

基于水蚯蚓摄食活性污泥的生长动力学研究

马王钢, 孙培德, 宋英琦, 郭茂新, 施群燕, 都韶婷, 罗涛

(浙江工商大学环境科学与工程学院, 杭州 310012)

摘要: 基于水蚯蚓摄食活性污泥的批量培养试验, 考察了水蚯蚓在活性污泥中的生长规律, 以及底物、溶解氧浓度由低到高变化对水蚯蚓比增长速率的影响。结果表明, 在水温 $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、溶解氧 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、底物浓度 $4000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下培养 18 周, 水蚯蚓体重随培养时间的变化趋势较好地符合 Gauss 函数, 最大比增长速率 $\mu_{\text{AWmax}} = 0.41\text{ d}^{-1}$, 最大产率系数 $Y_{\text{W/S}} = 0.32$, 最大污泥减量率 $\text{SR}_{\text{max}} = 25.5\%$; 底物浓度和溶解氧浓度由低到高变化时, 水蚯蚓比增长速率与底物浓度、溶解氧浓度之间的关系满足 Monod 方程, 底物浓度对水蚯蚓生长速率的影响要大于溶解氧浓度, 水蚯蚓可以在溶解氧浓度较低的环境中生长。呼吸试验结果表明, 水蚯蚓幼蚓期、快速生长期、成熟稳定期、衰亡期呼吸速率分别维持在 6.39、10.10、11.31 和 5.74 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 左右, 快速生长期与成熟稳定期所需溶解氧浓度要高于幼蚓期与衰亡期。

关键词: 水蚯蚓; 污泥减量; 比增长速率; 产率系数; 呼吸速率 (OUR)

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2011)08-2340-07

Growth Kinetics of Aquatic Worms Feeding on Activated Sludge

MA Wang-gang, SUN Pei-de, SONG Ying-qi, GUO Mao-xin, SHI Qun-yan, DU Shao-ting, LUO Tao

(School of Environmental Science and Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The growth kinetics of aquatic worms was investigated from juvenile to decline phase for 18 weeks by cultivating with activated sludge in batch test. Results showed that the growth of aquatic worms well fit Gauss function for cultivating 18 weeks. The maximum specific growth rate, growth yield of aquatic worms and sludge reduction rate was 0.41 d^{-1} , 0.32 and 25.5%, respectively. When the concentration of substrate and dissolved oxygen change from low to high, the relationship between the specific growth rate with dissolved oxygen, and substrate concentration meet the Monod equation. Compared with the dissolved oxygen, the substrate concentration had greater effect on the specific growth rate of aquatic worms, and aquatic worms can live in the environment with low dissolved oxygen. Furthermore, the breath test showed the oxygen uptake rate of aquatic worms was almost 6.39, 10.10, 11.31 and 5.74 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ from juvenile to decline phase, the dissolved oxygen demand of the rapid growth and mature stage was higher than juvenile and decline phase.

Key words: aquatic worms; sludge reduction; specific growth rate; growth yield; oxygen uptake rate (OUR)

原生/后生动物捕食微生物的污泥减量技术因具有经济高效、无二次污染等优点, 已经引起国内外学者的广泛关注^[1-8]。水蚯蚓作为污水处理系统中能够观测到的最大后生动物, 可附着于填料上生长繁殖, 具有较高的耐污染能力和较大的污泥吞噬能力, 因而被广泛应用于污泥减量研究中, 并被认为是用于污泥减量的一种较为理想的捕食生物。

目前, 国外学者已在水蚯蚓污泥减量工艺与反应器开发设计等领域展开了大量研究^[2-8], 研究内容除水蚯蚓毒理试验^[2]、反应器开发设计^[3-5]及水蚯蚓污泥减量影响因素^[6]的探讨外, 还涉及水蚯蚓污泥减量过程中的物料平衡和潜在利用价值研究^[7-8]。与国外相比, 国内研究不仅包括反应器的设计开发^[9-11], 还包括水蚯蚓污泥减容^[12, 13]与营养物质释放规律^[14]等机制的探讨。

综上所述, 国内外文献的研究重点主要集中在水蚯蚓污泥减量效果和反应器的设计开发上, 而基

于水蚯蚓摄食活性污泥的生长动力学研究相对缺乏。本研究旨在从水蚯蚓污泥减量的动力学角度出发, 探明水蚯蚓基于摄食活性污泥的生长规律; 考察底物和溶解氧浓度从限制到饱和变化对水蚯蚓比增长速率的影响, 定量表示水蚯蚓生长与底物、溶解氧的关系; 并首次采用呼吸试验探究水蚯蚓的呼吸机制。研究结果可为水蚯蚓污泥减量潜力评估、工艺优化、反应器的设计开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 水蚯蚓

水蚯蚓指由霍夫水丝蚓 (*Limnodrilus*

收稿日期: 2010-09-18; 修订日期: 2011-01-10

基金项目: 浙江省高等学校创新团队项目 (T200912); 浙江省自然科学基金重点项目 (Z507721); 浙江省自然科学基金项目 (Y5090106, Y5110265)

作者简介: 马王钢 (1985 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染防治真与控制, E-mail: mawanggang@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: pdsun@126.com

hoffmeisteri)、苏氏尾鳃蚓 (*Branchiura sowerbyi*) 和正颤蚓 (*Tubifex tubifex* Müller) 等组成的混合种颤蚓科蠕虫,其中霍夫水丝蚓占主要组分. 文中除特别说明外,均使用“水蚯蚓”指代此类混合种颤蚓科蠕虫.

1.2 测试指标及方法

试验中所测指标与测试方法见表 1.

表 1 测试指标及方法

Table 1 Analysis indicators and methods			
序号	名称	测试方法	仪器型号
1	总悬浮固体 (TSS)	定量滤纸过滤后 105℃ 烘干称重 ^[15]	JC101 电热鼓风干燥箱
2	挥发性悬浮固体 (VSS)	马弗炉 600℃ 灼烧后称重 ^[15]	SX2-4-10 马弗炉
3	水蚯蚓干重 (DW)	烘箱 105℃ 烘干后称重 ^[16]	JC101 电热鼓风干燥箱
4	水蚯蚓湿重 (WW)	多孔铝箔滤干水份后称重 ^[16]	EL104 电子天平
5	水蚯蚓干湿重比例系数 ($f_{DW/WW}$)	水蚯蚓干重除湿重	—
6	水蚯蚓 VSS 湿重比例系数 ($f_{VSS/WW}$)	水蚯蚓 VSS 除湿重	—
7	溶解氧浓度 [$\rho(O_2)$]	溶解氧仪法	YSI-550A 溶解氧仪

表 2 试验参数及表达式¹⁾

Table 2 Parameters and expressions of this experiment			
序号	名称	表达式 (1)	表达式 (2)
1	污泥减量率 (SR)/%	$SR(t) = \left(1 - \frac{TSS_{(t)}}{TSS_{(0)}}\right) \cdot 100\%$	$SR(t) = \left(1 - \frac{TSS_{(t)}}{TSS_{(0)}}\right) \cdot 100\%$
2	水蚯蚓比增长速率 (μ_{AW}) / d ⁻¹	$\mu_{AW} = \frac{(DW_{(t)} - DW_{(0)}) \cdot \frac{1}{f_{DW/WW}}}{WW_{(0)} \cdot f_{DW/WW} \cdot \Delta t}$	$\mu_{AW} = \frac{(WW_{(t)} - WW_{(0)}) \cdot f_{DW/WW} \cdot \frac{1}{\Delta t}}{WW_{(0)} \cdot f_{DW/WW}}$
3	水蚯蚓产率系数 ($Y_{W/S}$)	$Y_{W/S} = -\frac{\Delta VSS_{worms}}{\Delta VSS_{sludge}}$	$Y_{W/S} = -\frac{\Delta WW_{worms} \cdot f_{VSS/WW}}{\Delta VSS_{sludge}}$
4	TSS 半饱和系数 (K_{TSS}) / mg·L ⁻¹	—	—
5	O ₂ 半饱和系数 (K_{O_2}) / mg·L ⁻¹	—	—

1) 表达式 (1) 为参考文献 [15] 中的相关表达式; 表达式 (2) 为本试验采用的表达式, 考虑到本试验要长期进行, 不能把水蚯蚓烘干称 DW 和 VSS, 因此采用 WW 分别乘以 $f_{DW/WW}$ 、 $f_{VSS/WW}$ 来代表水蚯蚓的 DW、VSS

水蚯蚓比增长速率 μ_{AW} 表达式为:

$$\mu_{AW} = \frac{(WW_{(t)} - WW_{(0)}) \cdot f_{DW/WW}}{WW_{(0)} \cdot f_{DW/WW} \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

式中, $WW_{(0)}$ 为水蚯蚓初始投加湿重 (mg); $WW_{(t)}$ 为经过时间 t (d) 后水蚯蚓湿重 (mg). $f_{DW/WW}$ 为水蚯蚓干湿重比例系数, 经试验测定其值为 0.216.

水蚯蚓产率系数 $Y_{W/S}$ 表达式:

$$Y_{W/S} = -\frac{\Delta WW_{worms} \cdot f_{VSS/WW}}{\Delta VSS_{sludge}}$$

其中:

$$\Delta WW_{worms} = WW_{(t)} - WW_{(0)}$$

$$\Delta VSS_{sludge} = VSS_{(t)} - VSS_{(0)}$$

$f_{VSS/WW}$ 为水蚯蚓 VSS 湿重比例系数, 经试验测定其值为 0.203.

所有试验均安排 5 次平行试验, 取平均值作为试验结果, 将 5 次平行试验结果的标准偏差作为误

1.3 评价指标分析

水蚯蚓污泥减量的动力学评价指标主要包括

μ_{AW} 、 K_{TSS} 和 K_{O_2} , 化学计量系数主要指 $Y_{W/S}$, 见表 2.

污泥减量率 $SR = (1 - TSS_{(t)} / TSS_{(0)}) \times 100\%$

式中, $TSS_{(0)}$ 表示初始污泥浓度 (mg·L⁻¹); $TSS_{(t)}$ 表示经过时间 t (d) 减量后污泥浓度 (mg·L⁻¹).

差限.

1.4 试验设计

1.4.1 生长曲线试验

本试验拟通过考察水蚯蚓湿重随培养时间的变化情况, 揭示水蚯蚓摄食活性污泥的生长规律与污泥减量能力, 试验操作过程如下.

随机挑取 50 条体长 < 5 mm 的水蚯蚓幼虫放入 250 mL 烧杯, 投加 200 mL 活性污泥混合液 ($TSS = 4\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 活性污泥取自杭州七格污水处理厂二沉池); 烧杯内置曝气管供氧, 通过控制曝气流量使得烧杯内溶解氧浓度维持在 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 水温 $25^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$; 为平衡水蚯蚓种属和个体间的生长差异, 共设 5 组平行试验^[17]. 为确保水蚯蚓生长所需底物充足新鲜, 培养过程中, 每 1 周 (7 d) 换活性污泥混合液 1 次, 同时将 50 条水蚯蚓挑出洗净并进行称重, 考察培养过程中水蚯蚓湿重、污泥减量率、水蚯

蚓比增长速率及产率系数随时间的变化规律.

1.4.2 溶解氧浓度对水蚯蚓比增长速率的影响

本试验拟通过考察溶解氧浓度对水蚯蚓比增长速率的影响,探明溶解氧浓度对水蚯蚓生长的影响规律,定量表示溶解氧浓度与水蚯蚓生长的关系,试验操作过程如下.

根据水蚯蚓生长发育的表观特征^[17-19]选取幼蚓期(体长<5 mm)、快速生长期(体色鲜红、活性高、无生殖环带)、成熟稳定期(具有生殖环带)、衰亡期(体色暗红,活性低)的水蚯蚓各50条称重后放入250 mL烧杯,培养方法如1.4.1节.溶解氧浓度设定0.5、1、2、4、6、8 mg·L⁻¹共6个梯度;底物浓度(TSS,下同)控制在4 000 mg·L⁻¹,保证水蚯蚓有足够的食物来源,水温25℃±0.5℃.

1.4.3 水蚯蚓呼吸速率测定

为进一步探究水蚯蚓的呼吸机制,利用BI-2000电解呼吸仪进行水蚯蚓不同生长阶段呼吸速率测定试验,试验装置见图1.试验原理及操作过程如下.

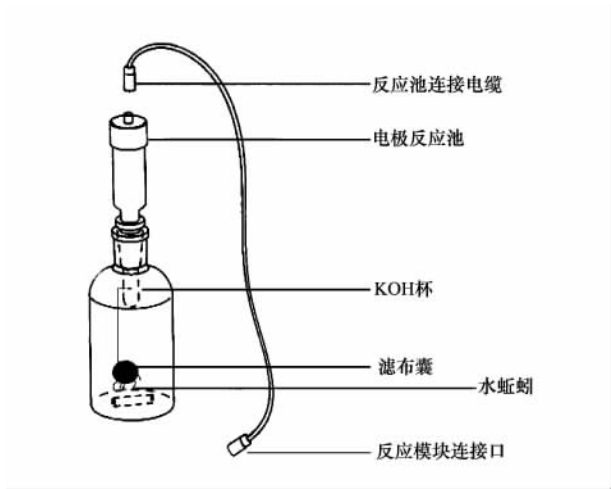


图1 水蚯蚓呼吸试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of the experimental device for oxygen uptake rate of aquatic worms

根据水蚯蚓生长发育的表观特征^[17-19]挑选不同生长阶段的水蚯蚓1 g放入滤布囊,滤布囊孔径为25 μm.试验过程中水蚯蚓的尾巴伸出滤布囊进行呼吸,呼吸作用产生的CO₂由装在KOH杯中的KOH吸收,致使反应器内气压下降,压力传感器探测到这种变化立即接通电解池的电源电解硫酸产生氧气,以维持反应瓶气压.通过计算电流流量,便可得到水蚯蚓OUR(oxygen uptake rate)变化曲线.

1.4.4 底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响

本试验拟通过考察底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响,探明底物浓度对水蚯蚓生长的影响规律,定量表示底物浓度与水蚯蚓生长的关系,试验操作过程如下.

根据水蚯蚓生长发育的表观特征^[17-19]选取幼蚓期(体长<5 mm)、快速生长期(体色鲜红、活性高、无生殖环带)、成熟稳定期(具有生殖环带)、衰亡期(体色暗红,活性低)的水蚯蚓各50条称重后放入250 mL烧杯,培养方法如1.4.1节.底物浓度设定200、400、800、1 600、3 200、6 400 mg·L⁻¹共6个梯度;溶解氧浓度控制在4 mg·L⁻¹,保证水蚯蚓有足够的溶解氧来源,水温25℃±0.5℃.

2 结果与讨论

2.1 生长曲线

水蚯蚓湿重随培养时间的变化见图2.由图2及实验室观察可知:1~2周水蚯蚓湿重无明显变化,体长<5 mm;3~9周水蚯蚓湿重快速增长,虫体体色鲜红,活性强,但无生殖环;10~11周水蚯蚓湿重维持稳定,且出现生殖环带,达到性成熟;12~18周水蚯蚓湿重不断减少,进入一个明显的衰亡阶段,且体色暗红,活性变弱.根据水蚯蚓湿重随培养时间的变化规律以及水蚯蚓的表观特征^[17-19],将水蚯蚓的生命周期(不包括蚓茧期)分为幼蚓期、快速生长期、成熟稳定期和衰亡期4个时期,见表3.

表3 水蚯蚓生命周期划分

Table 3 Dipartition of aquatic worms' life cycle				
序号	名称	时间	体重变化	表观特征
1	幼蚓期	第1~2周	基本不变	体长<5 mm
2	快速生长期	第3~9周	显著增加	体色鲜红,活性高,无生殖环带
3	成熟稳定期	第10~11周	维持稳定	出现生殖环带,达到性成熟
4	衰亡期	第12~18周	显著变小	体色暗红,活性低

利用Origin 8.0数据分析软件对水蚯蚓体重随培养时间的变化曲线进行拟合(图2).由图2可知:1~18周水蚯蚓的生长趋势呈“钟”形,符合

Gauss 模型,拟合方程:

$$WW = -3\,960.66e^{-2(\frac{t-10.65}{8.63})^2}$$

(R² = 0.996 9)

F 检验表明,水蚯蚓生长数据的 Gauss 拟合结果均在 $P < 0.01$ 的水平上显著相关。

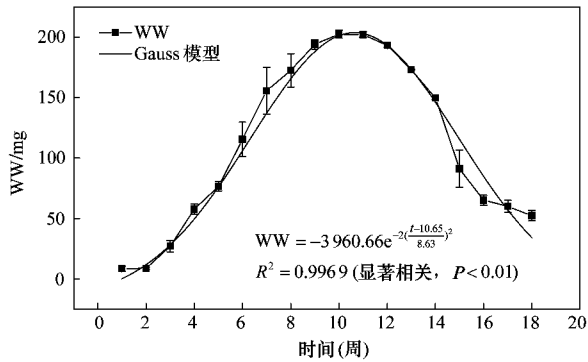


图2 水蚯蚓湿重随时间变化的动力学分析

Fig.2 Kinetics analysis of wet weight of aquatic worms with time

在以往研究中,只有诸晖等^[17]研究了水蚯蚓在活性污泥中的生长情况,但并未得出水蚯蚓完整的生长曲线,本研究首次以活性污泥为底物得到水蚯蚓相对完整的生长曲线,水蚯蚓平均生长速率为 $0.007 \text{ mg} \cdot (\text{条} \cdot \text{d})^{-1}$ 。由于水蚯蚓具有聚集成团附着于填料上的特性,试验过程中特别是中试及工程化大规模推广过程中很难确定其生物量的变化^[11],利用水蚯蚓生长曲线及平均生长速率可对水蚯蚓生物量变化进行预测,具有一定的实用意义。

同时,本试验也考察了污泥减量率、水蚯蚓比增长速率及产率系数在这 18 周内的变化规律(图 3)。从图 3 可知 1~6 周 SR 、 μ_{AW} 、 $Y_{\text{W/S}}$ 随培养时间的增大而增大,并在第 6 周达到最大值: $\text{SR}_{\text{max}} = 25.5\%$, $\mu_{\text{AWmax}} = 0.41 \text{ d}^{-1}$, $Y_{\text{W/Smax}} = 0.32$ 即水蚯蚓消化 1 mg 污泥中的 VSS 最多会有 0.32 mg 新增水蚯蚓生成,可见水蚯蚓具有较好的污泥减量潜力;7~18 周 SR 、 μ_{AW} 、 $Y_{\text{W/S}}$ 随培养时间的变大而变小。本研究推测:前 6 周中有 4 周(第 3~6 周)处于快速增长期,水蚯蚓生长代谢旺盛,摄入的活性污泥相应较多,其中较大部分污泥转换为自身的生物量(主要表现为湿重增加)。比较而言,7~18 周中有 7 周(第 12~18 周)处于衰亡期, μ_{AW} 不断变小,相应地 SR 、 $Y_{\text{W/S}}$ 也变小,在衰亡期水蚯蚓需要维持生命活动的能量变小,活性低下,不再需要摄入大量的活性污泥,因此污泥减量能力降低。根据这一规律,可通过调节底物和环境条件,缩短幼蛭期,推迟水蚯蚓进入衰亡期的时间,发挥水蚯蚓最大的污泥减量能力。

2.2 溶解氧对水蚯蚓比增长速率的影响

水蚯蚓 4 个时期比增长速率与溶解氧浓度的关系见图 4。由图 4 可知,随着溶解氧浓度的增加,水

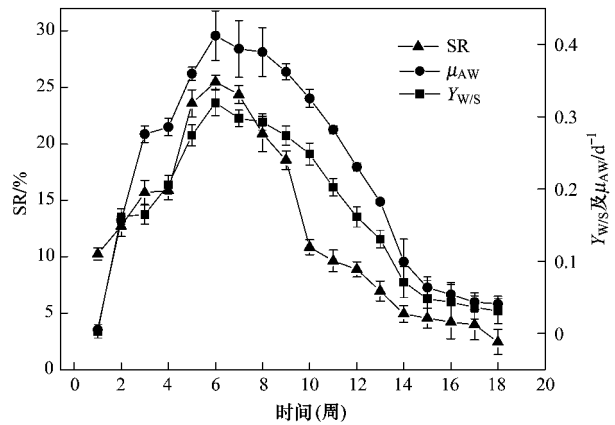


图3 培养时间与污泥减量率、水蚯蚓比增长速率及产率系数的相互关系

Fig.3 Relationship between culture time with SR , μ_{AW} and $Y_{\text{W/S}}$

蚯蚓比增长速率逐渐趋于平缓,可采用 Monod 模型进行拟合分析。

幼蛭期:

$$\mu = \frac{0.22 \times \rho(O_2)}{0.70 + \rho(O_2)}$$

$$(\mu_{\text{max}} = 0.22 \text{ d}^{-1} \quad K_{O_2} = 0.70)$$

$$R^2 = 0.8194 \quad P < 0.01)$$

快速生长期:

$$\mu = \frac{0.44 \times \rho(O_2)}{1.22 + \rho(O_2)}$$

$$(\mu_{\text{max}} = 0.44 \text{ d}^{-1} \quad K_{O_2} = 1.22)$$

$$R^2 = 0.8618 \quad P < 0.01)$$

成熟稳定期:

$$\mu = \frac{0.36 \times \rho(O_2)}{1.36 + \rho(O_2)}$$

$$(\mu_{\text{max}} = 0.36 \text{ d}^{-1} \quad K_{O_2} = 1.36)$$

$$R^2 = 0.8680 \quad P < 0.01)$$

衰亡期:

$$\mu = \frac{-0.34 \times \rho(O_2)}{-0.22 + \rho(O_2)}$$

$$(\mu_{\text{max}} = -0.34 \text{ d}^{-1} \quad K_{O_2} = -0.22)$$

$$R^2 = 0.9391 \quad P < 0.01)$$

从拟合得到的溶解氧半饱和系数来看,水蚯蚓在其生长过程中对溶解氧的需求并不高,且 K_{O_2} 衰亡期 $< K_{O_2}$ 幼蛭期 $< K_{O_2}$ 快速生长期 $< K_{O_2}$ 成熟稳定期,这表明快速生长期和成熟稳定期对溶解氧的需求要大于幼蛭期和衰亡期,推测这主要是因为成熟稳定期和快速生长期水蚯蚓的代谢水平要高于幼蛭期和衰亡期,溶解

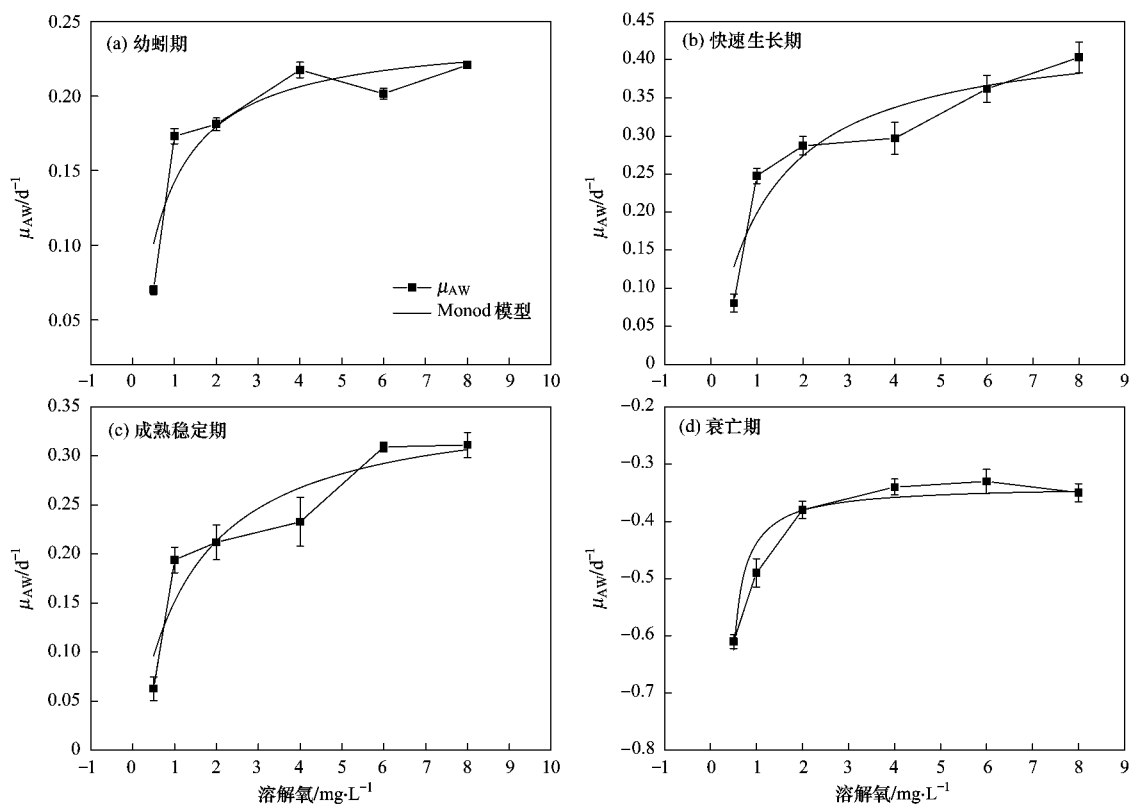


图 4 溶解氧对水蚯蚓比增长速率的影响

Fig. 4 Effect of dissolved oxygen concentration on the specific growth rate of aquatic worms

氧需求量大,特别是成熟稳定期,水蚯蚓个体达到性成熟,开始形成并逐渐产下蚓茧,需要较高的溶解氧浓度来维持这些生命活动.

针对这一结果,本研究首次利用 BI-2000 电解呼吸仪对水蚯蚓不同生长阶段的 OUR 进行验证,结果见图 5. 从中可知,水蚯蚓在 4 个时期呼吸速率分别维持在 6.39、10.10、11.31 和 5.74 $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 左右,其呼吸速率的大小关系与 Monod 模型拟合结果的溶解氧半饱和系数大小关系完全一致.

基于以上分析可推测:水蚯蚓对溶解氧浓度需求并不高,在实际工程应用中溶解氧浓度维持在 2.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右就可满足水蚯蚓生长需求,鉴于水蚯蚓耐缺氧能力强的特点^[19,20],溶解氧浓度甚至可以设定在更低水平. 根据这一结论在反应器运行方式的选择上完全可以考虑间歇曝气,而不同于现有大部分研究将水蚯蚓接种于连续曝气区^[20].

2.3 底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响

水蚯蚓 4 个时期比增长速率与底物浓度的关系见图 6,随着底物浓度的增加,水蚯蚓比增长速率逐渐趋于平缓,采用 Monod 模型进行拟合分析.

幼蚓期:

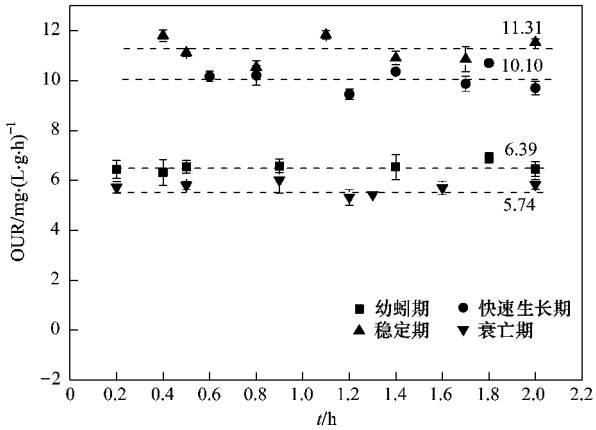


图 5 水蚯蚓生长各阶段呼吸速率 (OUR)

Fig. 5 Oxygen uptake rate of aquatic worms growth stages

$$\mu = \frac{0.35 \times \text{TSS}}{995.74 + \text{TSS}}$$
$$(\mu_{\max} = 0.35 \text{ d}^{-1} \quad K_{\text{TSS}} = 995.74)$$
$$R^2 = 0.9882 \quad P < 0.01)$$

快速生长期:

$$\mu = \frac{0.52 \times \text{TSS}}{1348.92 + \text{TSS}}$$
$$(\mu_{\max} = 0.52 \text{ d}^{-1} \quad K_{\text{TSS}} = 1348.92)$$

$R^2 = 0.979\ 1\ \ P < 0.01)$

成熟稳定期:

$$\mu = \frac{0.49 \times \text{TSS}}{1\ 428.63 + \text{TSS}}$$

$(\mu_{\max} = 0.49\text{d}^{-1}\ \ K_{\text{TSS}} = 1\ 428.63$

$R^2 = 0.985\ 8\ \ P < 0.01)$

衰亡期:

$$\mu = \frac{-0.28 \times \text{TSS}}{-200 + \text{TSS}}$$

$(\mu_{\max} = -0.28\ \text{d}^{-1}\ \ K_{\text{TSS}} = -200$

$R^2 = 0.903\ 1\ \ P < 0.01)$

从拟合曲线的趋势看,水蚯蚓在底物浓度1 600 ~ 3 200 mg·L⁻¹时即有较大的比增长速度.考虑到普通活性污泥系统中污泥浓度一般维持在1 500 ~ 2 500 mg·L⁻¹^[21],因此,单从底物浓度角度考虑,水蚯蚓在普通活性污泥系统即可获得一个较高的比增长速度.从半饱和系数看, $K_{\text{TSS衰亡期}} < K_{\text{TSS幼蚓期}} < K_{\text{TSS快速生长期}} < K_{\text{TSS成熟稳定期}}$,这说明水蚯蚓在快速生长期和成熟稳定期需要的底物浓度要高于衰亡期和幼蚓期,这是因为水蚯蚓在快速生长期和成熟稳定期生命活动旺盛,特别是在成熟稳定期水蚯蚓达到性成熟,开始产蚓茧,需要摄入相对较多的活性污泥.

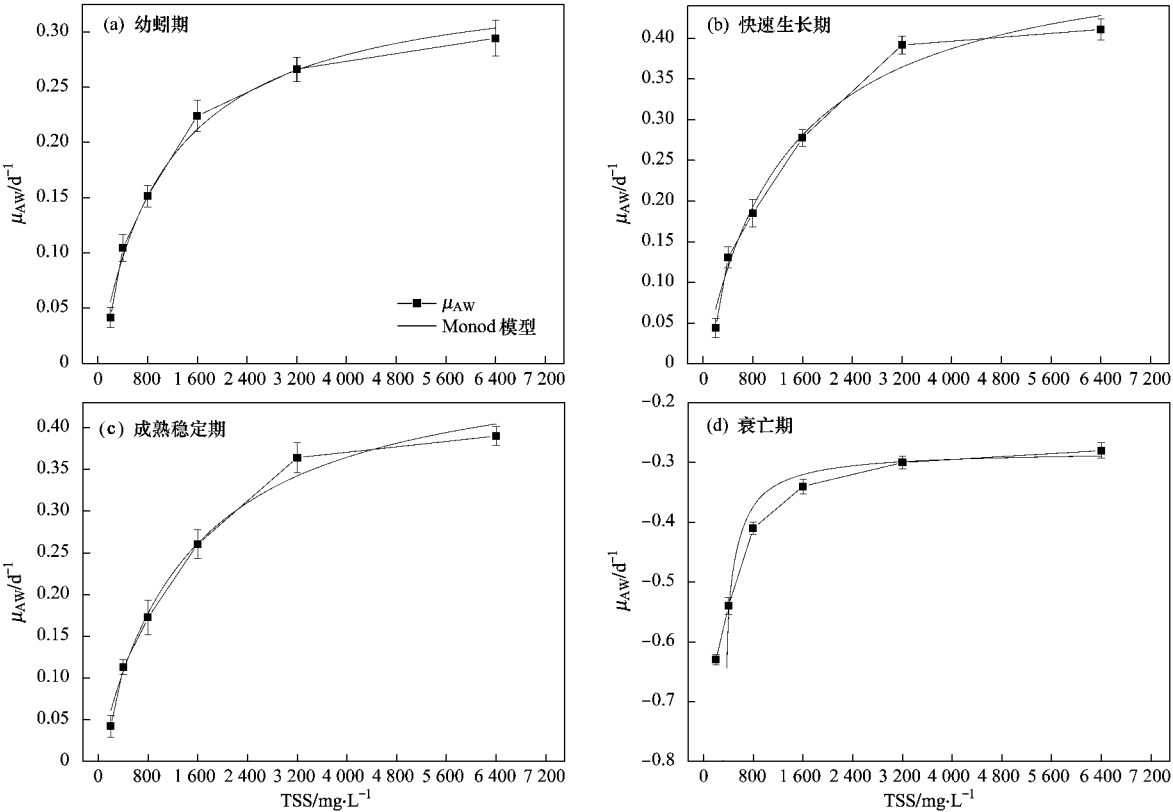


图 6 底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响

Fig.6 Effect of substrate concentration on the specific growth rate of aquatic worms

相较溶解氧对水蚯蚓比增长速率的影响而言,底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响要大得多,4个时期的最大比增长速率、拟合相关性都要高.这是因为水蚯蚓有较高的耐缺氧能力,有许多学者甚至把水蚯蚓归为一种兼氧后生动物^[19,20],在低溶解氧浓度的环境下水蚯蚓可以切换到一种缺氧代谢模式.

3 结论

(1) 水蚯蚓通过摄食活性污泥获得生长,其生

长趋势较好地符合 Gauss 函数,平均生长速率 0.007 mg·(条·d)⁻¹,最大比增长速率为 0.41 d⁻¹,最大产率系数为 0.32,最大污泥减量率为 25.5%.

(2) 分别以溶解氧和底物浓度为限制性因子,研究水蚯蚓比增长速率与溶解氧和底物浓度的关系,得到水蚯蚓比增长速率与底物浓度、溶解氧浓度之间的关系满足 Monod 方程,溶解氧对水蚯蚓比增长速率的影响要小于底物浓度对水蚯蚓比增长速率的影响.

(3)水蚯蚓幼蚓期、快速生长期、成熟稳定期、衰亡期的呼吸速率分别维持在 6.39、10.10、11.31 和 5.74 $\text{mg}\cdot(\text{L}\cdot\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$ 左右,快速生长期与成熟稳定期所需溶解氧浓度要高于幼蚓期与衰亡期;水蚯蚓有较强的耐缺氧能力,在设计水蚯蚓污泥减量反应器时,可以考虑间歇曝气等运行方式,而不一定将水蚯蚓接种于曝气区.

(4)单从底物条件考虑,普通活性污泥系统都适合水蚯蚓的生长,底物浓度在 3 200 ~ 6 400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 变化时,水蚯蚓比生长速率接近最大比增长速率.

参考文献:

[1] Tian Y, Lu Y B, Chen L, *et al.* Optimization of process conditions with attention to the sludge reduction and stable immobilization in a novel Tubificidae-reactor [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(15): 6069-6076.

[2] Maestre Z, Martinez-Madrid M, Rodriguez P. Monitoring the sensitivity of the oligochaete *Tubifex tubifex* in laboratory cultures using three toxicants [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2009, **72** (8): 2083-2089.

[3] Hendrickx T L G, Temmink H, Elissen H J H, *et al.* Design parameters for sludge reduction in an aquatic worm reactor [J]. Water Research, 2010, **44**(3): 1017-1023.

[4] Hendrickx T L G, Temmink H, Elissen H J H, *et al.* Aquatic worms eating waste sludge in a continuous system [J]. Bioresource Technology, 2009, **100** (20): 4642-4648.

[5] Elissen H J H, Hendrickx T L G, Temmink H, *et al.* A new reactor concept for sludge reduction using aquatic worms [J]. Water Research, 2006, **40** (20): 3713-3718.

[6] Hendrickx T L G, Temmink H, Elissen H J H, *et al.* The effect of operating conditions on aquatic worms eating waste sludge [J]. Water Research, 2009, **43** (4): 943-950.

[7] Elissen H J H, Mulder W J, Hendrickx T L G, *et al.* Aquatic worms grown on biosolids: Biomass composition and potential applications [J]. Bioresource Technology, 2010, **101**(2): 804-

811.

[8] Hendrickx T L G, Temmink H, Elissen H J H, *et al.* Aquatic worms eat sludge: Mass balances and processing of worm faeces [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, **177**(13): 633-638.

[9] Wei Y S, Wang Y W, Guo X S, *et al.* Sludge reduction potential of the activated sludge process by integrating an oligochaete reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **163**(1): 87-91.

[10] Huang X, Liang P, Qian Y. Excess sludge reduction induced by *Tubifex tubifex* in a recycled sludge reactor [J]. Journal of Biotechnology, 2007, **127** (3): 443-451.

[11] 魏源送,刘俊新. 利用寡毛类蠕虫反应器处理剩余污泥的研究 [J]. 环境科学学报, 2005, **25** (6): 803-808.

[12] 诸晖,魏源送,杨宇,等. 颤蚓污泥减容效果及其影响因素分析 [J]. 环境科学学报, 2008, **28** (6): 1141-1148.

[13] 诸晖,魏源送,王亚炜,等. 颤蚓对活性污泥沉降性能的影响 [J]. 环境科学学报, 2008, **28** (5): 910-915.

[14] Wei Y S, Zhu H, Wang Y W, *et al.* Nutrients release and phosphorus distribution during oligochaetes predation on activated sludge [J]. Biochemical Engineering Journal, 2009, **43** (3): 239-245.

[15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 107-108.

[16] Buys B R, Klapwijk A, Elissen H J H, *et al.* Development of a test method to assess the sludge reduction potential of aquatic organisms in activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(17): 8360-8366.

[17] 诸晖,魏源送,刘俊新. 颤蚓在活性污泥中的生长研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1342-1347.

[18] 李仁熙. 正颤蚓的生长发育及繁殖生物学的研究 [J]. 水生生物学学报, 2001, **25**(1): 14-20.

[19] Elissen H J H. Sludge reduction by aquatic worms in wastewater [D]. Netherlands: Wageningen University, 2007.

[20] 诸晖,魏源送,王亚炜,等. 寡毛类蠕虫污泥减量工艺及其生长规律的研究进展 [J]. 过程工程学报, 2008, **8**(5): 1030-1039.

[21] 梁鹏,黄霞,钱易. 食物污泥对红斑颚体虫生长的影响 [J]. 中国环境科学, 2004, **24**(3): 159-162.