on solid fish waste: TAN and nitrate as nitrogen source under practical RAS conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(10): 1924-1930.
- [16] 刘文畅, 罗国芝, 谭洪新, 等. 生物絮凝反应器对中试循环水养殖系统中污水的处理效果[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(8): 184-191.
- Liu W C, Luo G Z, Tan H X, *et al.* Treatment efficiency of wastewater in pilot test of biofloc reactor in recirculating aquaculture systems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 184-191(in Chinese).
- [17] Ciggin A S, Orhon D, Capitani D, *et al.* Aerobic metabolism of mixed carbon sources in sequencing batch reactor under pulse and continuous feeding[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 129: 118-126.
- [18] 张兰河, 丘晓春, 张宇, 等. 碳源投加方式对SBR工艺脱氮速率的影响[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(2): 731-736.
- Zhang L H, Qiu X C, Zhang Y, *et al.* Effect of different adding methods of carbon sources on denitrification rate[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(2): 731-736(in Chinese).
- [19] 张万友, 张兰河, 杨涛, 等. 不同有机碳源对SBR工艺同步硝化反硝化影响[J]. *化工进展*, 2010, 29(12): 2395-2399.
- Zhang W Y, Zhang L H, Yang T, *et al.* Effects of organic carbon on simultaneous nitrification and denitrification in sequencing batch reactor[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(12): 2395-2399(in Chinese).
- [20] Avnimelech Y. Carbon/nitrogen ratio as a control element

- ent in aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 1999, 176(3-4): 227-235.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002(in Chinese).
- [22] Chu C P, Lee D J. Multiscale structures of biological flocs[J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, 59(8-9): 1875-1883.
- [23] Pochana K, Keller J, Lant P. Model development for simultaneous nitrification and denitrification[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1): 235-243.
- [24] Torà J A, Baeza J A, Carrera J, *et al.* Denitrification of a high-strength nitrite wastewater in a sequencing batch reactor using different organic carbon sources[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 172(2-3): 994-998.
- [25] Karanasios K A, Vasiliadou I A, Tekerlekopoulou A G, *et al.* Effect of C/N ratio and support material on heterotrophic denitrification of potable water in bio-filters using sugar as carbon source[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 111: 62-73.
- [26] Ge S J, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Nitrite accumulation under constant temperature in anoxic denitrification process: the effects of carbon sources and COD/NO₃⁻N[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 137-143.
- [27] Guo J H, Peng Y Z, Yang X, *et al.* Changes in the microbial community structure of filaments and floc formers in response to various carbon sources and feeding patterns[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98(17): 7633-7644.
- [28] 王凤祥, 龙腾锐, 郭劲松. 活性污泥膨胀的影响因素及调控措施研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(1): 117-121.
- Wang F X, Long T R, Guo J S. Study on factors affecting the activated sludge bulking and its control[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2007, 29(1): 117-121(in Chinese).

Effects of feeding methods of carbon sources on the water treatment of suspended growth reactors in a recirculating aquaculture system

LIU Wenchang¹, TAN Hongxin^{1,2,3*}, LUO Guozhi^{1,2,3}, CHEN Wei¹, ZHANG Nannan¹,
YU Yongxia¹, YAO Miaolan^{1,2}, PIMPRON Pronapinyakun¹

(1. *Shanghai Engineering Research Center of Aquaculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,*

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. *National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education,*

Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: A suspended growth reactor under continuous carbon resource feeding method (SGR-Con) and another under several steps carbon resource feeding method (SGR-Sev) were operated in a pilot-scale recirculating aquaculture system to compare their water treatment efficiency. It indicated that the concentrations of dissolved organic carbon in the reaction zone of SGR-Con was at a high and stable level, while that in SGR-Sev firstly increased to the same level of SGR-Con during the 0 h in cycle to the instantaneously carbon feeding time and it subsequently decreased to a lower and stable level after 4 h in cycle. Dissolved oxygen in the reaction zone of SGR-Sev, as well as the settling zone was significantly higher than that in SGR-Con. The pH in the reaction zone between different reactors had no significant difference, and it was same in settling zone. Several steps carbon resource feeding method significantly increased the nitrogen removal of reactor. Overall the experimental period, the removal rate of nitrate and total nitrogen in SGR-Sev could be 63.91%±14.31% and 64.07%±12.11%, respectively. Besides, alkalinity in the effluent of SGR-Sev was (278.18±80.33) mg/L. SGR-Sev was favorable to achieve good settling performance of bio-flocs. However, the concentrations of total ammonia nitrogen and nitrite in the effluent of SGR-Sev were higher than those of SGR-Con. In summary, it is better to adopt the several steps carbon resource feeding method for suspended growth reactors.

Key words: feeding methods of carbon resource; microorganism suspended growth reactors; recirculating aquaculture system; water treatment

Corresponding author: TAN Hongxin. E-mail: hxtan@shou.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2017YFD0701700)