

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.22.003

Nereda[®]好氧颗粒污泥工艺的脱氮除磷性能及工程实例

吴志明¹, 陈学春¹, 赵欣², 刘洋²

(1. 德和威<北京>环境工程有限公司, 北京 100022; 2. 哈斯康宁工程咨询<上海>有限公司, 上海 200030)

摘要: Nereda[®]工艺是一种成熟可靠的应用于污水生化处理的好氧颗粒污泥技术。凭借Nereda[®]反应器的特殊内件及运行周期, Nereda[®]工艺具有同时脱氮除磷的优异性能。以荷兰3座应用Nereda[®]技术的市政污水厂(Epe, Utrecht和Garmerwolde污水厂)为工程案例, 详细介绍了它们的概况以及实际的脱氮除磷运行表现。最后总结了Nereda[®]技术的优点以及应用方面的竞争优势。

关键词: Nereda[®]工艺; 好氧颗粒污泥; 运行周期; 脱氮除磷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)22-0016-06

Nitrogen and Phosphorus Removal via the Nereda[®] Aerobic Granular Sludge Process

WU Zhi-ming¹, CHEN Xue-chun¹, ZHAO Xin², LIU Yang²

(1. DHV <Beijing> Environmental Engineering Co. Ltd., Beijing 100022, China; 2. Royal Haskoning Consulting <Shanghai> Co. Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract: Nereda[®] process is a proven and reliable aerobic granular sludge technology for wastewater biochemical treatment. With the special internals and operation cycle of the Nereda[®] reactor, the process has excellent performance of simultaneous nitrogen and phosphorus removal. Three municipal sewage plants in Netherlands (Epe, Utrecht and Garmerwolde WWTP), which apply this Nereda[®] technology, are taken as engineering cases to introduce their general situation and actual operation performance of nitrogen and phosphorus removal in detail. Finally, the advantages of Nereda[®] technology and the competitive advantages in application are summarized.

Key words: Nereda[®] process; aerobic granular sludge; operation cycle; nitrogen and phosphorus removal

在水环境保护要求日趋严格的背景下, 全国多地如江苏、浙江、安徽、云南、广东、河北等重点区域以及流域相继颁布和实施了严于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A标准的地方标准, 这些标准的颁布和实施均对污水处理厂的处理能力提出了更高要求, 尤其是出水氮和磷的排放标准更为严格。因此, 同时具备脱氮除磷功能的污水处理工艺是高排放标准污水厂的必然选择。

Nereda[®]工艺属于好氧颗粒污泥(AGS)工艺的

一种, 是荷兰皇家哈斯康宁DHV公司与荷兰代尔夫特理工大学于20世纪90年代开始研发的具有优异的脱氮除磷性能的新型水处理工艺。至2022年初, 在欧洲、非洲、澳大利亚、北美和南美洲, 已运行的Nereda[®]工艺污水处理设施已有50多座, 总处理能力超过1 300万人口当量(约 $260 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)。在已建成投运的项目中, 不乏日处理能力数万乃至数十万吨的大型污水处理厂, 这表明该工艺可以应用于不同规模的市政污水和工业废水处理厂。目前, 该

工艺已进入中国并建成了全规模的污水处理厂。

与采用絮状污泥的传统活性污泥法或生物膜系统不同,Nereda[®]工艺中处理污水的微生物在不需要载体的情况下,可自发聚集为颗粒状污泥。由于好氧颗粒污泥的体积较大,氧和水中的物质无法全部进入和渗透到颗粒的核心,因而在颗粒径向上形成了浓度梯度。例如,越靠近污泥表面,氧浓度越高,在表面附近形成富氧区;向里则构成缺氧区乃至逐步过渡到核心的厌氧区。在不同分区中,存在着各自的优势微生物种群,这已被荧光原位杂交分析所证实^[1-2]。上述好氧颗粒污泥的结构和独特性质,使其在一个颗粒污泥上,即可达成COD、BOD₅和氮、磷的同时高效去除。

相关实验已经证实,通过控制“丰盛-饥饿”、溶解氧的饱和度、进水模式等方式可以优化好氧颗粒污泥工艺的脱氮除磷性能^[3-5]。为此结合Nereda[®]工艺的运行模式,阐释了好氧颗粒污泥的脱氮除磷性能优异的原因,同时结合荷兰的3个典型工程案例,进一步分析了Nereda[®]工艺实际的脱氮除磷表现,以供参考。

1 Nereda[®]工艺的脱氮除磷性能

1.1 脱氮除磷基本过程

相关荧光原位杂交分析已经证实,好氧颗粒最外层主要分布着硝化菌,颗粒内部主要含聚磷菌、反硝化菌、聚糖菌等,这些菌群在传统活性污泥系统中也同样存在。由代尔夫特理工大学提供的好氧颗粒污泥与活性污泥中的微生物种群分布如图1所示。

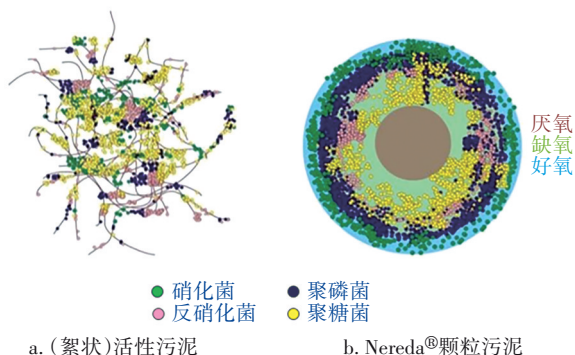


图1 好氧颗粒污泥与活性污泥中的微生物种群分布示意

Fig.1 Schematic diagram of microbial population distribution in aerobic granular sludge and activated sludge

对于传统活性污泥和好氧颗粒污泥工艺去除生物营养物的过程而言,上述不同功能菌群发生的

生化反应基本是相同的。具体而言,聚磷菌在厌氧进水期间将易生物降解的COD转化为糖原或聚-β-羟丁酸(PHB)储存,并释放出磷酸盐,而在曝气期间聚磷菌使用储存的PHB作为碳源并吸收厌氧期间释放的磷酸盐,同时硝化菌将氨氮转化为硝酸盐氮。当系统处于缺氧阶段时,反硝化菌将硝酸盐氮转化为氮气,完成反硝化过程。

1.2 Nereda[®]工艺的运行模式

与传统活性污泥工艺不同的是,Nereda[®]工艺在培养出具有良好沉降性能的好氧颗粒污泥的同时,对废水中的COD、氮和磷也具有显著的去除效果。主要的原因在于其特殊的运行模式(见图2)和污泥筛选机制。

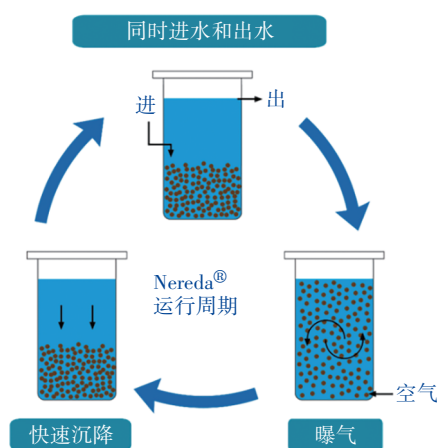


图2 Nereda[®]工艺的运行周期

Fig.2 Operating cycle of the Nereda[®] process

① 同时进水和出水

在进水阶段,来水自反应器的底部进入,并通过特殊的布水内件在接近柱塞流流态下穿过沉降的颗粒污泥床层。由于进水为柱塞流的流态,反应器顶端的经上一周期处理并净化好的水与底部进入的污水之间没有掺混,使得经过处理的污水能够被置换(或者说“推出”)而成为出水;由此反应器在出水的同时也在不断进水。不同于传统的SBR工艺,Nereda[®]反应器使用的是静态固定滗水器而非移动滗水器,且可以同时进水和出水,不需要单独设置耗时的滗水阶段。另外,滗水过程中反应器水位固定,也避免了传统SBR系统水位变化造成的水头“浪费”。

② 曝气

所有的生物处理过程几乎都发生在曝气反应阶段,通常采用微孔曝气工艺。由于颗粒污泥体量

较大,在其结构内会产生氧浓度梯度,颗粒污泥最外层的有机污染物被高效氧化,同时硝化细菌也聚集在颗粒外层,将氨氮转化为硝态氮。硝化产生的硝态氮扩散到颗粒内部的缺氧层后会发生反硝化反应,实现脱氮;此外,超常的生物吸磷过程也同时发生。

③ 快速沉降

在这个阶段,颗粒污泥与处理过的污水会实现泥水分离。由于颗粒污泥优异的沉降特性,因此所需的沉降时间很短,通常为5~30 min。泥水分离后,将曝气阶段生长和积累而形成的剩余污泥排出系统。

1.3 Nereda®工艺的脱氮除磷特点

Nereda®系统的设计和运行采用的是序批式SBR模式,但Nereda®工艺是专门为了培养好氧颗粒污泥而设计的,因此有着与众不同的特点。

首先,从微生物学角度,Nereda®工艺的设计充分利用了“丰盛-饥饿”机制,即厌氧-好氧交替的运行机制,筛选出了慢速生长的聚磷菌。通常Nereda®工艺的厌氧进水时间较长,一般为0.6~2.0 h。较长的厌氧时间可确保进水阶段所有易降解COD都能转化为聚羟基脂肪酸(PHA),即储存在微生物体内的慢速可生物降解的聚合物。当进入曝气阶段后,微生物将主要利用内部储存的生物聚合物进行好氧代谢,如此会降低细菌的生长速率。而较低的生长速率会使颗粒污泥的生长更慢、更密实,因此维持颗粒污泥光滑的表面只需更小的剪切力。如此,培养出的好氧颗粒污泥将更加稳定。

其次,从Nereda®工艺系统实际运行的表现可以发现,依托于反应器在线仪表如溶解氧(DO)、氨氮、硝酸盐等监测仪,通过灵活地优化曝气阶段和缺氧阶段的时间,以及改变曝气系统的DO设定等手段,可以调节生化系统的硝化与反硝化能力。在曝气过程中,氨氮被转化为硝酸盐,由于颗粒中存在固有的氧梯度,微生物将利用外部的COD使一部分硝态氮在颗粒内部的缺氧区发生反硝化反应,此为同时硝化反硝化过程。此外,相关研究还证实聚磷菌和聚糖菌在厌氧情况下储存的生物聚合物也可充当反硝化过程中的电子供体^[3,6-7]。同时,在好氧条件下,聚磷菌将磷酸盐储存为聚磷化合物,从而实现反硝化和磷酸盐去除的双重功能。因此Nereda®工艺可以减轻聚磷菌与反硝化菌对进水

COD的竞争,节省COD的消耗,使更多的COD用于反硝化,从而提高氮的去除率。只要维持缺氧条件,聚磷菌就不会在液体中释放磷酸盐,这将使出水中的磷浓度也较低。

此外,好氧颗粒污泥的粒径大小、来水有机物种类等也会影响氮、磷的去除^[3]。在一定程度上颗粒越大,反硝化效率越高,然而氨氮的氧化速率并不受颗粒大小的影响。

相关实验及中试结果表明^[2,7],以聚磷菌为主的颗粒更大、更密集,因具有更快的沉降速度而有优势保持在反应器的底部。由于进水是从反应器底部以柱塞流方式进入,很明显底部的颗粒有更多的可用底物,与聚糖菌相比,聚磷菌暴露于较高比例的可利用碳源环境中。通过在反应器特定高度上设置污泥排出点并进行排泥操作的控制,可使聚糖菌群体的污泥停留时间低于聚磷菌主导的颗粒污泥,导致随着时间的推移聚糖菌被淘汰出系统。所以,以聚磷菌为主的好氧颗粒污泥系统具有更好的生物除磷能力。

2 工程运行表现

2.1 荷兰Epe污水处理厂

Epe污水处理厂是荷兰第一个全规模应用Nereda®技术的市政污水处理厂。依托于先期长达4年的中试论证,该厂最终于2010年开始设计、建造,2011年正式投入运行,图3为Epe污水处理厂的鸟瞰图。



图3 Epe污水处理厂鸟瞰图

Fig.3 Aerial photos of Epe WWTP

Epe污水处理厂的主要处理工艺流程如图4所示。污水先经过格栅和隔油沉砂池,随后通过3座Nereda®反应器净化后进入重力砂滤池,经过滤后直

接排放。Nereda[®]反应器的设计平均处理量为8 000 m³/d,峰值小时流量为1 500 m³/h。

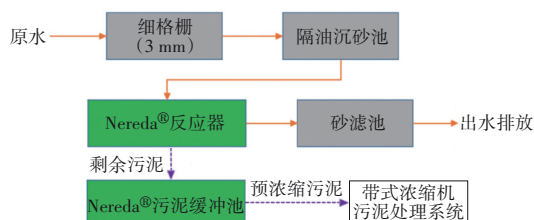


图4 Epe污水处理厂的Nereda[®]工艺流程

Fig.4 Schematic flow chart of Nereda[®] process in the Epe WWTP

自2011年9月起经过4个月的运行,Nereda[®]系统的进水量即达到了100%的设计流量。启动期间,颗粒污泥在Nereda[®]反应器内逐渐累积。值得注意的是,污泥“颗粒化”过程有一段时间发生在冬季,污水的平均温度低于10℃。

监测结果证实,自投产以来,采用Nereda[®]技术使原污水厂的处理能力增加了1倍,并且Nereda[®]的性能超出预期,出水水质达到荷兰最高标准,总氮和总磷浓度分别低于5 mg/L和0.3 mg/L。对该污水处理厂2020年1月—12月的运行数据进行了统计,结果如表1所示。

表1 Epe污水处理厂的设计水质和运行数据

Tab.1 Design water quality and operational data of Epe WWTP mg·L⁻¹

项目	设计值			运行指标			
	进水		出水要求	进水		出水(砂滤后)	
	平均值	平均值	80%保证率	平均值	80%保证率	平均值	80%保证率
COD	678		125	806	1 183	24.6	30.0
BOD ₅	279		20	346	534	1.5	2.0
TSS	265		30	319	524	6.0	10.5
TKN	72			73	103	1.6	2.6
TN		8		73	103	2.5	6.7
TP	7.6	0.3		8	12	0.2	0.6

由表1可知,出水总氮平均为2.5 mg/L,出水总磷平均为0.2 mg/L,均满足出水氮、磷指标要求,且出水总氮明显优于设计要求。

另外,由于该污水厂还接收了35%左右的屠宰场废水,受此影响,进水特性和负荷均有较大波动,尤其是进水pH的波动(pH接近10),但Nereda[®]系统依然表现出了良好的稳定性和抗冲击能力。在与原有传统活性污泥系统平行运行的中试中发现,高

pH会导致常规活性污泥系统的硝化功能完全丧失,并需数周时间才能恢复,而接收相同进水的Nereda[®]中试装置在几个运行周期后的1~2 d内即可恢复正常运行。

2.2 荷兰Utrecht污水处理厂

Utrecht污水处理厂是荷兰迄今为止建造的规模最大的采用Nereda[®]工艺的污水厂,平均日流量76 300 m³/d,峰值流量14 100 m³/h。该厂于2017年实施提标改造,2018年开始正式运行。原污水厂采用传统活性污泥法,仅沉淀池就有14座,改造后只需6套Nereda[®]反应器以及不到40%的占地面积即可处理相同的水量。由于Nereda[®]工艺占地紧凑,因此在原有曝气池和沉淀池左侧的有限区域内就可新建Nereda[®]处理系统,如图5所示。而原有曝气池和沉淀池在Nereda[®]工艺系统启动之后便进行了拆除,腾出的区域交还社区用作自然教育中心。

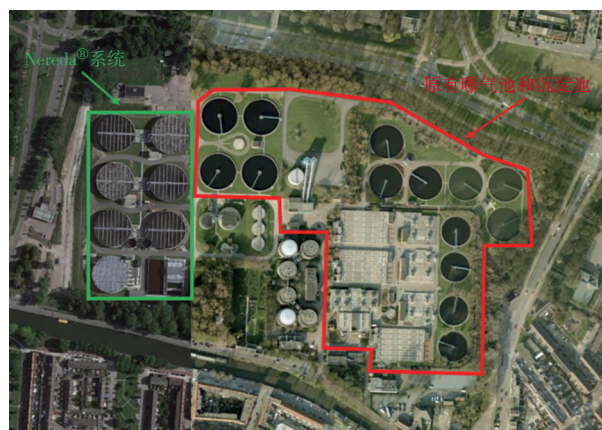


图5 Utrecht污水厂Nereda[®]系统与原有处理系统的鸟瞰照片

Fig.5 Aerial photos of the Nereda[®] system and the original treatment system in Utrecht WWTP

Utrecht污水处理厂的Nereda[®]工艺流程如图6所示。

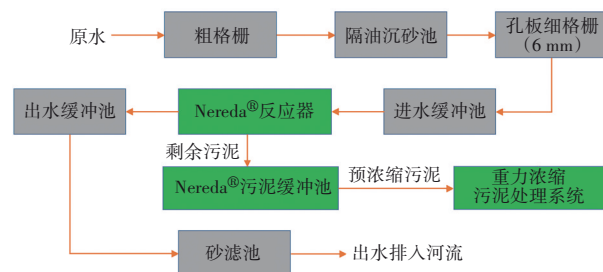


图6 Utrecht污水处理厂的Nereda[®]工艺流程

Fig.6 Schematic flow chart of Nereda[®] process in the Utrecht WWTP

该污水处理厂新建的Nereda[®]系统共有6座圆

形池,单座池容12 000 m³,直径46 m,水深7.3 m,设计水温为10~24 ℃。此外,Nereda[®]系统还包括1座12 000 m³的进水缓冲池、2座500 m³的预浓缩污泥缓冲池以及1座4 000 m³的出水缓冲池。

在不投加任何化学药剂的情况下,该污水厂出水总氮和总磷分别低于5 mg/L和0.5 mg/L(见表2),比原活性污泥系统出水相应指标低50%,出水可直接排入与厂区紧邻的河流。也正是因为上述Nereda[®]系统紧凑的占地和优异的生物脱氮除磷能力,该污水厂运行仅一年便获得了国际水务情报(GWI)平台颁发的“2019年度最佳污水处理项目”奖项。

表2 Utrecht污水处理厂的设计水质和运行数据

Tab.2 Design water quality and operational data of the Utrecht WWTP

项 目	设计值		运行指标			
	进水	出水	进水		出水(砂滤后)	
	平均值	平均值	平均值	95%保证率	平均值	95%保证率
COD	730	125	622	818	26	35
BOD ₅	287	20	270	380	3	7
TSS	314	8	280	380	7	13
TKN	64		56	74	2	4
TN	64	5			5	9
NH ₄ ⁺ -N					0.4	2.0
PO ₄ ³⁻ -P					0.3	0.9
TP	8	0.5	8	11	0.5	1.3

注: 运行指标为2020年9月—2021年8月期间的数据。

2.3 荷兰 Garmerwolde 污水处理厂

荷兰 Garmerwolde 污水处理厂于2005年被改造成AB两段式活性污泥系统,之后因无法达到所需的营养物去除目标以及不断增长的处理水量的需求,需要对污水厂进行升级。荷兰当地水务局最终选择了Nereda[®]技术作为生化处理工艺,以扩大处理能力,并同时提高脱氮除磷能力。

荷兰皇家哈斯康宁 DHV 公司提供的解决方案是新建两套9 500 m³的Nereda[®]反应器以及一座4 000 m³的进水缓冲池,并与现有的AB系统并行运行。2013年启动了提标改造工程,建造了两套直径为41 m的Nereda[®]反应器来处理约41%的进水,占地面积却比原AB处理系统的25%(澄清池直径为48 m)还小。该污水厂Nereda[®]系统与AB系统平面布置如图7所示。



图7 Garmerwolde污水厂Nereda[®]系统与AB系统平面布置

Fig.7 Overview of the Nereda[®] system and the existing AB treatment system in the Garmerwolde WWTP

Nereda[®]系统于2014年正式投运至今,处理的水量已经超过总水量的50%,平均处理量20 000 m³/d。具体的工艺流程如图8所示。

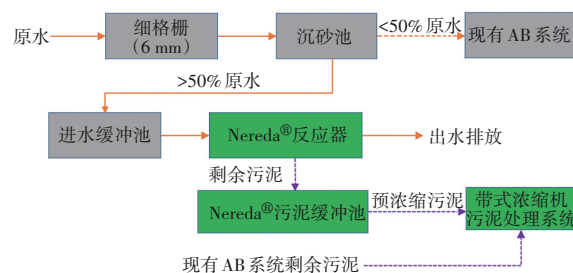


图8 Garmerwolde污水处理厂的Nereda[®]工艺流程

Fig.8 Flow chart of Nereda[®] process in the Garmerwolde WWTP

Nereda[®]反应器的启动主要有两个阶段:第一阶段是颗粒化阶段,第二阶段是处理效率提升阶段。

第一阶段:由于在调试期间对出水TN和TP分别提出了小于15 mg/L和1 mg/L的要求,因此该阶段污水系统的进水负荷需要根据出水指标适时调整,以满足出水排放要求。在运行3个月后系统流量达到了设计要求,对TN、TP和COD的去除趋于稳定。总磷完全通过Nereda[®]系统生物反应即可达到去除目标,TN和TP均满足上述出水要求。

第二阶段:经过第一阶段的启动期后,坚固密实的颗粒床(MLSS>8 g/L)已形成并在此后能长期保持稳定,5 min的污泥体积指数SVI可达45 mL/g。颗粒污泥中有超过80%的粒径>0.2 mm,超过60%的粒径>1 mm。启动完成后Nereda[®]系统出水TN和TP平均值分别为6.9和0.9 mg/L,所有指标都符合出水要求。第二阶段即2014年3月—12月的进、出水平均值如表3所示。而同样的运行期间,在投加

大量反硝化碳源以及用于改善污泥性质的混凝剂和除磷铁盐的情况下,传统AB系统出水TN和TP平均值分别为9.9和0.9 mg/L。

表3 Garmerwolde污水处理厂的运行数据

Tab.3 Operational data of the Garmerwolde WWTP

mg·L⁻¹

项 目	BOD ₅	COD	TN	NH ₄ ⁺ -N	TP	TSS
进水	224	506	49.4	39.0	6.7	236
出水要求	20	125	7.0		1.0	30
Nereda®出水	9.7	64	6.9	1.1	0.9	20

值得注意的是,上述Nereda®工艺运行期间偶有氮和磷浓度比平均值高的情况,这是因为大雨引起的进水流量及营养物浓度比干燥天气下高2~5倍(即“首次冲刷”效应)。但在大雨时段通过缩短Nereda®系统的循环周期时间即从390 min缩短到180 min,并投加少量的铁盐除磷药剂[Fe(Ⅲ)/P物质的量比为0.18],就可使系统对总磷的去除率维持在90%。

此外,2014年的运行数据显示,Nereda®系统(包括中间泵)的运行能耗比AB系统降低了50%左右。与AB系统的高化学药剂成本相比,Nereda®系统几乎不需要投加额外的化学药剂。此外,加药还导致AB系统的污泥产量几乎是Nereda®系统的两倍。因此,Nereda®系统的总运营成本(能耗、药剂、污泥处理等)明显低于传统工艺。

3 结语

通过Nereda®反应器特殊的内件构造以及特有的运行模式,可以培养出以慢速生长的聚磷菌或聚糖菌为主的好氧颗粒污泥。此种颗粒结构密实,沉降性好并且可长期稳定。加之好氧颗粒污泥特殊的三维空间分层结构,Nereda®工艺具有同时将COD、氮和磷等营养物高效去除的能力。从荷兰的3个典型工程案例来看,Nereda®工艺在实际污水处理运行中均有着出色的脱氮除磷表现,同时也显示出,Nereda®工艺具有占地面积小、抗冲击负荷能力强、运行费用低、运行模式灵活、处理效果好等传统污水处理工艺无法比拟的优点。Nereda®工艺能很

好地解决现有污水厂占地资源紧张又亟需扩大处理能力的问题。对于土地资源紧张的地区,Nereda®工艺无论是新建或扩(改)建都具有无可比拟的竞争优势。

参考文献:

- [1] PRONK M, DE KREUK M K, DE BRUIN B, *et al.* Full scale performance of the aerobic granular sludge process for sewage treatment [J]. *Water Research*, 2015, 84: 207-217.
- [2] WINKLER M K H, KLEEREBEZEM R, KHUNJAR W O, *et al.* Evaluating the solid retention time of bacteria in flocculent and granular sludge [J]. *Water Research*, 2012, 46(16): 4973-4980.
- [3] YUAN Q, GONG H, XI H, *et al.* Strategies to improve aerobic granular sludge stability and nitrogen removal based on feeding mode and substrate [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 84(10): 144-154.
- [4] LI J, DING L B, CAI A, *et al.* Aerobic sludge granulation in a full-scale sequencing batch reactor [J]. *Biomed Research International*, 2014, 2014: 268789.
- [5] LOCHMATTER S, GONZALEZ-GIL G, HOLLIGER C. Optimized aeration strategies for nitrogen and phosphorus removal with aerobic granular sludge [J]. *Water Research*, 2013, 47(16): 6187-6197.
- [6] YUN G, LEE H, HONG Y, *et al.* The difference of morphological characteristics and population structure in PAO and DPAO granular sludges [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 76(2): 388-402.
- [7] WINKLER M K, BASSIN J, KLEEREBEZEM R, *et al.* Selective sludge removal in a segregated aerobic granular biomass system as a strategy to control PAO-GAO competition at high temperatures [J]. *Water Research*, 2011, 45(11): 3291-3299.

作者简介:吴志明(1989-),男,福建南平人,硕士,工程师,主要从事水污染治理工艺设计工作。

E-mail:jimmy.wu@dhv-beec.com

收稿日期:2022-05-27

修回日期:2022-08-19

(编辑:丁彩娟)