

用快速生物活性测定仪测定活性污泥生物活性的研究

施汉昌,柯细勇,张伟,张杰远

(清华大学环境科学与工程系环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084, E-mail: shihanchang@tsinghua.org.cn)

摘要:基于快速生物活性测定仪,对污水处理厂好氧生物处理单元的重要运行指标——污泥活性的长期变化、酸碱性、温度、毒性等外部环境条件对污泥活性的影响进行了测定与研究。结果表明,长期运行的活性参数变化幅度在 20% 以内;pH 值偏离正常值时,生物活性有不同程度的下降,但对酸性环境的耐受能力远大于对碱性环境的耐受能力;温度升高,污泥的活性增强,温度超过 42.5 °C 后,污泥活性遭到强烈抑制,但内源呼吸速率受温度的影响不明显;毒性物质对生物活性有很强的抑制作用,而且抑制可能是有选择性的。最后还测量了一个实际污水处理厂的污泥活性,标准偏差在 20% 以内。这表明,污泥活性测定结果较稳定,所测量的活性参数能够表征污泥的活性状态。

关键词:生物活性;呼吸速率;生物活性测定仪;活性污泥

中图分类号:X172 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2004)01-0067-05

Study on the Biological Activity of Activated Sludge Using a Rapid Biological Activity Tester

SHI Han-chang, KE Xi-yong, ZHANG Wei, ZHANG Jie-yuan

(Environmental Simulation and Pollution Control State Key Joint Laboratory, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China E-mail: shihanchang@tsinghua.org.cn)

Abstract: Based on a Rapid Biological Activity Tester (RBAT), a study was taken on the sludge activity which is one of the most important parameters in the operation of aerated biological treating unit in WWTp to measure the effect of the external environmental conditions on the sludge activity, such as acidity and alkalinity, temperature, toxicity, etc. It is observed that the variety of the activity parameters is limited in 20% for a long time. While pH is deviated from the normal value, the biological activity drops to some degree, and furthermore, the ability of the microorganism to endure the acerbic environment is much higher than that to endure the alkaline environment. Temperature increase can result in the enhancement of the biological activity, and if the temperature is higher than 42.5 °C, the biological activity is greatly inhibited, but the endogenous respiring rate is less influenced by high temperature. Toxicity can greatly inhibit the biological activity of the activated sludge, and the inhibition is probably selective. Finally, the biological activity of the activated sludge from a real wastewater treatment plant was tested, and the standard deviation of the result is less than 20%. The results indicate that the RBAT is a promising method to measure biological activity, and the characteristics of activated sludge can be well expressed.

Key words: biological activity; oxygen uptake rate; rapid biological activity tester; activated sludge

生物活性是污水处理厂好氧生物处理单元的重要运行指标,它反映了好氧生物反应器降解有机物质的能力。我国绝大多数污水处理厂采用了好氧生物处理工艺,需要对生物处理性能进行在线监测,以判断当前的生物活性状态,通过自动或者人工的方式调整运行参数,使生物处理单元能够运行在最佳的状态点,提高出水水质。

快速生物活性测定仪(rapid biological activity tester, RBAT)采用开放、快速的呼吸测量方法,测量活性污泥系统中微生物的好氧呼吸速率(oxygen uptake rate, OUR),并且利用好氧呼吸速率,结合数学模型,评价污泥的生物活性。

本研究采用 RBAT 对污泥活性的长期变化、酸性碱性、温度、毒性等外部环境条件对污泥活性的影响进行了测定与研究。

1 活性污泥系统污泥活性的长期变化

在实验室人工培养活性污泥,利用 RBAT 实验装置测量污泥活性随时间的变化。

1.1 实验方法

从反应器中取泥 5L,加入 RBAT 测量仪,加自来水至 10L,曝气并搅拌,按照稳定污泥-测量 $K_{L,a}$ -测量 OUR_{ex} 曲线的顺序进行[其中, $K_{L,a}$ 表示氧传质系数,单位 min^{-1} , OUR_{ex} 表示外源呼吸速率,单位 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$]。测试用反应底物为乙酸-乙酸钠溶液。典型的溶解氧浓度(DO)响应曲线如图 1 所

收稿日期:2002-12-11;修订日期:2003-01-21

基金项目:清华大学 985 环境科学与工程研究院基金项目(ENV99-02)

作者简介:施汉昌(1950~),男(汉),上海人,教授。

示.

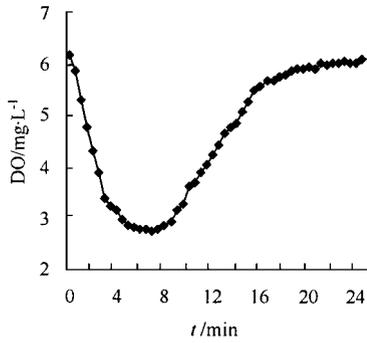


图 1 加入底物的溶解氧浓度响应曲线

Fig.1 Responding curve of DO after adding substance

第 1 阶段每次加入 30 g 有机碳(即有机 C, 表示以 C 表示的乙酸-乙酸钠,下同.反应器内有机物质浓度 COD 为 1000 mg/L),初始 COD 和去除 COD 基本维持稳定状态;第 2 阶段每次加入 60 g 有机 C(反应器内 COD 为 2000 mg/L),因加入了过量的营养物,初始 COD 和去除 COD 都出现一个明显的高峰;第 3 阶段每次加入 45 g 有机 C(反应器内 COD 为 1500 mg/L),因加入的营养物比第 1 阶段增多,初始 COD 和去除 COD 在更高的数值上维持稳定状态.

这段时间里,微生物逐渐适应其生活环境,生物活性不断增强.开始时,活性比较稳定,中间一段时间,生物活性迅速增加,最后,增加的趋势减缓.实验结果清楚地显示了活性污泥系统的启动过程中,污泥活性的巨大变化.

1.2 实验结果

可以根据上述实验得到的溶解氧浓度响应曲线计算 OUR_{ex} ,如图 2 所示.实际上,得到的 OUR_{ex} 曲线中的噪声很大,需要滤波算法平滑曲线.

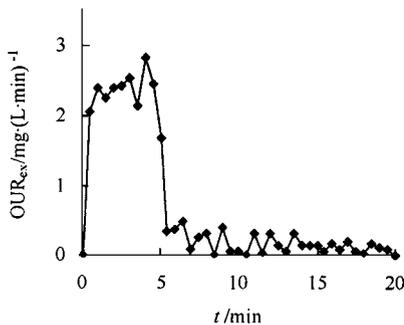


图 2 含 C 底物的 OUR_{ex} 曲线

Fig.2 OUR_{ex} curve of C substance

RBAT 测量污泥活性含 C 反应底物的参数估计的数值计算原理公式:

$$OUR_{ex} = \frac{\mu_m X(1-Y)}{Y} \cdot \frac{\left| \int_0^{\infty} OUR_{ex} dt - \int_0^t OUR_{ex} dt \right|}{K_S(1-Y) + \left| \int_0^{\infty} OUR_{ex} dt - \int_0^t OUR_{ex} dt \right|} \quad (1)$$

其中的 $\mu_m X(1-Y)/Y$ 和 $K_S(1-Y)$ 分别用组合参数 V_m 和 YK_S 表示.在生物量浓度(X_H, X_A)和产率系数(Y_H, Y_A)已知的情况下(这些参数可以采用单独的实验测量),就可以计算出细菌最大比增长速率 μ_m ,溶解性基质的饱和系数 K_S 等参数.

表 1 给出了反应器 10d 连续运行的测试数据.其中, V_m 和 YK_S 是根据 OUR_{ex} 曲线直接估值得到的参数;产率系数 Y 利用估值得到的参数和注入反应底物的 COD 值计算得到;悬浮物质的浓度 SS 为实测得到;初始 COD 为实测的反应器清液 COD 加上投加的有机 C 换算出的 COD;去除 COD 为初始 COD 减去反应后实测的反应器上清液 COD; μ_m 和 K_S 是利用 V_m, YK_S, Y 和 SS 的数据计算得到的.需要说明的是,计算 μ_m 时,应该使用异养微生物的量 X_H .但是,这个数据很难测量,而 SS 中主要物质为 X_H ,因此这里用 SS 估计.

2 测量环境条件对污泥活性的影响

以反应器中的活性污泥为研究对象,利用 RBAT 测量环境条件对污泥活性的影响.内容包括酸性环境、碱性环境、温度和有毒物质对污泥活性的影响.

在数据分析时,由于污泥浓度,污泥产率系数在每次实验过程中都不会有显著变化,故未计算最大比增长速率 μ_m ,只计算并比较了包含 μ_m 的组合参数 V_m .

2.1 外界条件维持不变时污泥活性的稳定性

在污泥温度、pH 值基本维持不变的情况下,开展污泥活性的稳定性实验,每隔 2 h 测量一次,共完成 5 个测量组,总计实验时间 10 h.测量结果如图 3 和图 4 所示.从图中可以看到, OUR_{ex} 曲线在比较长的测试时间内,都基本维持稳定,变化幅度在 20% 以内,组合参数 V_m 也是如此.

以上实验表明,外界条件不变的情况下,污泥的活性在 10~16 h 的测量过程中变化不大.

2.2 酸性环境对污泥活性的影响

采用上述活性污泥研究酸性环境对于污泥活性的影响.

表 1 测量的活性污泥参数

Table 1 Parameters of activated sludge measured

时间/月-日	μ_m / $L \cdot d^{-1}$	K_S / $mg \cdot L^{-1}$	V_m / $mg \cdot (L \cdot min)^{-1}$	YK_S / $mg \cdot L^{-1}$	Y	SS / $mg \cdot L^{-1}$	初始 COD / $mg \cdot L^{-1}$	COD 去除量 / $mg \cdot L^{-1}$
第 1 阶段	04-25	0.205	0.495	0.542	0.173	0.173	0.173	0.173
	04-26	0.183	0.524	0.559	0.199	0.199	0.199	0.199
	04-27	0.237	0.572	0.754	0.221	0.221	0.221	0.221
	04-28	0.219	0.690	0.614	0.235	0.235	0.235	0.235
	04-29	0.238	0.747	0.945	0.321	0.321	0.321	0.321
	04-30	0.359	1.645	1.492	0.750	0.750	0.750	0.750
第 2 阶段	05-01	0.358	2.540	1.592	1.159	0.543	7620	2319
	05-02	0.430	4.146	1.687	1.702	0.589	8100	3000
	05-03	0.387	3.807	1.520	1.500	0.606	8700	3572
	05-04	0.470	2.006	1.710	0.782	0.610	8190	3426
第 3 阶段	05-05	0.597	2.888	2.171	1.135	0.607	8090	2762
	05-06	0.497	1.057	1.585	0.551	0.479	8440	2713
	05-07	0.651	2.022	2.111	1.034	0.489	8920	2745
	05-08	0.734	2.968	2.217	1.495	0.496	8560	2713
	05-09	0.639	3.087	2.605	1.756	0.431	8900	2672

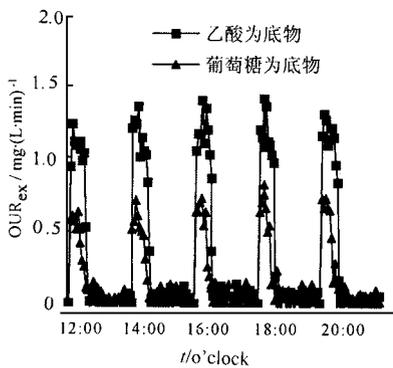


图 3 外界条件不变时的 OUR_{ex} 曲线

Fig. 3 OUR_{ex} curve under steady condition

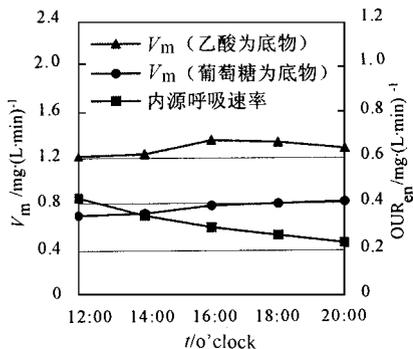


图 4 外界条件不变时的组合参数 V_m 变化

Fig. 4 Combined parameter V_m change under steady condition

利用 HCl 溶液(2 mol/L)和 NaOH 溶液(1 mol/L)调整 pH 值,用 pH 计测定 pH 值.因活性污泥溶液自身有酸碱缓冲能力,实验中要不断地加入酸,以调整 pH 值.

首先从污泥的正常状态(本研究中采用的污泥

正常 pH 值为 8.0)开始测量.然后,每次使 pH 值降低 1,并完成一个测量组.由图 5 可以看出,只要 pH 值偏离正常状态,组合参数 V_m 就会显著下降,而且组合参数 V_m 与 pH 值几乎成线性关系.但在 pH 值很低时,污泥还能维持一定的活性.

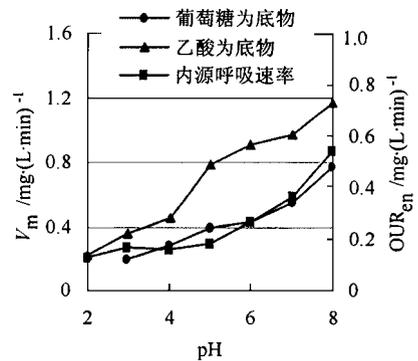


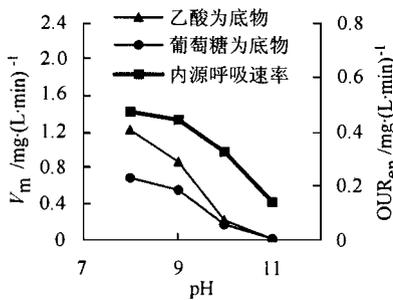
图 5 酸性环境对组合参数 V_m 的影响

Fig. 5 Effect to combined parameter V_m under acid condition

2.3 碱性环境对污泥活性的影响

从污泥的正常状态(pH = 8.0)开始测量.然后,每次使 pH 值升高 1,并完成一个测量组.

实验结果如图 6 所示,只要 pH 值偏离正常状态,组合参数 V_m 就会显著下降.与酸性环境不同的是,碱性环境中组合参数 V_m 下降很快,而且它与 pH 值的关系明显是非线性的.在 pH 值稍高处(pH = 10.0),污泥的活性已经遭到了强烈抑制.这种差异的原因可能是,自然界有机物降解过程中一般都要经历小分子有机酸(如乙酸)的阶段,因此自然的微生物对于酸性环境的耐受能力远远大于对于碱性环境的耐受能力.

图6 碱性环境对组合参数 V_m 的影响Fig. 6 Effect to combined parameter V_m under alkaline condition

2.4 温度对污泥活性的影响

采用温控仪调整活性污泥的温度,加热速度大约 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$.

首先从污泥的初始温度($22.5\text{ }^\circ\text{C}$)开始测量.然后,每次升高 $5\text{ }^\circ\text{C}$,并完成一个测量组.实验结果如图7所示.活性污泥温度的变化会明显影响组合参数 V_m .最初,温度的上升加速了生化反应,活性不断上升, $32.5\text{ }^\circ\text{C}$ 附近是生化反应的最佳区域,污泥的活性达到最高峰,然后温度继续上升,逐渐抑制了生化反应酶的活性,使污泥活性逐渐下降,温度超过 $42.5\text{ }^\circ\text{C}$ 后,污泥活性遭到强烈抑制.

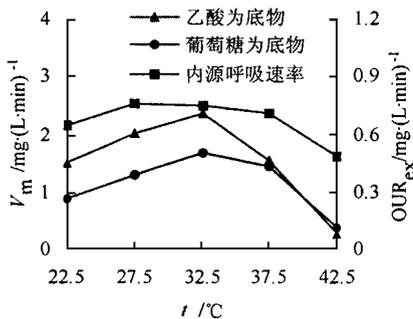


图7 温度对污泥活性的影响

Fig. 7 Effect of temperature to sludge activity

但是,污泥的内源呼吸速率 OUR_{en} 受温度的影响不太明显,尤其在高温时仍然保持了较高的数值,与组合参数 V_m 的变化形成了鲜明对照.

2.5 毒性物质对于污泥活性的影响

实验采用的毒性物质是常用的杀菌剂 CuSO_4 .根据 Vanrolleghem 等人的实验经验,污泥对于 Cu^{2+} 的毒性敏感浓度为 10 mg/L .因此,本实验要测试的 Cu^{2+} 毒性范围为 $0\sim 25\text{ mg/L}$.

首先测量活性污泥的正常状态.然后,每次加入 5 mg/L CuSO_4 ,并完成一个测量组.实验结果如图8所示.污泥降解乙酸表现出的活性在 Cu^{2+} 的浓度从

0 mg/L 上升到 10 mg/L 时下降很快,超过 10 mg/L 以后,污泥活性对 Cu^{2+} 浓度的增加并不敏感.污泥降解葡萄糖表现出的活性始终对 Cu^{2+} 浓度的增加不敏感.

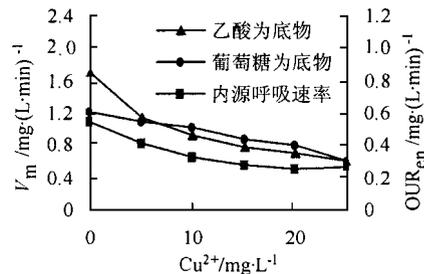


图8 毒性物质对于污泥活性的影响

Fig. 8 Effects of toxicity to sludge activity

上述实验可知,无论是 OUR_{ex} 曲线的高度,还是组合参数 V_m 的大小,以葡萄糖作底物都要明显低于以乙酸-乙酸钠作底物.但在毒性实验中,由于 Cu^{2+} 的抑制作用, Cu^{2+} 浓度超过 10 mg/L 以后,用2种底物实验得到的组合参数 V_m 几乎相同,这说明, Cu^{2+} 对生化反应的抑制可能是有选择性的.当 Cu^{2+} 的浓度达到 25 mg/L 时,以葡萄糖为底物的组合参数 V_m 下降了一半以上,说明了 Cu^{2+} 明显的抑制作用.

3 污水处理厂污泥活性的测量结果

通过测量北京市某污水处理厂污泥的活性参数,考察 RBAT 应用于实际的效果.

该污水处理厂设计处理能力为 $100\ 0000\text{ t/d}$.处理厂进水 COD 为 $200\sim 400\text{ mg/L}$,出水 COD 为 $20\sim 50\text{ mg/L}$.测量时,取处理厂的回流污泥,适当浓缩(污泥浓度为 $5\ 434\text{ mg/L}$).分别以乙酸-乙酸钠、氯化铵和实际污水作反应底物,测定了该活性污泥降解含 C 物质、含 N 物质和实际污水时的生物活性.

表2列出了含 C 物质、含 N 物质和实际污水作底物时各次测量得到的组合参数值,以及它们的平均值和相对偏差.表中 $V_{m,H}$ 和 $Y_{K_{S,H}}$ 分别表示底物为含 C 物质的2个组合参数, $V_{m,A}$ 和 $Y_{K_{S,A}}$ 分别表示底物为含 N 物质的2个组合参数.

由实验可知,该污水处理厂的活性污泥降解含 C 底物时,表现了良好的生物活性;降解含 N 底物时,生物活性比较差;降解实际污水时,活性污泥并没有表现出良好的生物活性,而且没有显示自养菌与异养菌的区别,可能是因为污水中所含的易降解

表 2 某污水处理厂污泥活性测量结果

Table 2 Measurement result of sludge activity from a WWTTP

测次	底物为含 C 物质			底物为含 N 物质			底物为实际污水 ¹⁾	
	$V_{m,H}$	$YK_{S,H}$	Y_H	$V_{m,A}$	$YK_{S,A}$	Y_A	V_m	YK_S
	$/ \text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$	$/ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$/ \text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$	$/ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$		$/ \text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{min})^{-1}$	$/ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
1	2.79	0.89	0.66	0.43	1.66	0.31	0.50	1.60
2	2.90	0.80	0.69	0.30	1.42	0.30	0.55	1.61
3	2.78	0.51	0.69	0.41	1.21	0.30	0.42	1.18
4	2.63	0.72	0.70	0.41	1.24	0.45	0.66	1.84
平均	2.78	0.73	0.68	0.39	1.38	0.34	0.53	1.56
平均偏差 / %	3.52	19.40	2.39	15.46	15.04	22.13	10.05	27.75

1) 底物为实际污水中易降解物质的浓度没有测量,因此产率系数 Y 无法求出。

物质不足。

含 C 底物的测量结果平均偏差较小,含 N 底物的测量结果平均偏差较大。对于含 C 底物, μ_m 和 Y 的测量结果平均偏差较小, K_S 的测量结果平均偏差较大;对于含 N 底物,各参数测量结果平均偏差相当。

在长达 14 h 的测量阶段中,测量结果的平均偏差较小, RBAT 表现了良好的测量稳定性。

4 结论

长期运行的活性参数变化幅度在 20% 以内;pH 值偏离正常值时,生物活性都有不同程度地下降,但对于酸性环境的耐受能力远远大于对于碱性环境的耐受能力;温度高,污泥的活性增强,温度超过 42.5 °C 后,污泥活性遭到强烈抑制,但内源呼吸速率受温度的影响不明显;毒性物质对生物活性有很强的抑制作用,而且抑制可能是有选择性的。

利用 RBAT 测量实际污泥活性发现,在多次测量中,数值偏差在 20% 以内,测量结果稳定,活性参数能够可靠地表征污泥的状态。

实验结果表明, RBAT 能可靠地测量生物活性指标,是水处理过程研究和运行控制中反映活性污泥特性的良好测试手段,具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] Kong Z, Vanrolleghem P. Simultaneous determination of inhibition kinetics of carbon oxidation and nitrification with a respirometer[J]. Water Research, 1996, **30**(4): 825 ~ 836 .
- [2] Vanrolleghem P, Kong Z, Rombouts G. An on-line respirographic biosensor for the characterization of load and toxicity of waste water[J]. Journal of Chemical Biotechnology, 1994, **59**: 321 ~ 333 .
- [3] Witteborg A, Last A. Respirometry for determination of the in-

fluent SS-concentration[J], Water Science and Technology, 1996, **33**(1) : 311 ~ 323 .

- [4] Brouwer H, Klapwuk A. Identification of activated sludge and wastewater characteristics using respirometric batch-experiments [J]. Water Research, 1998, **32**(4): 1240 ~ 1254 .
- [5] Spanjers H, Vanrolleghem P. Respirometry as a tool for rapid characterization of wastewater and activated sludge[J]. Water Science and Technology, 1995, **31**(2): 105 ~ 114 .
- [6] Plessis D, Chris A, Barnard P. Development of respirometry methods to assess the microbial activity of thermophilic bioleaching archaea[J]. Journal of Microbiological Methods, 2001, **47**(2): 189 ~ 198 .
- [7] Gutiérrez M, Etxebarria J, Fuentes L. Evaluation of waste water toxicity: comparative study between microtox and activated sludge oxygen uptake inhibition[J]. Water Research, 2002, **36**(4): 919 ~ 924 .
- [8] Klapwijk A, Brouwer H, Vrolijk E. Control of intermittently aerated nitrogen removal plants by detection endpoints of nitrification and denitrification using respirometry only[J]. Water Research, 1998, **32**(5): 1700 ~ 1703 .
- [9] Orupold K, Mairin A, Tenno T. Estimation of biodegradation parameters of phenolic compounds on activated sludge by respirometry[J]. Chemosphere, 2001, **44**(5): 1273 ~ 1280 .
- [10] Strotmann U, Geldern A, Kuhn A. Evaluation of a respirometric test method to determine the heterotrophic yield coefficient of activated sludge bacteria[J]. Chemosphere, 1999, **38**(15): 3555 ~ 3570 .
- [11] Vanrolleghem A, Spanjers H. A hybrid respirometric method for more reliable assessment of activated sludge model parameter[J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(12): 237 ~ 246 .
- [12] Marsili Libelli S, Tabani F. Accuracy analysis of a respirometer for activated sludge dynamic modeling[J]. Water Research, 2002, **36**(5): 1181 ~ 1192 .
- [13] Urfer D, Huck M. Measurement of biomass activity in drinking water biofilters using a respirometric method[J] Water Research, 2001, **35**(6): 1469 ~ 1477 .