

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.03.014

低温条件下生物转盘处理低浓度污染地表水

陈彦洁, 付国楷, 李 轩, 王测文, 蒋涛阳
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘 要: 为实现低温条件下(冬季水温为 8~15℃)快速启动生物转盘处理低浓度污染地表水,采用自然挂膜法 G1、活性污泥挂膜法 G2 和硝化菌挂膜法 G3 这 3 种方式进行生物转盘挂膜,并对出水指标与生物膜表观形貌、群落组成进行对比研究。结果表明,从启动速率与抗冲击负荷能力来看, $G3 > G2 > G1$; 25 d 后接种硝化菌的生物转盘对氨氮的去除率即可达到 88.78%。稳定运行后,3 种挂膜方式的生物转盘对低浓度污染地表水的处理效果相近,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 COD 的去除率均可稳定在 90% 和 20%。3 种挂膜方式的微生物丰度与种类相似,与硝化反应有关的细菌主要有 *Nitrosospira*、*Candidatus nitrotoga*、*Nitrosomonas*, 在 3 种挂膜方式中分别占比 15.85%、12.04%、12.47%; 与 COD 降解有关的细菌主要有 *Reyranella*、*Thermomonas*、*Polymorphobacter*、*Sphingomonas* 与 *Arenimonas*, 在 3 种挂膜方式中分别占比 10.69%、12.39%、15.02%。微生物多样性和均匀度呈现出后端生物转盘盘片大于前端的趋势,说明微生物种类和均匀度与污染物种类和浓度有关。

关键词: 生物转盘; 低温启动; 低浓度污染地表水; 污染物削减; 微生物群落组成
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)03-0085-07

Treatment of Low Concentration Polluted Surface Water by Rotating Biological Contactor at Low Temperature

CHEN Yan-jie, FU Guo-kai, LI Xuan, WANG Ce-wen, JIANG Tao-yang
(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region' Eco-Environment <Ministry of Education>, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: In order to quickly start rotating biological contactor (RBC) to treat low concentration polluted surface water at low temperature between 8℃ and 15℃ in winter, biofilm was successfully attached on the media through three methods, namely natural cultivation (G1), cultivation by inoculating activated sludge (G2) and cultivation by inoculating nitrifier (G3), respectively, and the effluent quality, morphology of the biofilm and microbial community were compared. In term of starting time and anti-shock load capacity, G3 was better than G2, and G2 was superior to G1. After 25 days, the removal rate of ammonium nitrogen could reach 88.78% in G3 system inoculated with nitrifier. During stable operation, similar treatment performance of surface water was obtained in G1, G2 and G3 systems, and the removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and COD could be stabilized at 90% and 20%, respectively. Microbial abundance and species of G1, G2 and G3 systems were similar to each other. *Nitrosospira*, *Candidatus nitrotoga*, and *Nitrosomonas* were the main nitrifiers, and the relative abundance of nitrifiers in G1, G2 and G3 systems were 15.85%, 12.04% and 12.47%, respectively. *Reyranella*, *Thermomonas*,

Polymorphobacter, *Sphingomonas* and *Arenimonas* were responsible for degradation of COD, and the relative abundances were 10.69%, 12.39% and 15.02% in G1, G2 and G3 systems, respectively. The back-end disks of the rotating biological contactor exhibited higher microbial uniformity and richer diversity than those in the front disks of the rotating biological contactor, indicating that the species and uniformity of the microbial community were related to the type and concentration of pollutants.

Key words: rotating biological contactor (RBC); start-up at low temperature; low concentration polluted surface water; pollutant reduction; microbial community composition

目前低浓度污染地表水治理措施主要有调水引流、疏挖底泥、向水体中投加氧化剂^[1]等方法,但是这些方法工程量较大,且易形成二次污染,对周边生态面貌有巨大冲击与影响。生物转盘(RBC)^[2]作为一种低能耗、处理效果好的污水处理设备,还具有接触时间短、产生污泥量少、抗冲击负荷能力强等优点,并且其基建费用与运行费用低,生物膜的脱落物密度高,容易沉淀与清理,比较适用于低浓度污染地表水的治理^[3-4]。目前实验室研究结果表明^[5-6],采用生物转盘工艺处理低浓度污染地表水,对氨氮有良好的去除效果,但在大型实际工程中的应用鲜见报道。

本工程为2017年底建成的低浓度污染地表水水质强化处理生物转盘组设施,处理规模为10 000 m³/d。项目建成后正处于冬季,需在低温(8~15℃)条件下进行生物转盘的挂膜和启动。常用的生物转盘挂膜方法有循环法和排泥法,但大量研究表明低温条件会对生物转盘挂膜产生冲击^[7],使得挂膜启动时间延长,生物膜易脱落,保温设计成本增加^[8]。为使生物转盘在冬季低温条件下快速启动,使出水氨氮满足要求,本工程采取了自然挂膜(G1)、活性污泥接种挂膜(G2)、硝化菌接种挂膜(G3)这3种不同的启动方式^[9-11],以探究和对比在冬季低温条件下何种方式更有利于生物转盘实现快速挂膜,并发挥去除污染物的作用。同时,对稳定运行后的3类生物转盘的生物膜进行了生物种群和优势菌种分析比较。

1 材料与方法

1.1 原水水质

实验原水取自西南地区某低浓度污染河水,生物转盘进水水质如下:pH值为7.8~8.4、水温为8.5~18℃、COD为25.04~51.28 mg/L、NH₄⁺-N为5.06~13.87 mg/L、TN为7.56~16.57 mg/L、TP为0.788~1.025 mg/L。

1.2 工程概况

实验采用三维结构生物转盘,进水方向垂直轴向。7台生物转盘串联为一组,共设6组并联运行,采用配水渠均匀配水至6组生物转盘,6组生物转盘独立运行且互不干扰(见图1)。每台转盘盘片为279片,盘片间距为20 mm,盘片直径为2 m;主体材质为碳钢结构,玻璃钢外盖;主轴采用进口方形钢轴;比表面积为233.33 m²/m³,设计流量为10 000 m³/d,挂膜初期每组进水流量为2 m³/h,稳定运行期每组进水流量为70 m³/h,水力负荷率为0.137 m³/(m²·d),表观停留时间为0.75 h。实验过程中生物转盘均保持2.4 r/min的转速^[10]。

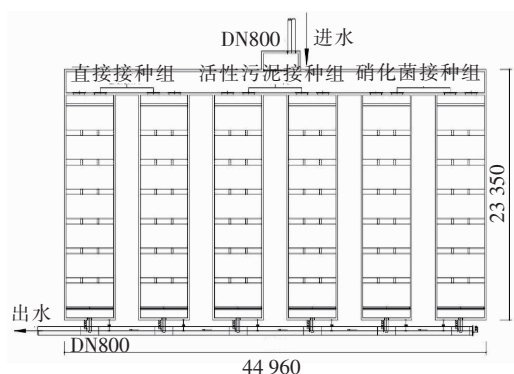


图1 生物转盘示意

Fig.1 Schematic diagram of RBCs

1.3 实验方法

6组生物转盘采用3种不同的挂膜方式,第1、2组采用G1法启动,第3、4组采用G2法启动,第5、6组采用G3法启动。具体接种方式如下:

① G1保持2 m³/h的流量连续进水,盘片保持2.4 r/min的转速转动。

② G2使用的接种污泥取自某污水处理厂氧化沟内的活性污泥,污泥浓度为4 g/L,保持转盘内1/2的原水量,将40 m³污泥和原水混合投入转盘内,淹没其40%面积的盘片,盘片保持2.4 r/min的转速转动,闷曝5 d后全部排出,之后以2 m³/h的

流量开始连续进原水运行。

③ G3 投加某厂家生产的硝化菌干菌,将质量为 454 g 的硝化菌干菌与 10 L 河水混合投加至转盘进行接种,接种时淹没反应器内 40% 面积的盘片,盘片保持 2.4 r/min 的转速转动,闷曝 5 d 后全部排出,之后以 2 m³/h 的流量开始连续进原水运行。

转盘从接种到稳定运行一共 100 d,分为接种挂膜期、启动期、稳定运行期 3 个阶段。为使生物转盘形成稳定的生物膜,先以 2 m³/h 的小流量运行,当第 28 天接种挂膜完成后,每隔 5~15 d 根据出水水质监测结果不断增大流量至 70 m³/h。以氨氮、COD 去除率达到稳定作为启动成功的标志。

1.4 检测方法

COD:重铬酸钾法,氨氮:纳氏试剂分光光度法,温度:温度计,微生物群落:16S rRNA 基因测序。

2 结果与讨论

2.1 生物转盘对 NH₄⁺-N 的去除情况

3 种不同挂膜方式的生物转盘对 NH₄⁺-N 的去除效果见图 2。在接种挂膜期间,前 5 d,G1 对氨氮的去除率维持在较低水平^[7],在 6%~12% 之间,G1 对 NH₄⁺-N 的平均去除率均低于 10%,但有缓慢增长的趋势,此时氨氮的大部分去除可能来源于转盘的机械拦截^[5-6]。5 d 后,3 种生物转盘均以 2 m³/h 的小流量开始运行。前 28 d,在进水 NH₄⁺-N 平均浓度为 10.50 mg/L 的情况下,水温由 8℃ 升至 9℃,G1 出水氨氮浓度不断降低,氨氮去除率不断攀升;第 25 天 G1 对氨氮的去除率达到 56.42%,第 27 天 G1 对 NH₄⁺-N 的去除率达到 85.67%,说明转盘内微生物不断增殖并发挥作用,硝化菌已适应进水水质并开始逐步增殖。

G2 在第 5 天适应进水水质后,由于拥有极高的微生物量,对氨氮的去除率大幅提升至 70.67%,在第 7~20 天,氨氮去除率不断降低,由 83.31% 跌至 23.85%。这期间观察生物膜表面,并未见太多褐色泥点。由此可见,在第 4~6 天,获得较高氨氮去除率的原因是转盘表面黏附活性污泥,残留在转盘表面和反应器中的污泥发挥了主要去除作用^[11]。但由于水温低、水流冲刷、生物量低等影响,在第 7~20 天,残余在转盘内的污泥不断被稀释,生物量不断降低,硝化菌增殖速度相对较缓慢,硝化效果逐渐降低。在第 23~27 天,氨氮去除率稳步升高至 61.19%,说明反应器内的生物量开始不断增多并逐

渐稳定。

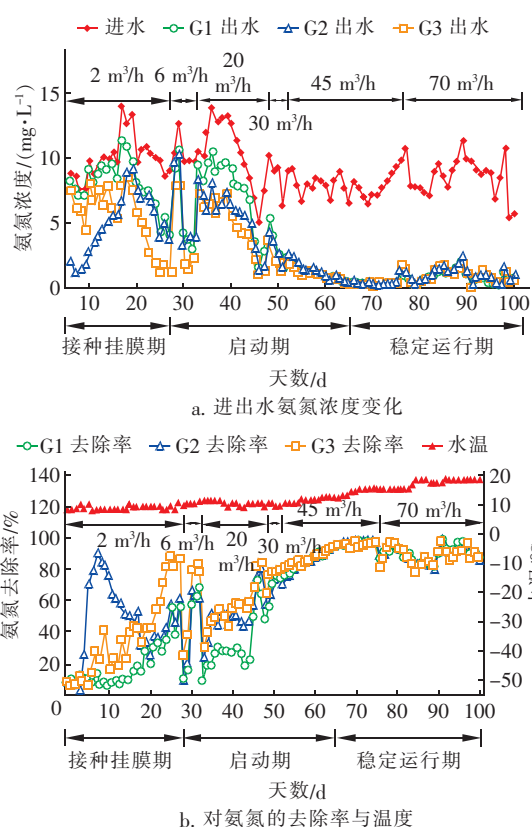


图2 3种挂膜方式的生物转盘组在100 d运行过程中对氨氮的去除效果

Fig. 2 Removal of ammonia nitrogen in 100 d operation of RBCs started with G1, G2 and G3

G3 在启动初期处于适应水质的过程,对氨氮的去除率仅为 7.61%,去除率增长缓慢。适应水质后启动 25 d 内对 NH₄⁺-N 的去除率达到 80% 以上,25 d 时去除率达到 88.78%,与 G1、G2 相比,G3 由于硝化菌生物量大,硝化菌更易大量繁殖而成为优势菌种。可见,G3 更能迅速稳定地发挥作用。经过 28 d 的挂膜,肉眼已可观察到生物转盘表面出现大量褐色泥点状物质,此时接种挂膜已基本完成。

接种挂膜完成后进入启动期。第 28~64 天,进水 NH₄⁺-N 平均浓度为 9.96 mg/L,水温逐渐升至 12℃,生物转盘运行流量增至 45 m³/h,对 NH₄⁺-N 的去除效果总体呈现波动上升,至第 61 天,3 种启动方式的生物转盘对 NH₄⁺-N 的去除率均达到 90% 以上且相差不大。其中,由于逐渐加大流量,3 种启动方式都不同程度地出现氨氮去除率急剧降低的现象,这是因为生物膜脆弱且易被水流冲刷脱落,导致生物量降低。但经过 2~3 d 的稳定运行,生物

转盘又开始逐渐恢复处理效果。3种挂膜方式在流量不断增大的过程中,转盘抗冲击负荷能力明显增强。G3在第28天对氨氮的去除率降至25.47%,2 d后去除率又迅速升至81.48%,硝化效果回升,第33天去除率降幅明显减小。G2在第28天对氨氮的去除率急剧降至7.81%,2 d后,在进水氨氮为9.625 mg/L时,出水氨氮为4.212 mg/L,去除率恢复至60.73%,第33天,又将流量调大至20 m³/h,去除率降至21.13%,相较上一次以及G1,投加污泥组已显示出一定的抗冲击负荷能力。由此可见,G3与G2均较G1有着更快的恢复速度即更好的抗冲击负荷能力。之后,生物转盘对氨氮的去除率呈现波动式不断上升趋势,说明硝化菌已成为优势菌种,硝化效果开始增强,生物转盘启动成功。

启动成功后进入稳定运行期,第64~75天,进水NH₄⁺-N平均浓度为7.17 mg/L,水温迅速升至15℃,可见生物转盘对NH₄⁺-N的去除率稳定在94%以上。第76天,调节流量至最终实际运行流量70 m³/h,3种启动方式下对NH₄⁺-N的平均去除率分别降低至86.54%、87.82%、81.80%,虽有所下降但经过75 d的培养,生物转盘抗冲击负荷能力明显增强,之后去除效果迅速趋于稳定。G1、G2、G3对氨氮的平均去除率分别达到90.29%、89.41%、89.55%,在进水氨氮为5.625~11.250 mg/L、水温为15~18℃时,出水氨氮浓度基本均能维持在1.5 mg/L以下,优于地表水Ⅳ类水体标准。

稳定运行期不同接种挂膜方式下,各级盘片的NH₄⁺-N去除率及面积负荷分别见表1、2。

表1 稳定运行期3种挂膜方式在不同温度下对NH₄⁺-N的去除率

Tab.1 Removal rate of NH₄⁺-N of G1,G2 and G3 under different temperature in stable operation phase

温度/℃	挂膜方式	氨氮去除率/%			
		总去除率	第1级	第2级	第3~7级
15	G1	91.21	67.13	11.01	2.61
	G2	91.08	67.03	11.00	2.61
	G3	91.10	67.05	11.00	2.61
17	G1	87.80	62.60	11.04	2.83
	G2	87.17	62.15	10.96	2.81
	G3	88.48	63.09	11.13	2.85
18	G1	90.65	62.55	11.86	3.25
	G2	89.24	61.58	11.67	3.20
	G3	88.62	61.15	11.59	3.18

表2 稳定运行期3种挂膜方式在不同温度下的NH₄⁺-N面积负荷

Tab.2 NH₄⁺-N area load of G1,G2 and G3 under different temperature in stable operation phase

温度/℃	挂膜方式	氨氮面积负荷/(g·m ⁻² ·d ⁻¹)			
		平均	第1级	第2级	第3~7级
15	G1	1.052	4.943	0.811	0.038
	G2	1.048	4.917	0.806	0.038
	G3	1.046	4.911	0.806	0.038
17	G1	1.203	5.271	0.930	0.048
	G2	1.193	5.191	0.916	0.047
	G3	1.212	5.354	0.944	0.048
18	G1	1.015	4.443	0.842	0.046
	G2	1.000	4.309	0.817	0.045
	G3	0.992	4.244	0.804	0.044

2.2 生物转盘对COD的去除情况

生物转盘对COD的去除趋势总体上与去除氨氮一致,但可能由于进水中COD浓度不高且多为难降解有机物,所以去除效果一般。在3种挂膜方式下生物转盘对COD去除效果的差距不明显。由于生物量低、进水浓度不高、水温低,G1对COD的去除效果一直不佳,但总体去除率波动上升,去除率接近20%并逐渐稳定。在第66天,该组去除率第一次突破20%,达到24.5%,可能是由于温度上升,好氧异养微生物开始快速增殖^[8],削弱了进水浓度的限制,去除率最高可达到36.67%。流量增大完毕后,转盘对COD的去除率开始稳定于20%左右。

G2在刚开始由于投加了活性污泥进行密闭培养,转盘中COD浓度较高,达到95.90 mg/L,活性污泥自身所含微生物快速降解COD,使得COD去除效果迅速提升。5 d后,将转盘排尽,开始连续进水,由于转盘内生物量骤减,COD去除率迅速降至10%及以下^[11]。启动中期,微生物逐渐适应水质,不断增殖,使得COD去除率一路攀升,随着水温的不断上升,去除率可达到18.23%~40.91%,随着流量的增大,COD去除率逐渐稳定在21%左右。

G3的COD去除率整体维持在15%~40%,投加硝化菌前期生物量较大,能在启动初期快速发挥作用,但受进水水质影响,去除效果波动较大,这可能是因为进水COD浓度处于较低水平,限制了一些好氧异养菌的生长。经过培养,最高去除率发生在第26天,此时进水COD为33.65 mg/L,出水COD为17.63 mg/L,去除率达到47.62%。之后,随着流量的增大,COD去除率逐渐稳定在20%左右。由于

投加硝化菌前期生物量较大,G3、G2 对 COD 的去除效果较相似,去除率都能稳定在 20% 及以上,所需时间差异不大;G3、G2 都优于 G1,与之相比达到同样削减率所用时间更短。

稳定运行期不同挂膜方式下,各级盘片的 COD 去除率及面积负荷分别见表 3、4。

表 3 稳定运行期 3 种挂膜方式在不同温度下对 COD 的去除率

Tab. 3 Removal rate of COD of G1, G2 and G3 under different temperature in stable operation phase

温度/℃	挂膜方式	COD 去除率/%			
		总去除率	第 1 级	第 2 级	第 3 ~ 7 级
15	G1	31.66	16.06	4.78	2.17
	G2	33.27	16.87	5.02	2.28
	G3	34.12	17.31	5.15	2.33
17	G1	26.77	13.98	3.90	1.78
	G2	26.04	13.60	3.80	1.73
	G3	28.38	14.82	4.14	1.88
18	G1	20.88	11.21	2.94	1.35
	G2	23.05	12.38	3.25	1.49
	G3	23.20	12.46	3.27	1.49

表 4 稳定运行期 3 种挂膜方式不同温度下各级盘片的 COD 面积负荷

Tab. 4 COD area load of G1, G2 and G3 under different temperature in stable operation phase

温度/℃	挂膜方式	COD 面积负荷/(g · m ⁻² · d ⁻¹)			
		平均	第 1 级	第 2 级	第 3 ~ 7 级
15	G1	1.739	1.955	0.582	0.053
	G2	1.829	2.161	0.643	0.058
	G3	1.872	2.268	0.675	0.061
17	G1	1.669	1.633	0.456	0.042
	G2	1.625	1.547	0.432	0.039
	G3	1.791	1.858	0.519	0.047
18	G1	1.222	0.959	0.252	0.023
	G2	1.343	1.163	0.305	0.028
	G3	1.358	1.184	0.311	0.028

2.3 生物膜中微生物群落分析

分别在稳定运行后的 3 类生物转盘的第 2 级、第 5 级盘片处取样。Z2、Z5 代表 G1 生物转盘第 2 级、第 5 级盘片的生物膜样本;W2、W5 代表 G2 相应的生物膜样本;X2、X5 代表 G3 相应的生物膜样本。表 5 为样本的 Alpha 多样性指数。可以看出,3 种挂膜方式下生物转盘表面生物膜实际 OTU 数目相近。各转盘沿程第 2 级和第 5 级间 OTU 数目差异也不大,但总体呈现出生物转盘后端生物多样性

高于前端的趋势,说明微生物种类和均匀度与污染物种类和浓度有关。Shannon 指数也符合上述规律。G2 的微生物种类丰富度较 G1、G3 高,可能是由于活性污泥取自污水厂,接种时污泥本身带来了较多种类的微生物。

表 5 Alpha 多样性指数

Tab. 5 Alpha diversity index

项目	OTU	Ace	Chao	Shannon	Simpson	Good's coverage
Z2	399	455.405	454.556	3.467	0.094	0.997
Z5	451	481.308	484.735	4.150	0.041	0.998
W2	437	464.193	465.977	4.299	0.029	0.998
W5	444	477.019	478.222	4.380	0.028	0.998
X2	420	470.447	476.271	3.890	0.051	0.997
X5	422	465.802	465.444	3.847	0.061	0.997

门水平下生物膜中菌属的相对丰度见图 3。可以发现,3 组转盘在微生物组成、优势细菌构成上比较相似,6 个样品中丰度最大的 4 类菌属分别是变形菌门(*Proteobacteria*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)、硝化螺旋菌门(*Nitrospirae*)、放线菌门(*Actinobacteria*),所占比例均远远高于其他菌属。变形菌门的相对丰度分别为 44.57%、65.39%、53.07%,作为占比最高的菌门,是生物膜中最丰富、最主要的细菌^[12],其在脱氮除磷的活性污泥中的占比约为 38.27%,所以 G2 生物转盘的变形菌门占比高达 65.39%。酸杆菌门相对丰度分别为 26.06%、6.40%、20.48%。生物转盘对氨氮绝大部分的去除作用是由硝化螺旋菌门贡献的,其相对丰度分别为 14.31%、5.96%、11.89%。放线菌门的相对丰度分别为 3.31%、6.97%、4.25%。

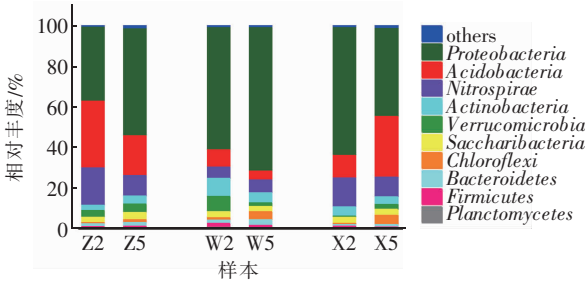


图 3 门水平下生物膜中菌属的相对丰度

Fig. 3 Bacterial communities of biofilm at phylum level

在相对丰度上,总体均呈现变形菌门 > 酸杆菌门 > 硝化螺旋菌门的特点,但硝化螺旋菌门的相对丰度总体呈现 G1 > G3 > G2。G2 生物转盘表面生物膜的微生物情况较 G1、G3 均匀且多样性更好,酸

杆菌门、硝化螺旋菌门、放线菌门数目相当,这可能是由于接种的活性污泥本身带有较丰富的微生物。

对比同一转盘的沿程两级生物膜的微生物情况,发现经过长期的稳定运行,沿程出现了一定的生物分级现象。在 G1 组和 G2 组中,第 2 级的变形菌门相对丰度小于第 5 级,第 2 级的酸杆菌门相对丰度则大于第 5 级,G3 组则与之相反。对于硝化螺旋菌门,G1 组和 G3 组的硝化菌丰度则体现出第 2 级大于第 5 级的现象,与氨氮沿程去除率变化一致,这与氨氮负荷有关,由于转盘级数较多,盘片数目较多,氨氮浓度沿程急剧下降。而 G2 组的硝化螺旋菌门在第 2 级、第 5 级总体相差不大。

属水平下菌属在各级转盘所占比例见图 4。*Nitrosomonas* 为主要的 AOB,能氧化氨为亚硝酸盐,*Nitrospira* 与 *Candidatus nitrotoga* 为主要的 NOB,能氧化亚硝酸盐为硝酸盐,完成硝化反应。在 Z2、Z5、W2、W5、X2、X5 中,*Nitrospira* 的丰度分别为 18.42%、10.21%、5.69%、6.23%、14.16%、9.62%;*Nitrosomonas* 的丰度分别为 0.16%、0.70%、0.28%、2.28%、0.16%、0.58%;*Candidatus nitrotoga* 的丰度分别为 0.36%、1.85%、1.05%、8.56%、0.14%、0.27%。*Candidatus nitrotoga* 是一种属于 β -变形菌纲的新型 NOB 菌属^[13],更能适应低温环境^[14]。*Nitrospira* 与 *Candidatus nitrotoga* 的数量是互补的,比如 G2 中 *Nitrospira* 的含量为 3 种挂膜方式中最低,而 *Candidatus nitrotoga* 的含量在 G2 中最高。

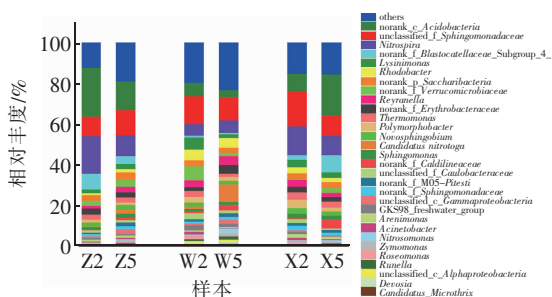


图4 生物膜属水平下菌属的相对丰度

Fig.4 Bacterial communities of biofilm at level of genus

AOB 菌属总体呈现转盘前端高于后端的趋势,NOB 菌属总体呈现转盘后端高于前端的趋势,这说明串联系统中,氨氮氧化成亚硝酸盐主要发生在转盘前端,亚硝酸盐氧化成硝酸盐主要发生在后端。3 种挂膜方式下与硝化有关的菌属 (*Nitrosomonas*、

Nitrospira、*Candidatus nitrotoga*) 占比分别为 15.85%、12.04%、12.47%;与有机物降解有关的菌属主要是 *Reyranella*、*Thermomonas*、*Polymorphobacter*、*Arenimonas* 和 *Sphingomonas*,且均与难降解有机物有关,此类细菌在 3 种挂膜方式下占比分别为 10.69%、12.39%、15.02%。

3 结论

① 低温条件下(8~15℃)启动生物转盘处理低浓度污染地表水时,从启动速度和前期抗冲击负荷能力来看,硝化菌挂膜法最佳,活性污泥挂膜法次之,最后是自然挂膜法,运行 25 d 后采用硝化菌挂膜法的生物转盘对氨氮的去除率达到 88.78%。稳定运行期,3 种挂膜方式下生物转盘对氨氮、COD 的去除效果基本一致,分别稳定在 90%、20%。

② 3 类生物转盘经长期运行后,变形菌门、酸杆菌门、硝化螺旋菌门、放线菌门成为优势菌种。3 类转盘在微生物组成方面相似,但采用活性污泥接种的生物转盘的微生物丰度和均匀度相对较高。

③ 与硝化作用有关的细菌有 *Nitrospira*、*Candidatus nitrotoga*、*Nitrosomonas*,此类细菌在 3 种挂膜方式下分别占比 15.85%、12.04%、12.47%;与 COD 降解有关的细菌有 *Reyranella*、*Thermomonas*、*Polymorphobacter*、*Sphingomonas* 和 *Arenimonas*,此类细菌在 3 种挂膜方式下分别占比 10.69%、12.39%、15.02%。AOB 菌属总体呈现转盘前端高于后端的趋势,NOB 菌属总体呈现转盘后端高于前端的趋势。串联系统中,前端主要发生亚硝化反应,后端主要发生硝化反应。

④ 串联系统中,生物膜的微生物多样性和均匀度总体呈现生物转盘后端高于前端的特点,微生物种类、均匀度与污染物种类、浓度有关。

参考文献:

- [1] 田军,张春敏,金竹静,等. 城市河道生态整治技术研究进展[J]. 环境科学导刊,2017,36(3):38-41.
TIAN Jun, ZHANG Chunmin, JIN Zhujing, et al. Advance of urban river ecological remediation technology [J]. Environmental Science Survey, 2017, 36(3): 38-41 (in Chinese).
- [2] RANA S, GUPTA N, RANA R S. Removal of organic pollutant with the use of rotating biological contactor [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2): 4218-4224.

- [3] 金立建,黄凯,杨华. “治、用、保”模式在农村水环境综合整治中的应用[J]. 中国给水排水,2019,35(10):119-122.
JIN Lijian, HUANG Kai, YANG Hua. Application of control,utilization and protection in the treatment of rural domestic sewage[J]. China Water & Wastewater,2019,35(10):119-122(in Chinese).
- [4] 唐云鹭,刘东方,于洁,等. 填料-生物转盘处理有机模拟污水[J]. 环境工程学报,2013,7(6):2121-2126.
TANG Yunlu, LIU Dongfang, YU Jie, *et al.* Packed rotating biological contactor system for treatment of simulated organic wastewater [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2013,7(6):2121-2126(in Chinese).
- [5] 魏东洋,董磐磐,李杰,等. 新型载体生物转盘处理微污染河水效果研究[J]. 中国环境科学,2013,33(S1):156-159.
WEI Dongyang, DONG Panpan, LI Jie, *et al.* Study on the effect of new carrier rotating biological contactor treatment of micro-polluted river water [J]. China Environmental Science, 2013, 33 (S1): 156-159 (in Chinese).
- [6] 许雯佳,成小英. 水力停留时间对活性发生物转盘处理污染河水的影响[J]. 环境科学,2018,39(1):202-211.
XU Wenjia, CHENG Xiaoying. Influence of hydraulic retention time on the treatment of polluted river water by an activated carbon rotating biological contactor [J]. Environmental Science, 2018, 39 (1): 202-211 (in Chinese).
- [7] CORTEZ S, TEIXEIRA P, OLIVEIRA R, *et al.* Rotating biological contactors: a review on main factors affecting performance[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology,2008,7(2):155-172.
- [8] 韦真周,范庆丰,容继,等. 生物转盘处理小城镇生活污水工程实例[J]. 水处理技术,2016,42(2):133-136.
WEI Zhenzhou, FAN Qingfeng, RONG Ji, *et al.* A case history of treating urban sewage by rotating biological contactor[J]. Technology of Water Treatment,2016,42(2):133-136(in Chinese).
- [9] 林丽,念海明,杨建华,等. TDS 三维结构生物转盘技术在乡镇生活污水处理中的调试运行优势[J]. 自动化与仪器仪表,2016(5):221-222,225.
LIN Li, NIAN Haiming, YANG Jianhua, *et al.* TDS three-dimensional structures of biological rotating disc technology in villages and towns sewage treatment operation advantages [J]. Automation & Instrumentation,2016(5):221-222,225(in Chinese).
- [10] ILGI K K, Fikret K. Biological decolorization of textile dyestuff containing wastewater by *Coriolus versicolor* in a rotating biological contactor[J]. Enzyme and Microbial Technology,2002,30(2):195-199.
- [11] 姜高彬,刘金泉,赵淑萍,等. 低温条件下生物转盘处理城镇污水的研究[J]. 中国给水排水,2015,31(23):101-103.
LOU Gaobin, LIU Jinqian, ZHAO Shuping, *et al.* Experimental study on treatment of municipal wastewater by rotating biological contactor under low temperature conditions [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31 (23):101-103(in Chinese).
- [12] 侯爱月,李军,卞伟,等. 不同短程硝化系统中微生物群落结构的对比分析[J]. 中国环境科学,2016,36(2):428-436.
HOU Aiyue, LI Jun, BIAN Wei, *et al.* Analysis of microbial community structure in different partial nitrification system [J]. China Environmental Science, 2016,36(2):428-436(in Chinese).
- [13] ALAWI M, LIPSKI A, SANDERS T, *et al.* Cultivation of a novel cold-adapted nitrite oxidizing betaproteobacterium from the Siberian Arctic[J]. ISME Journal,2007,1(3):256-264.
- [14] HSION-WEN K. Population (amoA-based) and Activity (amoA-mRNA-based) Assessment of Ammonia Oxidizing Bacteria (AOB) during Activated Sludge Wastewater Treatment[D]. Knoxville:The University of Tennessee,2006:10-14.

作者简介:陈彦洁(1995-),女,四川邻水人,硕士研究生,主要研究方向为水体污染控制与修复。

E-mail:729160617@qq.com

收稿日期:2019-11-03

修回日期:2019-12-27

(编辑:刘贵春)