

活性污泥抑制试验的呼吸速率连续测试方法^{*}

邱 勇¹ 张凤英² 李 冰¹ 张永明² 李 激^{1,3} 施汉昌¹

(1. 清华大学环境学院 北京 100084;

2. 上海师范大学环境科学与工程学院 上海 200062;

3. 江南大学环境学院 无锡 214000)

摘 要 实验室常用序批测试方法获得活性污泥受毒性物质抑制的特征, 不适合污水处理厂日常运行管理。本文提出一种连续的呼吸速率测试方法, 可以快速表征进水中毒性物质对活性污泥中碳氧化和硝化过程的抑制特性。使用该方法测试了铜和酚对活性污泥的抑制效果, 分析了抑制的特性和机理。

关键词 污水处理 活性污泥 呼吸速率测试 抑制特性

一、引 言

我国工业废水排放量大, 且成分复杂。如果工业废水高强度 (大量或集中) 进入污水处理厂, 其中的高浓度毒性物质可能破坏污泥活性, 影响工艺稳定运行和出水水质。呼吸速率指单位时间活性污泥的耗氧量, 一般通过连续测量混合液中的溶解氧浓度获得^[1]。呼吸速率测试方法简单, 可用于污水组分、污泥活性、废水毒性检测、动力学参数估算及工艺优化运行等^[1]。常用的呼吸速率测试方法包括密闭式和开放式两种^[2]。同时也需要看到, 传统的呼吸速率法还不太适合污水处理厂化验室日常采用。比如, 序批测试虽然操作简单但耗时费力; 测试周期中需对活性污泥重复预曝气, 测试频率较低; 测试结果只能反映活性污泥的整体特征, 不能反映微生物种群的特点等。

本文基于开放式呼吸速率法^[2]原理, 提出一种连续呼吸速率测量方法, 可以快速简便地测试有毒物质对不同呼吸过程的抑制程度。

二、材料与方法

(一) 活性污泥抑制特征的理论分析

活性污泥抑制物质主要是重金属和有机物。重金属对微生物的影响是多方面的。某些重金属离子如锌、铜、钴、镍等在痕量水平时是微生物生命过程所必须的^[3], 但是大多数重金属对微生物有毒, 浓度越高、毒性越大。重金属对细胞的毒性机理包括竞争氧和巯基化合物的结合位点、阻遏呼吸作用、改变核酸和蛋白质的结构、干扰氧化磷酸和渗透压的平衡、使细胞形态异常甚至导致细胞的裂解等^[3]。重金属会降低活性污泥菌胶团处理效果, 其机理主要来自两方面: 一是由于重金属的竞争导致活性污泥菌胶团结合有机物的能力降低; 二是重金属抑制某些微生物种类的生长, 改变了菌落结构^[4,5]。

有机物对微生物的抑制过程比较复杂。如酚类化合物具有原生质毒性, 对菌体细胞膜有损害作用, 并能够使细胞蛋白质变性, 导致菌体蛋白凝固。此外酚还会脱氢酶和氧化酶系统产生抑制作用, 破坏细胞正常的新陈代谢作用。活性污泥微生物对大多数有毒有机物有一定的去除能力, 但是能力有限, 因此当有毒有机物在环境中达到一定浓度时, 毒性抑制作用才显露出来。

(二) 连续呼吸速率测量原理

在开放容器中持续曝气, 可以使活性污泥混合液的溶解氧最终达到稳定值, 耗氧速率与氧传质速率相等。此时呼吸速率计算公式如下所示

^{*} 基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项课题 (2011ZX07316-001) 和国家 863 课题 (2012AA063404-003) 资助。

$$\text{OUR}_{\text{tot}} = K_{\text{La}} (\text{DO}_{\text{s}} - \text{DO}_{\text{ST}}) \quad (1)$$

OUR_{tot} 为反应器中总呼吸速率 ($\text{mgDO/L} \cdot \text{min}$)，一般包含外源呼吸速率 OUR_{ex} 和内源呼吸速率 OUR_{en} ； DO_{st} 为作为比较基准的混合液平衡溶解氧浓度 (mg/L)，为加入过量底物后的平衡溶解氧； DO_{s} 为混合液在实验条件下能达到的最高溶解氧浓度 (mg/L)，为加入抑制物前的平衡溶解氧； K_{La} 为混合液中氧传质系数 (min^{-1})。

在连续测试时，逐步在持续曝气的活性污泥中添加定量的毒性物质，可以使微生物活性抑制、耗氧速率降低，导致溶解氧从比较基准 DO_{ST} 升高到新的平衡浓度值 DO_{ST}^* ，此时受抑制后的呼吸速率仍然满足耗氧速率和充氧速率相等，即式 (1)。

使用活性污泥总呼吸速率的降低幅度来描述微生物活性受抑制的程度。

$$I\% = \frac{\text{OUR}_{\text{tot}} - \text{OUR}_{\text{tot}}^*}{\text{OUR}_{\text{tot}}} \quad (2)$$

将呼吸速率表达式代入 (2)，得到仅仅使用溶解氧浓度来计算呼吸速率抑制率的计算公式：

$$I\% = \frac{\text{DO}_{\text{ST}}^* - \text{DO}_{\text{ST}}}{\text{DO}_{\text{s}} - \text{DO}_{\text{ST}}} \quad (3)$$

$I\%$ 表示抑制率； DO_{st}^* 表示呼吸速率受抑制后重新稳定的溶解氧浓度 (mg/L)； DO_{st} 、 DO_{s} 同上。

(三) 实验装置与条件

连续式呼吸过程抑制测试装置结构与开放式呼吸速率仪相似，如图 1 所示，包括反应装置、信号采集、数据处理等部分。混合液采用北京市某城镇污水处理厂外回流污泥，取回后曝气 12 小时达到内源状态。使用分析纯的无水乙酸钠和氯化铵分别配置 COD 和氨氮原液，添加浓度为 500 mgCOD/L 和 5 mg/L ，使活性污泥始终在最大呼吸速率状态。

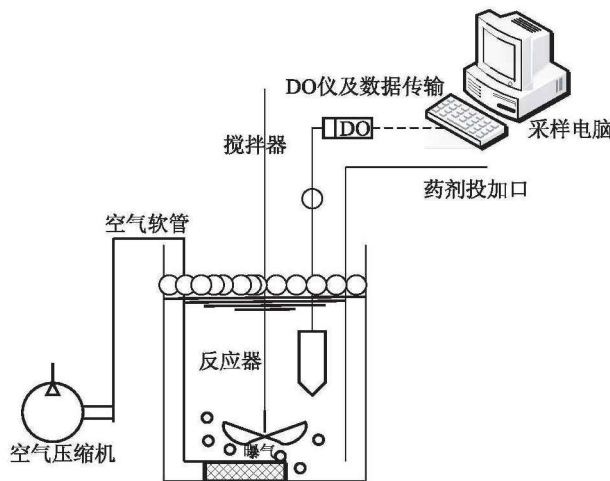


图 1 实验装置图

采用分析纯的五水硫酸铜、苯酚配制抑制剂原液。在试验时逐次向活性污泥中投加，计算累积浓度下的抑制率，获得抑制曲线。

三、结果与讨论

(一) 呼吸速率连续测试曲线

通过呼吸速率连续测试，可以在一个反应器内获得多个稳定的反应平衡状态，从而减少测试难度。图 2 显示了活性污泥最大碳氧化速率的变化情况，图 3 则显示了最大氨氧化好氧速率的溶解氧曲线。从图中可以看到，每次投加铜离子抑制剂后，大约 10min 即可达到新的平衡状态。

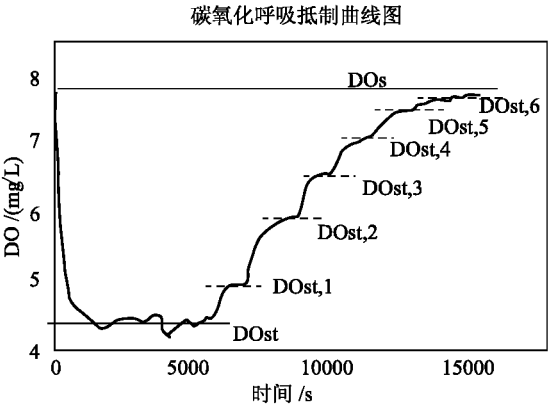


图2 活性污泥碳氧化过程的溶解氧曲线

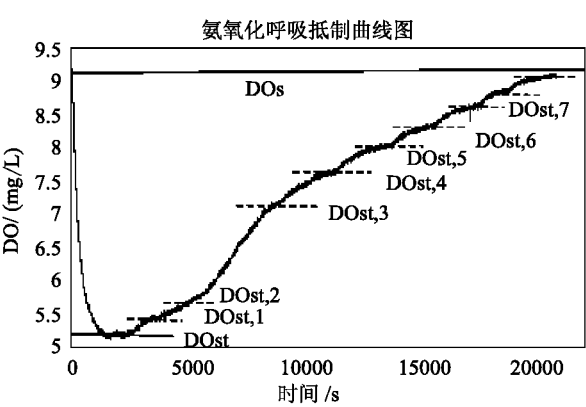


图3 活性污泥氮氧化过程的溶解氧曲线

(二) 活性污泥的抑制曲线

根据图2和图3的数据,用公式(3)可以计算得到累积浓度下的抑制率,可以绘制活性污泥的抑制曲线,如图4和图5所示。

由于污泥浓度会影响抑制物的毒性效应,因此为进行横向比较,采用单位质量微生物的抑制剂浓度(g药剂/gVSS)作为横坐标。抑制率和抑制剂浓度的关系曲线即为抑制曲线。

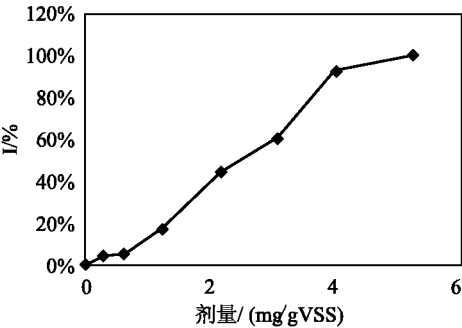


图4 活性污泥碳氧化过程的抑制曲线

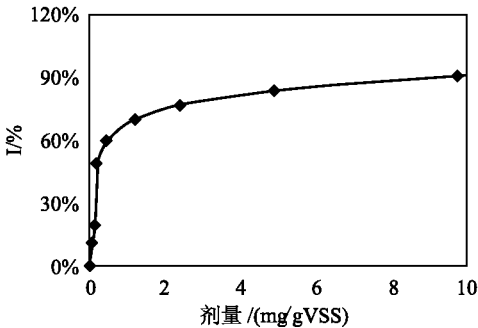


图5 活性污泥硝化过程的抑制曲线

抑制率50%对应的毒性物质浓度成为EC50,可以描述毒性物质的剂量影响。表1为毒性物质对呼吸速率抑制效应的EC50计算结果。可以看到抑制物质对活性污泥碳氧化过程的影响明显,而对氮氧化的影响更大,因为对应的IC50浓度更低。

表1 铜和苯酚的IC50结果

单位: mg/gVSS	碳氧化抑制	氮氧化抑制
Cu^{2+}	1.5	0.53
苯酚	7.4	1.8

(三) 碳氧化和氮氧化过程的受抑制特征

从表1分析,氮氧化过程EC50比碳氧化过程低,说明氮氧化过程非常容易受到抑制。这是由于硝化菌种类少、数量少、功能比较单一,因此某几类细菌受抑制后的整体表现很明显。异养菌种类多、数量多、底物利用途径多,因此具有重叠功能的细菌可以相互替代从而减弱影响。这与文献报道的氮氧化比碳氧化对毒性更敏感的结果是一致的^[6]。

同时还应该看到异养菌和硝化菌在微生物群落结构上的差异。污水中有机底物种类很多,导致异养菌群落结构丰富;氨氮仅有一种物质,导致硝化过程群落结构比较单一。碳氧化和氮氧化

微生物在群落结构丰富性上的差异,有可能是两者呼吸速率受抑制效果相差很大的重要原因。因此也可以推测,呼吸速率的受抑制特征可以作为一种粗略指标来反映群落结构的丰富性。

(四) 方法对实际工作的意义

首先,该方法仪器配置简单,操作过程容易,数据处理不复杂,因此适合作为日常化验中检测活性污泥性质的方法。通过测试本厂污泥的受抑制特性,可以掌握抑制物种类和浓度,从而加快在抑制发生后的污染物质来源排查。

其次,从呼吸速率对毒性物质的敏感性差别可以看到:活性污泥的硝化过程最易受破坏,次之是 COD 的降解。这表明首先要特别注意抑制硝化作用的物质,运行时密切注意氨氮出水浓度,及时发现抑制现象。

最后,城市污水厂进水中的常见重金属铜离子的影响剂量约为 1mg/gVSS ,意味着较低浓度的铜离子即可形成抑制,容易使异养菌和自养菌失活,影响有机物和氨氮的去除效率。

四、结 论

本文提及了连续式呼吸速率测试方法来快速开展活性污泥的毒性抑制实验,结论如下。

1. 连续式呼吸速率测试获取抑制曲线的方法可以获得活性污泥降解 COD 和氨氧活性的抑制特性,操作简便,易于在实际污水处理厂开展。
2. 采用上述方法,获得了铜和酚的抑制曲线,结果表明氨氧化呼吸最易被抑制、碳氧化次之,并从酶系种类、群落稳定性和微生物浓度等方面做了简单分析。
3. 活性污泥硝化过程容易受到破坏,可通过观察出水氨氮的变化规律来及时发现毒性抑制现象。重金属离子在 1mg/gVSS 时能明显抑制碳氧化和氨氧化过程,从而影响出水水质。

参 考 文 献

- [1] 邱勇. 快速生物活性测定方法的仪器化与控制策略研究 [D]. [硕士学位论文]. 北京:清华大学环境科学与工程系, 2003. 6.
- [2] 邱勇, 柯细勇, 施汉昌. 快速生物活性测定方法的仪器化 [J]. 环境工程学报, 2007, 1 (3): 133 - 137.
- [3] 陈亚刚, 陈雪梅, 张玉刚, 龙新宪. 微生物抗重金属的生理机制 [J]. 生物技术通报, 2009, 10: 60 - 65.
- [4] M. H. Cheng, J. W. Patterson and R. A. Minera. Heavy metals uptake by activated sludge [J]. Wat. Pollut. Control Fed., 1975, 47: 362.
- [5] S. K. Mittal and R. K. Ratra. Toxic effect of metal ions on biochemical oxygen demand [J]. Wat. Res., 2000, 34: 147.
- [6] Blum D. and Speece R. A database of chemical toxicity to environmental bacteria and its use in interspecies comparisons and correlations [J]. Res. J. Wat. Pollut. Control Fed, 1991, 63: 198 - 207.