

文章编号:1000-582X(2009)02-0187-05

# 活性污泥模型碳氧化过程参数的呼吸法估计

卢培利<sup>a,b</sup>, 艾海男<sup>a</sup>, 张欣<sup>a</sup>, 张代钧<sup>a,c</sup>, 龙腾锐<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 资源及环境科学学院; b. 三峡库区生态环境教育部重点实验室;

c. 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:**以自行开发的混合呼吸仪对异养菌好氧降解有机物过程进行呼吸测量,结合数学拟合分别对实验室污泥和污水处理厂污泥碳氧化过程模型参数进行了识别与估计。结果表明,2种污泥各自3个组合参数估计值的变动系数 CV 分别在 13%以内和 8%以内,单参数估计值的 CV 分别在 25%以内和 10%以内,混合呼吸仪高的测试频率和测量精度能够改善参数估计精度。呼吸测量实验初始基质浓度和污泥浓度通过影响呼吸速率曲线特性(信息含量)而影响参数估计的精度,是此类实验中需要重点优化的条件。

**关键词:**活性污泥模型;识别;呼吸测量

**中图分类号:**X703.1

**文献标志码:**A

## Parameter estimation of the carbon oxidation process of the activated sludge model using respirometry

LU Pei-li<sup>a,b</sup>, AI Hai-nan<sup>a</sup>, ZHANG Xin<sup>a</sup>, ZHANG Dai-jun<sup>a,b</sup>, LONG Teng-rui<sup>b</sup>

(a. Department of Environmental Science; b. Key Laboratory for the Eco-environmental Protection of Three Gorges Reservoir Region, State Ministry of Education; c. Key Laboratory for the Resource Exploitation and the Environmental Disaster Control Engineering in Southwestern China, State Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China).

**Abstract:** A new hybrid respirometer is used to measure the oxygen uptake rate (OUR) of COD aerobic biodegradation process. Parameter identification and estimation of carbon oxidation process of an Activated Sludge Model are studied by combining the OUR data and mathematical fitting of curves. Coefficients of variation (CVs) for the three combined parameters estimated are below 13% for activated sludge from a laboratory and below 8% for activated sludge from a wastewater treatment plant. For single parameter estimation, the CVs are below 25% and below 10%, respectively. High measurement frequency and precision of the hybrid respirometer can improve the precision of parameter estimation. Initial concentrations of the substrate and the activated sludge of the respirometric experiment are key conditions that must be optimized to obtain high-precision parameter estimation due to their effect on OUR curve characteristics.

**Key words:** activated sludge model; identification; respirometry

收稿日期:2008-09-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50578166)

作者简介:卢培利(1975-),男,重庆大学博士后,主要从事水污染控制方向研究,(Tel)023-65105875;(E-mail)lupl@cqu.edu.cn。  
欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

国际水协活性污泥模型 (activated sludge models, ASMs) 是废水生物处理模型的里程碑。获得模型参数值是模型应用的必要前提<sup>[1]</sup>。尽管已经有一些方法能够得到某些参数值<sup>[2]</sup>, 但目前实际中仍不能识别全部 ASMs 参数<sup>[3-4]</sup>。因此, 模型参数校核成为常用的方法<sup>[5-8]</sup>, 并提出了几种系统化的校核程序<sup>[9-13]</sup>。

ASMs 参数识别与估计需要通过实验设计获得更多高频率、高精度的外部可测变量。Vanrolleghem 等提出向批试验中增加基质脉冲, 最大比增长速率  $\mu_{\max}$  和基质半饱和系数  $K_s$  的估值置信区间可缩小 25%<sup>[14]</sup>; 相似研究还表明, 碳氧化亚模型参数估值置信区间缩小了 20%, 硝化亚模型参数估值置信区间缩小了 50%<sup>[15]</sup>。Baetens 等通过优化反应器中醋酸盐浓度, 改善了生物除磷过程 6 个参数的置信区间<sup>[16]</sup>。Petersen 认为用溶解氧浓度作为测量变量, 可以提高硝化模型参数  $\mu_{\max}$ 、 $K_{NH}$ 、 $S_{NH}(0)$  的估计精度<sup>[17]</sup>。国内的研究主要集中于参数灵敏度分析和部分计量系数的推导<sup>[18-21]</sup>。

COD (chemical oxygen demand) 组分的好氧降解 (碳氧化) 过程是 ASMs 的首要模块, 氧利用速率 (oxygen uptake rate, OUR) 是估计其参数的首选外部可测变量。利用自行开发的混合呼吸仪对异养菌好氧呼吸进行呼吸测量, 通过模型拟合来估计该过程的模型参数, 并通过统计分析考察其效果。

## 1 基于 OUR 的参数可识别性

根据碳氧化过程基质降解与 OUR 之间的关系可以得到式(1)、(2):

$$-\frac{dS_s}{dt}(1 - Y_H) = OUR_{ex}(t), \quad (1)$$

$$OUR_{ex}(t) = \mu_{\max} \cdot X_H \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot \frac{S_s(t)}{K_s + S_s(t)}, \quad (2)$$

对式(1)积分代入式(2)得式(3)

$$OUR_{ex}(t) = \mu_{\max} X_H \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H} \cdot$$

$$\frac{S_s(0) \cdot (1 - Y_H) - \int_0^t OUR_{ex}(t) \cdot dt}{K_s \cdot (1 - Y_H) + S_s(0) \cdot (1 - Y_H) - \int_0^t OUR_{ex}(t) \cdot dt}, \quad (3)$$

$$\text{令 } A = \mu_{\max} X_H \cdot \frac{1 - Y_H}{Y_H}, B = K_s \cdot (1 - Y_H),$$

$$C = S_s(0) \cdot (1 - Y_H),$$

则有

$$OUR_{ex}(t) = A \cdot \frac{C - \int_0^t OUR_{ex}(t) \cdot dt}{B + C - \int_0^t OUR_{ex}(t) \cdot dt}, \quad (4)$$

其中:  $S_s$  为有机基质浓度, mgCOD/L;  $S_s(0)$  为初始有机基质浓度, mgCOD/L;  $S_O$  为溶解氧浓度, mg/L;  $OUR_{ex}$  为外源呼吸速率, mg/(L · min);  $Y_H$  为异养菌产率系数, mgCOD/mgCOD;  $\mu_{\max}$  为异养菌最大比生长速率,  $\text{min}^{-1}$ ;  $X_H$  为异养菌浓度, mgCOD/L;  $K_s$  为基质半饱和系数, mgCOD/L。

当随基质降解的不同时刻的  $OUR_{ex}$  可测时, 对式(4)进行数值拟合, 理论上  $A$ 、 $B$ 、 $C$  是可以识别的 3 个组合参数。当  $S_s(0)$  (或  $Y_H$ ) 已知时,  $Y_H$  (或  $S_s(0)$ )、 $K_s$ 、 $\mu_{\max} \cdot X_H$  可识别。如果进一步知道  $X_H$ , 则全部参数都可识别。

## 2 实验设计与参数估计

### 2.1 材料和方法

#### 2.1.1 实验材料

采用自行开发的混合呼吸仪测量异养菌好氧降解 COD 的 OUR。该仪器为开放系统, 便于实验条件的改变, 能够恒温和调节 pH 值; 数据由计算机系统实时记录和显示, 具有自动长期运行、测试频率高等优点<sup>[22-23]</sup>。

活性污泥分别来自处理合成废水的实验室 SBR 反应器和城市污水处理厂曝气池。有机基质是浓度为 20 gCOD/L 的 HAc-NaAc 溶液, 20 g/L 的 ATU 用于抑制硝化, 浓度为 2 mol/L 的 HCl 和 NaOH 用于调节 pH。

#### 2.1.2 实验方法

实验前事先对污泥进行洗涤、驯化和空曝等处理。取 2 L 浓缩污泥至混合呼吸仪的曝气室中, 稀释至 4 L, 污泥浓度为 2 500 mgVSS/L (实验室污泥实验) 和 1 100 mgVSS/L (污水厂污泥实验), 向其中投加 ATU, 浓度达到 20 mg/L。打开呼吸仪测量软件, 从内源呼吸速率开始记录。然后向曝气室中投加基质至初始 COD 浓度为 50 mg/L (实验室污泥实验) 和 40 mg/L (污水厂污泥实验), 通过软件观察呼吸速率和 pH 值的变化, 控制 pH 值为 7.5~8.5。当重新进入内源呼吸后, 再投加等量基质, 如此重复 3 次, 实验温度 25 °C。

### 2.2 结果与讨论

#### 2.2.1 OUR 曲线特性分析

实验得到活性污泥完整的 OUR 曲线如图 1 所

示,从内源呼吸段开始,当基质投加后,迅速经由上升段进入稳定段、下降段,最后再次进入内源呼吸段。参数估计是采用稳定段及其以后的数据,OUR 曲线的完整性直接影响参数估计的精度。图 2、3 分别是其中 1 次 OUR 曲线。实验室污泥实验使用的污泥浓度高,且污泥长期用合成废水培养,有机成分高(VSS/SS=0.94),活性成分也高,导致 OUR 很高,最大 OUR 约为污水厂污泥实验最大 OUR 的 2 倍。基质很快被降解到饱和浓度以下,稳定段持续时间短,整个 OUR 曲线呈持续下降态势。污水厂污泥实验的污泥浓度和活性都较低,导致最大 OUR 也较低,投加的基质远大于半饱和浓度,稳定段持续了近 20 min,之后进入快速下降阶段。这种 OUR 曲线形状与 Monod 方程的理想曲线形式非常吻合,有利于获得高精度的参数估计。

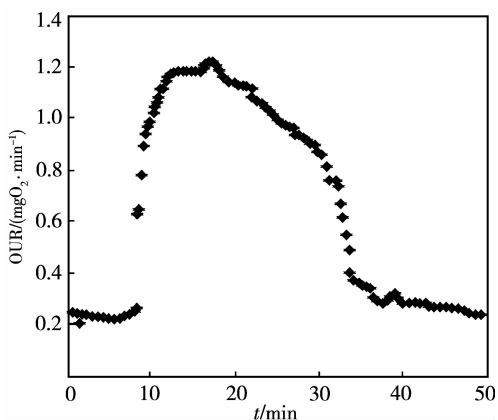


图 1 有机物好氧降解的典型 OUR 曲线

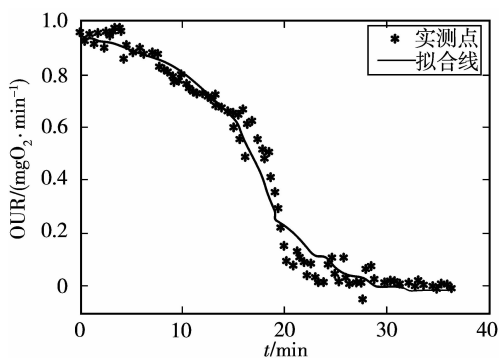


图 2 HAc-NaAc 混合液投入实验室合成污泥 (COD=50 mg/L) 的 OUR 曲线

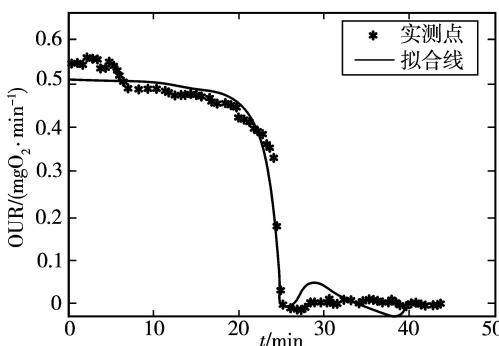


图 3 HAc-NaAc 混合液投入污水厂污泥 (COD=40 mg/L) 的 OUR 曲线

2.2.2 组合参数的估计

使用方程(4)分别对实验室污泥和污水处理厂污泥的 3 次 OUR 曲线从稳定段开始拟合,拟合工作在 MATLAB 软件上完成,其中 1 次的结果见图 2、3。组合参数 A、B、C 的估计值、均值(AVE)、标准偏差(STD)、变动系数(CV)和 95%置信区间见表 1。

表 1 组合参数估计值的统计分析结果

污泥	参数	1	2	3	AVE	STD	CV/%	95%置信区间
实验室污泥	A	1.141	1.081	1.061	1.094	0.041	3.78	1.094±0.047
	B	2.528	2.137	2.059	2.241	0.252	11.23	2.241±0.284
	C	11.867	14.292	15.329	13.829	1.777	12.85	13.829±2.011
污水厂污泥	A	0.489	0.536	0.522	0.515	0.026	5.09	0.515±0.027
	B	0.290	0.249	0.279	0.273	0.021	7.77	0.273±0.024
	C	11.332	11.701	11.623	11.552	0.195	1.68	11.552±0.220

由表 1 可以看出,实验室污泥实验参数估计值的 CV 在 3.78%~12.85%之间,95%置信度下置信区间的宽度是均值的 8.59%~29%;污水厂污泥实验参数估计值的 CV 在 1.68%~5.09%之间,95%置信度下置信区间的宽度是均值的 3.81%~17.58%。后者重现性明显优于前者。组合参数 B,即(1-Y<sub>H</sub>)K<sub>s</sub>的估计偏差明显大于组合参数 A,即

$\mu X_H(1-Y_H)/Y_H$  的估计偏差,特别是实验室污泥实验,前者的偏差约为后者偏差的 3 倍。这与以往所有的研究完全一致。Vanrolleghem 等认为参数估计的偏差在 5%~20%,包含  $\mu_{max}$  的组合参数误差较小,包含 K<sub>s</sub> 的组合参数误差较大<sup>[24]</sup>。施汉昌等对 4 种参数估值算法进行了比较,认为单参数法在精度、多次平均偏差,稳定性和计算量方面都有优势,利用

这种算法,以开发的快速生物活性检测仪进行呼吸测量实验,得到异养过程参数  $A$  和  $B$  估值的 CV 分别为 3.52% 和 19.40%,自养过程参数  $A$  和  $B$  估值的 CV 分别为 15.46% 和 15.04%<sup>[25]</sup>。

### 2.2.3 参数的进一步识别与估计

表 2 参数估计实验统计分析结果

污泥	参数	1	2	3	AVE	STD	CV/%	95%置信区间
实验室污泥	$\mu_{\max} X_H$	3.67	2.70	2.40	2.92	0.664	22.74	2.92±0.751
	$K_s$	10.65	7.48	6.72	8.28	2.085	25.18	8.28±2.359
	$Y_H$	0.76	0.71	0.69	0.72	0.036	5.00	0.72±0.041
污水厂污泥	$\mu_{\max} X_H$	1.24	1.30	1.27	1.27	0.030	2.36	1.27±0.034
	$K_s$	1.02	0.85	0.96	0.94	0.086	9.15	0.94±0.098
	$Y_H$	0.72	0.71	0.71	0.71	0.006	0.85	0.71±0.007

由表 2 可以看出,对于相同的基质,两种污泥的产率系数几乎相同,与国际水协给出的 0.67 的典型值(20 °C)比较接近。但两种污泥的半饱和系数却相差近 10 倍。国际水协在 ASM2 中给出该参数典型值为 4 mg/L,在 ASM3 中给出的典型值分别为 2 mg/L(外源易生物降解 COD)和 1 mg/L(胞内贮存 COD)。由此可见,污水厂污泥的半饱和系数与典型值较接近,而实验室污泥的半饱和系数远高于典型值,可能是由于长期合成废水培养使污泥种群发生明显变化的原因。过高的半饱和系数使基质投加后不久即进入不饱和状态,是最大呼吸速率持续时间短的原因。要获得  $\mu_{\max}$  的估计值,必须知道  $X_H$ ,但这一参数的测量还存在很大难度,以 VSS 代替  $X_H$  得到的  $\mu_{\max}$  不具有可比性。但组合参数  $\mu_{\max} X_H$  的估计精度能够反映  $\mu_{\max}$  的估计精度。 $Y_H$  估值的 CV 最小, $K_s$  估值的 CV 最大。污水厂污泥参数估计的 CV 仍在 10% 以内。Kong 等使用 RODTOX 进行呼吸测量,用单 Monod 模型拟合得到异养菌  $\mu_{\max}$  和  $K_s$  估值的 CV 分别为 20.5% 和 40%,自养菌分别为 28% 和 65.7%<sup>[26]</sup>。

通过文献看出,以 OUR 为外部可测变量的参数估计,最大估计偏差甚至达到 60% 以上,20% 以内的 CV 是比较理想的。研究利用新开发的混合呼吸仪开展呼吸实验得到的组合参数估计的 CV 即使在初始实验条件不佳的情况下也在 13% 以内,实验条件合适时的全部参数的 CV 都在 10% 以内,小于文献报道结果,表明新呼吸仪高的测试频率和测量精度能够改善参数估计的精度。

## 3 结 论

1)以混合呼吸仪测量的 OUR 为外部可测变量,拟合得到实验室污泥和污水处理厂污泥碳氧化

上述工作中,只能识别组合参数,要识别单个参数,必须获得更多的已知条件。研究中,投加的基质浓度  $S(0)$  已知,那么,参数的可识别性可以进一步改进, $Y_H$ 、 $K_s$  和  $\mu_{\max} X_H$  可以被估计,根据表 1 计算,结果见表 2。

过程组合参数估计值的 CV 分别在 13% 和 8% 以内,单参数估计值的 CV 分别在 25% 和 10% 以内。新呼吸仪高的测试频率和测量精度能够改善参数估计精度。

2)污水厂污泥参数估计精度明显高于实验室污泥参数估计精度。初始基质投加量和污泥浓度对实验得到的 OUR 曲线的完整性(信息含量)的影响是主要原因。这 2 个参数是优化实验设计中需要重点优化的实验条件。

3)2 种污泥产率系数的估计值几乎相同,接近典型值(20 °C),但半饱和系数估计值却相差近 10 倍,实验室污泥的半饱和系数的估计值远高于典型值。长期的合成废水培养主要影响了污泥的半饱和系数。以 VSS 代替  $X_H$  估计的  $\mu_{\max}$  不具有可比性, $X_H$  的测量是需要重点解决的问题。

### 参考文献:

- [1] SIN G, VANHULLE S W H, DE PAUW D J W, et al. A critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis [J]. *Wat Res*, 2005, 39: 2459-2474.
- [2] PETERSEN B, GERNAEY K, DEVISSCHERA M, et al. A simplified method to assess structurally identifiable parameters in monod-based activated sludge models [J]. *Wat Res*, 2003, 37: 2893-2904.
- [3] DE PAUW D J W, SIN G, INSEL G, et al. Discussion of "assessing parameter identifiability of activated sludge model No. 1" by pedro afonso and maria da conceicao cunha [J]. *J Environ Eng*, 2004, 130: 110-112.
- [4] GUJER W. Activated sludge modeling: past, present and future [J]. *Wat Sci Technol*, 2006, 53(3): 111-119.
- [5] PETERSEN B, GERNAEY K, HENZE M, et al.

- Calibration of activated sludge models: a critical review of experimental designs [C]// *Biotechnology for the Environment: Wastewater Treatment and Modeling, Waste Gas Handling*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003:101-186.
- [6] INSEL G, SIN G, LEE D S, et al. A calibration methodology and model-based system analysis for nutrient removing SBRs under reduced aeration [J]. *J Chem Tech Biotech*, 2006, 81(4):679-687.
- [7] RUANO M R, RIBES J, DE PAUW D J W, et al. Parameter subset selection for the dynamic calibration of activated sludge models (ASMs): experience versus systems analysis [J]. *Wat Sci Technol*, 2007, 56(8): 107-115.
- [8] SIN G, DIRK J W, DE PAUW D J W, et al. An efficient approach to automate the manual trial and error calibration of activated sludge models [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 100(3): 516-528.
- [9] HULSBEEK J J W, KRUIT J, ROELEVELD P J, et al. A practical protocol for dynamic modeling of activated sludge systems [J]. *Water Sci Technol*, 2002, 45(6):127-136.
- [10] VANROLLEGHEM P A, INSEL G, PETERSEN B, et al. A comprehensive model calibration procedure for activated sludge models [C]//*Proceedings of WEFTEC 2003, 76th Annual Technical Exhibition and Conference*. Los Angeles: CA, 2003(10):11-15.
- [11] VANROLLEGHEM P A, SIN G, GERNAEY K. Transient response of aerobic and anoxic activated sludge activities to sudden concentration changes [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2004, 86: 277-290.
- [12] LANGERGRABER G, RIEGER L, WINKLER S, et al. A guideline for simulation studies of wastewater treatment plants [J]. *Water Sci Technol*, 2004, 50(7): 131-138.
- [13] VANROLLEYHEM P A, SIN G, VAN HULLE S W H, et al. Comment on a critical comparison of systematic calibration protocols for activated sludge models: a SWOT analysis[J]. *Wat Res*, 2006, 40: 2994-2996.
- [14] VANROLLEGHEM P A, VAN DAELE M, DOCHAIN D. Practical identifiability of a biokinetic model of activated sludge respiration [J]. *Wat Res*, 1995, 29: 2561-2570.
- [15] PETERSEN B, GERNAEY K, VANROLLEGHEM P A. Practical identifiability of model parameters by combined respirometric-titrimetric measurements [J]. *Wat Sci Tech*, 2001, 43(7): 347-356.
- [16] BAETENS D, HOSTEN L H, PETERSEN B, et al. Optimal experimental design for the calibration of models of phosphorous removing activated sludge systems [J]. *Journal A*, 2000, 41(3):65-73.
- [17] PETERSEN B. Calibration, identifiability and optimal experimental design of activated sludge models [D]. Belgium: Ghent University, 2000.
- [18] 张代钧, 卢培利, 陈丹琴, 等. 传统活性污泥法 COD 去除及脱氮改造的模拟 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22(4):448-453.  
ZHANG DAI-JUN, LU PEI-LI, CHEN DAN-QIN, et al. Modeling COD and N removal upgrading in the activated sludge process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002,22(4):448-453.
- [19] 张代钧, 卢培利, 严晨敏, 等. 活性污泥 2 号模型用于城市污水处理厂脱氮除磷改造的研究 [J]. *环境科学学报*, 2003,23(3):332-337.  
ZHANG DAI-JUN, LU PEI-LI, YAN CHEN-MIN, et al. Application of ASM NO. 2 to the study of upgrading WWTP for biological nitrogen and phosphorus removals [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003,23(3):332-337.
- [20] 甘立军, 刘建勇. ASM1 中化学计量系数的测定与计算 [J]. *中国给水排水*, 2003, 19(1): 79-81.  
GAN LI-JUN, LIU JIAN-YONG. Measurement and calculation of stoichiometric parameters in ASM1 [J]. *China Water & Wastewater*, 2003, 19(1): 79-81.
- [21] 宋文清, 杨海真. 活性污泥数学模型中异养菌产率系数的测定 [J]. *环境污染与防治*, 2004, 26(4): 253-255.  
SONG WEN-QING, YANG HAI-ZHEN. Measurement of yield coefficient of heterotrophic biomass in ASM1 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2004, 26(4): 253-255.
- [22] 卢培利, 张代钧, 张欣, 等. 自动混合呼吸测量仪的开发与验证 [J]. *环境工程学报*, 2007, 1(5): 118-123.  
LU PEI-LI, ZHANG DAI-JUN, ZHANG XIN, et al. Development and validation of automated hybrid respirometer [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 1(5): 118-123.
- [23] 卢培利. 混合呼吸测量仪开发与活性污泥模型 COD 组分表征研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [24] VANROLLEGHEM P A, KEESMAN K J. Identification of biodegradation models under model and data uncertainty [J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 33(2): 91-105.
- [25] 施汉昌, 柯细勇, 张伟, 等. 用快速生物活性测定仪测定活性污泥生物活性的研究 [J]. *环境科学*, 2004, 25(1): 67-71.  
SHI HAN-CHANG, KE XI-YONG, ZHANG WEI, et al. Study on the biological activity of activated sludge using a rapid biological activity tester [J]. *Environmental Science*, 2004, 25(1): 67-71.
- [26] KONG Z, VANROLLEGHEM P A, WILLEMS P, et al. Simultaneous determination of inhibition kinetics of carbon oxidation and nitrification with a respirometer [J]. *Wat Res*, 1996, 30(4): 825-836.