

# 呼吸图谱表征活性污泥微生物的休眠与流失

张亚伟, 李志华, 杨成建, 李仁运

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 通过试验模拟污水厂低温条件,研究了温度降低过程中出水水质和活性污泥呼吸图谱的变化规律。结果表明,有机物去除和脱氮效果明显恶化的临界温度分别为8℃和10℃;系统经过短暂低温冲击后恢复至原温度运行,微生物活性和污水处理能力可快速恢复。当标准条件下OUR未发生明显变化而现场条件下OUR减小时,表明微生物进入休眠状态,且现场条件与标准条件下的OUR差值越大,进入休眠状态的微生物数量越多,此时升高温度可快速激活微生物的活性。当标准条件下OUR明显减小时,表明微生物出现流失。该研究提供了一种利用呼吸图谱判别微生物休眠与流失的简便方法,为污水厂在越冬期的水质安全保障提供了理论基础。

**关键词:** 低温; 活性污泥; 呼吸图谱; 呼吸比例; 休眠; 流失

**中图分类号:** X703      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4602(2017)11-0007-05

## Indication of Dormancy and Loss of Activated Sludge Microorganisms Using Respirogram

ZHANG Ya-wei, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, LI Ren-yun

(Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology <Ministry of Education>, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The changes of effluent quality and activated sludge respirogram were studied during the process of temperature reduction by simulating the low temperature condition of the sewage plant. The results showed that the critical temperature for the removal efficiency of organic matter and nitrogen were 8℃ and 10℃, respectively. The system was restored to the original temperature operation after a brief low temperature impact, and microbial activity and sewage treatment capacity could also be quickly restored. When the field condition OUR decreased and the standard condition OUR did not change obviously, it indicated that the microorganism was in a dormant state, and the greater the OUR difference between the field condition and the standard condition, the more the microorganisms entered the dormant state. At this time, the increasing temperature could activate the activity of microorganism rapidly. When the standard condition OUR significantly reduced, indicating the loss of microorganisms. This study provides a simple method for discriminating dormancy and loss of microorganisms by respirogram, which provides a

基金项目: 陕西省住房和城乡建设厅科技计划项目(2015-K63); 西安市社会发展引导计划—社会发展科技示范项目(2016063SF/SF09)

通信作者: 李志华      E-mail: lizhihua@xauat.edu.cn

theoretical basis for the safety of water quality of the wastewater treatment plant in winter.

**Key words:** low temperature; activated sludge; respirogram; respiration ratio; dormancy; biomass loss

目前我国污水处理厂的主体工艺主要为活性污泥法。活性污泥微生物的活性直接关系到污水处理的效果,而温度在很大程度上影响着微生物的活性<sup>[1~3]</sup>。低温会抑制活性污泥微生物的活性,尤其是硝化菌和反硝化菌的活性,从而影响污水处理厂对污染物尤其是含氮污染物的去除效果<sup>[3]</sup>。硝化细菌的最适生长温度为25~30℃,当温度较低时,部分硝化菌会进入休眠状态而无法发挥硝化作用,若温度继续降低则硝化菌会发生流失,严重影响脱氮效果。微生物的休眠与流失状况与污水处理厂的处理效果密切相关,但目前针对微生物的休眠与流失尚缺乏准确的判断依据。

好氧微生物的耗氧速率(OUR)作为评价活性污泥代谢活性的一个重要指标,可以表征污泥微生物的生理和活性状态。耗氧速率法作为一种快速生物检测法,可以反映环境变化对微生物的影响<sup>[4,5]</sup>。因而在污水厂实际运行中,可以用OUR及其比例的变化来指示系统的运行状况及活性污泥的健康状态等<sup>[6~9]</sup>。

笔者基于呼吸计量法,运用SBR反应器,通过模拟污水厂低温条件,对降温过程中出水水质、活性污泥呼吸图谱的变化进行分析,研究污水处理厂在冬季低温条件下活性污泥系统的处理能力、微生物的流失与休眠状态及微生物种群的变化规律,以期作为冬季低温条件下污水处理厂的运行调控提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与装置

试验采用SBR反应器,接种污泥取自西安某污水处理厂A<sup>2</sup>O工艺的好氧池。反应器有效容积为7L,充水比为1/3。反应器的运行温度通过水浴层外接温度控制器进行控制。反应器运行周期为8h,运行工况为:进水0.2h→曝气搅拌6h→沉淀1.6h→排水0.2h。

活性污泥的呼吸图谱采用污水处理智慧运行工作站进行测定,该智慧运行工作站由恒温好氧反应器、溶解氧探头、pH计、PLC控制系统、加药系统和数据分析系统组成。其中,恒温好氧反应器是有效

容积为1.2L的有机玻璃密闭容器,内置均匀充氧曝气头,外侧有循环恒温水浴层。分析平台在线连续采集溶解氧和pH值数据,采集周期设定为2s,数据自动存入数据库。

### 1.2 试验方案

SBR反应器的进水采用人工配水,以乙酸钠作为碳源,氯化铵作为氮源,磷酸二氢钾作为磷源,具体的进水水质如下:COD为650mg/L,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  为80mg/L,TP为8mg/L,微量元素为0.4mL/L。微量元素组成: $\text{H}_3\text{BO}_3$  为0.15g/L,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  为0.03g/L, KI为0.18g/L,  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  为0.12g/L,  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为0.06g/L,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为0.12g/L,  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  为0.15g/L,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为1.54g/L, EDTA为12.74g/L。

试验初期,控制SBR反应器的运行温度为20℃,进行污泥驯化和培养,待运行稳定后温度逐步降低至5℃。同时分析不同温度下反应器对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除效果,并对曝气搅拌末期的污泥进行取样,分析现场条件(测定呼吸图谱温度与反应器运行温度相同)及标准条件(测定呼吸图谱温度为20℃)下活性污泥呼吸图谱的变化。

### 1.3 分析方法

#### 1.3.1 呼吸速率测定方法

采用呼吸计量法,通过智能分析平台监测恒温好氧反应器中的氧平衡浓度,计算得到氧吸收速率。SBR反应器处于曝气搅拌末期时取活性污泥0.3L,加入智能分析平台后稀释至1.2L,测定现场OUR<sub>s</sub>。之后将污泥样品通过搅拌15s、沉淀10min、去上清液定容至0.6L,用缓冲溶液(PBS)洗泥3次,测定污泥的准内源OUR<sub>q</sub>。然后将反应器内活性污泥混合液定容至1.2L,通过对污泥样品曝气2h测定其内源OUR<sub>e</sub>,再加入50mg/L的氯化铵测定OUR<sub>en</sub>,此呼吸速率包括自养菌呼吸速率OUR<sub>n</sub>和内源OUR<sub>e</sub>。最后加入300mg/L的乙酸钠,保证基质充足,测定总呼吸速率OUR<sub>enc</sub>,此呼吸速率包括自养菌呼吸速率OUR<sub>n</sub>、异养菌呼吸速率OUR<sub>e</sub>、内源呼吸速率OUR<sub>e</sub>。整个分析过程由仪器通过PLC进行自动控制,保持曝气量稳定、搅拌均匀。

此外,定义内源呼吸比例为内源呼吸速率占总呼吸速率的比例,即  $OUR_e/OUR_{enc}$ ;同理,  $OUR_n/OUR_{enc}$  为自养菌呼吸比例,  $OUR_c/OUR_{enc}$  为异养菌呼吸比例。将测定温度与反应器运行温度相同时得到的图谱定义为现场条件呼吸图谱,而测定温度控制在 20 ℃ 时得到的图谱为标准条件呼吸图谱。

### 1.3.2 水质分析方法

COD 采用快速消解分光光度法测定;  $NH_4^+ - N$  采用纳氏试剂分光光度法测定; TN 采用过硫酸钾氧化—紫外分光光度法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降温过程中反应器出水水质变化

降温过程中对各指标的去除效果如图 1 所示。

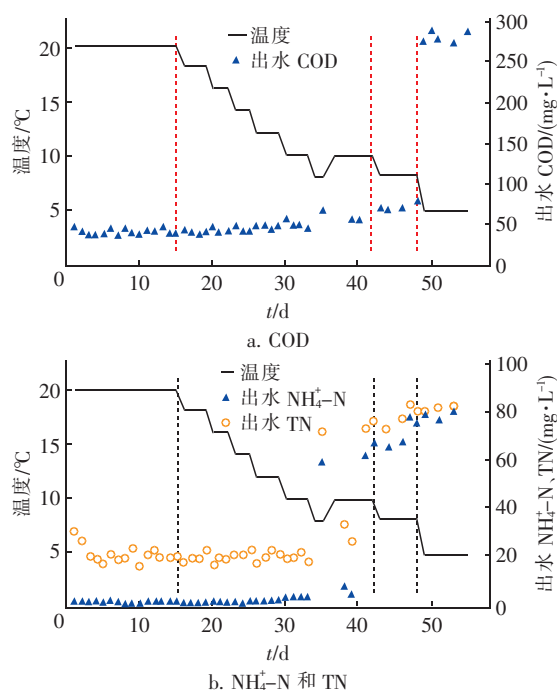


图1 出水水质随温度的变化

Fig. 1 Variation of effluent quality with temperature

在温度从 20 ℃ 逐渐降低至 8 ℃ 的过程中,出水 COD 基本保持稳定且均在 60 mg/L 以下,去除率均在 90% 以上,温度变化对 COD 的去除效果影响较小。这是因为温度降低虽然会降低异养菌的活性,减缓有机物的降解速率,但由于异养菌庞大的生物量以及足够的水力停留时间,故在此范围内温度降低对有机物的去除效果影响不大。但温度由 8 ℃ 降低至 5 ℃ 时,对 COD 的去除效果急剧恶化,出水 COD 升至 275 mg/L 左右,去除率降至 55% 左右。

在温度从 20 ℃ 逐渐降低至 10 ℃ 的过程中,出

水  $NH_4^+ - N$  和 TN 浓度基本保持稳定,系统可以维持较高的脱氮效率。其中,出水  $NH_4^+ - N \leq 2$  mg/L,去除率保持在 97% 以上,而出水 TN 约为 20 mg/L,去除率为 75% 左右。这说明在 10 ~ 20 ℃ 范围内温度降低对生物硝化及脱氮效果影响较小。但是当温度由 10 ℃ 降至 8 ℃ 时,系统的脱氮能力急剧降低,出水  $NH_4^+ - N$  急剧升高至 65 mg/L 左右,出水 TN 升高至 72 mg/L 左右,去除率分别降为 18% 和 10% 左右。温度继续降低至 5 ℃ 时,系统基本丧失脱氮能力。此时,低温严重抑制了微生物尤其是硝化菌的活性,微生物开始流失,严重影响到污水处理效果。

此外,由图 1 可知,将反应器运行温度由 10 ℃ 降至 8 ℃ 运行一天后,立即升温至 10 ℃,出水 COD、 $NH_4^+ - N$  和 TN 浓度均有明显升高后又降低,说明当系统受到短暂的低温冲击并立即恢复原温度运行时,系统对污水的处理能力可以很快恢复。综上所述,8 ℃ 为此水质条件下系统去除有机物的效果急剧恶化的临界温度,而脱氮能力急剧恶化的临界温度为 10 ℃ 左右。

### 2.2 降温过程中活性污泥呼吸图谱变化

#### 2.2.1 现场与标准条件下呼吸图谱变化

现场条件呼吸图谱反映的是现场条件下微生物的活性,与出水水质有密切关系,可以表征活性污泥微生物在一定条件下处理污水的能力。而标准条件呼吸图谱反映的是活性污泥微生物的内在特性。降温过程中现场条件与标准条件呼吸图谱变化如图 2 所示。随着温度的逐渐降低,现场条件下的自养菌 OUR、异养菌 OUR 和总 OUR 均逐渐减小。说明温度降低会导致微生物的活性下降,从而导致污水处理能力变差。而在标准条件下活性污泥呼吸图谱均可以分为三个阶段,第一阶段为 20 ℃ 条件下驯化培养至稳定阶段,第二阶段为温度由 20 ℃ 降至 10 ℃ 时呼吸图谱未明显变化阶段,第三阶段为温度由 10 ℃ 降至 5 ℃ 时标准呼吸图谱开始减小阶段。

第二阶段的标准条件呼吸图谱明显高于第一阶段,这是由于在此阶段反应器运行温度逐渐减低,而标准条件呼吸图谱的测定温度为 20 ℃,温度的突然升高会使活性污泥微生物产生应激反应,从而使得微生物的 OUR 增大。在第二阶段标准条件下的 OUR 基本保持稳定,而现场条件下的 OUR 却逐渐减小,说明在此阶段活性微生物的内在活性并未降

低,只是在现场条件下,部分微生物由于温度降低进入了休眠状态,此时若升高温度则可以使活性污泥快速恢复活性。由此说明当现场条件呼吸图谱减小而标准条件呼吸图谱并未发生明显变化时,部分微生物进入休眠状态,此时升高温度可以快速激发微生物的活性。

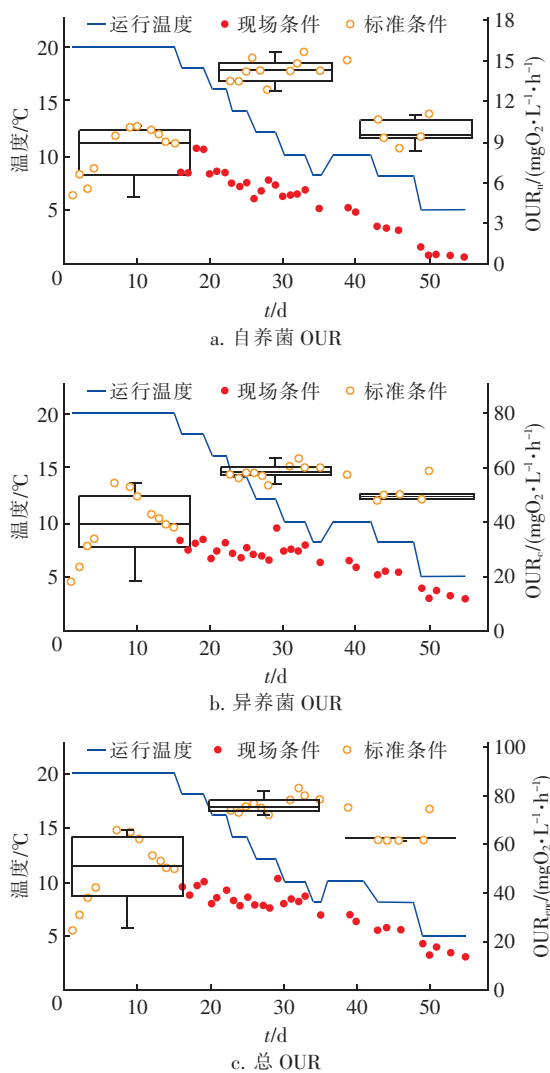


图2 现场与标准条件下呼吸图谱变化

Fig. 2 Variation of respirogram under field and standard condition

第三阶段的标准条件呼吸图谱明显小于第二阶段。由图1可知,第三阶段污泥基本丧失硝化能力,有机物去除能力也急剧恶化,由物料平衡可知微生物在此阶段生长缓慢,自养菌甚至没有增长,但定时排泥导致活性污泥微生物尤其是自养菌发生了流失,此时升高温度也无法使微生物恢复活性,故标准条件呼吸图谱明显减小。由此说明当标准条件

$\text{OUR}$  出现明显减小时,表明微生物出现了流失。

第二阶段温度由  $20^{\circ}\text{C}$  降至  $10^{\circ}\text{C}$  的过程中,现场条件下自养菌  $\text{OUR}$  与异养菌  $\text{OUR}$  的降幅分别为 40% 和 25% 左右,第三阶段的标准条件自养菌  $\text{OUR}$  相比第二阶段减小了 31.48%,而标准条件异养菌  $\text{OUR}$  减小了 12.17%,由此说明了异养菌对低温的适应能力明显强于自养菌,低温条件下自养菌较异养菌更容易发生休眠与流失。

## 2.2.2 现场与标准条件下各呼吸比例变化

降温过程中现场条件与标准条件下呼吸比例变化如图3所示。

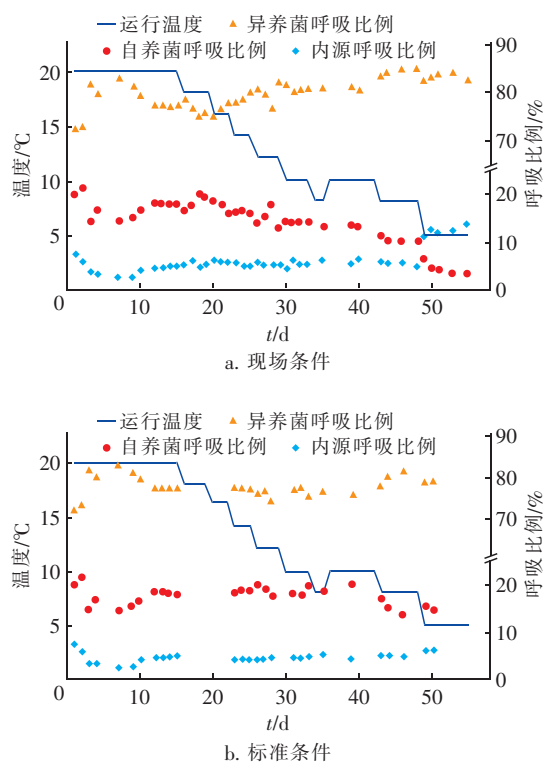


图3 现场与标准条件下呼吸比例变化

Fig. 3 Variation of respiration ratio under field and standard condition

由图3(a)可知,随着温度的降低,现场条件自养菌呼吸比例逐渐减小,而异养菌呼吸比例逐渐增大,说明温度降低对异养菌的影响较小,但对自养菌的影响较大。

由图3(b)可知,温度由  $20^{\circ}\text{C}$  降至  $10^{\circ}\text{C}$  的过程中,标准条件自养菌呼吸比例和异养菌呼吸比例均保持稳定,说明在此阶段活性污泥微生物的内在活性基本保持稳定,温度降低对污泥的内在生理特性影响较小。尽管由于低温导致污泥的现场条件呼吸



比例发生变化,但此时升高温度可以很快恢复活性污泥微生物尤其是自养菌的活性,从而提高现场条件自养菌呼吸比例。温度由 10℃ 继续降至 8 和 5℃,标准条件下自养菌呼吸比例开始减小,而异养菌呼吸比例开始增大,说明此时低温对微生物的种群结构产生了一定影响,自养菌流失严重,也表明异养菌较自养菌对低温的适应能力更强。

温度由 20℃ 降至 8℃ 的过程中,现场条件与标准条件下的内源呼吸比例均基本保持稳定。温度由 8℃ 继续降至 5℃,现场条件与标准条件下的内源呼吸比例均开始增大,说明低温对微生物的生理活性产生重大影响,污泥的健康状态恶化,应及时采取强化措施。

### 3 结论

① 在降温过程中,有机物去除效果恶化的临界温度为 8℃,脱氮效果恶化的临界温度为 10℃。系统经过短暂低温冲击后恢复至原温度运行,微生物活性及污水处理能力可以快速恢复。

② 通过对比标准条件与现场条件呼吸图谱,可以判断微生物是否产生休眠与流失。现场条件下 OUR 减小且标准条件下 OUR 未发生明显变化时,表明微生物进入休眠状态,且现场条件与标准条件的 OUR 差值越大,微生物进入休眠状态的数量越多,此时升高温度可快速激活微生物的活性。标准条件下 OUR 明显减小时,则表明微生物出现流失。

③ 低温会导致活性污泥微生物种群结构的变化,随着温度的降低,现场条件自养菌呼吸比例减小,异养菌呼吸比例增大。温度由 8℃ 降至 5℃ 时,现场条件与标准条件下内源呼吸比例均增大,低温严重影响污泥的健康状态,此时应及时采取强化措施。

### 参考文献:

- [1] 王阿华,杨小丽,叶峰. 南方地区污水处理厂低温生物脱氮对策研究[J]. 给水排水,2009,35(10):28-33.
- [2] 姚俊芹,易红星,魏震华,等. AB 工艺污水厂冬季运行效果分析[J]. 环境工程学报,2008,2(12):1644-1646.
- [3] 李捷,张杰. 温度对 A/O 工艺反硝化除磷效果的影响[J]. 中国给水排水,2008,24(19):99-100.
- [4] 王建华,陈永志,彭永臻. 低碳氮比实际生活污水 A<sup>2</sup>O-BAF 工艺低温脱氮除磷[J]. 中国环境科学,2010,30(9):1195-1200.
- [5] Abbassi B E. Effect of hydraulic loading variations on the performance of decentralized small scale activated sludge treatment plant[J]. American - Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Sciences,2008,4(5):617-624.
- [6] Majone M, Valentino F, Villano M, et al. Effect of hydraulic and organic loads in sequencing batch reactor on microbial ecology of mixed cultures and storage of polyhydroxyalkanoates[J]. J Biotechnol,2010,150:71.
- [7] 李志华,白旭丽,张芹,等. 基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析[J]. 环境科学,2014,35(9):3492-3497.
- [8] 李志华,柴波,孙垂猛,等. 冲击与恢复条件下活性污泥 OUR 的变化规律[J]. 中国给水排水,2015,31(9):1-5.
- [9] 李志华,孙垂猛,柴波. 不同类型活性污泥内源呼吸过程典型特征解析[J]. 中国给水排水,2015,31(7):25-28.



作者简介:张亚伟(1992-),男,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为废水生物处理理论与技术。

E-mail:1561821962@qq.com

收稿日期:2016-01-27