

# 寡毛类蠕虫污泥减量工艺及其生长规律的研究进展

诸 晖, 魏源送, 王亚炜, 刘俊新

(中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085)

**摘 要:** 对近年来寡毛类蠕虫污泥减量工艺和寡毛类蠕虫生长繁殖规律的研究进展进行了系统评述. 除了种属以外, 寡毛类蠕虫在活性污泥系统中的稳定存在、生长和繁殖直接影响到其对活性污泥的捕食和削减能力, 其生长繁殖规律受到底物性质、环境因素、种群密度等因素影响. 现有研究大多采用表观污泥产率系数来衡量寡毛类蠕虫污泥减质效果, 该方法易受到活性污泥工艺中多种因素的影响, 且忽略了蠕虫对活性污泥的浓缩、团聚作用, 不能准确反映寡毛类蠕虫的污泥减质效果. 而同位素示踪方法为寡毛类蠕虫污泥减质效果评价、筛选适于活性污泥系统的寡毛类蠕虫种属提供了一条新途径. 寡毛类蠕虫具有改善活性污泥沉降的性能, 亦可考虑将其应用于污泥减容.

**关键词:** 活性污泥法, 污泥减量, 寡毛类蠕虫

**中图分类号:** X703

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-606X(2008)05-1030-11

## 1 前 言

活性污泥法是目前全世界城市污水和工业废水处理厂使用最为广泛的生物处理技术, 但在运行过程中会产生大量的剩余污泥<sup>[1,2]</sup>. 一般传统活性污泥工艺每去除 1 kg BOD<sub>5</sub> 所产生的剩余污泥量约为 15~100 L, 其含水率超过 95%<sup>[3,4]</sup>. 剩余污泥的处理与处置费用占污水处理厂总运行费用的 20%~40%, 甚至高达 60%, 已成为污水处理厂日益严峻的挑战<sup>[1]</sup>. 因此, 如何在保证污水处理效果的前提下, 减少剩余污泥产生的技术研究已受到广泛关注.

解决剩余污泥处理与处置的首要原则是污泥减量化, 它包含两方面含义: 减少污泥产生量(污泥减质)和减少污泥容积(污泥减容). 传统的污泥处理主要是实现污泥减容, 即采用浓缩、脱水和干燥的方法, 降低污泥含水率, 以便于后续的污泥运输和处置. 这种传统的污泥末端处理技术不但处理费用昂贵, 增加了污水处理厂的建设和运行成本, 而且无法从根本上减少污泥的干物

质量, 对污泥的最终处置(如卫生填埋、焚烧等)依然带来巨大压力. 因此, 近年来, 越来越多的研究开始着眼于从源头减少剩余污泥产生量, 与之相应的源头污泥减质技术研发也已成为国内外污泥减量技术研究的方向.

目前从源头上减少污泥产生量(污泥减质)的技术可分为 4 类<sup>[1]</sup>: (1) 溶胞-隐性生长. 通常采用物理、化学方法或二者结合的方法使细胞溶解, 然后引起微生物的隐性生长, 从而减少污泥产量; (2) 内源呼吸. 延长污泥龄或降低污泥负荷, 使细菌处在内源呼吸阶段来减少剩余污泥的产量; (3) 解偶联代谢. 通过增加分解代谢和合成代谢之间的能量(ATP)差异, 使供给微生物合成代谢的能量变得有限, 从而减少剩余污泥的产量; (4) 生物捕食. 根据生态学原理, 食物链越长, 能量损失越大, 产生的生物量也越低. 上述不同污泥减量技术的优缺点见表 1.

生物捕食法污泥减量技术是依据生态学理论, 基于物质和能量在食物链传递过程中逐级递减的原理, 利用原、后生动物捕食细菌, 减少剩余污泥产生量的技术. 与

表 1 目前各种污泥减量技术的优缺点比较<sup>[1]</sup>

Table 1 Advantages and disadvantages of sludge reduction strategies<sup>[1]</sup>

Strategy	Example	Advantages	Disadvantages
Lysis-cryptic growth	Ozonation of return sludge	Sludge can be completely reduced	High cost and energy consumption for ozonation equipment
Endogenous respiration	Extended aeration	Easy operation	Large footprint, high investment and operation cost, high energy consumption
Uncoupling metabolism	Dosing chemical uncoupler 2,4,5-trichlorophenol (TCP)	Relatively simple	Toxic to environment, increasing COD, difficult for industrialization
Predation on bacteria	Worms (protozoa & metazoa)	Relatively simple; No byproducts	Unstable worm growth, long reaction time, nutrients release

收稿日期: 2008-04-22, 修回日期: 2008-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 5040821); 国家高技术研究发展计划(863)基金资助项目(编号: 2007AA06Z347)

作者简介: 诸晖(1982-), 男, 上海市人, 硕士, 主要研究方向为水污染控制和污泥处理与处置; 魏源送, 通讯联系人, Tel: 010-62849108, E-mail: yswei@rcees.ac.cn.

其他技术相比,生物捕食法不必投入额外能量与外加药剂,运行成本低,环境友好,这些显著的优点使其成为具有发展前途的新技术,正日益成为污泥减量技术研究的热点.活性污泥系统中的生物捕食群落主要由原生动物和少量后生动物(如轮虫、线虫和寡毛类蠕虫等)组成,并且基质(污水中的有机物)-细菌-原、后生动物形成了一个相互协调的食物链.虽然原、后生动物与细菌共同组成了复杂而稳定的活性污泥生态系统,并各自承担着无法替代的作用,但由于曝气池的运行条件主要是为细菌等微生物降解有机物考虑,并不完全适于原、后生动物的生长,因此,如何在活性污泥系统中促进捕食者生物(原、后生动物)的稳定生长,强化它们捕食细菌的作用,从而形成高效的捕食食物链,最终实现最小的剩余污泥产生量,是生物法污泥减量技术亟需解决的问题.目前,生物法污泥减量技术主要包括两段法工艺和直接投加寡毛类蠕虫两种方法,其中由于工艺简单、无需对现有的污水处理设施进行改造,寡毛类蠕虫污泥减量技术近年来得到了广泛的研究.

本工作对近年来生物法污泥减量技术,尤其是寡毛类蠕虫污泥减量技术的研究进展进行系统整理,总结寡毛类蠕虫在活性污泥中的捕食、生长和繁殖行为,探讨其与污泥减量效果之间的互相影响,从而为今后寡毛类

蠕虫污泥减量工艺的研究提供参考和借鉴.

## 2 两段法污泥减量工艺

正因为传统的活性污泥曝气池并不适合原、后生动物的生长,两段法污泥减量工艺便单独构建了适于原、后生动物等捕食生物生长的反应器,使大量分散细菌在该反应器内被捕食,从而减少污泥产量<sup>[5-9]</sup>.两段法工艺由分散细菌阶段和捕食者阶段构成.分散细菌阶段利用污水中丰富的有机污染物促进分散细菌的快速生长,关键参数是水力停留时间(Hydraulic Retention Time, HRT)应等于污泥停留时间(Sludge Retention Time, SRT),要保证 HRT 必须足够长以避免冲走分散细菌,又必须足够短以防止细菌结团和捕食者的生长;捕食者的阶段目的是促进原生动物和后生动物的生长,其特点是污泥龄较长,有着适合于原、后生动物增殖的环境条件<sup>[1,6]</sup>.关于两段法污泥减量研究的文献报道总结于表 2.

首先应用两段法反应器的是 Ratsak 等<sup>[5]</sup>,证实了第二阶段原、后生动物捕食细菌实现污泥产生量减少的能力,并且原、后生动物生长得越好,剩余污泥产生量就越少.随后, Lee 等<sup>[7]</sup>发现,碳源不同会影响细菌生长的形态,进而影响原、后生动物对其捕食的效率.同时发现,相对于原生动物,轮虫(Rotifera)削减剩余污泥产生

表 2 生物捕食法污泥减量工艺的文献报道

Table 2 Literature data of predation on bacteria for reducing excess sludge production

Operation condition	Predator	Sludge yield <sup>1)</sup>	Sludge reduction	Reference
Lab scale, 30 °C, pH=7, bacteria ( <i>P. fluorescens</i> )	Ciliate ( <i>T. pyriformis</i> )	-	12%~43%	[5]
Lab scale, synthetic wastewater, MBR, 1 <sup>st</sup> stage: 20~27 °C, pH=7.8~8.5, 2 <sup>nd</sup> stage: 18~30 °C, pH=7.6~8.3	Protozoa & metozoa	-	20%~30%	[6]
Lab scale, 30 °C, pH=7, synthetic wastewater	Protozoa & metozoa (rotifera is predominant)	0.05~0.17	30%~50%	[7]
Lab scale, 30 °C, pH=7, pulp and paper wastewater	Protozoa & metozoa	0.01~0.23	-	[8]
Lab scale, synthetic wastewater, protozoa cultivated in a two-stage MBR system	Protozoa	-0.47	-	[9]
Oligochaetes				
Pilot scale, tricking filters, 18~23 °C, excess sludge Filled with lava slag	<i>T. tubifex</i>	-	10%~50%	[12]
Filled with plastic media	<i>T. tubifex</i>	-	10%~45%	
Pilot scale, oxidation ditch, 18~23 °C, domestic wastewater	<i>T. tubifex</i>	0.17	-	[12]
Pilot scale, suction submerged MBR, 20 °C, municipal wastewater	<i>A. hemprichi</i> <i>N. elinguis</i>	0.00~0.12	-	[13]
Pilot scale, gravitational submerged MBR, 20 °C, municipal wastewater	<i>A. hemprichi</i> <i>N. elinguis</i>	0.10~0.15	-	[13]
Pilot scale, activated sludge system, 20 °C, municipal wastewater	<i>A. hemprichi</i> <i>P. aequiseta</i> <i>N. elinguis</i>	0.17	-	[14]
Lab scale, activated sludge system, 20 °C, excess sludge	<i>T. tubifex</i>	-	(48±44)%	[15]
Lab scale, activated sludge system, 20~25 °C, municipal wastewater	<i>A. hemprichi</i>	-	39%~65% 0.53~6.32 <sup>2)</sup>	[18]
Lab scale, reflux CAS, 20~25 °C, domestic wastewater	<i>T. tubifex</i>	-	0.18~0.81 <sup>2)</sup>	[20]

Note: 1) kg/kg, TSS (total suspended solid)/COD<sub>removed</sub>; 2) kg/(kg-d), VSS (volatile suspended solid)/ww (wet weight).

量的作用更大. Ghyoot 等<sup>[6]</sup>比较了膜生物反应器(Membrane Bio-reactor, MBR)和传统的活性污泥(Conventional Activated Sludge, CAS)反应器应用两段法的污泥减质效果,发现 MBR 更有利于原、后生动物的生长,污泥减质作用更明显. 以往的研究均发现,利用两段法工艺时,原、后生动物的捕食作用会引起硝酸盐和磷酸盐的大量释放,对出水水质有一定的影响<sup>[7,8]</sup>.

### 3 寡毛类蠕虫污泥减量工艺

寡毛类蠕虫是环节动物门(Annelida)寡毛纲(Oligochaeta)的通称,约有 3000 种蚯蚓,但只有少部分为淡水生. 目前,应用于污泥减量工艺研究的寡毛类蠕虫主要有两类,一类是红斑瓢体虫(*A. hemprichi*)和仙女虫属(*Nais* sp.)等游离型蠕虫,另一类是颤蚓科(Tubificidae)和带丝蚓属(*Lumbriculus* sp.)等附着型蠕虫.

寡毛类蠕虫污泥减量技术研究始于 Ratsak 等<sup>[10,11]</sup>. 1994 年,她首先观察到了红斑瓢体虫和仙女虫的爆发与污泥产量之间的关系. 对荷兰某活性污泥处理厂中寡毛类蠕虫种群动态一年半的监测结果表明,伴随着仙女虫(*Nais elinguis*)的大量发生,污泥产生量显著减少,用于曝气的能量也大大降低. 除了占绝大多数的仙女虫外,还观察到吻盲虫(*Pristina* sp.)、红斑瓢体虫(*A. hemprichi*)的存在和线虫(Nematode)的偶尔出现. 更深入的研究表明,只要污泥混合液中有 20~30 条寡毛类蠕虫,污泥产量就能减少;即使污泥量减少 50%,也不会对污水净化效果产生影响. 随后, Rensink 等<sup>[12]</sup>在研究一种改进的污水处理系统时,发现在塑料填料上自然生长有颤蚓(*Tubifex* sp.)、仙女虫和红斑瓢体虫,此时污泥产量从 0.4 kg/kg 降为 0.16 kg/kg,并未影响出水水质(Mixed Liquor Suspended Solid, MLSS, 污泥混合液悬浮颗粒物). 从此,学者们提出大胆设想,用向活性污泥系统中直接投加寡毛类蠕虫的方式来实现污泥减量,并付诸尝试和研究<sup>[10-30]</sup>.

寡毛类蠕虫同时具有污泥减质和污泥减容效果. 许多寡毛类蠕虫污泥减量研究均发现寡毛类蠕虫有显著的集聚污泥和改善污泥沉降性能的能力<sup>[14,18,20,23-25]</sup>,可实现对活性污泥的减容,但这方面的研究并不深入和系统.

#### 3.1 寡毛类蠕虫污泥减质效果

自从 Ratsak<sup>[11]</sup>和 Rensink 等<sup>[12]</sup>发现活性污泥系统中自然生长有寡毛类蠕虫时能显著减少污泥产生量后,学者们开始研究在活性污泥系统中主动投加寡毛类蠕虫对污泥的减质能力(表 2).

因寡毛类蠕虫的种类和生物习性不同,其在活性污

泥系统中的分布和生长情况各异,从而影响到污泥减质工艺的效果. 张绍园<sup>[13]</sup>研究发现,游离型寡毛类蠕虫同样能在 MBR 中自发形成,其中优势种群是红斑瓢体虫(*A. Hemprichi*),同时也存在少量仙女虫和吻盲虫属蠕虫. Wei 等<sup>[14]</sup>发现游离型寡毛类蠕虫在 CAS 和 MBR 中均可自发产生,优势种群在红斑瓢体虫和仙女虫间交替,且红斑瓢体虫占据优势的时间更长一些. 上述结果中的优势蠕虫与 Ratsak 在 1994 年的研究结果有所不同. Liang 等<sup>[18]</sup>发现游离型蠕虫种群密度与活性污泥产率之间呈反比关系,当在推流式 CAS 中接种一定红斑瓢体虫后,能引起 39%~65%的污泥减质率,污泥减质速率(VSS)约为 0.53~6.32 kg/(kg·d),远好于接种颤蚓时的效果.

然而,像红斑瓢体虫和仙女虫这样的游离型蠕虫虽能自发形成,并发挥较好的污泥减质作用,但由于其在曝气池中的生长和繁殖很不稳定,爆发和消失无规律可循,因此很难应用于实际操作中<sup>[14]</sup>. 而作为附着性蠕虫的颤蚓,虽不易在污泥中大量地自发形成,但由于从自然界中极易获得,且生长稳定,控制方便,可以通过投加的方式接种于活性污泥中,从而实现污泥减质. Rensink 等<sup>[12]</sup>首先开始将颤蚓应用于活性污泥工艺的研究. 他向装有填料的生物滴滤池中投加颤蚓,发现剩余污泥产量下降了 10%~50%,剩余污泥产率从 0.4 kg/kg 降至 0.15 kg/kg;同样将颤蚓投入装有填料的氧化沟后,剩余污泥产率从 0.22 kg/kg 降至 0.17 kg/kg. 然而,像颤蚓这样的附着型蠕虫容易沉于池底,无法在曝气池中均匀分布,因此无法发挥其最大的捕食能力. 为了克服上述难题,Wei 等<sup>[15-17]</sup>开发了一套集成式蠕虫反应器用来处理排放的剩余污泥和回流污泥,不仅加有可供颤蚓附着的填料载体,还通过污泥循环来避免游离型蠕虫的流失,保证其生长环境的稳定. 研究表明,接种颤蚓进行污泥减质,减质率达到 48%左右<sup>[16]</sup>.

寡毛类蠕虫污泥减质效果因废水处理工艺流程和反应器构造不同而显示出较大差异. Wei 等<sup>[14]</sup>在比较 CAS 和 MBR 中寡毛类蠕虫生长情况对剩余污泥产量的影响时,发现在 CAS 曝气池中平均蠕虫密度(71 条/mg)远大于 MBR 中的 10 条/mg,由此可见 CAS 提供了更适宜的生存环境. 在 CAS 中,由于寡毛类蠕虫的作用,剩余污泥产率降至 0.17 kg/kg,污泥容积指数(Sludge Volume Index, SVI)降至 60 mL/g,而这 2 个指标在 MBR 中却并未得到显著减少和改善. 由于寡毛类蠕虫捕食活性污泥会导致一定程度的营养物释放,因此 Huang 等<sup>[20]</sup>构建了新型回流污泥反应器,在颤蚓捕食的同时,进一步促进活性污泥的隐形生长,以实现更大的污泥减质效果. 研究表明,在最佳颤蚓投放量(2.5 g/L)和最佳污泥

回流比的情况下,单位质量颤蚓的污泥减质率可达 0.18~0.81 kg/(kg·d)。

除了寡毛类蠕虫的种类及其生长情况、废水处理工艺流程和反应器构造等因素之外,主要活性污泥工艺参数也能影响寡毛类蠕虫污泥减质的效能。Wei 等<sup>[14,25]</sup>在比较 CAS 和 MBR 中寡毛类蠕虫污泥减量效果的同时,考察了污泥浓度(TSS)、水力停留时间(HRT)、污泥停留时间(SRT)、污泥负荷(底物量/微生物量, Food/Microorganism, F/M)、回流比、温度(*T*)、pH 和溶解氧(DO)对蠕虫生长的影响。统计分析结果表明,在 MBR 中,除了 F/M 外,其他参数均对蠕虫在 MBR 中的生长有影响;而在 CAS 中,除了 SRT 外,其他参数也均对蠕虫的生长产生影响。游离型蠕虫只在低污染负荷、溶解氧足够的情况下出现,且泥龄不能过短以防止蠕虫流失<sup>[26]</sup>。Liang 等<sup>[18]</sup>发现,在 CAS 反应器中,当 F/M<0.7 kg/(kg·d)时,红斑瓢体虫才会大量爆发。随着 SRT 的缩短,红斑瓢体虫种群生长速率降低,当 SRT<3 d 时,系统中的红斑瓢体虫会消失。同时,污泥性质也是影响红斑瓢体虫生长的因素,红斑瓢体虫更愿意捕食高蛋白质含量和小颗粒粒径的污泥,而当污泥浓度大于 0.3 g/L 时,红斑瓢体虫的生长才不受污泥浓度的影响。

### 3.2 寡毛类蠕虫污泥减质效果评价

对于利用寡毛类蠕虫进行污泥减质,也有学者表示置疑。Luxmy 等<sup>[22]</sup>研究发现,寡毛类蠕虫的存在与否(每 1 mL 混合液约 1000~2000 条蠕虫和不含有蠕虫)都对淹没式膜生物反应器中的剩余污泥产率没有任何显著影响。Falconi 等<sup>[23]</sup>的批量实验研究结果也表明,红斑瓢体虫的污泥减容效果比污泥减质效果更为显著。

目前,人们对寡毛类蠕虫污泥减质效果还存在争议,一个主要原因就是还未建立科学的寡毛类蠕虫减质效果的评价方法。以往的研究大多采用表观污泥产率系数来评价寡毛类蠕虫的污泥减质效果,而污泥减质率是通过比较进出反应器的污泥浓度变化计算得出的,污泥减质率(%)=(TSS<sub>in</sub>-TSS<sub>out</sub>)/TSS<sub>in</sub>。污泥浓度通过直接称量法测得。然而,表观污泥产率系数容易受工艺、反应器结构和运行参数等多种因素的影响,并非仅仅由于颤蚓捕食引起,不宜作为评价寡毛类蠕虫污泥减质效果的唯一标准<sup>[19,24]</sup>。污泥减质率只是通过简单比较进出反应

器的污泥浓度来确定,忽略了寡毛类蠕虫在反应器中所引起的污泥集聚和积累效应,从而夸大了颤蚓污泥减质的效果。已有的研究表明,寡毛类蠕虫具有的团聚污泥和改善污泥沉降性能的能力恰恰是显著和不可忽略的。

最近,Elissen 等<sup>[21]</sup>开发了一套新型的蠕虫污泥减量装置,将夹杂带丝蚓(*Lumbriculus variegatus*)接种于某一定制填料上,第一次实现了蠕虫捕食污泥和消化排泄两个步骤的分离,通过直接称量法测量了由于蠕虫捕食作用引起的污泥减少量及其转化量。结果表明,在被蠕虫捕食的 49 mg/d 污泥中,25%通过粪便形式排出体外,其余 75%被蠕虫消化吸收(只有 2%的物质转化为蠕虫自身生物量的增长,其余 73%的物质被最终矿化)。单位质量蠕虫的污泥减质速率约为 0.045 mg/(mg·d),每天矿化的污泥质量约占蠕虫自身湿重的 4.5%。

采用滤纸(孔径为 0.14~0.22 μm)直接称量污泥浓度,从而确定污泥减质效果的方法存在泥虫分离困难、称量精度低等问题从而影响测定结果。蠕虫的摄食、消化、排泄等一系列生理活动会导致污泥中固态碳向非固态碳的转化,通过测定封闭系统中的非固态碳产生速率,就可得到颤蚓引起的污泥减质速率。据此原理,梁鹏<sup>[24]</sup>利用非固态碳产生速率法考察了颤蚓污泥减质速率,但此法需经一系列换算且 CO<sub>2</sub> 等非固态碳气体测量误差大,因此得到的污泥减质速率也不十分精确。

为了更加精确地表征寡毛类蠕虫污泥减质的效果和速率,诸晖<sup>[27]</sup>采用 <sup>32</sup>P 放射性同位素示踪法考察了颤蚓(以霍夫水丝蚓 *L. hoffmeisteri* 为主)对活性污泥的捕食速率,大约为 0.0069 mg/(mg·d),单位质量的颤蚓每天所能减少的污泥质量不到其自身湿重的 1%,这说明颤蚓污泥减质效果并不显著。

表 3 系统总结了近来应用不同方法测得的污泥减质速率。由此可见,污泥减质速率不仅与寡毛类蠕虫种属和污泥特性有关,更因污泥减质效果评价方式的不同而各异。因此,如何更加有效衡量和评价寡毛类蠕虫的污泥减质效果显得尤为重要,此方面还需进行深入研究,以便进一步明确不同类型寡毛类蠕虫的污泥减质能力。

### 3.3 寡毛类蠕虫污泥减容效果

同原生动物具有促进污泥絮凝的作用一样,人们在利用寡毛类蠕虫进行污泥减量研究中发现它们同样具有

表 3 颤蚓污泥减质速率文献数据

Table 3 Literature data of sludge reduction rate induced by Tubificidae

Method	Type of worms	Sludge characteristic	Sludge reduction rate [mg/(mg·d)]	Reference
Direct weighing	<i>T. tubifex</i>	Disinfected sludge	0.63	[24]
Non-solid carbon generation rate	<i>T. tubifex</i>	Disinfected sludge	0.491	[19]
Direct weighing (novel reactor)	<i>L. svariagatus</i>	Activated sludge	0.045	[21]
Direct weighing	<i>L. hoffmeisteri</i>	Disinfected sludge	0.005 63	
Direct weighing	<i>L. hoffmeisteri</i>	Activated sludge	0.000 74	[27]
Isotope tracing	<i>L. hoffmeisteri</i>	Activated sludge	0.006 9	

显著的集聚污泥和改善污泥沉降性能的能力<sup>[11-19,23]</sup>. 污泥的沉降性能主要通过 SVI 来表征. Wei 等<sup>[14]</sup>发现红斑瓢体虫和仙女虫在 CAS 中改善污泥 SVI 的效果较 MBR 更为明显,前者 SVI 从 130 mL/g 降为 60 mL/g. 梁鹏<sup>[24]</sup>也发现红斑瓢体虫具有稳定污泥沉降性能的作用,并且 SVI 与蠕虫种群密度之间高度相关. Huang 等<sup>[20]</sup>研究了颤蚓对污泥沉降性能的影响,并考察了 SVI 与污泥浓度的关系,发现在 TSS<3.3 g/L 时, SVI 并没有明显的改变. 相关研究均表明,向活性污泥系统中投加寡毛类蠕虫能够起到污泥减容的作用,但这方面的研究并不深入和系统. 诸晖等<sup>[29,30]</sup>通过投加颤蚓,考察了其对于活性污泥沉降性能的影响,系统评价了由颤蚓引起的污泥减容效果,并对影响因素进行了统计分析. 结果表明,颤蚓污泥减容明显,投加颤蚓后的 60 min 内,活性污泥沉降速率明显加快,60 min 时的污泥容积相对于投加前可减少 8%~42%. Pearson 相关性分析表明,活性污泥沉降比(SV<sub>30</sub>)和半沉降时间 t<sub>50</sub> 是影响颤蚓污泥减容作用的重要因素,而并非污泥浓度 TSS 和 SVI. 这些研究结果为寡毛类蠕虫污泥减容提供了有力的依据,对寡毛类蠕虫污泥减量工艺是一个有效的补充.

## 4 寡毛类蠕虫生长和繁殖规律

无论污泥减质还是减容,选择合适的寡毛类种属,并保持其在活性污泥系统中的稳定存在和生长至关重要.

作为营养级比细菌高的捕食者生物,蠕虫自身的捕食潜力、代谢速率,以及由此形成的生长和繁殖能力,都是决定寡毛类蠕虫污泥减量可行性和效率的基本前提. 虽然对于寡毛类蠕虫能够减少活性污泥产生量还存在争议,但由于它们在活性污泥中生长不稳定,受季节和工艺运行条件影响显著,从而引起污泥减质效果不理想,也是至今仍未明确寡毛类蠕虫污泥减质能力的原因之一. 因此,亟需对寡毛类蠕虫在活性污泥系统中的捕食习性、生长和繁殖规律有一个全面的认识,以便为今后寡毛类蠕虫污泥减量工艺的研究与应用提供理论依据. 然而,目前极其缺乏寡毛类蠕虫在活性污泥系统中的捕食、生长和繁殖行为等方面的研究. 通过野外实地观察、取样分析和实验室培养,人们已经对天然水体中寡毛类蠕虫个体和种群增长规律、生殖方式、生命周期(Life cycle)、生活史(Life span)取得了较为成熟的研究成果,这些研究成果可为寡毛类蠕虫污泥减量工艺的研究提供有益的借鉴.

### 4.1 寡毛类蠕虫生长和繁殖规律

#### 4.1.1 生长规律

寡毛类蠕虫个体的生长速率和生命周期不仅影响其种群生长和密度,与其摄食和代谢速率亦有关系. 在水生生物学界,人们已经对寡毛类蠕虫的生长速率(或生长速率方程)、生命周期和生命长度等指标进行了考察,并研究了相关的影响因素.

表 4 寡毛类蠕虫生长规律文献数据

Table 4 Literature data of the growth of some species of Oligochaeta

Species	Cultivation/growth condition	Growth rate [mg/(ind·d)] <sup>1)</sup> or growth formula	Life cycle <sup>2)</sup> (d), life span (a)	Reference
	Substance: sand, food: lettuce, temperature 24 °C	0.069~0.078	50~57 d	[31]
	Substances: absorbent cotton, food: mixture of flour and lettuce, various temperatures	15 °C: $W=6.87/(1+136.48e^{-0.0612t})$ 20 °C: $W=5.99/(1+118.8e^{-0.0918t})$ 25 °C: $W=6.82/(1+135.28e^{-0.1389t})$	100~123 d 70~90 d 48~64 d	[32]
<i>T. tubifex</i> Müller	Food: lettuce, various temperatures	—	10 °C: 196 d, 15 °C: 130 d	[33]
	Food: lettuce, temperature 20 °C, various initial densities of worms	—	10 ind/jar <sup>3)</sup> : 196 d, 45 ind/jar: 205 d, 86 ind/jar: 263 d, 161 ind/jar: 373 d	[34,35]
	Substance: activated sludge, temperature 20.5 °C	0.25~0.28; $W=0.044e^{0.276t}$ (first 15 d)	30 d	[36]
	Substance: silt, temperature 20.5 °C	0.015±0.006	Cannot achieve sex maturity	
	Field observation & sample analysis	—	1~2 a	[37]
<i>L. hoffmeisteri</i>	Food: lettuce, various temperatures	—	10 °C: 295 d, 15 °C: 196 d	[33]
	Food: activated sludge, various temperatures	20 °C: $W=3.7/(1+11.4742e^{-0.0429t})$ 25 °C: $W=4.7/(1+7.7989e^{-0.0435t})$	—	[43]
<i>Monopylephorus limosus</i>	Food: mixture of flour and lettuce, various temperatures	—	20 °C: 73~98 d, 27 °C: 51~72 d	[38]
	Field observation & sample analysis	—	1 a	[39]
<i>B. Sowerbyi</i>	Substance: silt and lime, various temperatures	—	20 °C: 17~20 d <sup>4)</sup> , 25~27 °C: 9~11 d <sup>4)</sup>	[40]
	Field observation	—	1~2 a	[41]
Naididae				
<i>N. variabilis</i>	Cultivated in lab, food: bacteria, temperature: 20 °C	0.143~0.23	—	[42]
<i>N. elinguis</i>		0.11	—	
<i>P. aequiseta</i>		0.163~0.235	—	

Note: 1) mg/(ind·d) represents the average daily increase of wet weight of one individual of worm; 2) A certain growth period of worm starting from germ cell, followed by developing into cocoons, hatching out, growing, sex maturation, and eventually to worm starting laying eggs; 3) ind/jar represents the number of worms in one jar; 4) Period of time (d) for larva developing in eggs and cocoons.

表 4 列举了一些学者<sup>[31-42]</sup>对寡毛类蠕虫生长规律的研究成果. 这些研究大多通过野外观测和利用面粉、莴苣等淀粉、纤维素类食物进行实验室饲养来考察颤蚓等的生长情况, 但这些研究结果并不能简单地等同于以活性污泥为底物时颤蚓的生长规律. 因此, 诸晖等<sup>[43]</sup>以颤蚓为研究对象, 活性污泥为底物, 通过批量培养实验, 考察了颤蚓在 20 和 25 °C 下的生长规律. 结果表明, 颤蚓在活性污泥中的生长较好地符合 Logistic 曲线; 25 °C 更适于颤蚓生长; 并且同其他底物相比, 以活性污泥为底物时的颤蚓生长并未表现出明显差别.

4.1.2 繁殖规律

寡毛类蠕虫的繁殖方式因种类而异, 主要有无性繁殖和有性繁殖两类. 一些较为低等的寡毛类蠕虫(如仙女虫科)采取芽裂生殖(Fission)方式进行无性繁殖, 通常在中部的某一体节形成芽区(Budding zone), 增生若干新节, 前面若干新节形成母体尾部而后面新节则发育为幼体的头部, 待幼体成熟后脱离母体. 而寡毛类蠕虫中的

带丝蚓(*Lumbriculus* sp.)则采取断裂生殖的无性繁殖方式, 由虫体自切为若干段, 每段再生出新的头部和尾部, 形成完整个体. 有性繁殖在寡毛类蠕虫中更加普遍(如颤蚓科), 不论雌雄同体还是雌雄异体, 生殖时都需经过异体受精, 形成受精卵并发育成幼体. 不少种类能分泌膜状物将或多或少的受精卵包裹起来, 以利幼体在其中孵化, 这个构造通称为卵茧(Cocoon)<sup>[44]</sup>. 采取何种生殖方式对于一些寡毛类蠕虫来说并不绝对, 有学者发现在环境条件恶劣的情况下(如低温、干燥), 原本无性繁殖的仙女虫科(Naididae)和瓢体虫科(Aeolosomatidae)蠕虫会依据季节不同, 交替发生有性和无性繁殖<sup>[45-47]</sup>. 它们产下虫卵以抵御不良的生存环境, 等待环境适宜时重新孵化, 从而实现生命的延续. 蠕虫的繁殖能力关系到其种群的增长, 对蠕虫在食物链中的地位和作用也至关重要, 最终将影响到利用蠕虫进行污泥减量的效果和效率. 有关学者对颤蚓科蠕虫繁殖能力的研究成果总结于表 5.

表 5 寡毛类蠕虫繁殖能力的文献数据

Table 5 Literature data of the reproduction of some species of Oligochaeta

Species	Cultivation/growth condition	Reproduction situation	Reference
<i>T. tubifex</i> Müller	Substance: sand, food: lettuce, temperature: 24 °C, initial population density: 1 500~18 000 ind/m <sup>2</sup> <sup>1)</sup>	About 61 eggs laid during first 100 d by each worm at average, the increase of population density would reduce the reproduction rate of worms	[31]
	Temperature 5~30 °C	Egg laying rate kept stable between 10~25 °C	[48]
<i>L. hoffmeisteri</i>	Substance: clay, food: activated sludge, temperature: 20.5 °C, initial population density 2 600~7 600 ind/m <sup>2</sup> <sup>1)</sup> , raised from newly born larva	Getting sex maturity after 30 d and starting laying eggs after 35 d, mean reproduction rate 9.7 cocoons/(ind-d) <sup>2)</sup> , 310 eggs/(ind-d) <sup>3)</sup>	[36]
	Temperature 5~30 °C, dissolved oxygen 0.1~9.6 mg/L	The increase of temperature caused the increase of egg laying rate which was at peak at 25 °C, when DO>2 mg/L, both egg and cocoon laying rate kept stable	[48]
	Field observation and sample analysis	Most worms would die after reproduction in the first year, few would survive until next year and gave the second reproduction	[37]
<i>B. Sowerbyi</i>	Field observation and sample analysis	Getting sex maturity and laying eggs from Apr. to June; a mass death of mature worms after reproduction in Oct., genital system would suffer from regression with few small-sized worms	[39]
	Field observation and sample analysis	Reproduction season was from Apr. to July, genital system would suffer regression after July	[40]
	Field observation and sample analysis	Reproduction season was from Mar. to Sept., temperature, DO and organic contents in water affected worms' reproduction obviously	[41]

Note: 1) ind/m<sup>2</sup> represents the average number of worms in the unit area of 1 m<sup>2</sup>; 2) cocoons/(ind-d) represents the average number of cocoons that one individual of worms could lay in one day; 3) eggs/(ind-d) represents the average number of cocoons that one individual of worms could lay in one day.

4.1.3 种群生长

寡毛类蠕虫属底栖生物, 在水生生物学中, 底栖生物的化性和周年生产量是非常重要的概念, 它们反映了底栖生物在特定空间下种群生长的固有规律和潜力. 这些概念对人为利用蠕虫进行污泥减量有一定指导意义.

化性(Voltinism)是某类动物在单位时间(通常为一年内)内出现的世代数, 它不仅是研究动物生活史的重要参数, 也是测定动物生产量时的重要指标<sup>[44]</sup>. 生物量(Biomass)是某一时刻单位空间内所存在的活体质量, 生产量(Production)是在单位时间单位空间内产生新的有

机物质的总量. 因此, P/B 系数表示单位生物量的生产能力, 亦称倍增系数或周转率, 它反映了生物种群增长的速率<sup>[49]</sup>.

主要寡毛类蠕虫的化性、周年生产量和周转率列于表 6. 颤蚓科蠕虫大多具有较高的 P/B 系数, 说明其在自然环境中一年的倍增量较高, 生长和繁殖能力强. 由于栖息环境、初始生物量以及其他竞争性和捕食性生物种类和数量的不同, 导致同种类寡毛类蠕虫的周年生产量和周转率也并不相同. 因此, 究竟它们是否适应活性污泥系统还有待于进一步研究.

表6 主要寡毛类蠕虫的化性、周年生产量和P/B系数  
Table 6 Voltinism, annual production and P/B of some species of Oligochaeta

Species	Voltinism (generation/a)	Production <sup>1)</sup> [g/(m <sup>2</sup> -a)]	P/B	Location	Reference
<i>T. tubifex</i> Müller	-	55.74	28.6	Cold Spring, USA	[39]
		48.9	5.25	Pietra del Pertusillo Reservoir, Italy	
<i>L. hoffmeisteri</i>	3	0.29	11.4	Lake Houhu, Wuhan, China	[43]
		228.66	6.7	Cold Spring, USA	[39]
		3.9	8.0	Naivasha Lake, Kenya	[50]
<i>Limnodrilus</i> sp.	-	32.16	12.5	Eglwys Nunydd reservoir, UK	[39]
		6.66~8.55	3.6~7.8	Lake Donghu, Wuhan, China	[39]
<i>B. sowerbyi</i>	1	3.41	4.0	Lake Houhu, Wuhan, China	[43]
		2.68	7.1	Baoan Lake, Hubei, China	[43]
		44.4	5.0	Naivasha Lake, Kenya	[50]

Note: 1) Some data were converted by dry weight (dw) of worms with the coefficient of dw/ww=1/6.

寡毛类蠕虫的个体生长和发育较细菌缓慢, 生命周期长, 因此只用种群生长来反映一定时期一定空间内寡毛类蠕虫的生长情况是模糊和不准确的. 有学者主张将寡毛类蠕虫个体和种群两方面的生长联系起来, 建立生长动力学模型. 1980年代, Kooijman等<sup>[51]</sup>将寡毛类蠕虫的种群生长、个体生长以及能量的流动有机地结合在一起考虑, 提出了寡毛类蠕虫 DEB(Dynamic Energy-Budget)模型. 1992年, Ratsak等<sup>[10]</sup>应用 DEB 模型成功描述了仙女虫在活性污泥中的个体生长、无性分裂以及种群增长的情况. 1999年, Pasteris等<sup>[52]</sup>以年龄(Age)、体重(Weight)和生命形态(Stage)为三个维度提出了霍夫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*)的矩阵种群模型(Matrix population models), 研究表明与年龄和生命形态相比, 体重作为确定霍夫水丝蚓的种群结构的标准是薄弱的.

## 4.2 寡毛类蠕虫生长和繁殖的影响因素

### 4.2.1 捕食选择性

寡毛类蠕虫的生长、繁殖活动通过捕食为其提供物质基础和能量来源. 蠕虫捕食、消化能力的大小以及由此建立的食物链关系不仅关系到蠕虫生存、生长和繁殖等生命活动, 更维系了特定生态系统中物质和能量流动的平衡. 因此, 寡毛类蠕虫捕食能力的大小是其污泥减质能力的前提和保证. 寡毛类蠕虫主要以细菌、藻类等低级生物为食, 但存在捕食选择性. 捕食选择性主要表现在寡毛类蠕虫对底物颗粒大小、有机质含量、细菌种类的偏好上.

### (1) 底物颗粒大小

由于个体和口器大小的差别, 寡毛类蠕虫对底物颗粒大小的要求不同. Rodriguez等<sup>[53]</sup>测量了*T. tubifex*排泄物的粒径分布, 发现颗粒平均粒径小于63 μm, 更有75%的颗粒平均粒径小于25 μm. 至于小型寡毛类蠕虫, Bowker等<sup>[54]</sup>发现*Nais elinguis*的食道形状和尺寸决定了其可吞食食物的最大尺寸, 藻类被吞食的速率与其长度成反比, 因此, 单细胞藻类被吞食的速度远远高于成团和丝状藻类.

寡毛类蠕虫对颗粒粒径的偏好影响到它们对底物基质的选择, 从而影响到不同种类蠕虫的分布和丰度. 一般来说, 粘土与淤泥含量高的基质颗粒较为细腻, 粒径较小; 当粘土和淤泥含量较低、沙土含量较高时, 基质的颗粒更为粗糙. Sauter等<sup>[55]</sup>发现在Constance湖中, 粒径小于63 μm的基质对于颤蚓科蠕虫的分布是非常重要的环境因素. 表7显示了不同种属颤蚓对基质中粘土和淤泥含量的偏好情况.

### (2) 底物有机质含量

寡毛类蠕虫的食性亦表现为对底物有机质含量的选择上. Rodriguez等<sup>[53]</sup>认为, 颤蚓的捕食行为存在两个水平的选择性: 底物粒径和底物颗粒中的有机质含量. 许多研究人员以颤蚓科蠕虫来研究颤蚓分布和丰度与底物有机质含量间的关系, 但结果并不相同. Wachs发现正颤蚓(*T. tubifex* Müller)偏好营养丰富的底物(如高有机碳和总氮)而不论粒径如何, 但Zahner发现这类物种

表7 不同种属颤蚓对基质中粘土与淤泥含量的偏好性<sup>[55]</sup>

Table 7 Substrate preference of species in relation to the clay and silt content of sediment<sup>[55]</sup>

Species	Clay and silt content (%)	Species	Clay and silt content (%)
<i>Tubifex tubifex</i>	>60	<i>Limnodrilus claparedeianus</i>	<10
<i>Potamothenrix heuscheri</i>	>60	<i>Potamothenrix moldaviensi</i>	<10
<i>Potamothenrix bedotii</i>	>60	<i>Tubifex ignotus</i>	<10
<i>Ilyodrilus templetoni</i>	>60	<i>Psammoryctides barbatus</i>	<10
<i>Aulodrilus plurisetus</i>	>60	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i>	No preference
<i>Styrodrilus heringianus</i>	20~30	<i>Limnodrilus profundicola</i>	No preference
<i>Limnodrilus udekemianus</i>	50~70	<i>Potamothenrix hammoniensis</i>	No preference
<i>Spirosperma ferox</i>	50~70		

更喜好粗糙颗粒、营养贫乏的基质(如低有机碳、有机氮和有机磷)。在考察颤蚓丰度与底物有机质含量的关系时, Brinkhurst<sup>[56]</sup>认为两者存在正相关关系, 但更多的研究<sup>[57-59]</sup>表明颤蚓种群数量与底物有机质含量之间没有什么关系, 甚至呈反比关系。

人们并未对野外环境下底物有机质含量与寡毛类蠕虫分布和丰度之间的关系达成共识, 这可能是由于受到了其他环境因素(如水温、溶氧、水质条件等)的共同和复杂影响。然而, 批量实验研究<sup>[12]</sup>表明, 低负荷传统活性污泥工艺中产生的污泥(含 50%~70%有机碳)作为寡毛类蠕虫的食物是合适的。Finogenova 等<sup>[36]</sup>在烧杯中培养正颤蚓, 分别以活性污泥(富含有机质)和自然水体中的淤泥(贫有机质)为底物来观察其生长和繁殖情况。结果表明, 在以活性污泥为底物时, 正颤蚓的生长速率是以淤泥为底物时的 2 倍, 而且达到性熟的时间更早, 每 100 d 每条蠕虫的产卵数分别是以淤泥为食时的 2.5 倍和以莴苣为食时的 5 倍。由于颤蚓(*T. tubifex*)和霍夫水丝蚓(*L. hoffmeisteri*)的强耐污染能力和高生长速率, 使它们在富含有机质的水体中(如人类活动产生的生活污水和污泥)成为优势种群。Aston 等<sup>[60,61]</sup>发现苏氏尾鳃蚓(*Branchiura sowerbyi*)也能以活性污泥为食, 但必须同时为其提供沙粒或河底淤泥作为附着生长的环境。

### (3) 细菌偏好

Coler 等<sup>[62]</sup>首次证实了颤蚓对细菌的捕食选择性, 根据这一原理, 他成功将混合种颤蚓自然地区分开来。McMurtry 等<sup>[57]</sup>认为, 相比其物理和化学性质来说, 底物中微生物种群的组成对颤蚓的捕食选择性行为的影响更为重要。他发现颤蚓的捕食与底物中异养好氧菌数量之间存在着显著的相关性。

寡毛类蠕虫消化不同种类细菌的能力各异。Wavre 等<sup>[63]</sup>发现大部分(大约 70%)异养菌在颤蚓肠道运输过程中就被杀死, 而颤蚓排泄物中却富含另一种单一菌群的细菌。形成这种单一菌种群的原因被认为是在经肠道运输、消化后仍存活的细菌由于适宜肠道内环境而大量繁殖, 肠道内的某些环境因素促进了这类细菌的快速生长<sup>[64]</sup>。

Brinkhurst<sup>[65]</sup>发现某种颤蚓的粪便中含有另一种颤蚓所偏好的细菌种类, 因此, 他认为不同种类的颤蚓间存在互利共生(Mutualism)关系。Milbrink<sup>[66]</sup>证实了这一说法, 他发现, 混合培养几种不同种属的颤蚓能使颤蚓的生长速率提高 50%, 并且颤蚓达到成熟所需的时间也大大缩短。他认为是颤蚓的捕食选择性让更多不同种属的颤蚓生长在一起, 由于各自都能获得所偏好的细菌作为食物, 呼吸速率得到降低, 生长速率得到提高。

Mermillod-Blondin 等<sup>[67]</sup>发现水丝蚓(*Limnodrilus* sp.)和颤蚓(*Tubifex* sp.)混合培养时比单独培养更能刺激基质表层 5 cm 内细菌数量的增长, 同时氧气的需求量减少。而单独培养颤蚓时, 颤蚓在消耗完自身偏好的细菌之后, 会主动钻入底物下层继续寻找食物, 由此带来了呼吸损耗的增长, 导致其用于捕食、消化食物的时间减少。

颤蚓因捕食选择性而产生的粪便能改善周围底物的有机质组成和含量。Brinkhurst 等<sup>[68]</sup>发现, 寡毛类蠕虫粪便中的有机质、能量和含氮量高于其周遭的底物质。但是也有人认为这种有机质的富集程度仍然不能满足颤蚓生存和生命活动对能量的需求。因此, 大部分像颤蚓这样的食碎屑动物(Deposit feeder)依旧需要靠非活性物质和食物来维持生命, 就像靠捕食细菌来提供蛋白质一样, 靠捕食未分解的腐殖质(Detritus)来提供碳水化合物<sup>[69]</sup>。

### 4.2.2 环境因素

温度和溶氧是 2 个最重要的环境因素, 决定了不同种类蠕虫在自然环境下的分布、组成和丰度。有研究<sup>[70]</sup>表明, 一般情况下, 缺氧湖泊中的寡毛类蠕虫种群数量较低。

#### (1) 温度

在对英国湖泊地区中颤蚓科蠕虫的研究中, Raynoldson<sup>[70]</sup>发现颤蚓和霍夫水丝蚓在 10~13℃便能生长, 但最适宜这 2 种颤蚓个体发育和繁殖的温度是 20~25℃<sup>[71]</sup>。Aston<sup>[72]</sup>以活性污泥为底物培养苏氏尾鳃蚓时发现, 苏氏尾鳃蚓的最大生长速率和繁殖速率均发生在 21~29℃间, 25℃下种群的倍增时间为 1.48 周。同时, 他发现最适宜成熟颤蚓产卵的温度和最适宜未性熟颤蚓生长的温度也是 25℃左右; 而性成熟颤蚓的最适生长温度却较低, 在 10~15℃间。一种解释是, 成熟颤蚓在 20~24℃时的生长被较高的繁殖速率所抑制。Lochhead 等<sup>[42]</sup>和 Juget 等<sup>[73]</sup>考察了温度对 *N. variabilis*, *N. elinguis* 和 *P. equiseta* 无性繁殖速率的影响, 在 20℃下, *N. variabilis* 和 *P. equiseta* 的种群平均倍增时间是 3 d, 而在 8℃时, *P. equiseta* 的倍增时间最长为 22 d。诸晖等<sup>[43]</sup>在以活性污泥培养颤蚓科蠕虫时(以霍夫水丝蚓为主), 发现颤蚓在 25℃的生长速率[0.0722 mg/(ind·d), mg/(ind·d)代表 1 条颤蚓 1 d 的生长量]大约是 20℃时[0.0342 mg/(ind·d)]的 2 倍, 25℃更适于颤蚓生长。

#### (2) 溶解氧

Reynoldson<sup>[70]</sup>考察了溶解氧对 *T. tubifex* 和 *L. hoffmeisteri* 生长繁殖的影响, 发现这 2 种颤蚓都表现出在一段时间内耐缺氧环境的能力, *T. tubifex* 是 16 周, 而 *L. hoffmeisteri* 是 10 周。Famme 等<sup>[74]</sup>发现 *T. tubifex* 能



在缺氧恒化器中生存、生长和繁殖,其生存状态至少能持续10个月以上,因此他们认为 *T. tubifex* 属于嗜厌氧生物. 另一常见种类 *Ilyodrilus templetoni* 却对缺氧环境敏感,其生存维持不到4周<sup>[70]</sup>.

对于小型游离型寡毛类蠕虫, Dumnicka 等<sup>[75]</sup>发现 *N. elinguis* 的出现几率与温度在 0.3~20.6℃ 的变化呈正相关,最适合此物种生长的是含氧量和营养水平都不太高的水体,而不是重度污染水体( $BOD_5 > 9.24 \text{ mg/L}$ ). 在  $BOD_5$  较低、含氧量较高的水体中,此物种的种群数量较高. 因此, *N. elinguis* 被认为是反映污染水体或富营养化水体最理想的指示生物.

#### 4.2.3 种群密度

寡毛类蠕虫种群生长受自身种群密度的调节. Adreani 等<sup>[76]</sup>研究发现,蠕虫种群密度的减少(如被捕食)反而缩短了蠕虫性成熟的时间,提高了蠕虫的繁殖能力,从而使种群数量快速增长. 同样,由于种群密度过高导致的蠕虫繁殖能力下降,会引起整个种群数量的下降. 基于以上种群动力学,有学者认为寡毛类蠕虫可根据其自身种群密度的变化来调控种群大小<sup>[35]</sup>,也调控着蠕虫的生长、性成熟和繁殖速率<sup>[34,35]</sup>. 其中,生长速率和平均产卵速率与种群密度成反比,世代时间与种群密度成正比. 可见,太低或太高的起始种群密度均不利于颤蚓的生长.

种群密度影响蠕虫繁殖方式. Christensen<sup>[45]</sup>发现,当高密度(>400条,200 mL 烧杯中以75 mL 湿粗沙粒为基质)培养时, *Enchytraeus bigeminus* 纯粹以断裂生殖的方式繁殖;而当密度小于300~350条时,有性繁殖就会出现.

## 5 结语与展望

寡毛类蠕虫污泥减量工艺近年来受到了广泛关注,尤其是直接利用寡毛类蠕虫从源头减少活性污泥产生量(污泥减质)的研究. 然而,目前人们对寡毛类蠕虫是否具有显著的污泥减质潜力还存在争议. 这主要是由于两方面的原因:(1)至今还未建立一套统一且科学有效的寡毛类蠕虫污泥减质效果的评价方法,因而难以推进蠕虫筛选及其工艺条件优化等一系列的后续研究工作;(2)寡毛类蠕虫不能在传统的活性污泥工艺中稳定生长,人们缺乏对寡毛类蠕虫以活性污泥为底物(食物)时的捕食、生长和繁殖规律的深刻认识. 因此,本文通过系统总结寡毛类蠕虫污泥减量工艺及其生长和繁殖规律的研究进展,以期为筛选合适的寡毛类蠕虫种类、强化蠕虫捕食活性污泥的食物链机制、优化寡毛类蠕虫污泥减量工艺条件提供有益的参考和借鉴.

现有研究大多采用表观污泥产率系数或表观污泥减量率来衡量寡毛类蠕虫的污泥减质效果,但此法易受活性污泥工艺中多种因素影响,也忽略了寡毛类蠕虫对活性污泥的团聚和浓缩作用,因此,并不能有效和准确评价寡毛类蠕虫所具有的污泥减质能力. 如何准确衡量和评价寡毛类蠕虫的污泥减质效果还需要进行深入的研究,以便进一步明确不同种类寡毛类蠕虫的污泥减量能力,同时结合寡毛类蠕虫在以活性污泥为底物时的捕食、生长和繁殖规律,筛选出适宜活性污泥系统稳定运行的蠕虫种类. 同位素示踪方法可为寡毛类蠕虫污泥减质效果评价提供一条新途径,作者在利用  $^{32}\text{P}$  同位素示踪剂评价颤蚓捕食污泥所引起的表观污泥减质效果方面进行了有效的尝试,但  $^{32}\text{P}$  难以反映寡毛类蠕虫捕食污泥过程中物质和能量的传递. 今后可采用碳同位素为示踪剂,直接考察因寡毛类蠕虫捕食所引起的污泥矿化作用. 这将为评价寡毛类蠕虫污泥减质效果、筛选适宜种群提供更加有力的证据.

寡毛类蠕虫可有效改善活性污泥沉降性能,具有一定的污泥减容作用,但目前缺乏对其污泥减容机理的深入研究. 寡毛类蠕虫的污泥减容作用具有一定的工程应用前景,但在实际应用之前,不仅需解决蠕虫来源、回收、循环利用及出路等问题,还需进行科学合理的技术经济分析,避免标新立异给污泥处理增加新的负担.

#### 参考文献:

- [1] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, et al. Minimization of Excess Sludge Production for Biological Wastewater Treatment [J]. *Water Res.*, 2003, 37(18): 4453-4467.
- [2] 张自杰. 排水工程(下册), 第4版 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 107-108, 328-346.
- [3] Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, 4<sup>th</sup> Ed. [M]. USA: McGraw-Hill Companies, Inc., 2003. 361-384.
- [4] Liu Y, Tay J H. Strategy for Minimization of Excess Sludge Production from the Activated Sludge Process [J]. *Biotechnol. Adv.*, 2001, 19(2): 97-107.
- [5] Ratsak C H, Kooi B W, Van Verseveld H W. Biomass Reduction and Mineralization Increase due to the Ciliate *Tetrahymena pyriformis* Grazing on the Bacterium *Pseudomonas fluorescens* [J]. *Water Sci. Technol.*, 1994, 29(7): 119-128.
- [6] Ghyoot W, Verstraete W. Reduced Sludge Production in a Two-stage Membrane-assisted Bioreactor [J]. *Water Res.*, 2000, 34(1): 205-215.
- [7] Lee N M, Welander T. Reducing Sludge Production in Aerobic Wastewater Treatment through Manipulation of the Ecosystem [J]. *Water Res.*, 1996, 30(8): 1781-1790.
- [8] Lee N M, Welander T. Use of Protozoa and Metazoa for Decreasing Sludge Production in Aerobic Wastewater Treatment [J]. *Biotechnol. Lett.*, 1996, 18(4): 429-434.
- [9] 翟小蔚, 潘涛, Ghyoot W, 等. 利用原生动物削减剩余活性污泥产量 [J]. *中国给水排水*, 2000, 16(11): 6-9.
- [10] Ratsak C H, Kooijman S A L M, Kooi B W. Modelling the Growth of an Oligochaete on Activated Sludge [J]. *Water Res.*, 1993, 27(5):

- 739-747.
- [11] Ratsak C H. Grazer Induced Sludge Reduction in Wastewater Treatment [D]. Amsterdam: Free University, 1994.
- [12] Rensink J H, Rulkens W H. Using Metazoa to Reduce Sludge Production [J]. *Water Sci. Technol.*, 1997, 36(11): 171-179.
- [13] 张绍园. 膜分离与生物降解组合工艺处理受污染水研究 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2000. 19-52.
- [14] Wei Y S, Van Houten R T, Borger A R, et al. Comparison Performances of Membrane Bioreactor and Conventional Activated Sludge Processes on Sludge Reduction by Oligochaete [J]. *Environ. Sci. Technol.*, 2003, 37(14): 3171-3180.
- [15] Wei Y S, Liu J X. The Discharged Excess Sludge Treated by Oligochaete [J]. *Water Sci. Technol.*, 2005, 52(10/11): 265-272.
- [16] Wei Y S, Liu J X. Sludge Reduction with a Novel Combined Worm-reactor [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 564: 213-222.
- [17] Wei Y S, Liu J X. Reducing Sludge Production in Activated Sludge Process with Oligochaetes: Platform Presentation [A]. Lyon W G, Hong J, Reddy R K. *Environmental Science and Technology (2005) (Volume 1) [C]*. New Orleans: American Science Press, 2005. 276-283.
- [18] Liang P, Huang X, Qian Y. Excess Sludge Reduction in Activated Sludge Process through Predation of *Aeolosoma hemprichi* [J]. *Biochem. Eng. J.*, 2006, 28: 117-122.
- [19] Liang P, Huang X, Qian Y, et al. Determination and Comparison of Sludge Reduction Rates Caused by Microfaunas' Predation [J]. *Bioresour. Technol.*, 2006, 97: 854-861.
- [20] Huang X, Liang P, Qian Y. Excess Sludge Reduction Induced by *Tubifex tubifex* in a Recycled Sludge Reactor [J]. *J. Biotechnol.*, 2007, 127: 443-451.
- [21] Elissen H J H, Hendrickx T L G, Temmink H, et al. A New Reactor Concept for Sludge Reduction Using Aquatic Worms [J]. *Water Res.*, 2006, 40(20): 3713-3718.
- [22] Lumxy B S, Kubo T, Yamamoto K. Sludge Reduction Potential of Metozoa in Membrane Bioreactors [J]. *Water Sci. Technol.*, 2001, 44(10): 197-202.
- [23] Falconi R, Cristiani E, Tomba G, et al. Sludge Reduction Induced by Two Species of Aeolosomatidae [A]. Wang H Z, Erséus C, Liang Y L. *The 10<sup>th</sup> International Symposium on Aquatic Oligochaeta [C]*. Wuhan: Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, 2006. 42.
- [24] 梁鹏. 利用微型动物减少剩余污泥产生量的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004. 22-48.
- [25] 魏源送, 樊耀波. 蠕虫污泥减量效果及其影响因素分析 [J]. *环境科学*, 2005, 26(1): 76-83.
- [26] Ratsak C H, Verkuiljen J. Sludge Reduction by Predation Activity of Aquatic Oligochaetes in Wastewater Treatment Plants: Science or Fiction? A Review [J]. *Hydrobiologia*, 2006, 564: 197-211.
- [27] 诸晖. 利用颤蚓对污水处理厂剩余污泥的减量效果评价 [D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2006. 54-68.
- [28] Wei Y S, Zhu H, Wang Y W, et al. Nutrients Release of Sludge Reduction Induced by Oligochaetes: Short Oral Presentation [A]. *The 6<sup>th</sup> IWA World Water Congress [C]*. Vienna, 2008.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Kosiorek D. Development Cycle of *Tubifex tubifex* Müller in Experimental Culture [J]. *Pol. Arch. Hydrobiologia*, 1974, 21: 411-422.
- [32] 李仁熙. 正颤蚓的生长发育及繁殖生物学的研究 [J]. *水生生物学报*, 2001, 25(1): 14-20.
- [33] Bonacina C, Bonomi G, Monti C. Progress in Cohort Culture of Aquatic Oligochaeta [J]. *Hydrobiologia*, 1987, 155: 163-169.
- [34] Bonacina C, Bonomi G, Monti C. Population Analysis in Mass of *Tubifex tubifex* [J]. *Hydrobiologia*, 1989, 180: 127-134.
- [35] Bonacina C, Bonomi G, Monti C. Density-dependent Processes in Cohorts of *Tubifex tubifex* with Special Emphasis on the Control of Fecundity [J]. *Hydrobiologia*, 1989, 180: 135-141.
- [36] Finogenova N P, Lobasheva T M. Growth of *Tubifex tubifex* (Oligochaeta, Tubificidae) under Various Trophic Conditions [J]. *Int. Rev. Ges. Hydrobiol.*, 1987, 72(6): 709-726.
- [37] Kennedy C R. The Life History of *Limnodrilus hoffmeisteri* Clap. (Oligochaeta: Tubificidae) and Its Adaptive Significance [J]. *Oikos*, 1966, 17: 158-168.
- [38] 陈旭, 朱琳, 王启山, 等. 红虫生长发育及繁殖的生物学研究 [J]. *给水排水*, 2005, 31(6): 38-40.
- [39] Liang Y L. Annual Production of *Branchiura sowerbyi* (Oligochaeta: Tubificidae) in the Donghu Lake, Wuhan, China [J]. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 1984, 2: 102-108.
- [40] Cassellato S. Life Cycle and Karyology of *Branchiura sowerbyi* Beddard (Oligochaeta, Tubificidae) [J]. *Hydrobiologia*, 1984, 115: 65-69.
- [41] Carrol H J, Dorris T T. The Life History of *Branchiura sowerbyi* [J]. *Am. Midl. Nat.*, 1972, 87: 413-422.
- [42] Lochhead G, Learner M A. The Effect of Temperature on Asexual Population Growth of Three Species of Naididae (Oligochaeta) [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 98: 107-112.
- [43] 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.
- [44] 王洪铸, 梁雁龄. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 249-253.
- [45] Christensen B. Density Dependence of Sexual Reproduction in *Enchytraeus bigeminus* (Enchytraeidae) [J]. *Oikos*, 1973, 24: 287-294.
- [46] Loden M S. Reproductive Ecology of Naididae (Oligochaeta) [J]. *Hydrobiologia*, 1981, 83: 115-123.
- [47] Timm T. Potential Age of Aquatic Oligochaeta [J]. *Hydrobiologia*, 1984, 115: 101-104.
- [48] Aston R J. Field and Experimental Studies on the Effects of a Power Station Effluent on Tubificidae (Oligochaeta, Annelida) [J]. *Hydrobiologia*, 1973, 42(2/3): 225-242.
- [49] 王骥. 高级水生生物学 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 128-150.
- [50] Raburu P, Mavuti K M, Harper D M, et al. Population Structure and Secondary Productivity of *Limnodrilus hoffmeisteri* (Claparede) and *Branchiura sowerbyi* Beddard in the Profundal Zone of Lake Naivasha, Kenya [J]. *Hydrobiologia*, 2002, 488: 153-161.
- [51] Kooijman S A L M, Hanstveit A O, Van der Hoeven N. Research on the Physiological Basis of Population Dynamics in Relation to Ecotoxicology [J]. *Water Sci. Technol.*, 1987, 19: 21-37.
- [52] Pasteris A, Vecchi M, Bonomi G. A Comparison among Different Population Models for *Limnodrilus hoffmeisteri* Claparede (Oligochaeta, Tubificidae) [J]. *Hydrobiologia*, 1999, 406: 183-189.
- [53] Rodriguez P, Martinez-Madrid M, Arrate J A, et al. Selective Feeding by the Oligochaete *Tubifex tubifex* (Tubificidae, Clitellata) [J].

- Hydrobiologia, 2001, 463: 133–140.
- [54] Bowker D W, Wareham M T, Learner M A. The Selection and Ingestion of Epilithic Algae by *Nais elinguis* (Oligochaeta: Naididae) [J]. Hydrobiologia, 1983, 98: 171–178.
- [55] Sauter G, Güde H. Influence of Grain Size on the Distribution of Tubificid Oligochaete Species [J]. Hydrobiologia, 1996, 334: 97–101.
- [56] Brinkhurst R O. Distribution and Abundance of Tubificid (Oligochaeta) Species in Toronto Harbour, Lake Ontario [J]. Journal Fisheries Research Board of Canada, 1970, 27: 1961–1969.
- [57] McMurtry M J, Rapport D J, Chua K E. Substrate Selection by Tubificid Oligochaetes [J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1983, 40: 1639–1646.
- [58] Robbins J A, McCall P L, Fisher J B, et al. Effects of Deposit-feeders on Migration of  $^{137}\text{Cs}$  in Lake Sediments [J]. Earth Planet. Sci. Lett., 1979, 42: 277–287.
- [59] Robbins J A, Keilty T J, White D S, et al. Relationships among Tubificid Abundances, Sediment Composition, and Accumulation Rates at Lake Erie [J]. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 1989, 46: 223–231.
- [60] Aston R J, Milner A G P. Condition Required for the Culture of *Branchiura sowerbyi* (Oligochaeta: Tubificidae) in Activated Sludge [J]. Aquaculture, 1982, 26: 155–160.
- [61] Aston R J, Sadler K, Milner A G P. The Effects of Temperature on the Culture of *Branchiura sowerbyi* (Oligochaeta: Tubificidae) on Activated Sludge [J]. Aquaculture, 1989, 29: 137–145.
- [62] Coler R A, Gunner H B, Zuckerman B M. Selective Feeding of Tubificid on Bacteria [J]. Nature, 1967, 216: 1143–1144.
- [63] Wavre M, Brinkhurst R O. Interactions between Some Tubificid Oligochaetes and Bacteria Found in the Sediments of Toronto Harbour, Ontario [J]. Journal Fisheries Research Board of Canada, 1971, 28: 335–341.
- [64] Juniper S K. Stimulation of Bacterial Activity by a Deposit Feeder in Two New Zealand Intertidal Inlets [J]. Bulletin of Marine Science, 1981, 31: 691–701.
- [65] Brinkhurst R O. Factors Mediating Interspecific Aggregation of Tubificid Oligochaete [J]. Journal Fisheries Research Board of Canada, 1974, 31: 460–462.
- [66] Milbrink G. Mutualistic Relationships between Cohabiting Tubificid Species [J]. Hydrobiologia, 1987, 155: 193.
- [67] Mermillod-Blondin F, Creuzé des Châtelliers M, Gérino M. Effects of the Interaction between Tubificid Worms on the Functioning of Hyporheic Sediments: An Experimental Study in Sediment Columns [J]. Archiv für Hydrobiologie, 2003, 156: 203–223.
- [68] Brinkhurst R O, Jamieson B G M. Distribution and Ecology [A]. Brinkhurst R O. Aquatic Oligochaeta of the World [C]. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1971. 122–147.
- [69] Lopez G R, Levinton J S. Ecology of Deposit Feeding Animals in Marine Sediments [J]. Quarterly Review of Biology, 1987, 62: 235–260.
- [70] Reynoldson T B. The Role of Environmental Factors in the Ecology of Tubificid Oligochaetes—An Experimental Study [J]. Holarctic Ecology, 1987, 10: 241–248.
- [71] Reynoldson T B, Rodriguez P, Madrid M M. A Comparison of Reproduction, Growth and Acute Toxicity in Two Populations of *Tubifex tubifex* (Müller, 1774) from the North American Great Lakes and Northern Spain [J]. Hydrobiologia, 1996, 334: 199–206.
- [72] Aston R J. The Effect of Temperature on the Life Cycle, Growth and Fecundity of *Branchiura sowerbyi* (Oligochaeta: Tubificidae) [J]. Journal of Zoology, 1968, 154: 29–40.
- [73] Juget J, Goubier V, Barthélémy D. Intrinsic and Extrinsic Variables Controlling the Productivity of Asexual Populations of *Nais* sp. (Naididae, Oligochaeta) [J]. Hydrobiologia, 1989, 180: 177–184.
- [74] Famme P, Knudsen K. Anoxic Survival, Growth and Reproduction by the Freshwater Annelid, *Tubifex* sp., Demonstrated Using a New Simple Anoxic Chemostat [J]. Comp. Biochem. Physiol., 1985, 81A: 251–253.
- [75] Dumnicka E, Pasternak K. The Influence of Physicochemical Properties of Water and Bottom Sediments in the River Nida on the Distribution and Numbers of Oligochaeta [J]. Acta Hydrobiologica, 1978, 20: 215–232.
- [76] Adreani L, Bonacina C, Bonomi G, et al. Cohort Cultures of *Psammoryctides barbatus* (Grube) and *Spirosperma ferox* Eisen: A Tool for a Better Understanding of Demographic Strategies in Tubificidae [J]. Hydrobiologia, 1984, 115: 113–119.

## Advances in Sludge Reduction Induced by Oligochaetes and Theirs Growth Kinetics

ZHU Hui, WEI Yuan-song, WANG Ya-wei, LIU Jun-xin

(Research Center for Eco-environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Advances in sludge reduction induced by oligochaetes and their growth kinetics are thoroughly reviewed. Stable presence, growth and reproduction of oligochaetes in activated sludge system, both affecting their predation on sludge and their capacity of sludge reduction, are significantly influenced by such factors as substrate characteristics, environmental conditions, population density of oligochaetes, except for their different species. Based on direct weighing, the observed sludge yield coefficient is not considered as suitable to evaluate the real capacity of sludge reduction of biomass by oligochaetes, because this method can be easily affected by lots of factors in activated sludge process. Whereas, isotope tracing provides a new way to more effectively evaluate the capacity of sludge reduction and screen worms suitable for sludge reduction of biomass. In addition, worms can improve the sludge settling, and should be considered in sludge reduction of volume.

**Key words:** activated sludge process; sludge reduction; oligochaetes