

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.013

北方城镇污水处理厂提标扩容HPB技术中试研究

韩红波¹, 王成显², 牟悦¹, 柴晓利², 易境¹, 戴晓虎²

(1. 湖南三友环保科技有限公司, 湖南 长沙 410205; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 针对北方城镇污水处理厂冬季气温低、出水水质难以达标的难题,依托山西省太原市某污水处理厂开展了高浓度复合粉末载体生物流化床(HPB)技术在低温环境下(<10℃)的提标扩容中试研究。通过向生化单元投加复合粉末载体,混合液悬浮固体(MLSS)为10~15 g/L,污水处理量由5.76 m³/d(模拟量为12.8×10⁴ m³/d)逐步提升至9.60 m³/d(模拟量为21.3×10⁴ m³/d),HRT由11.83 h缩短为7.11 h,同时出水水质指标均可稳定达到山西省地方标准《污水综合排放标准》(DB 14/1928—2019),出水COD、NH₃-N、TN和TP的平均浓度分别为22.8、0.39、6.85和0.28 mg/L。当中试运行至第30天和第100天时,分析各生化单元的微生物情况发现,微生物群落结构发生了明显变化,拟杆菌门的相对丰度由37.76%降低至15.99%,变形菌门的相对丰度则基本维持在22.75%,而放线菌门的相对丰度由14.77%提升至37.88%,成为了相对丰度较高的菌群,强化了生物脱氮除磷。中试结果表明,在低温环境下HPB技术对于城镇污水处理厂的提标扩容具有重要的推广应用价值。

关键词: 高浓度复合粉末载体生物流化床; 提标扩容; 脱氮除磷; 微生物群落结构

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0081-07

Pilot Test of HPB Technology Applied in Upgrading and Expansion of a Municipal Wastewater Treatment Plant in North China

HAN Hong-bo¹, WANG Cheng-xian², MOU Yue¹, CHAI Xiao-li², YI Jing¹,
DAI Xiao-hu²

(1. Hunan Sanyou Environmental Protection Co. Ltd., Changsha 410205, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper carried out a pilot study on high-concentration composite powder carrier biological fluidized bed (HPB) technology for upgrading and expansion of a wastewater treatment plant at low temperature (less than 10℃) in Taiyuan, Shanxi Province, so as to solve the problem of low temperature and poor effluent quality of municipal wastewater treatment plants in North China in winter. By adding composite powder to the biochemical unit, the mixed liquor suspended solids (MLSS) was 10–15 g/L, the sewage treatment capacity was gradually increased from 5.76 m³/d to 9.60 m³/d (the corresponding actual sewage treatment capacity was 12.8×10⁴ m³/d and 21.3×10⁴ m³/d respectively), and the hydraulic retention time (HRT) was shortened from 11.83 h to 7.11 h. In addition, the effluent quality

基金项目: 污染控制与资源化研究国家重点实验室自主课题(PCRRCC20017); 郴州国家可持续发展议程创新示范区建设专项(2021SFQ04)

通信作者: 戴晓虎 E-mail: daixiaohu@tongji.edu.cn

indexes stably met the requirements specified in *Comprehensive Sewage Discharge Standard* (DB 14/1928-2019) of Shanxi Province, and the average values of effluent COD, $\text{NH}_3\text{-N}$, TN and TP were 22.8 mg/L, 0.39 mg/L, 6.85 mg/L and 0.28 mg/L, respectively. The microbial community of each biochemical unit was analyzed on days 30 and 100, and it was found that the microbial community composition changed significantly. At phylum level, the relative abundance of *Bacteroidota* decreased from 37.76% to 15.99%, and the relative abundance of *Proteobacteria* was basically remained at 22.75%. However, the relative abundance of *Actinobacteriota* increased from 14.77% to 37.88% and became a dominant phylum, which enhanced the biological nitrogen and phosphorus removal. The pilot test results showed that HPB technology had important application value for upgrading and expansion of municipal wastewater treatment plants at low temperature.

Key words: high-concentration composite powder carrier biological fluidized bed (HPB); upgrading and expansion; nitrogen and phosphorus removal; microbial community composition

随着环境容量的减小和水环境问题的日益突出,污水处理和排放标准越来越严格,现有污水处理厂普遍面临着将出水水质从《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级B提升至一级A(下称“GB一级A”),甚至更高的地方标准要求^[1]。同时,随着城镇化进程的加快,污水产生量显著增加,污水厂面临着同步完成“提标”和“扩容”的双重任务,对现有污水处理系统造成巨大压力。

目前,在污水处理厂提标改造过程中广泛采用的技术有MBBR、MBR和硝化-反硝化深床滤池等。其中,MBBR工艺填料粒径较大、比表面积较小,在生化单元中容易形成局部堆积^[2];MBR工艺则存在投资运行费用高、易产生膜污染等问题;而硝化-反硝化深床滤池不仅容易堵塞,还需要额外投加碳源。这一系列问题反映出我国城镇污水处理厂在“提标”和“扩容”新技术方面的迫切需求。因此,开展可以同步实现“提标”和“扩容”两方面需求的新技术研究,对于缓解污水处理厂面临的压力具有重要意义。

高浓度复合粉末载体生物流化床(HPB)是在传统活性污泥法基础上发展而来的新技术,其通过在生化单元中投加复合粉末载体材料来提高活性污泥浓度,同时构建附着和悬浮生长的微生物系统,并通过生物载体回收单元延长了微生物停留时间,实现了双泥龄,解决了硝化菌和聚磷菌泥龄矛盾等问题,强化了微生物脱氮除磷效果。HPB技术可以有效对接传统污水处理工艺,如AAO、氧化沟和SBR等^[1,3],提高原生生化单元的处理能力,在污水处

理厂提标改造方面具有良好的应用潜力。目前,HPB技术已在南方某污水处理厂进行了提标扩容工程验证,在不新增征地的情况下,对原有生化单元进行改造,实现了处理负荷的翻倍,各项出水指标均能够稳定、持续地满足《湖南省城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 43/T 1546—2018)中的一级标准^[1]。然而,当水温低于15℃时,硝化细菌和反硝化细菌的代谢活性减弱,脱氮效果变差,因此,在北方低温条件下,探究HPB技术的适用性和运行稳定性成为目前亟待解决的问题。

笔者在山西省太原市某污水处理厂开展HPB技术中试研究,在低温条件下(环境温度<10℃,水温<15℃)模拟厂区工艺运行情况,分析系统启动和稳定运行过程中进出水水质的变化,研究其抗冲击负荷性能;同时分析生化单元微生物群落结构的变化规律,探究HPB技术“双泥龄”脱氮除磷机制,旨在为低温条件下HPB技术在污水处理厂提标扩容中的应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 工艺现状及改造需求

山西省太原市某污水处理厂二期现状总设计规模为 $9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,生化单元采用AAO工艺,出水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准,出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP分别不超过50、5、15和0.5 mg/L;其中,当水温 $\leq 12^\circ\text{C}$ 时,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 应不超过8 mg/L。污水处理厂二期生化单元池容为63 000 m^3 ,厌氧池、缺氧池和好氧池的池容占比分别为12%、34%和54%,内回流

比为100%~300%,外回流比为100%,HRT为16.80 h。根据山西省水污染防治需求和厂区规划,要求该污水厂二期处理规模提升至 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上,且出水水质提升至山西省《污水综合排放标准》(DB 14/1928—2019),污水处理厂提标后出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP分别不超过40、2、15和0.4 mg/L。

1.2 中试装置

中试采用HPB和AAO耦合工艺(见图1),主要包括预处理过滤装置、生化池、二沉池和复合粉末载体回收装置4个单元。其中,生化池为钢制反应器,有效容积为 2.842 m^3 ($1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m} \times 1.45 \text{ m}$,均分为4格),进水来自于污水厂粗格栅间,经预处理过滤装置后进入生化池,各单元均设有DO和pH在线监测设备。其中1#池无曝气装置,分为上下两层,下层为厌氧区,上层为缺氧区,两者的池容比为0.55/0.45,2#、3#和4#皆有曝气装置,可分别调控溶解氧,2#池在运行过程中作为缺氧区,3#和4#为好氧区,末端(4#池)溶解氧稳定保持在3~3.5 mg/L。生化池出水进入钢制辐流式沉淀池,有效沉淀面积为 0.5 m^2 ,有效体积为 1.9 m^3 。二沉池排出的剩余污泥暂存在回收单元储泥桶中,回收单元每天开启1次,将剩余污泥中的载体进行回收重复利用。回收单元主要由旋流分离器构成,其下出口回流至生化单元,上出口则进行排放。各单元之间以UPVC管道连接,进水、回流等皆可进行流量控制,出水管路中设置流量计。

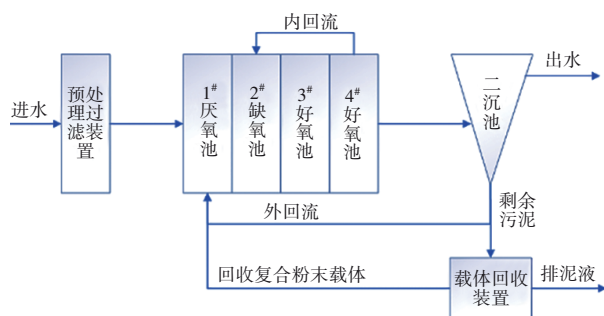


图1 HPB和AAO耦合工艺示意

Fig.1 Schematic diagram of AAO combined with HPB process

HPB技术在逐步提升中试系统处理量的过程中设置了5种工况,具体见表1(模拟量为该停留时间下反算出的厂区处理规模)。不同工况下MLSS均为10~15 g/L,MLVSS/MLSS均为0.3~0.5,内回流比均为250%,外回流比均为100%,厌氧池、缺氧池

和好氧池的池容占比分别为14%、36%和50%。

表1 HPB技术工艺参数

Tab.1 Process parameters of HPB technology

项 目	工况 I	工况 II	工况 III	工况 IV	工况 V
处理量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	5.76	7.20	8.16	9.12	9.60
模拟量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	12.8	16.0	18.1	20.2	21.3
HRT/h	11.83	9.47	8.36	7.48	7.11
运行时间/d	12	5+16	4	36	31

为了研究HPB技术在北方低温条件下的实际运行情况,中试装置于2020年12月28日接种该污水处理厂二期生化池活性污泥,并同步投加复合粉末载体,使污泥浓度稳定在14 g/L左右。启动后系统即以240 L/h的流量(工况I)连续进水,并进行相应分析。在后续稳定运行过程中,根据生化池MLSS浓度适量投加复合粉末载体材料。装置运行过程中,水温和环境温度的变化如图2所示。

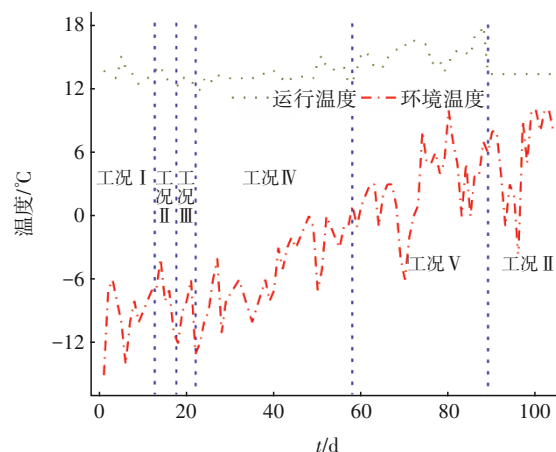


图2 装置运行期间水温和环境温度的变化

Fig.2 Variation of water temperature and ambient temperature during operation of the device

1.3 分析项目及方法

系统进水、出水和厂区二沉池出水每2 h取样1次,然后将1 d内的水样等体积制成混合样,并检测COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP等水质指标。其中,COD采用重铬酸钾法测定, $\text{NH}_3\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定。每天上午09:00检测MLSS和 SV_{30} 等指标,MLSS和MLVSS采用重量法测定, SV_{30} 采用30 min静置沉降法测定。微生物高通量测序方法参考文献[4],提取DNA后,送至上海美吉生物医药科技有限公司进行测序。

2 结果与讨论

2.1 粉末载体材料特性分析

复合粉末载体由硅藻土和硫铁矿经过湿式研磨法复配而成,其物理特性如图3所示。可知,该复合粉末载体呈圆饼状,且具有丰富的孔隙结构,平均粒径为22 μm 。Fe和S元素均匀地分布在载体表面,说明湿式研磨法可有效地将硅藻土和硫铁矿复合在一起。

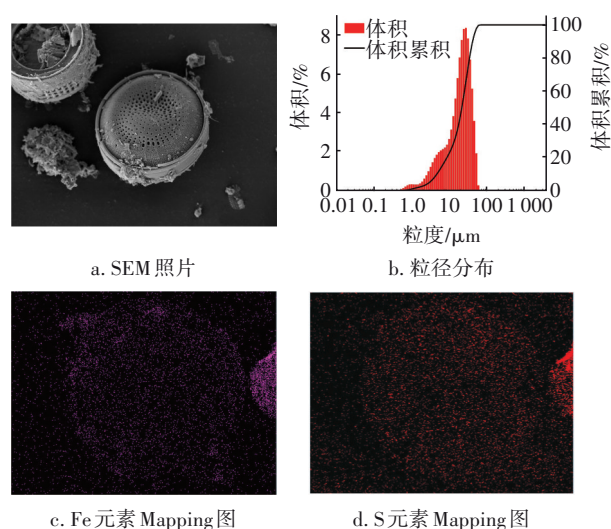


图3 复合粉末载体的物理特性

Fig.3 Physical properties of composite powder carrier

2.2 污泥特性变化情况

HPB系统通过复合粉末载体投加量调控混合液MLSS浓度,运行过程中MLSS的变化情况如图4所示。

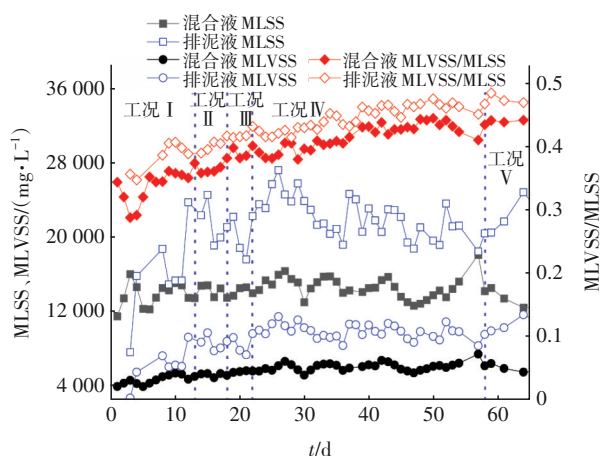


图4 生化池稳定运行期间污泥浓度的变化

Fig.4 Change of sludge concentration during stable operation of biochemical tank

为了应对北方冬季水温低的不利条件,设备启动初期在较高的MLSS浓度下运行。从图4可以看出,工况I中混合液平均MLSS浓度为13 871 mg/L。工况II(前段)和工况III时间相对较短,平均MLSS浓度为14 215 mg/L。工况IV中进水含氮污染物浓度长期高于设计值,平均MLSS浓度为14 586 mg/L。进入工况V后,系统处理量提高至9.60 m^3/d ,同时将MLSS浓度下调至12 235 mg/L,出水水质仍然相对比较稳定,说明MLSS浓度的降低并未对出水水质造成不利影响。整个中试过程中,系统SVI值在57.21~98.11 mL/g之间波动,平均值为71.94 mL/g,远低于厂区同期水平。

在适度控制复合粉末载体补充量及回收利用装置排泥的情况下,中试过程中混合液MLVSS/MLSS控制在0.3~0.5范围内。在较高处理量工况下,进水污染物浓度较高且载体投加量相对较低的双重影响下,MLVSS/MLSS值缓慢升高。通过载体回收装置分离排出的剩余污泥,即排泥液,相较于混合液,其MLSS和MLVSS浓度均较高,说明经过二沉池沉降浓缩后,排泥液污泥含固率上升了。值得注意的是,排泥液MLVSS/MLSS值较混合液显著升高,说明排泥液中的无机组分偏低,即附着微生物的复合粉末载体被有效回收重新进入生化单元,有效提高了载体的回收利用效率,延长了微生物停留时间,对微生物菌群结构的筛选和驯化具有促进作用。

2.3 出水水质分析

生化池运行期间,对COD的去除效果见图5。

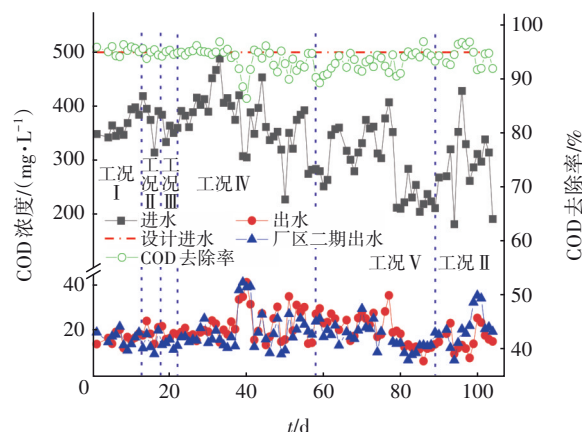


图5 对COD的去除效果

Fig.5 Removal effect of COD

由图5可知,系统进水水质波动较大,平均进水COD浓度为380 mg/L,随着进水量的增加,生化池HRT不断缩短,工况V的HRT(7.11 h)较厂区二期生化池HRT(16.80 h)减少9.69 h,但出水COD浓度基本不变,与厂区二期处理效果相近,出水COD浓度均值为22.8 mg/L,平均COD去除率为94%,稳定达到山西省“准V”类水标准限值,即COD<40 mg/L。

对NH₃-N和TN的去除效果如图6所示。由图6(a)可知,平均进水NH₃-N浓度为51 mg/L,稍高于厂区原工艺设计指标(49 mg/L),厂区二期NH₃-N出水浓度波动较大,而随着进水负荷的不断提升,HPB技术出水NH₃-N稳定,波动性较小。在HRT为7.11 h的情况下,平均出水NH₃-N浓度为0.39 mg/L,远低于山西省“准V”类水标准限值,即NH₃-N<2 mg/L, NH₃-N去除率高达99%。

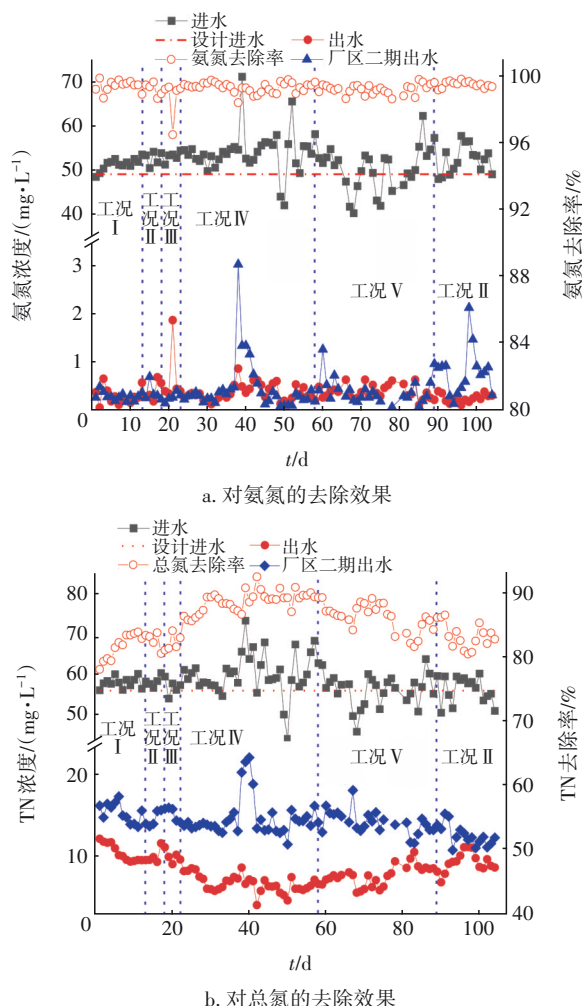


图6 对NH₃-N和TN的去除效果

Fig.6 Removal effect of NH₃-N and TN

试验期间TN进水浓度(平均为58 mg/L)普遍高

于厂区设计指标(56 mg/L),见图6(b)。投加复合粉末载体后,HPB技术对TN的去除效果显著,平均出水TN浓度为6.85 mg/L,远低于山西省“准V”类水标准限值,即TN<15 mg/L,平均TN去除率高达89%,HPB技术中试系统在更高的进水负荷条件下,出水TN浓度较同期厂区二沉池出水(HRT=16.80 h)平均低6 mg/L。在同时提升流量和下调混合液污泥浓度的条件下(工况V),对出水TN的去除效果和优势依然显著,说明HPB技术在TN去除方面具有更为显著的优势。

对TP的去除效果如图7所示。可知,运行期间进水TP浓度在3.85~7.15 mg/L之间波动,平均进水浓度为5.6 mg/L。随着处理量的提升,除磷效果波动相对较大,除工况I外,HPB技术出水水质均稍逊于厂区二沉池出水,但工况II~IV平均出水TP浓度分别为0.3、0.28和0.28 mg/L,依然满足山西省“准V”类水标准,即TP<0.4 mg/L。一般情况下,TP会在后续深度处理工艺中被去除,因此HPB技术中试过程中并未投加任何除磷药剂进行化学除磷,TP的数据采集也较其他指标提前结束。随着后续处理量的持续提升,出水TP浓度波动依然很小,说明在未投加除磷药剂的情况下,HPB技术具有较好的除磷效果。

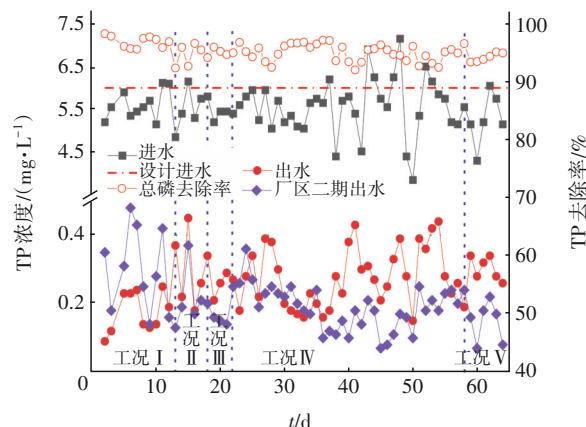


图7 对TP的去除效果

Fig.7 Removal effect of TP

2.4 微生物群落结构分析

当HPB技术运行至第30天和第100天时,分别对中试系统和厂区二期各生化单元中的微生物进行菌落结构分析,在门水平上的结果见图8(TY代表厂区工艺,HPB代表中试技术,An为厌氧段,A为缺氧段,O为好氧段)。由图8(a)可知,与厂区各生

化单元相比,向中试系统投加复合粉末载体运行30 d后,优势菌群种类并未发生明显变化,主要包括拟杆菌门(*Bacteroidota*)、变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteriota*)和黏菌门(*Myxomycota*),且拟杆菌门和变形菌门相对丰度的增加与TN和TP去除率有较高的一致性,说明在投加复合粉末载体后,污泥混合液中原有的优势菌群在载体表面快速附着生长,相对丰度有了显著性提升,硝化作用和反硝化除磷作用得到了同步加强^[5]。

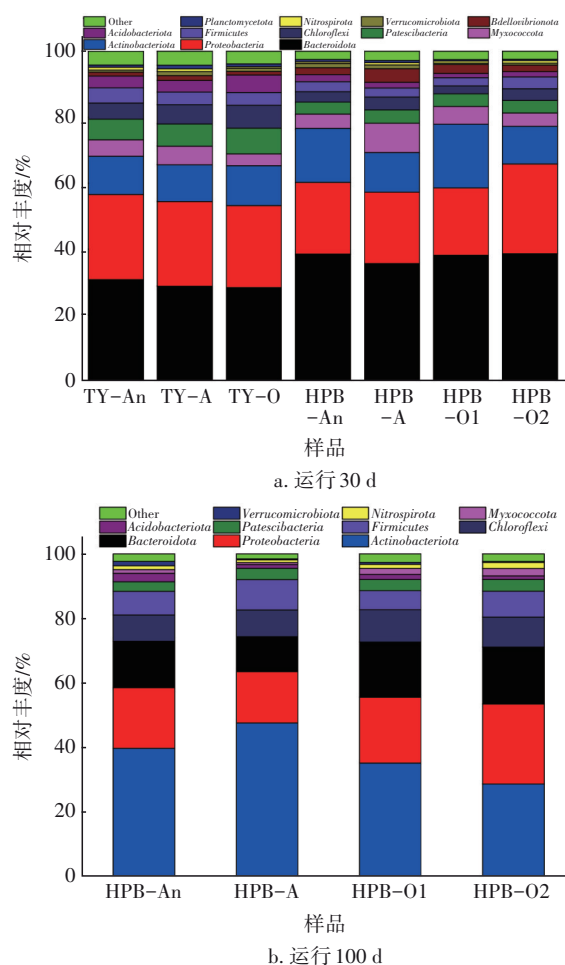


图8 微生物群落结构在门水平上的差异

Fig.8 Differences of microbial community composition at phylum level

然而运行100 d后,中试系统中微生物群落结构的相对丰度变化较大,见图8(b),放线菌门的相对丰度由14.77%(30 d)提升至37.88%(100 d),成为了相对丰度最大的菌群;变形菌门的相对丰度则基本维持在22.75%;而拟杆菌门的相对丰度则由原来的37.76%(30 d)降低至15.99%,其不再是优势菌群,说明复合粉末载体的投加对微生物群落结

构具有一定的诱导驯化作用,此时放线菌门成为体系中相对丰度最大的微生物菌群,这种异养菌在新陈代谢过程中可以将硝酸盐还原为亚硝酸盐,并产生一定量的硫化氢,从而促进反硝化作用。另外,在投加复合粉末载体材料后,严格厌氧的绿弯菌门(*Chloroflexi*)和厚壁菌门(*Firmicutes*)的相对丰度明显增加,表明复合粉末载体材料由于溶解氧传质效率的差异为不同层次的生物膜生长提供了有利条件,而厚壁菌门可以强化COD的去除。

在纲水平上,投加复合粉末载体材料30 d后,拟杆菌纲(*Bacteroidia*)相对丰度由厂区的27.12%提升至37.12%,见图9(a),并作为优势菌群在复合粉末载体材料表面得到有效富集生长。

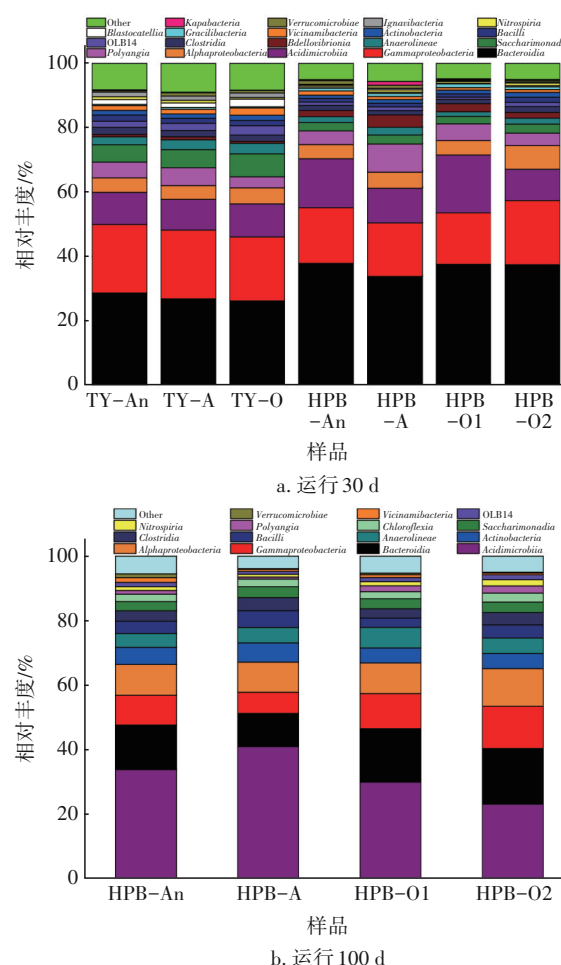


图9 微生物群落结构在纲水平上的差异

Fig.9 Differences of microbial community composition at class level

而在运行100 d后,虽然拟杆菌纲相对丰度降低至15.81%,但其仍是生化系统中的优势菌种,见图9(b)。 α -变形菌(*Alphaproteobacteria*)和 γ -变形

菌(*Gammaproteobacteria*)是变形菌门中的优势菌纲,主要参与硝酸盐的还原,在脱氮过程中发挥了积极作用,其从属菌(如聚糖菌)同时也强化了生物除磷作用^[6-7]。由于复合载体材料中含有硫铁矿,因此可能促进以 Fe^{2+} 为能量来源、以 CO_2 为碳源的酸微菌纲(*Acidimicrobiia*)生长,产生的 Fe^{3+} 有利于厌氧条件下进行厌氧铁氨氧化反应(*Feammox*)^[8-9]。

3 结论

① 太原某污水处理厂采用HPB技术进行中试,通过向生化单元投加复合粉末载体的方法,在低温环境下(环境温度 $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$,水温 $<15\text{ }^{\circ}\text{C}$)将MLSS浓度增加至 $10\sim 15\text{ g/L}$,实现了污水处理量由 $5.76\text{ m}^3/\text{d}$ (模拟量为 $12.8\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$)逐步提升至 $9.60\text{ m}^3/\text{d}$ (模拟量为 $21.3\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),水力停留时间由原来的 11.83 h 缩短为 7.11 h 。

② 在污水处理量提高的情况下,中试装置出水水质指标均可稳定达到山西省《污水综合排放标准》(DB 14/1928—2019),出水COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP的平均浓度分别为 22.8 、 0.39 、 6.85 和 0.28 mg/L ;在低温环境下,HPB技术对TN的去除效果显著,相较于同期厂区二沉池出水TN浓度平均低 6 mg/L 。

③ 在装置运行到第30天和第100天时生化单元的群落结构发生了变化,拟杆菌门的相对丰度由原来的 37.76% (30 d)降低至 15.99% (100 d),变形菌门的相对丰度则基本维持在 22.75% ,而放线菌门的相对丰度由 14.77% (30 d)提升至 37.88% (100 d),成为了相对丰度较高的菌群,强化了微生物脱氮除磷作用。

参考文献:

- [1] 柴晓利,韩红波,张宏亮,等. HPB工艺用于污水厂提标扩容改造的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 9-15.
CHAI Xiaoli, HAN Hongbo, ZHANG Hongliang, et al. Full-scale test of HPB process applied in upgrading and capacity expansion of a wastewater treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(1): 9-15 (in Chinese).
- [2] 陈霖,于涛. MBBR+氧化沟与改良AAO工艺用于污水处理厂提标扩建[J]. 中国给水排水, 2019, 35(8): 58-62.
CHEN Lin, YU Tao. Application of MBBR+oxidation ditch and modified AAO process in the upgrading and extension of sewage treatment plant[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(8): 58-62 (in Chinese).
- [3] WU B, WANG X Z, WANG C X, et al. Novel micro-granular sludge process for highly efficient treatment of low-strength and low C/N ratio municipal wastewater [J]. Chemosphere, 2021, 287 (Pt 3): 132322.
- [4] RAVEL J, GAJER P, ABDO Z, et al. Vaginal microbiome of reproductive-age women[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, 108(S1): 4680-4687.
- [5] 康晓荣. 超声联合碱促进剩余污泥水解酸化及产物研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
KANG Xiaorong. Study on Hydrolysis and Acidification of Activated Sludge Enhanced by Ultrasound Combined with Alkaline [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013 (in Chinese).
- [6] YE L, SHAO M F, ZHANG T, et al. Analysis of the bacterial community in a laboratory-scale nitrification reactor and a wastewater treatment plant by 454-pyrosequencing [J]. Water Research, 2011, 45(15): 4390-4398.
- [7] HU M, WANG X H, WEN X H, et al. Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis [J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 72-79.
- [8] HUANG S, JAFFE P R. Characterization of incubation experiments and development of an enrichment culture capable of ammonium oxidation under iron-reducing conditions [J]. Biogeosciences, 2015, 12(3): 769-779.
- [9] YANG Y F, XIAO C C, YU Q, et al. Using $\text{Fe}(\text{II})/\text{Fe}(\text{III})$ as catalyst to drive a novel anammox process with no need of anammox bacteria[J]. Water Research, 2021, 189: 116626.

作者简介: 韩红波(1986—),男,河南洛阳人,硕士,高级工程师,从事市政给水厂、污水处理厂设计工作。

E-mail: 631039829@qq.com

收稿日期: 2021-12-26

修回日期: 2022-02-25

(编辑: 任莹莹)