

# 蠕虫污泥减量效果及其影响因素分析

魏源送, 樊耀波

(中国科学院生态环境研究中心水污染控制技术研究室, 北京 100085)

**摘要:** 研究了蠕虫生长在活性污泥法中试系统的污泥减量效果及其对出水水质的影响, 同时对蠕虫生长的影响因素进行了初步分析. 结果表明, 除了初始的 20 d 之外, 整个试验过程中均有蠕虫出现, 其中红斑瓢体虫 (*Aeolosoma hemprichii*) 和仙女虫 (*Nais elinguis*) 交替占据优势地位, 但红斑瓢体虫占据主导地位的时间长于仙女虫, 而吻盲虫 (*Pristina aequisetata*) 只是偶尔存在. 蠕虫连续保持高密度生长 (曝气池中蠕虫总密度大于 30 条/mg) 长达 172 d. 高密度下的蠕虫生长不仅能显著降低污泥产率, 而且能明显提高污泥的沉降性能. 蠕虫密度越高, 出水水质越差. 仙女虫比红斑瓢体虫具有更大的污泥减量能力, 并且前者对出水水质的影响也大于后者. 蠕虫生长不影响硝化过程, 但当仙女虫占优势时, 蠕虫生长会导致出水  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度的升高. 蠕虫生长影响因素的分析表明, 只有污泥龄对 2 种蠕虫的生长没有影响, 但温度和水力停留时间均能显著影响它们的生长.

**关键词:** 蠕虫; 污泥减量; 活性污泥法; 生物捕食

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2005)01-0076-08

## Reducing Sludge Production by Predation and Its Factors Analysis in Conventional Activated Sludge Process

WEI Yuan-song, FAN Yao-bo

(Department of Water Pollution Control Technology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Reducing excess sludge production induced by Oligochaete is carried out in a pilot scale of conventional activated sludge (CAS) reactor for 345 days. Worms occurred for nearly whole operating period except for the first 20 days, and continuously maintained at high density (over 30 total worms/mg VSS in aeration tank) for 172 days. Three types of worm were found, *Aeolosoma hemprichii* and *Nais elinguis* alternatively dominated, but *Pristina aequisetata* occasionally presented. High worm density greatly contributes to both reducing sludge production and improving the sludge settling characteristics, and *Nais elinguis* had more potential for sludge reduction than *Aeolosoma*. Worm growth had impacts on effluent quality, and *Nais elinguis* growth affected effluent quality much more than *Aeolosoma*. Worm growth does not disturb the nitrification process, but  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  release into effluent occurs as *Nais elinguis* dominated. Analysis of factors affecting worm growth show that only SRT has no any impact on neither *Aeolosoma* nor *Nais*, however, both temperature and HRT can affect their growth very much.

**Key words:** oligochaete; sludge reduction; activated sludge process; predation

活性污泥法是当今应用最广泛的污水生物处理方法,但同时副产大量的剩余污泥<sup>[1]</sup>.目前剩余污泥的处理与处置费用约占污水处理厂总运行费用的 25%~40%,甚至高达 60%.此外,随着法律、法规对污水处理的要求愈益严格,例如:从 1995 年 1 月 1 日起,荷兰要求废水排放必须达到:  $\text{BOD}_5 < 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TKN}(\text{夏季}) < 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $\text{TP} < 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ <sup>[2,3]</sup>.污水处理厂今后将产生更多的剩余污泥.因此,一个有效的途径就是从源头上减少剩余污泥的产量.

近年的研究发现,利用原、后生动物捕食细菌的特点,可以减少剩余污泥的产量,例如,蠕虫的大量生长能够大幅减少剩余污泥的产量<sup>[4~20]</sup>.蠕虫是活性污泥中观察到的最大后生动物<sup>[21]</sup>,主要类型有仙

女虫、红斑瓢体虫和颤蚓<sup>[4,14,15]</sup>.虽然蠕虫生长能够减少剩余污泥的产量,但蠕虫的生长不稳定,从而影响了它的污泥减量效果.此外,尽管近来有关蠕虫污泥减量的研究较多,但是人们目前并不清楚蠕虫的生长特性与活性污泥法操作因素之间的相互关系.因此,本研究的目的是通过长期运行,考察蠕虫生长在活性污泥法中的污泥减量效果及其对出水水质的影响,同时也对蠕虫生长的影响因素进行初步分析,以便了解如何在活性污泥法系统中保持蠕虫的长期稳定生长.

收稿日期:2003-12-18;修订日期:2004-02-02

基金项目:中荷国际合作项目

作者简介:魏源送(1969~),男,博士,副研究员,主要从事水污染控制和污泥处理与处置方面的研究.

1 材料与方法

活性污泥法中试系统由一个预沉池(有效容积 230 L)、一个推流式曝气池(有效容积 640 L)和一个二沉池(有效容积 160 L)组成,并连续运行 345 d.生活污水来源于邻近的居民小区,进入预沉池之前过 0.1 mm 的滤网.过滤后的生活污水特性见表 1.曝气池中的液位控制器控制进水蠕动泵(Watson-Marlow 601 S, UK)的运行,二沉池中的污泥通过蠕

动泵(Watson-Marlow 603 S, UK)回流至曝气池.试验运行过程中采用温控仪和加热器控制曝气池中污泥混合液水温为 20 ℃左右,同时在线监测曝气池中污泥混合液的溶解氧(WTW TriOxmatic 160 R, Germany)和 pH 值(PH M2, Germany).每天定时测量系统的进、出水流量和回流污泥流量.通过控制剩余污泥的排放量来调整污泥龄,并根据不同的污泥龄,将试验过程分为 5 个阶段,中试系统的具体操作参数见表 1.

表 1 活性污泥法试验系统中不同阶段的操作参数和生活污水特性(均值±标准偏差)  
Table 1 Characteristics of the fed wastewater and operation conditions in different stages

| 指 标    |                                                     | I<br>(第 0~116 天) | II<br>(第 117~154 天) | III<br>(第 155~200 天) | IV<br>(第 201~273 天) | V<br>(第 274~341 天) |
|--------|-----------------------------------------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| 操作运行参数 | t/℃                                                 | 21.1±3.3         | 24.2±0.7            | 23.0±0.9             | 20.9±2.2            | 21.4±2.5           |
|        | pH 值                                                | 6.6±0.3          | 6.4±0.2             | 6.3±0.2              | 6.9±0.2             | 6.7±0.3            |
|        | 溶解氧/mg·L <sup>-1</sup>                              | 2.7±2.6          | 2.6±2.1             | 1.9±1.9              | 4.0±3.0             | 3.4±2.9            |
|        | HRT/h                                               | 6.38±2.17        | 7.16±0.67           | 5.94±1.09            | 6.89±0.89           | 7.31±0.55          |
|        | SRT/d                                               | 46.83±7.55       |                     | 18.18±5.98           | 30.04±8.55          | 70.92±1.76         |
|        | F/M <sup>1</sup> /kg·(kg·d) <sup>-1</sup>           | 0.32±0.23        | 0.18±0.06           | 0.25±0.11            | 0.28±0.16           | 0.20±0.08          |
|        | 污泥回流比                                               | 1.07±0.46        | 0.86±0.08           | 0.81±0.12            | 0.99±0.32           | 0.77±0.11          |
|        | 曝气池 TSS/g·L <sup>-1</sup>                           | 6.59±0.91        | 5.96±1.74           | 5.65±0.70            | 5.77±0.79           | 5.68±1.02          |
|        | 曝气池 VSS/g·L <sup>-1</sup>                           | 5.43±0.74        | 4.82±1.32           | 4.54±0.56            | 4.72±0.66           | 4.73±0.88          |
|        | 曝气池 VSS/TSS 比值                                      | 0.82±0.01        | 0.81±0.02           | 0.80±0.01            | 0.82±0.02           | 0.83±0.01          |
| 生活污水特性 | 总 COD/mg·L <sup>-1</sup>                            | 393±184          | 260±97              | 267±114              | 369±189             | 334±104            |
|        | 溶解性 COD/mg·L <sup>-1</sup>                          | 116±54           | 93±21               | 110±50               | 127±23              | 89±6               |
|        | SS/mg·L <sup>-1</sup>                               | 172±157          | 147±78              | 136±63               | 155±157             | 126±65             |
|        | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>  | 41±12            | 30±15               | 36±9                 | 38±12               | 36±9               |
|        | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>  | 0.09±0.09        | 0.09±0.14           | 0.22±0.30            | 0.10±0.21           | 0.03±0.04          |
|        | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N/mg·L <sup>-1</sup>  | 0.35±0.93        | 1.66±1.63           | 0.02±0.04            | 0.05±0.23           | 0.00               |
|        | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/mg·L <sup>-1</sup> | 3.35±1.30        | 2.85±1.19           | 5.71±3.27            | 4.67±2.01           | 2.80±2.09          |

1) F/M 为污泥负荷(COD/VSS·d)

运行过程中每周定期采样 2 次(进、出水;曝气池混合悬浮液和回流污泥).采用德国 Dr. Lange 标准试剂测定 COD(LCK 314:15~150 mg/L COD; LCK 114:150~1000 mg/L COD)和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 浓度(LCK 303:2~47 mg/L NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N),其中测定溶解性 COD 时样品用 0.22 μm 滤膜过滤. NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度用离子色谱法测定(DX120, Dionex Corp., USA), TSS、VSS、SS 用重量法测定,体视显微镜(Wild M7, Switzerland)用做蠕虫计数(取 1 mL 污泥样品,蠕虫数量为 3 个平行样品的平均值).本研究中,蠕虫总量(N<sub>t</sub>)以红斑瓢体虫(*Aeolosoma hemprichicii*)计算,见公式(1)<sup>[20]</sup>.污泥产率计算方法详见公式(2~4).采用统计分析软件 SPSS 11.0 进行 Pearson 相关系数和 Spearman's rank 相关系数分析.

1 条仙女虫 = 7 条红斑瓢体虫 = 2.5 条吻盲虫 (1)

$$\Delta TSS = TSS_{n+i} - TSS_n + TSS_w$$

$$= 10^{-3} \cdot [(V_a \cdot X_a + V_s \cdot X_r)_{n+i} - (V_a \cdot X_a + V_s \cdot X_r)_{n+i} \cdot Q_w \cdot X_r] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta COD_{re\ moved} &= (COD_{re\ moved})_{n+i} - (COD_{re\ moved})_n \\ &= 10^{-6} \cdot 24 \cdot i \cdot \sum_n^{n+i} Q_{in} \cdot \\ &\quad \left| \sum_n^{n+i} COD_{in} - \sum_n^{n+i} COD_{out} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

$$Y = \frac{\Delta TSS}{\Delta COD_{re\ moved}} \quad (4)$$

其中:Y 为 i 天内的污泥产率(SS/COD<sub>re moved</sub>),kg/kg; ΔTSS 为 i 天内产生的污泥总量(SS),kg; ΔCOD<sub>re moved</sub> 为 i 天内去除的 COD 总量(COD<sub>re moved</sub>),kg; TSS<sub>n</sub>, TSS<sub>n+i</sub>, TSS<sub>w</sub> 分别是第 n 天和第 n+i 天的污泥总量,以及 i 天内的排泥总量(SS),kg; V<sub>a</sub>, V<sub>s</sub> 分别是曝气池和二沉池的有效容积,L; X<sub>a</sub>, X<sub>r</sub> 为曝气池和回流污泥总悬浮物固体浓度(TSS),g/L; COD<sub>in</sub>, COD<sub>out</sub> 为进水和出水 COD

浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $Q_{\text{in}}$  为进水流量,  $\text{L/h}$ ;  $Q_{\text{w}}$  为排放剩余污泥流量,  $\text{L/d}$ ; 24 为时间转换系数,  $10^{-3}$ ,  $10^{-6}$  为质量转换系数.

2 结果与讨论

2.1 蠕虫生长

试验运行 3 周后蠕虫在系统中出现, 并且增长迅速. 整个试验过程中有 3 种蠕虫出现, 它们分别是红斑瓢体虫、吻盲虫和仙女虫, 但吻盲虫只是偶尔出现. 在第 1 阶段, 曝气池中的蠕虫总密度在第 84 天达到最高值 (302 条/  $\text{mg}$ ), 并且红斑瓢体虫 (第 109 天, 141 条/  $\text{mg}$ ) 和仙女虫 (第 84 天, 25 条/  $\text{mg}$ ) 也达到了各自的最高值. 由于第一阶段高蠕虫密度导致的低污泥产率, 因此第 2 阶段没有排放剩余污泥长达 37 d. 长时间没有排放剩余污泥的后果就是蠕虫总密度显著下降, 从第 119 天的 152 条/  $\text{mg}$  降到第 154 天的 48 条/  $\text{mg}$ . 然而, 整个试验过程中的最高平均蠕虫密度却出现在第 2 阶段, 这主要是因为第 1 阶段蠕虫高速生长的持续表现. 红斑瓢体虫和仙女虫在第 1 阶段的大小分别为 1 ~ 2 mm 和 2 ~ 6 mm,

体态强壮, 游动活泼, 但红斑瓢体虫在第 2 阶段却体态虚弱, 大小为 0.5 ~ 2 mm. 从第 2 阶段至第 3 阶段, 红斑瓢体虫的密度逐渐下降, 而仙女虫的密度却略有上升 (图 1), 并在第 193 天曝气池和回流污泥中的仙女虫密度第一次超过红斑瓢体虫密度. 此后, 红斑瓢体虫和仙女虫交替占据主导地位 (图 1), 这种现象不同于其他研究者观察到的结果 (红斑瓢体虫或仙女虫占据主导地位) [5, 8, 18]. 在最后 2 个阶段, 红斑瓢体虫和仙女虫的生长曲线呈现振荡现象. 在第 4 ~ 5 阶段, 红斑瓢体虫体态虚弱, 大小为 0.5 ~ 2 mm, 但仙女虫却体态强壮, 大小为 2 ~ 8 mm.

蠕虫几乎在整个试验过程中都出现, 并且连续保持高密度 (曝气池中蠕虫总密度  $\geq 30$  条/  $\text{mg}$ ) 生长高达 172 天 (从第 70 天至第 242 天) (图 1). 红斑瓢体虫和仙女虫交替占据主导地位, 但红斑瓢体虫占据主导地位的时间长于仙女虫. 文献 [18] 认为蠕虫大小与蠕虫种群数量有关. 然而, 本研究中蠕虫大小却主要取决于蠕虫的生长状态. 也就是说, 当蠕虫生长处于同一阶段时, 不论蠕虫数量多少, 但蠕虫大小却几乎不变.

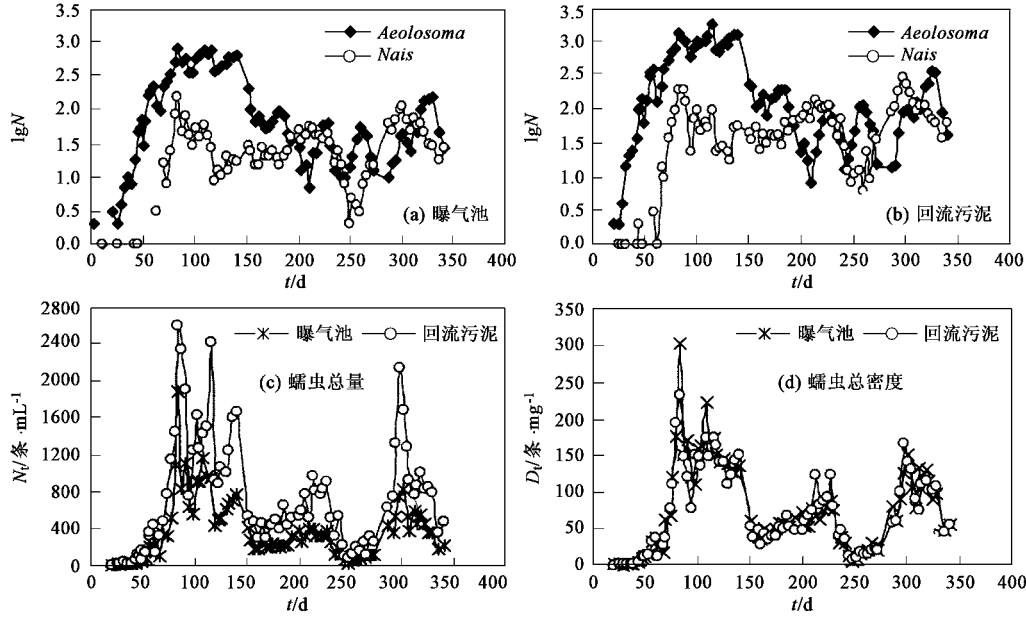


图 1 活性污泥法中的蠕虫生长状况  
Fig.1 The profiles of worm growth in the CAS reactor

2.2 污泥产率和污泥容积指数 (Sludge Volume Index, SVI)

5 个不同阶段的平均污泥产率为  $0.03 \pm 0.40 \text{ kg/kg}$ , 远低于常规活性污泥法的污泥产率 (TSS/  $\text{BOD}_5$ )  $0.7 \sim 1.0 \text{ kg/kg}$  [22]. 尽管第 2 阶段的平均蠕

虫密度最大, 但该阶段的污泥产率却高于第 1 阶段的污泥产率. 这可能是第 2 阶段的蠕虫生长处于下降阶段. 随着蠕虫密度的下降, 第 3 阶段的污泥产率增至  $0.40 \text{ kg/kg}$ . 有时蠕虫爆发会导致污泥产率为 0, 甚至使活性污泥处于负增长状态 (图 2). 高蠕

虫总密度(>100 条/ mg)下的污泥产率是低蠕虫总密度(<50 条/ mg)下污泥产率的一半,并且仙女虫比红斑瓢体虫具有更大的污泥减量能力.例如,仙女虫和红斑瓢体虫占主导地位时的污泥产率分别为 0.19 kg/ kg 和 0.13 kg/ kg(表 2).值得注意的是第 5 阶段的平均污泥产率低至 0.03 kg/ kg.显微观察表明水虱(*Daphnia*)在该阶段曾大量出现.例如,曝气池中水虱从第 273 天的 4 条/ mL 迅速增加到第 312

天的 141 条/ mL.由于水虱可以吞食污泥,所以,水虱和蠕虫的协同作用导致了第 5 阶段的低污泥产率.统计分析结果表明,水虱生长与污泥产率显著线性相关(双尾置信水平为 0.01 时 Pearson 相关系数为 -0.730).水虱生长能显著降低污泥产率,但水虱的爆发却严重影响出水水质.然而,目前并不清楚水虱在活性污泥工艺中出现和爆发的原因.

在第 1 阶段,随着蠕虫的出现和增长,污泥容积

表 2 不同阶段曝气池中蠕虫密度、污泥产率和污泥容积指数(均值±标准偏差)  
Table 2 Results of worm density, sludge yield and sludge volume index (SVI) in different stages

| 阶 段               | 污泥产率<br>/ kg·kg <sup>-1</sup> | 污泥容积<br>指数/ mL·g <sup>-1</sup> | 蠕虫总密度/ 条·mg <sup>-1</sup> |        | <i>Aeoloso ma</i> 密度/ 条·mg <sup>-1</sup> |       | <i>Nais</i> 密度/ 条·mg <sup>-1</sup> |      |
|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--------|------------------------------------------|-------|------------------------------------|------|
|                   |                               |                                | 曝气池                       | 回流污泥   | 曝气池                                      | 回流污泥  | 曝气池                                | 回流污泥 |
| I (第 0~116 天)     | 0.13±0.16                     | 69±29                          | 71±83                     | 64±73  | 43±47                                    | 40±43 | 4±6                                | 3±5  |
| II (第 117~154 天)  | 0.20±0.28                     | 43±6                           | 120±38                    | 118±44 | 95±41                                    | 92±43 | 4±1                                | 4±1  |
| III (第 155~200 天) | 0.40±0.33                     | 64±11                          | 52±11                     | 46±10  | 15±6                                     | 13±6  | 5±2                                | 5±1  |
| IV (第 201~273 天)  | 0.21±0.17                     | 65±20                          | 42±27                     | 50±38  | 6±4                                      | 6±4   | 5±4                                | 6±5  |
| V (第 274~341 天)   | 0.02±0.15                     | 41±5                           | 98±30                     | 98±35  | 14±13                                    | 15±15 | 12±4                               | 12±5 |

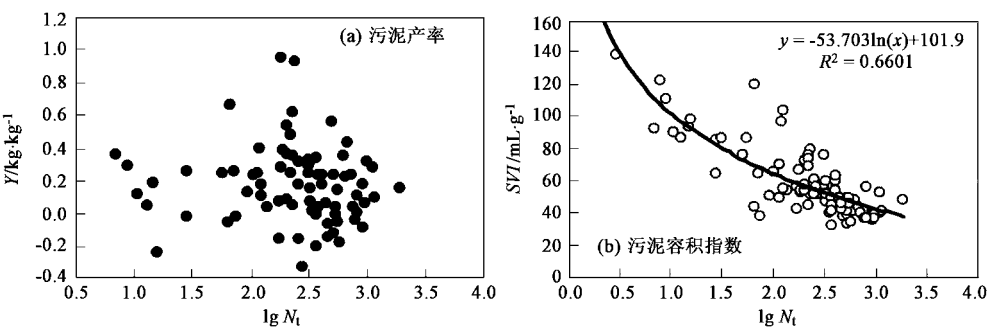


图 2 污泥产率和污泥容积指数与蠕虫密度的相互关系

Fig. 2 Relationships between sludge yield/ SVI and worm density in aeration tank

指数迅速下降,并在随后的阶段保持稳定(少数几天污泥发生膨胀除外)见图 2.所有 5 个阶段的平均污泥容积指数都小于 70 mL/ g(表 2),并且蠕虫生长与污泥容积指数显著线性相关(表 3).本研究结果清楚地表明蠕虫的存在和生长不但能减少污泥产率,而且能够提高污泥的沉降性能,这个结果与其他的 研究结果相同[5, 8, 14,15, 18].

2.3 蠕虫生长对出水水质的影响

2.3.1 COD 和 SS 去除

不同阶段平均蠕虫总密度的高低依次是第 2、第 5、第 1、第 3 和第 4 阶段,而平均总 COD 去除率的高低依次是第 3、第 1、第 4、第 5 和第 2 阶段,并且第 3 和第 4 阶段的平均 SS 去除率高于其他阶段.蠕虫密度越高,出水水质越差(表 4 和图 3).仙女虫占主导时的出水水质劣于红斑瓢体虫占优势时的出水

表 3 曝气池混合液中蠕虫数量(条/ mL)与污泥产率、污泥容积指数之间的相关系数

Table 3 Correlations among worm number in aeration tank, sludge yield and SVI

| 指 标                  | <i>Aeoloso ma</i>   | <i>Nais</i>         | 污泥产率                 | 污泥容积指数               |
|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Pearson 相关系数         |                     |                     |                      |                      |
| 蠕虫总量                 | 0.819 <sup>2)</sup> | 0.784 <sup>2)</sup> | -0.218               | -0.581 <sup>2)</sup> |
| <i>Aeoloso ma</i>    |                     | 0.285 <sup>2)</sup> | -0.058               | -0.444 <sup>2)</sup> |
| <i>Nais</i>          |                     |                     | -0.263 <sup>1)</sup> | -0.478 <sup>2)</sup> |
| 污泥产率                 |                     |                     |                      | 0.452 <sup>2)</sup>  |
| Spearman's rank 相关系数 |                     |                     |                      |                      |
| 蠕虫总量                 | 0.688 <sup>2)</sup> | 0.809 <sup>2)</sup> | -0.313 <sup>1)</sup> | -0.761 <sup>2)</sup> |
| <i>Aeoloso ma</i>    |                     | 0.235 <sup>1)</sup> | -0.089               | -0.590 <sup>2)</sup> |
| <i>Nais</i>          |                     |                     | -0.324 <sup>2)</sup> | -0.542 <sup>2)</sup> |
| 污泥产率                 |                     |                     |                      | 0.508 <sup>2)</sup>  |

1) 双尾置信水平为 0.05 时显著相关. 2) 双尾置信水平为 0.01 时显著相关.

水质(表 5). 统计分析结果也清楚地表明蠕虫生长对活性污泥法的出水水质具有显著的影响(表 6). 蠕虫爆发时出水变得浑浊, 这种现象与其他研究者观察到的现象一致<sup>[4, 8, 15]</sup>. 这可能是由于蠕虫的捕食, 部分污泥颗粒分解为小颗粒或悬浮固体, 从而导致出水悬浮物的增加. 此外, 水虱生长和爆发对出水水质的影响也不应忽视, 例如, 第 312 天的出水 COD 和 COD 去除率分别升高到 59 mg/L 和降低到 74 %, 曝气池中出现大量的泡沫, 出水浑浊.

2.3.2 营养物去除

本研究中, 无论进水和各个阶段的蠕虫生长状况如何变化, 但活性污泥法的硝化效果都非常好. 偶

尔几次出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度高于 1 mg/L(第 4 天、第 50 天和第 102 天), 整个试验过程中的出水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  浓度低( $<0.50 \text{ mg/L}$ ), 稳定, 并且所有阶段的平均  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  去除率均高于 99 % (表 4). 进水平均  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度都很低, 而出水平均  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度为 29 ~ 35 mg/L, 并且出水  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  浓度几乎为 0. 此外, 进、出水总无机氮的变化很小. 所有这些都意味着  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  被有效地硝化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 并证实了蠕虫生长既不影响硝化过程<sup>[5, 8, 13, 15, 18]</sup>, 也不会导致出水总无机氮的显著增加. 开始 2 个阶段的出水平均  $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$  浓度(2.10 mg/L 和 2.67 mg/L)

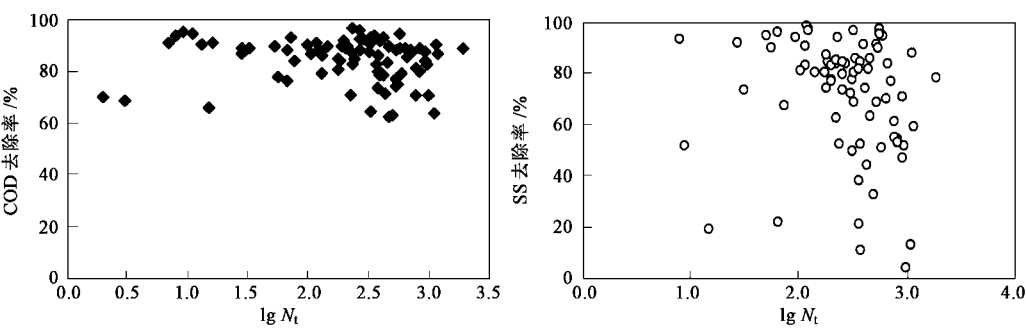


图 3 COD 去除率和 SS 去除率与蠕虫总密度(曝气池)的相互关系

Fig. 3 Relationships between COD removal/SS removal and worm density in aeration tank

表 4 不同阶段蠕虫生长对出水水质的影响(均值±标准偏差)

Table 4 Impacts of worm growth on effluent quality at different stages

| 指 标                                                  | I<br>(第 0 ~ 116 天) | II<br>(第 117 ~ 154 天) | III<br>(第 155 ~ 200 天) | IV<br>(第 201 ~ 273 天) | V<br>(第 274 ~ 341 天) |
|------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|
| 蠕虫总密度 <sup>1)</sup> /条·mg <sup>-1</sup>              | 71 ±83             | 120 ±38               | 52 ±11                 | 42 ±27                | 98 ±30               |
| SS 出水/ mg·L <sup>-1</sup>                            | 35 ±20             | 35 ±16                | 31 ±19                 | 25 ±19                | 32 ±10               |
| SS 去除率/ %                                            | 69 ±28             | 69 ±20                | 77 ±10                 | 76 ±24                | 64 ±22               |
| 总 COD 出水/ mg·L <sup>-1</sup>                         | 44 ±18             | 40 ±12                | 30 ±6                  | 52 ±18                | 49 ±12               |
| 总 COD 去除率/ %                                         | 86 ±9              | 81 ±11                | 88 ±4                  | 84 ±7                 | 81 ±8                |
| 溶解性 COD 出水/ mg·L <sup>-1</sup>                       |                    | 43 ±16                | 31 ±5                  | 50 ±13                | 31 ±3                |
| 溶解性 COD 去除率/ %                                       |                    | 70 ±5                 | 60 ±1                  | 59 ±10                | 62 ±5                |
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 出水/ mg·L <sup>-1</sup>    | 0.39 ±1.08         | 0.07 ±0.04            | 0.05 ±0.02             | 0.08 ±0.07            | 0.09 ±0.07           |
| $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率/ %                    | 99.08 ±2.37        | 99.60 ±0.50           | 99.88 ±0.06            | 99.78 ±0.16           | 99.48 ±1.47          |
| $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进水/ mg·L <sup>-1</sup>    | 0.09 ±0.09         | 0.09 ±0.14            | 0.22 ±0.30             | 0.10 ±0.21            | 0.03 ±0.04           |
| $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 出水/ mg·L <sup>-1</sup>    | 35 ±13             | 38 ±7                 | 31 ±8                  | 31 ±11                | 29 ±10               |
| $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 进水/ mg·L <sup>-1</sup>    | 0.35 ±0.93         | 1.66 ±1.63            | 0.02 ±0.04             | 0.05 ±0.23            | 0.00                 |
| $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 出水/ mg·L <sup>-1</sup>    | 0.06 ±0.24         | 0.00                  | 0.00                   | 0.04 ±0.14            | 0.00                 |
| 总无机氮 <sup>2)</sup> 进水/ mg·L <sup>-1</sup>            | 40 ±14             | 32 ±15                | 37 ±9                  | 38 ±12                | 30 ±13               |
| 总无机氮出水/ mg·L <sup>-1</sup>                           | 33 ±15             | 38 ±7                 | 31 ±8                  | 31 ±11                | 29 ±10               |
| $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 进水/ mg·L <sup>-1</sup> | 3.35 ±1.30         | 2.85 ±1.19            | 5.71 ±3.27             | 4.67 ±2.01            | 2.80 ±2.09           |
| $\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$ 出水/ mg·L <sup>-1</sup> | 2.10 ±1.00         | 2.67 ±0.75            | 5.84 ±3.03             | 5.85 ±1.93            | 3.11 ±1.98           |

1) 曝气池中的蠕虫总密度; 2) 总无机氮 =  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  +  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  +  $\text{NO}_2^- - \text{N}$

表 5 不同蠕虫占优势时 COD, SS, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 的变化情况 (均值 ± 标准偏差)

Table 5 Changes of COD, SS, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P with different dominant type of worms

| 优势蠕虫                                                          | COD    | 出水 COD               | SS 去除率  | 出水 SS                | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P/ mg·L <sup>-1</sup> |             |
|---------------------------------------------------------------|--------|----------------------|---------|----------------------|---------------------------------|------------------------------------------------------|-------------|
|                                                               | 去除率/ % | / mg·L <sup>-1</sup> | / %     | / mg·L <sup>-1</sup> | 去除率/ %                          | 进水                                                   | 出水          |
| <i>Aeolosoma</i> ( 第 21 ~ 189 天,第 245 ~ 270 天, 第 319 ~ 336 天) | 86 ± 8 | 43 ± 16              | 71 ± 24 | 31 ± 19              | 99.50 ± 1.50                    | 3.66 ± 2.05                                          | 3.27 ± 2.09 |
| <i>Nais</i> ( 第 193 ~ 242 天,第 273 ~ 315 天)                    | 83 ± 7 | 53 ± 15              | 71 ± 19 | 33 ± 15              | 99.77 ± 0.28                    | 4.09 ± 2.56                                          | 5.22 ± 2.71 |

低于进水(3.35 mg/L 和 2.85 mg/L),但在后面 3 个阶段(5.84 mg/L, 5.85 mg/L 和 3.64 mg/L)高于进水(5.71 mg/L, 4.67 mg/L 和 2.80 mg/L)(表 4). 红斑瓢体虫占优势时蠕虫生长不会导致出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度的增加,但仙女虫占主导时蠕虫生长却

会导致出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度的增加(表 5). 统计分析也表明,仙女虫生长对出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度有影响(表 6). 但与文献[15]的研究结果不同,本研究中出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度的增加并不显著.

2.4 蠕虫生长的影响因素

表 6 曝气池混合液中蠕虫数量(条/mL)与出水水质间的相关系数

Table 6 Correlations between worm density in aeration tank and effluent quality

| 指 标                             | <i>Aeolosoma</i>    | <i>Nais</i>         | COD                   | COD 去除率               | SS                    | SS 去除率                | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> -P |
|---------------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Pearson 相关系数                    |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 |                                 |                                  |
| 蠕虫总量                            | 0.819 <sup>2)</sup> | 0.784 <sup>2)</sup> | 0.372 <sup>1)</sup>   | - 0.161               | 0.395 <sup>2)</sup>   | - 0.269 <sup>1)</sup> | - 0.061                         | 0.406 <sup>2)</sup>             | - 0.020                          |
| <i>Aeolosoma</i>                |                     | 0.285 <sup>2)</sup> | - 0.245 <sup>2)</sup> | - 0.119               | 0.340 <sup>2)</sup>   | - 0.223               | - 0.006                         | 0.437 <sup>2)</sup>             | - 0.201                          |
| <i>Nais</i>                     |                     |                     | 0.362 <sup>2)</sup>   | - 0.167               | 0.280 <sup>2)</sup>   | - 0.220               | 0.063                           | 0.203                           | 0.191                            |
| COD                             |                     |                     |                       | - 0.521 <sup>2)</sup> | 0.345 <sup>2)</sup>   | - 0.369 <sup>2)</sup> | 0.084                           | 0.428 <sup>2)</sup>             | 0.094                            |
| COD 去除率                         |                     |                     |                       |                       | - 0.234 <sup>2)</sup> | 0.525 <sup>2)</sup>   | - 0.026                         | - 0.204                         | - 0.027                          |
| SS                              |                     |                     |                       |                       |                       | - 0.681 <sup>2)</sup> | 0.189                           | 0.331 <sup>2)</sup>             | - 0.032                          |
| SS 去除率                          |                     |                     |                       |                       |                       |                       | 0.019                           | - 0.243 <sup>1)</sup>           | - 0.048                          |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 | - 0.081                         | - 0.107                          |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 |                                 | 0.290 <sup>2)</sup>              |
| Spearman's rank 相关系数            |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 |                                 |                                  |
| 蠕虫总量                            | 0.688 <sup>2)</sup> | 0.809 <sup>2)</sup> | 0.413 <sup>2)</sup>   | - 0.230 <sup>1)</sup> | 0.441 <sup>2)</sup>   | - 0.316 <sup>2)</sup> | 0.160                           | 0.451 <sup>2)</sup>             | 0.178                            |
| <i>Aeolosoma</i>                |                     | 0.235 <sup>1)</sup> | 0.125                 | - 0.039               | 0.286 <sup>1)</sup>   | - 0.187               | 0.194                           | 0.328 <sup>2)</sup>             | - 0.018                          |
| <i>Nais</i>                     |                     |                     | 0.435 <sup>2)</sup>   | - 0.291 <sup>2)</sup> | 0.414 <sup>2)</sup>   | - 0.290 <sup>1)</sup> | 0.102                           | 0.295 <sup>2)</sup>             | 0.347 <sup>2)</sup>              |
| COD                             |                     |                     |                       | - 0.527 <sup>2)</sup> | 0.332 <sup>2)</sup>   | - 0.320 <sup>2)</sup> | 0.258 <sup>1)</sup>             | 0.364 <sup>2)</sup>             | 0.195                            |
| COD 去除率                         |                     |                     |                       |                       | - 0.223               | 0.443 <sup>2)</sup>   | - 0.181                         | - 0.189                         | - 0.177                          |
| SS                              |                     |                     |                       |                       |                       | - 0.759 <sup>2)</sup> | 0.125                           | 0.313 <sup>2)</sup>             | 0.030                            |
| SS 去除率                          |                     |                     |                       |                       |                       |                       | - 0.118                         | - 0.285 <sup>1)</sup>           | - 0.070                          |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 | 0.239 <sup>1)</sup>             | 0.142                            |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N |                     |                     |                       |                       |                       |                       |                                 |                                 | 0.366 <sup>2)</sup>              |

1) 双尾置信水平为 0.05 时显著相关. 2) 双尾置信水平为 0.01 时显著相关

本研究考察了 8 个操作参数对蠕虫生长的影响, 它们分别是温度、pH、溶解氧(DO)、水力停留时间(HRT)、污泥龄(SRT)、污泥负荷(F/M)、污泥浓度(TSS)和污泥回流比(recycle ratio). 统计分析结果表明, 只有污泥龄一个操作参数对 2 种蠕虫的生长没有影响, 其中 5 个操作参数(温度、水力停留时间、污泥浓度、污泥回流比和 pH)与蠕虫总量显著相关(表 7). 虽然红斑瓢体虫和仙女虫均属于游离型蠕虫,

但由于它们的个体大小不同, 影响它们生长的操作因素也有所不同. 统计分析结果表明(表 7), 温度、pH 和水力停留时间显著影响红斑瓢体虫的生长; 而仙女虫的生长则受到水力停留时间、温度、溶解氧、污泥负荷、污泥浓度和污泥回流比的显著影响. 温度和水力停留时间均为影响红斑瓢体虫和仙女虫的重要因素. 因此, 通过控制和改变不同的操作参数有可能控制不同种类蠕虫的长期稳定生长.

表 7 曝气池混合液中蠕虫数量(条/ mL)与不同操作参数的相关系数

Table 7 Correlations of worm density in aeration tank and operation parameters

| 指 标                  | <i>Aeolosoma</i>     | <i>Nais</i>          | TSS                  | HRT                  | SRT                  | F/ M                   | 回流比                    | 温度                   | pH                     | 溶解氧                    |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|------------------------|
| Pearson 相关系数         |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      |                        |                        |
| 蠕虫总量                 | 0. 819 <sup>2)</sup> | 0. 784 <sup>2)</sup> | 0. 246 <sup>1)</sup> | 0. 347 <sup>2)</sup> | 0. 111               | - 0. 201               | - 0. 234 <sup>1)</sup> | 0. 480 <sup>2)</sup> | - 0. 212 <sup>1)</sup> | 0. 038                 |
| <i>Aeolosoma</i>     |                      | 0. 285 <sup>2)</sup> | 0. 194               | 0. 253 <sup>1)</sup> | 0. 049               | - 0. 121               | - 0. 123               | 0. 551 <sup>2)</sup> | - 0. 455 <sup>2)</sup> | - 0. 145               |
| <i>Nais</i>          |                      |                      | 0. 212 <sup>1)</sup> | 0. 306 <sup>2)</sup> | 0. 137               | - 0. 222 <sup>1)</sup> | - 0. 226 <sup>1)</sup> | 0. 193               | 0. 052                 | 0. 263 <sup>1)</sup>   |
| TSS                  |                      |                      |                      | - 0. 018             | 0. 356 <sup>2)</sup> | - 0. 165               | 0. 076                 | 0. 087               | - 0. 340 <sup>2)</sup> | - 0. 256 <sup>1)</sup> |
| HRT                  |                      |                      |                      |                      | 0. 134               | - 0. 518 <sup>2)</sup> | 0. 329 <sup>2)</sup>   | 0. 266 <sup>1)</sup> | 0. 121                 | 0. 098                 |
| SRT                  |                      |                      |                      |                      |                      | - 0. 117               | - 0. 066               | 0. 013               | 0. 080                 | - 0. 064               |
| F/ M                 |                      |                      |                      |                      |                      |                        | - 0. 111               | - 0. 188             | 0. 210 <sup>1)</sup>   | - 0. 172               |
| 回流比                  |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        | - 0. 200             | 0. 081                 | - 0. 022               |
| 温度                   |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      | - 0. 421 <sup>2)</sup> | - 0. 178               |
| pH                   |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      |                        | 0. 101                 |
| Spearman's rank 相关系数 |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      |                        |                        |
| 蠕虫总量                 | 0. 688 <sup>2)</sup> | 0. 809 <sup>2)</sup> | 0. 088               | 0. 409 <sup>2)</sup> | 0. 187               | - 0. 185               | - 0. 220 <sup>1)</sup> | 0. 536 <sup>2)</sup> | - 0. 127               | 0. 088                 |
| <i>Aeolosoma</i>     |                      | 0. 235 <sup>1)</sup> | - 0. 004             | 0. 100               | 0. 192               | - 0. 002               | - 0. 199               | 0. 572 <sup>2)</sup> | - 0. 465 <sup>2)</sup> | - 0. 185               |
| <i>Nais</i>          |                      |                      | 0. 064               | 0. 367 <sup>2)</sup> | 0. 051               | - 0. 248 <sup>1)</sup> | - 0. 231 <sup>1)</sup> | 0. 336 <sup>2)</sup> | 0. 062                 | 0. 292 <sup>2)</sup>   |
| TSS                  |                      |                      |                      | - 0. 056             | 0. 426 <sup>2)</sup> | - 0. 077               | 0. 143                 | 0. 105               | - 0. 321 <sup>2)</sup> | - 0. 259 <sup>1)</sup> |
| HRT                  |                      |                      |                      |                      | 0. 071               | - 0. 493 <sup>2)</sup> | 0. 382 <sup>2)</sup>   | 0. 251 <sup>1)</sup> | 0. 195                 | 0. 095                 |
| SRT                  |                      |                      |                      |                      |                      | - 0. 012               | 0. 068                 | - 0. 197             | 0. 285                 | 0. 005                 |
| F/ M                 |                      |                      |                      |                      |                      |                        | - 0. 100               | - 0. 166             | 0. 076                 | - 0. 256 <sup>1)</sup> |
| 回流比                  |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        | 0. 013               | 0. 074                 | - 0. 181               |
| 温度                   |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      | - 0. 428 <sup>2)</sup> | - 0. 197               |
| pH                   |                      |                      |                      |                      |                      |                        |                        |                      |                        | 0. 182                 |

1) 双尾置信水平为 0. 05 时显著相关 2) 双尾置信水平为 0. 01 时显著相关

3 结 论

(1)除了初始的 20 d 之外,整个试验过程中均有蠕虫出现,分别是红斑瓢体虫、吻盲虫和仙女虫,但吻盲虫只是偶尔存在.蠕虫连续保持高密度生长(曝气池 VSS 中蠕虫总密度大于 30 条/ mg)长达 172 d.红斑瓢体虫和仙女虫交替占据优势地位,但红斑瓢体虫占据主导地位的时间长于仙女虫.

(2)高密度下的蠕虫生长不仅能显著降低污泥产率,而且能明显提高污泥的沉降性能.蠕虫总密度大于 100 条/ mg 时的平均污泥产率和污泥容积指数(0. 10 kg/ kg 和 41 mL/ g)远小于蠕虫总密度小于 50 条/ mg 时的平均污泥产率和污泥容积指数(0. 22 kg/ kg 和 77 mL/ g).仙女虫比红斑瓢体虫具有更大的污泥减量能力.

(3)蠕虫生长对出水水质有影响.蠕虫密度越高,出水水质越差.仙女虫对出水水质的影响大于红斑瓢体虫.但蠕虫生长既不影响硝化过程,也不会导致出水总无机氮的增加.当仙女虫占优势时,蠕虫生长会导致出水 PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 浓度的升高,但不严重.

(4)考察了 8 个操作参数对蠕虫生长的影响.统计分析表明,只有污泥龄对 2 种蠕虫的生长没有影响.影响红斑瓢体虫生长和仙女虫生长的因素不同,

但温度和水力停留时间均能显著影响它们的生长.

参考文献:

[ 1 ] Rocher M, G Goma, A P Begue, L Louvel, J L Rols. Towards a reduction in excess sludge production in activated sludge processes: biomass physicochemical treatment and biodegradation [ J ]. Appl. Microbiol. Biotechnol., 1999, **51**: 883 ~ 890.

[ 2 ] Spellman F R. Wastewater biosolids to compost [ M ]. Lancaster, Pennsylvania, USA: Technomic Publishing Company, Inc., 1997. 223 ~ 235.

[ 3 ] Low E W, H A Chase. Reducing production of excess biomass during wastewater treatment [ J ]. Water Research, 1999, **33** (5): 1119 ~ 1132.

[ 4 ] Ratsak C H, S A L M Kooijman, B W Kooi. Modelling the growth of an oligochaete on activated sludge [ J ]. Water Research, 1993, **27**(5): 739 ~ 747.

[ 5 ] Ratsak C H. Grazer induced sludge reduction in wastewater treatment [ D ]. The Netherlands: Vrije University, 1994.

[ 6 ] Ratsak C H, B W Kooi, H W van Verseveld. Biomass reduction and mineralization increase due to the ciliate *Tetrahymena Pyriformis* grazing on the bacterium *Pseudomonas Fluorescens* [ J ]. Wat. Sci. Tech., 1994, **29**(7): 119 ~ 128.

[ 7 ] Ratsak C H, K A Maarsen, S A L M Kooiman. Effects of protozoa on carbon mineralization in activated sludge [ J ]. Water Research, 1996, **30**(1): 1 ~ 12.

[ 8 ] Ratsak C H. Effects of *Nais elinguis* on the performance of an activated sludge plant [ J ]. Hydrobiologia, 2001, **463**: 217 ~ 222.

[ 9 ] Lee N M, T Welander. Influence of predator in nitrification in

aerobic biofilm [ J ]. Wat . Sci . Tech . , 1994 , 29 ( 7 ) : 355 ~ 363 .

[ 10 ] Welander T , N M Lee . Minimization of sludge production in aerobic treatment by use of predators [ C ] . Brighton , UK : The Second International Symposium on Environmental Biotechnology , 4 ~ 6 July 1994 .

[ 11 ] Lee N M , T Welander . Use of protozoa and metazoa for decreasing sludge production in aerobic wastewater treatment [ J ] . Biotechnology Letters , 1996 , 18 ( 4 ) : 429 ~ 434 .

[ 12 ] Lee N M , T Welander . Reducing sludge production in aerobic wastewater treatment through manipulation of the ecosystem [ J ] . Water Research , 1996 , 30 ( 8 ) : 1781 ~ 1790 .

[ 13 ] Resink J H , R Corstanje , J H van der Pal . A new approach to sludge reduction by metazoa [ C ] . Munchen : The 10<sup>th</sup> European Sewage and Reuse Symposium , IFAT 1996 . 339 ~ 364 .

[ 14 ] Rensink J H , W H Rulkens . Using metazoa to reduce sludge production [ J ] . Wat . Sci . Tech . , 1997 , 36 ( 11 ) : 171 ~ 179 .

[ 15 ] Janssen P M J , W H Rulkens , J H Rensink , H F van der Poest . The potential for metazoa in biological wastewater treatment . WQI , 1998 , September/ October , 25 ~ 27 .

[ 16 ] Ghyyoot W . Membrane-assisted bioreactor for anaerobic sludge digestion and low sludge production in aerobic wastewater treatment [ D ] . Belgium : University Gent , 1998 .

[ 17 ] Ghyyoot W , W Verstraete . Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bioreactor [ J ] . Water Research , 2000 , 34 ( 1 ) : 205 ~ 215 .

[ 18 ] 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 ] Luxmy B S , T Kubo , K Yamamoto . Sludge reduction potential of metazoa in membrane bioreactors [ J ] . Wat . Sci . Tech . , 2001 , 44 ( 10 ) : 197 ~ 202 .

[ 20 ] Eikelboom D H , A R Borger , R T van Houten . Reductie zuiveringsslib door borstelwormen . Fase 1 : Laboratoriumonderzoek [ R ] . The Netherlands : TNO-rapport . 2001 .

[ 21 ] Eikelboom D H . Process control of activated sludge plants by microscopic investigation [ M ] . UK : IWA Publishing , 2000 . 85 ~ 102 .

[ 22 ] Metcalf & Eddy . Wastewater engineering : treatment , disposal and reuse [ M ] . McGraw- Hill , Inc . , 1991 . 529 ~ 604 .

2003 年环境科学技术类期刊总被引频次和影响因子排序表<sup>1)</sup>

| 代码   | 期刊名称                        | 总被引频次 | 学科内排名 | 影响因子   | 学科内排名 |
|------|-----------------------------|-------|-------|--------|-------|
| Z027 | J OF ENVIRONMENTAL SCIENCES | 59    | 30    | 0 .119 | 30    |
| Z549 | 安全与环境学报                     | 129   | 28    | 0 .675 | 7     |
| Z029 | 长江流域资源与环境                   | 336   | 18    | 0 .691 | 6     |
| Z024 | 城市环境与城市生态                   | 474   | 13    | 0 .557 | 10    |
| Z015 | 电镀与环保                       | 219   | 24    | 0 .187 | 28    |
| Z013 | 工业水处理                       | 788   | 6     | 0 .424 | 21    |
| Z032 | 工业用水与废水                     | 106   | 29    | 0 .190 | 27    |
| Z010 | 海洋环境科学                      | 315   | 20    | 0 .492 | 15    |
| Z009 | 化工环保                        | 384   | 15    | 0 .461 | 17    |
| Z017 | 环境保护科学                      | 137   | 27    | 0 .150 | 29    |
| Z005 | 环境工程                        | 459   | 14    | 0 .350 | 22    |
| Z004 | 环境科学                        | 1793  | 1     | 1 .167 | 2     |
| Z003 | 环境科学学报                      | 1310  | 2     | 0 .994 | 3     |
| Z002 | 环境科学研究                      | 675   | 7     | 0 .630 | 8     |
| Z025 | 环境科学与技术                     | 345   | 17    | 0 .487 | 16    |
| Z019 | 环境污染与防治                     | 482   | 12    | 0 .429 | 20    |
| Z021 | 环境污染治理技术与设备                 | 800   | 5     | 0 .512 | 12    |
| Z023 | 农村生态环境                      | 293   | 21    | 0 .525 | 11    |
| Z008 | 农业环境科学学报                    | 641   | 9     | 0 .500 | 13    |
| Z011 | 上海环境科学                      | 671   | 8     | 0 .441 | 18    |
| H784 | 生态环境                        | 334   | 19    | 0 .439 | 19    |
| Z016 | 水处理技术                       | 593   | 10    | 0 .576 | 9     |
| Z007 | 四川环境                        | 154   | 26    | 0 .248 | 25    |
| G129 | 中国安全科学学报                    | 202   | 25    | 0 .324 | 23    |
| Z030 | 中国环境监测                      | 238   | 23    | 0 .225 | 26    |
| Z001 | 中国环境科学                      | 1260  | 3     | 0 .793 | 5     |
| Z546 | 中国人口资源与环境                   | 284   | 22    | 0 .500 | 13    |
| Z026 | 重庆环境科学                      | 353   | 16    | 0 .309 | 24    |
| Z022 | 资源科学                        | 517   | 11    | 0 .876 | 4     |
| Z012 | 自然资源学报                      | 858   | 4     | 1 .596 | 1     |
|      | 平均值                         | 507   |       | 0 .529 |       |

1) 中国科学技术信息研究所 .中国科技期刊引证报告( 2004 年版) .北京 :科学技术文献出版社 , 2004-10( 统计源期刊为 1576 种) .