

# 低碳源污水的奥贝尔氧化沟脱氮除磷影响因素分析

廖建胜, 林元昆, 吴 亨, 张 思, 叶浩然  
(温州中环正源水务有限公司, 浙江 温州 325000)

**摘 要:** 温州市中心片污水处理厂采用奥贝尔氧化沟工艺,近年来随着进水碳源浓度的降低,生物脱氮除磷效率也不断下降。结合该厂的实际运行数据,分析了沿程各构筑物对TN、TP的去除效果。由于长期处理低碳源污水,生物段各构筑物的实际运行工况与原设计功能有较大差异。影响脱氮除磷效果的限制因素是碳源不足、预处理段充氧、回流污泥携带硝态氮等。对此可通过控制曝气沉砂池的曝气强度、优化和调整氧化沟的溶解氧浓度、污泥回流比等加以解决。

**关键词:** 低碳源污水; Orbal 氧化沟; 脱氮除磷; 限制因素

**中图分类号:** X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)11-0027-06

## Analysis of TN and TP Removal Efficiency in Orbal Oxidation Ditch Process with Low Carbon Source

LIAO Jian-sheng, LIN Yuan-kun, WU Heng, ZHANG Si, YE Hao-ran  
(General Water of Wenzhou Company Limited, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** The Orbal oxidation ditch process was adopted in Wenzhou Central Sewage Treatment Plant. With the decrease of influent carbon source, the efficiency of biological nitrogen and phosphorus removal also decreased in the past few years. Based on the actual operation data of the plant, the removal effect of TN and TP along the process was analyzed. Because of the long-term treatment of sewage with low carbon source, there were large differences between the actual operating conditions of each biological structure and the function of the original design. The limiting factors of nitrogen and phosphorus removal were the low carbon source, the oxygenation of the pretreatment section, and the nitrate nitrogen in return sludge, etc. These problems could be solved by controlling the aeration intensity of aerated grit chamber, optimizing and adjusting dissolved oxygen concentration of oxidation ditch and sludge return ratio, and so on.

**Key words:** sewage with low carbon source; Orbal oxidation ditch; nitrogen and phosphorus removal; limiting factors

由于气候条件、居民生活方式、污水收集管网等因素的影响,国内城市污水处理厂的进水碳源浓度普遍较低<sup>[1]</sup>,一般难以保证同步生物脱氮除磷的效果<sup>[2]</sup>。投加碳源<sup>[3]</sup>、化学除磷<sup>[4]</sup>、侧流除磷<sup>[2,5]</sup>、侧流活性污泥水解<sup>[6,7]</sup>、改良工艺<sup>[1,8]</sup>、优化工艺参数<sup>[9,10]</sup>等措施都能提高脱氮除磷效果,但多数报道都基于实验室小试或中试研究。目前污水处理厂大多采用后置化学除磷和投加碳源来提高脱氮除磷效

果,导致运行成本和污泥产量均大幅增加<sup>[2]</sup>。笔者以温州市中心片污水处理厂为例,分析了在低碳源条件下氮、磷浓度的沿程变化以及各工艺单元的实际处理效果差异,指出影响生物脱氮除磷效果的关键限制因素,旨在为城市污水处理厂工程设计和运行调控提供参考。

### 1 工程概况

温州市中心片污水处理厂设计规模为  $20 \times 10^4$

$\text{m}^3/\text{d}$ ,分两期建设,一期规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,2002 年建成投运,续建规模为  $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,2003 年建成投运,两期工艺完全相同,并联运行,采用前置厌氧选择池的奥贝尔氧化沟工艺,设计 SRT 为 20 d,厌氧选择池 HRT 为 0.67 h,氧化沟 HRT 为 8 h,外、中、内三沟的容积占总容积的比例分别为 50%、32%、18%,DO 按 0、1、2 mg/L 控制,80% 的 TN 在外沟去除,工艺流程如图 1 所示。

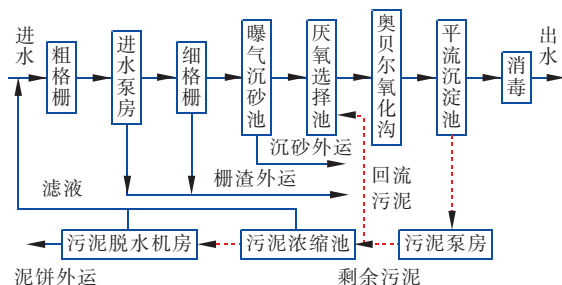


图1 工艺流程

Fig.1 Flow chart of sewage treatment process

设计进出水水质如表 1 所示。

表1 设计进出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	氨氮	总氮	总磷	SS
进水	350	130	20	30	5	150
出水	100	30	15	20	3	30

## 2 碳源浓度变化对去除氮、磷的影响

该厂自投入运行以来从未投加外部碳源和化学除磷药剂,TN、TP 全部由生物作用去除,从 2008 年开始水量满负荷运行,因此水质分析从 2008 年开始,其中 TN 数据分析从 2012 年开始。每天取进出水 24 h 混合样进行检测,并以年平均值进行统计。

### 2.1 进水碳源浓度变化

该厂进水 COD 浓度从 2008 年的 352 mg/L、2009 年的 370 mg/L 逐渐降至 2016 年的 107 mg/L, BOD<sub>5</sub> 浓度从 2008 年的 164 mg/L 逐渐降至 2016 年的 44 mg/L, TN 浓度从 2012 年的 27.85 mg/L 逐渐降至 2016 年的 20.19 mg/L,进水 COD、BOD<sub>5</sub> 浓度下降幅度远大于 TN; COD/TN 值从 2012 年的 10 逐渐降至 2016 年的 5.3, BOD<sub>5</sub>/TN 值从 2012 年的 4.7 逐渐降至 2016 年的 2.2 (见图 2)。对于脱氮工艺来说通常要求 BOD<sub>5</sub>/TN 值 > 4<sup>[11]</sup>,但该厂从 2014 年开始就已低于 4,表明进水碳源不足,呈典型低碳源

污水特征。

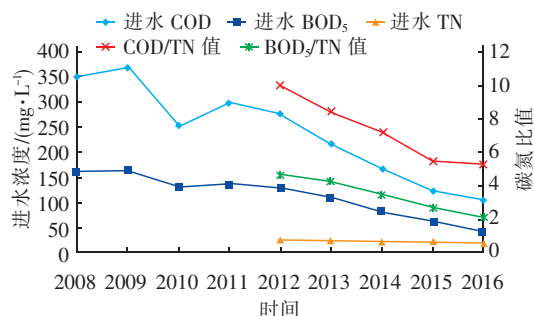


图2 进水污染物浓度的逐年变化

Fig.2 Change of influent pollutants concentration

### 2.2 进出水TN、TP 浓度变化

进水 TN 从 2012 年的 27.85 mg/L 逐渐降至 2016 年的 20.19 mg/L,而出水 TN 却从 10.41 mg/L 上升至 13.18 mg/L;随着进水碳源浓度的降低,TN 去除率大幅下降,从 2012 年的 62.62% 降至 2016 年的 34.72%,降幅达 44.55%。

进水 TP 从 2011 年的 3.92 mg/L 逐渐降至 2016 年的 1.74 mg/L,而出水 TP 却从 0.22 mg/L 上升至 0.9 mg/L;随着进水碳源浓度的降低,TP 去除率大幅下降,2011 年—2016 年的年平均去除率分别为 94.39%、93.66%、86.54%、75.21%、53.40%、48.28%,总降幅达 46.11%。

### 3 低碳源进水对脱氮除磷的影响分析

为了分析在低进水碳源下 Orbal 氧化沟生物脱氮除磷效果下降的原因,该厂从 2014 年 9 月—2016 年 12 月对不同工艺单元进行取样检测。进出水水样摇匀后直接检测,各单元取混合液静置后对上清液进行分析。通过二十几次的沿程分析后发现,各污染物的沿程变化趋势基本一致。

#### 3.1 COD 沿程变化

在不同浓度的低碳源进水条件下,至厌氧选择池时 COD 浓度已经基本下降至 30 mg/L 以下,去除率高达 77.94%,在 Orbal 氧化沟的外沟、中沟、内沟及二沉池已基本在 20 mg/L 以下,去除率仅有 11.03%,对 COD 的总去除率可达 88.97%。厌氧池对 COD 的去除率高,一是二沉池污泥回流(回流比为 90%~110%)稀释的结果,二是曝气沉砂池检测的是 TCOD,颗粒状和胶体态有机物进入厌氧池时被回流的污泥迅速吸附去除,三是 SCOD 在脱氮除磷过程中被有效利用。在外沟、中沟、内沟、二沉池 SCOD 浓度降低不明显,表明进水经过厌氧池后剩

下的大多是难降解有机物,有限的碳源已最大限度地被用于厌氧池的生物脱氮除磷过程,到外沟时碳源已不足。

### 3.2 脱氮过程分析

对氮浓度沿程变化的检测结果如图3所示。氨氮浓度从曝气沉砂池的18.09 mg/L迅速下降为厌氧池的3.96 mg/L,之后在外沟、中沟、内沟逐步降至0.2 mg/L,表明系统的硝化能力良好,氨氮去除率很高。厌氧池去除的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 为14.13 mg/L,去除率为78.11%,表明厌氧池存在较强的硝化反应,大部分 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在厌氧池已完成去除。这从硝态氮的变化曲线可以得到印证,回流硝态氮经进水稀释后,流入厌氧池的浓度计算值应为4.82 mg/L,而实测浓度为5.62 mg/L。曝气沉砂池出水TN为20.29 mg/L,厌氧池出水TN为10.44 mg/L,去除率达到49.74%,之后在外沟、中沟、内沟浓度几无变化,表明厌氧池中存在同步硝化反硝化(SND)现象<sup>[12]</sup>,TN主要在厌氧池被去除,外沟由于碳源不足反硝化受限,对TN的去除率不高。由此可见,实际承担TN去除的主要是厌氧池,而不是通常认为的外沟。

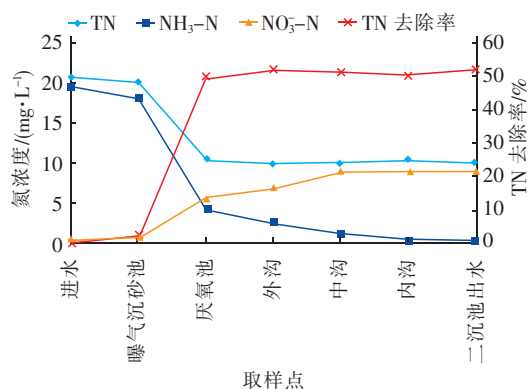


图3 沿程  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TN 浓度变化

Fig.3 Change of  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$  and TN concentration in system

### 3.3 除磷过程分析

曝气沉砂池对TP有一定的去除能力,TP浓度由2.25 mg/L降至1.73 mg/L,共去除了0.52 mg/L,去除率为23.11%,分析认为可能是油脂和有机颗粒物的有效去除使TP也得到一定的去除。TP主要在厌氧池得到去除,去除了0.89 mg/L,去除率为39.56%。在Orbal氧化沟的外沟、中沟、内沟TP浓度变化不大,分别为0.83、0.81、0.81 mg/L,这和厌氧释磷、好氧吸磷的生物除磷基本原理不一致。结

合前面的分析可知,由于厌氧池存在同步硝化反硝化现象,TP可能通过反硝化吸磷而得到部分去除,由于厌氧池没有发生释磷现象,导致中沟、内沟的好氧吸磷现象不明显,致使生物除磷总体去除率较低。

## 4 脱氮除磷影响因素分析

该厂历年相同时段的水温差别很小,pH值在6.8~7.3之间,各工艺段的HRT无法调节,SRT基本控制在13~20 d之间。

### 4.1 污泥回流比对脱氮除磷的影响

DO、硝态氮通过污泥回流的形式进入厌氧池,对厌氧释磷产生不利影响。为研究在低碳源进水条件下污泥回流比对去除TN、TP的影响,在该厂进行了为期半年(2016年6月9日—2017年1月8日)的生产性试验研究,一期工艺恒定污泥回流比为90%,续建工艺的污泥回流比则从100%逐步下调至65%,每次调整幅度为5%,并至少运行15 d,每天对进出水TP、TN取24 h混合样进行检测,并取同一回流比下的平均值进行分析,结果如图4、5所示。

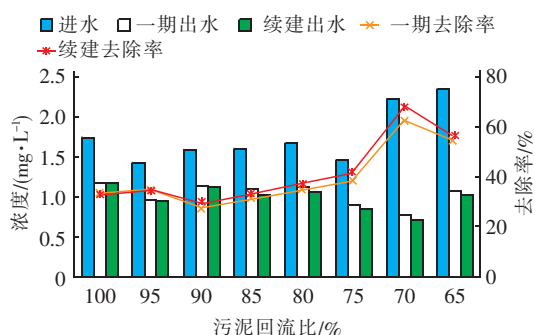


图4 不同回流比下对TP的去除率

Fig.4 Removal rate of TP under different reflux ratio

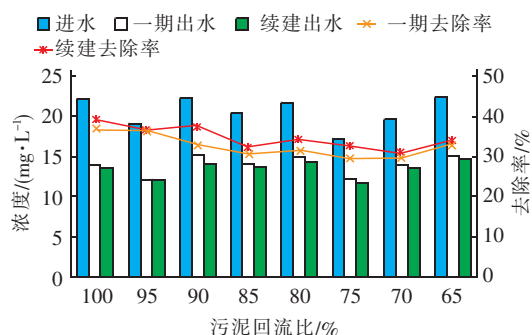


图5 不同回流比下对TN的去除率

Fig.5 Removal rate of TN under different reflux ratio

由图4可知,当续建污泥回流比>90%(即高于一期回流比)时,两者出水TP浓度相差无几,去除率也基本相同;当续建污泥回流比<90%(即低



于一期回流比)时,续建出水 TP 浓度比一期低 0.02 ~ 0.06 mg/L,去除率高 1.25% ~ 5.5%,表明当污泥回流比 < 90% 时,生物处理系统对 TP 的去除率有一定的提高,但当回流比继续下降时提升作用并不明显。

由图 5 可知,当一期回流比固定为 90%,续建回流比从 100% 逐步下调至 65% 时,续建出水 TN 浓度比一期略低,去除率比一期略高,最高达 3.47%,并且与污泥回流比不呈相关性。分析认为可能是工艺运行参数控制很难完全相同,导致续建工程的 TN 去除率普遍比一期略高,而与污泥回流比无关。表明在低碳源污水条件下,调整污泥回流比对去除 TN 的影响有限。

## 4.2 DO 对脱氮除磷的影响

### 4.2.1 沿程 DO 分析

为了探究溶解氧对生物除磷的影响,用便携式溶氧仪对沿程构筑物进行了多次检测,在水力沿程上共有 4 处跌落充氧现象,跌落高程差均在 0.4 ~ 0.5 m 之间。进水初始 DO (粗格栅前) 为 0.78 mg/L,经进水泵提升在出口跌落充氧后 DO 值提高至 1.98 mg/L,经曝气沉砂池曝气除砂充氧后 DO 提高至 2.66 mg/L,在曝气沉砂池出口处跌落充氧后 DO 又提高至 4.41 mg/L,之后与回流污泥 (DO 为 0.5 mg/L,回流比为 100%) 混合后流入厌氧池。由于初始好氧和回流硝态氮的存在,在厌氧池前端迅速发生同步硝化反硝化反应、氧化反应, TN 通过同步硝化反硝化去除, TP 通过反硝化除磷作用去除, SCOD 作为碳源迅速被利用和氧化,溶解氧被消耗降至 0.51 mg/L。由于碳源不足和 DO 降低,同步硝化反硝化反应减弱甚至停止,厌氧池末端 DO 仍有 0.46 mg/L,由此可知,整个厌氧池中 DO 处于较高的水平,没有达到聚磷菌 (PAOs) 释磷所需的厌氧环境 (一般  $DO < 0.2$  mg/L),聚磷菌 (PAOs) 未能释磷,因而无法在氧化沟中过量吸磷 (外沟、中沟、内沟、出口跌落处的 DO 分别为 0.48、1.48、1.68、3.69 mg/L),导致对 TP 的去除率较低。

通过分析可知,厌氧池没有严格控制厌氧条件是 TP 去除率较低的一个重要原因。预处理段进水泵出口、曝气沉砂池出口两处跌落充氧,以及曝气沉砂池曝气除砂充氧导致进水 DO 过高是厌氧池无法保持厌氧环境的主要原因。在 2011 年、2012 年进水 COD > 270 mg/L、 $BOD_5 > 130$  mg/L、 $BOD_5/TN$  值

> 4、 $BOD_5/TP$  值 > 35 的情况下,对 TP 的去除率分别高达 94.39%、93.66%,表明在碳源充足、高碳氮比、高碳磷比的条件下,可以消除预处理段充氧对厌氧池的不利影响。分析认为,在碳源充足条件下,厌氧池前端迅速发生硝化反硝化、氧化等反应,随着 DO 逐渐被消耗而形成缺氧环境,硝化反应减弱直至停止,剩余硝态氮被反硝化完全去除,当 DO 被完全消耗后进入厌氧环境,聚磷菌 (PAOs) 利用进水中剩余 VFAs 充分释磷,在氧化沟中沟、内沟好氧条件下过量吸磷,从而达到非常高的 TP 去除率。

### 4.2.2 外沟 DO 的分析

该厂 Orbal 氧化沟外、中、内三沟的容积占总容积的比例分别为 50%、32%、18%,外沟布置 6 组转碟,4 组呈几何轴对称布置,2 组对向均匀布置,转碟起到曝气充氧、推流搅拌混合的作用。沟内水流呈外壁流速高而内壁流速低、表面流速高而底部流速低;DO 也呈外壁高而内壁低、表面高而底部低,距转碟曝气点高而远离转碟低的几何分布。故选取一台全速运转的转碟后深度为 0.2 m 的日常监测点检测 DO,其 DO 值在外沟属于较高值。外沟 DO 为 0.48 mg/L,由此可知外沟处于整体缺氧状态。DO 浓度直接影响宏观和微观缺氧环境的形成,也是影响同步硝化反硝化的重要因素,点源限制性曝气方式和环形沟道设计为 Orbal 氧化沟实现同步硝化反硝化提供了条件<sup>[12]</sup>,分析表明,外沟 DO 控制不是该厂外沟反硝化脱氮的限制因素。

从图 3 可知,外沟作为 TN 主要去除单元,在实际生产过程中仅有硝化反应而几乎没有反硝化反应。这是因为进水经过厌氧池后剩下的大多是难降解有机物,可利用碳源已不足,表明碳源不足是外沟反硝化脱氮的限制因素。

## 4.3 污泥活性对脱氮的影响

该厂近几年生物池 MLSS 基本控制在 2 600 ~ 3 500 mg/L 之间,平均为 3 092 mg/L,MLVSS 平均为 1 407 mg/L,厌氧选择池的 HRT 为 0.67 h。从图 3 可知,厌氧池去除的 TN 达 9.85 mg/L,如不计同化作用去除的 TN,则厌氧池的反硝化速率为  $10.5 \text{ mgNO}_3^- - \text{N}/(\text{gVSS} \cdot \text{h})$ ,表明活性污泥性能良好,反硝化菌数量充足、反硝化能力较强,污泥活性不是外沟反硝化脱氮的限制因素。

## 4.4 污泥活性对除磷的影响

取该厂二沉池回流污泥各 2 L 置于 2 个总容积

为6 L的有机玻璃容器中,按100%回流比各加入2 L进厂原水,其中2<sup>#</sup>装置同时加入乙酸钠使初始SCOD浓度达到161 mg/L,每个容器的MLSS约为3 200 mg/L,MLVSS为1 792 mg/L。两个装置均设置搅拌器,以60~80 r/min转速搅拌,实时监测确保混合液DO<0.2 mg/L以维持厌氧环境。对2个容器分别在0、0.33、0.67、1、1.5、2、3、4 h时取样,样品经过滤后检测,结果如图6所示。

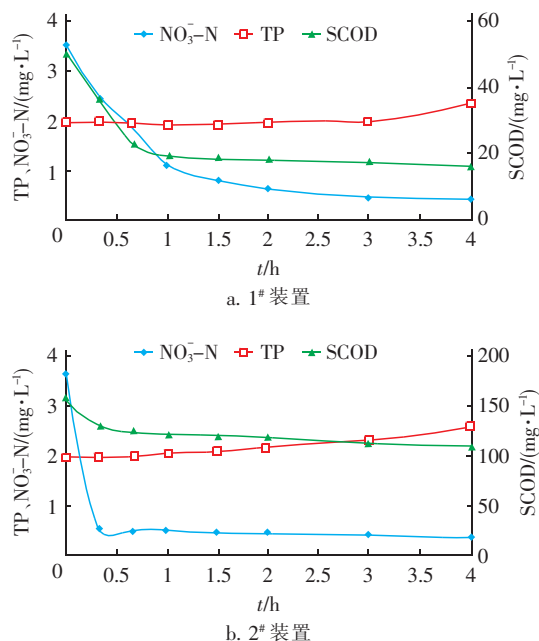


图6 活性污泥释磷规律

Fig. 6 Rule of phosphorus release from activated sludge

由图6(a)可知,1<sup>#</sup>装置由于碳源不足,反硝化速率较慢,在停留时间为1.5 h时,混合液中硝态氮浓度降至0.74 mg/L,在此过程中TP有小幅下降,分析认为可能是反硝化聚磷菌(DPB)以硝酸盐为电子受体进行吸磷的结果。在停留时间>2 h后,TP浓度开始缓慢上升,至4 h时TP浓度达到2.32 mg/L,总释磷量为0.36 mg/L,比释磷速率为0.05 mgP/(gVSS·h)。

由图6(b)可知,2<sup>#</sup>装置由于外加了充足的碳源,反硝化速率很快,在停留时间为20 min时,混合液中硝态氮浓度就已降至0.56 mg/L,在停留时间为1 h时,TP浓度开始缓慢上升,至4 h时TP浓度达到2.58 mg/L,总释磷量为0.59 mg/L,比释磷速率为0.082 mgP/(gVSS·h)。

2<sup>#</sup>装置消除了硝态氮对碳源竞争给释磷带来的不利影响,但其释磷量和比释磷速率仍然很低。分

析认为,厌氧池长期处于缺氧或较高浓度硝态氮环境,使PAOs不能优先吸收VFAs并以PHB贮存于胞内,以致在氧化沟中好氧环境下由于贮存的PHB少、分解产生的能量低,影响了PAOs的好氧生长和自身维持,使PAOs在与GAOs及其他好氧菌的竞争中处于劣势,从而引起系统中PAOs数量的减少<sup>[13]</sup>,导致除磷率下降。厌氧池非严格的厌氧环境以及活性污泥中PAOs数量的减少,是该厂除磷率下降的主要原因。

## 5 建议与措施

① 预处理段进水泵出口、曝气沉砂池出口两处跌落充氧,以及曝气沉砂池曝气除砂充氧引起进水DO浓度过高,导致厌氧池无法处于厌氧状态,是TP去除效果差、碳源氧化浪费的主要原因。因此,建议污水处理厂在设计时要重视预处理段的跌落充氧问题,减少跌落高程差、采用滑落或淹没出口,以减少跌落充氧;运行时在不影响除砂效果的前提下尽量控制曝气沉砂池的曝气强度、减少曝气量。

② 鉴于回流污泥中硝态氮对碳源的竞争及抑制PAOs释磷,宜延长厌氧池HRT,取《室外排水设计规范》(GB 50014—2006)推荐上限值(1.5~2 h),并在前端设置预缺氧池,使回流污泥在预缺氧池中完成反硝化脱氮。当低碳源污水中碳源不足以使回流污泥在预缺氧池中完成反硝化脱氮时,可以在预缺氧池投加碳源,在去除部分TN的同时确保厌氧池PAOs充分释磷,提高对TP的去除效果。当出水TN仍不能达标排放时,再考虑在Orbal氧化沟外沟投加碳源以提高反硝化脱氮效果。

③ 由于碳源在进入Orbal氧化沟时已基本消耗殆尽,因此在运行时可以适当减少中沟和内沟的曝气量,出水口DO控制在1.0~2.0 mg/L即可;根据污泥有机负荷合理降低氧化沟MLSS,避免因DO过高而过度氧化,或有机负荷过低导致污泥老化分解。

④ 尽管污泥回流比对TP、TN的去除效果影响不大,但考虑到污泥回流携带的硝态氮和DO给厌氧池PAOs厌氧释磷带来的不利影响,建议控制二沉池污泥层在合理范围前提下尽量降低污泥回流比,以70%~80%为宜。

## 6 结论

随着进水碳源浓度的不断下降,对TN的去除率由62.62%逐渐降至34.72%,对TP的去除率由

94.39% 逐渐降至 48.28%。

长期处理低碳源污水时,生物段各构筑物的实际运行工况与工程设计功能有较大差异。受预处理段跌落充氧和曝气沉砂池曝气充氧以及回流硝态氮的影响,厌氧池无厌氧释磷现象,存在同步硝化反硝化、反硝化除磷、氧化等反应,成为去除 TN、TP 的主要场所,其实际运行环境属于缺氧状态。Orbal 氧化沟外沟、中沟、内沟均以硝化、氧化反应为主,外沟几无反硝化作用,中沟、内沟几无好氧吸磷。影响该厂脱氮除磷效果的限制因素是进水碳源不足、预处理段充氧、回流污泥携带硝态氮。因此,在工程上应重视和消除预处理段跌落充氧和曝气充氧问题,以及回流污泥携带的硝态氮对厌氧池厌氧释磷的干扰问题;运行上应及时优化调控各工艺参数,以提高生物脱氮除磷效果,降低处理成本。

#### 参考文献:

- [1] 李若谷,张雁秋,孙艳,等. 低碳源污水中 ECOSUN-IDE 工艺的碳源利用分析[J]. 中国给水排水,2013,29(13):97-100.
- [2] 郝晓地,衣兰凯,付昆明. 侧流磷回收强化低碳源污水脱氮除磷效果的模拟与实验研究[J]. 环境工程学报,2013,7(1):231-236.
- [3] 孙慧,郑兴灿,孙永利,等. 外加碳源对改良 A<sup>2</sup>/O 工艺反硝化除磷的影响[J]. 中国给水排水,2010,26(13):82-85.
- [4] 黄健,汤利华,唐玉朝,等. 化学除磷比值对低碳源污水脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水,2012,28(3):94-97.
- [5] 郝晓地,衣兰凯,王克巍. 强化低碳源污水生物除磷的技术方式探究[J]. 中国给水排水,2012,28(1):95-99.
- [6] 吉芳英,郭倩,金展,等. 低碳源污水的强化反硝化除磷研究[J]. 中国给水排水,2012,28(13):7-10.
- [7] 刘智晓,Gert Petersen,张伟,等. 低碳源条件下利用侧流活性污泥水解技术强化生物脱氮除磷[J]. 给水排水,2013,39(1):53-57.
- [8] 王盈盈,于海琴,赵刚,等. 倒置 A<sup>2</sup>/O-MBR 工艺处理低碳源污水脱氮除磷效果研究[J]. 水处理技术,2013,39(6):77-79.
- [9] 杨庆娟,王淑莹,刘莹,等. 污泥回流比对 A<sub>2</sub>N 反硝化除磷工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水,2008,24(13):37-41.
- [10] 令云芳,王淑莹,王伟,等. 厌氧段 HRT 对 A<sub>2</sub>N 工艺反硝化除磷脱氮效果的影响[J]. 水处理技术,2006,32(10):44-47.
- [11] 张智,陈杰云,李勇,等. 处理低碳源污水的倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺强化脱氮技术研究[J]. 中国给水排水,2009,25(13):7-9.
- [12] 高守有,彭永臻,王淑莹,等. Orbal 氧化沟生物脱氮的中试研究[J]. 中国给水排水,2005,21(8):5-9.
- [13] 郭春艳,王淑莹,李夕耀,等. 聚磷菌和聚糖菌的竞争影响因素研究进展[J]. 微生物学通报,2009,36(2):267-275.



作者简介:廖建胜(1973- ),男,浙江瑞安人,本科,高级工程师,主要从事污水处理厂运行管理及污水处理技术研究工作。

E-mail:948051308@qq.com

收稿日期:2017-03-05