

# 利用红斑体虫减少剩余污泥产量的研究

梁 鹏, 黄 霞, 钱 易

(清华大学环境科学与工程系, 北京 100084)

**摘 要:** 在活性污泥反应器中引入红斑体虫以考察其生长条件和对剩余污泥的减量效果及对系统处理效果的影响。结果表明,  $SRT$  为 15~34 d 时对红斑体虫的长期生长没有影响; 进水  $COD$  负荷  $< 0.6 \text{ mg}/(\text{mgVSS} \cdot \text{d})$  时红斑体虫可大量出现。不同  $SRT$  和进水负荷条件下的污泥产率系数与反应器中的红斑体虫密度成负相关, 对剩余污泥的减量比例为 39%~58%。红斑体虫的存在有利于改善污泥的沉降性能, 且对  $COD$ 、氨氮、 $TP$  的去除效果影响不大。

**关键词:** 剩余污泥减量; 红斑体虫; 捕食

**中图分类号:** X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4602(2004)01 - 0013 - 05

## Use of *Aeolosoma hempfichicii* for Reducing Excess Sludge Yield

LIANG Peng, HUANG Xia, QIAN Yi

(Dept of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** *Aeolosoma hempfichicii* was added into activated sludge reactor, so as to investigate its growth condition and influence on the reduction of excess sludge and treatment effect of the system. The result showed that 15 ~ 34 d of  $SRT$  has no effect on long period growth of *Aeolosoma hempfichicii*; when influent  $COD$  loading rate is  $< 0.6 \text{ mg}/(\text{mgVSS} \cdot \text{d})$ , *Aeolosoma hempfichicii* appears in a large quantity. At different  $SRT$  and influent loading, sludge yield coefficient is in negative correlation with the density of *Aeolosoma hempfichicii*, and excess sludge is reduced in the proportion of 39% ~ 58%. Existence of *Aeolosoma hempfichicii* is beneficial to improving sludge settleability and has less influence on the removal of  $COD$ ,  $NH_3 - N$ , and  $TP$ .

**Keywords:** excess sludge reduction; *Aeolosoma hempfichicii*; predation

目前国内外对污泥减量技术的研究主要集中在三方面: 解偶联技术、促进污泥溶胞技术以及利用微型动物捕食污泥技术<sup>[1]</sup>。利用微型动物捕食污泥, 虽然污泥减量程度有限、减量稳定性有待加强, 但由于能耗低、不产生二次污染, 作为一种生态工程技术而备受关注<sup>[2]</sup>。现阶段国内外利用微型动物减量污泥的研究主要集中在寡毛纲环节动物如仙女虫、红斑体虫、颤蚓等体型较大的后生动物<sup>[3]</sup>。因红斑体虫在国内外污水处理厂中出现的频率较高、数量较大, 故以红斑体虫为研究对象进行了一系列试验。

## 1 试验装置与方法

### 1.1 试验装置和原水水质

试验装置如图 1 所示。

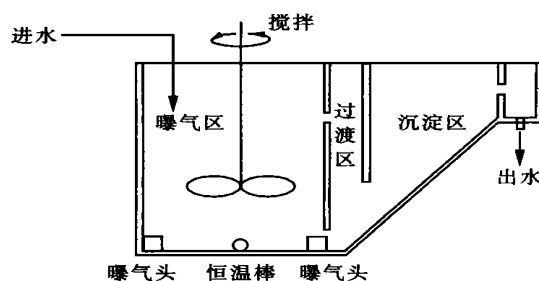


图 1 试验装置图

合建式曝气沉淀池分曝气区、过渡区和沉淀区三部分。曝气区体积为 20.4 L,利用砂头曝气,维持溶解氧量 > 2 mg/L,利用螺旋桨搅拌器混合和提升水流。反应器温度维持在 20~25 ℃。共建有 4 个同样的反应器,可以同时做 4 组平行试验。

原水采用清华大学 1# 宿舍的生活污水,由于其 COD 浓度仅为 180 mg/L 左右,故人为投加葡萄糖、淀粉、尿素及各种营养盐类而将 COD 浓度提高至 400 mg/L 左右。

1.2 运行方式

红斑体虫在活性污泥系统的曝气池中较为常见。根据已有文献报道<sup>[4]</sup>,影响红斑体虫在曝气池中出现的操作因素可能有两方面:一是污泥龄(SRT),较短的 SRT 不能有效地保持红斑体虫的存在;二是进水负荷,通常在负荷较低情况下容易出现原生动物和后生动物。因此试验分为两阶段:第一阶段主要是比较不同 SRT 对红斑体虫生长的影响;第二阶段主要是考察进水负荷对红斑体虫生长的影响。具体见表 1。

表 1 试验设计与操作条件

| 试验阶段 | 试验时间(d) | SRT(d) | VSS(mg/L) | 进水 COD 负荷<br>[mg/(mgVSS d)] | 进水流量(L/d) |
|------|---------|--------|-----------|-----------------------------|-----------|
| 一    | 50      | 34     | 2 252     | 0.266                       | 26        |
|      | 50      | 24     | 2 101     | 0.258                       | 26        |
|      | 20      | 15     | 1 510     | 0.332                       | 26        |
| 二    | 50      | 24     | 2 165     | 0.264                       | 26        |
|      | 20      | 24     | 2 101     | 0.473                       | 33~45     |

1.3 分析方法

COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、TP、SS、VSS 均按照国家标准方法测定,红斑体虫利用 MOTIC K-400PL 显微镜计数。

2 结果与分析

2.1 SRT 对红斑体虫生长的影响

在三个平行运行的反应器中投加相同污泥,同时接种等量的红斑体虫,比较不同 SRT 条件下红斑体虫的生长情况(见图 2)。

从图 2 可见,SRT 不同,红斑体虫的初期增长速率也不同,但最终虫密度接近,说明在 SRT = 15~34 d 的范围内,SRT 对红斑体虫的长期生长没有明显影响。

为比较红斑体虫初期增长速率的不同,将三个反应器前 5 天的数据按照 Malthus 指数模型拟合,得到不同 SRT 条件下的体虫初期表观增长

率(见表 2)。可以看出,SRT 越长,体虫初期表观增长率越大。但在表观增长率中,包含有 SRT 不同导致排泥量不同而产生的影响。

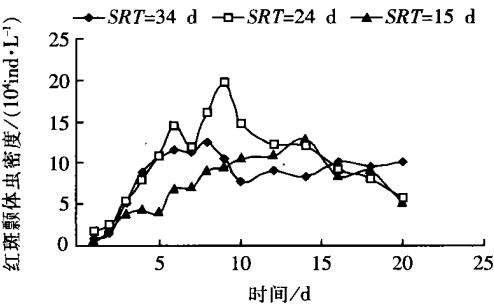


图 2 不同 SRT 条件下红斑体虫的生长情况

表 2 不同 SRT 条件下红斑体虫的两种增长率

| SRT(d) | 表观增长率<br>$R_M(d^{-1})$ | 净增长率<br>$r(d^{-1})$ |
|--------|------------------------|---------------------|
| 33     | 0.484                  | 0.502               |
| 24     | 0.428                  | 0.454               |
| 15     | 0.411                  | 0.453               |

从表 2 还可以看出,由于排泥使得反应器中红斑体虫的表观增长率  $R_M$  要低于净增长率  $r$ ,但在试验的 SRT 范围内差异较小。对于可使红斑体虫随排泥而被排出反应器的最大排泥量(最短 SRT),可通过以下计算得到:

假定红斑体虫的净增长率  $r$  为  $0.45 d^{-1}$ ,反应器体积为  $V$ ,每天排泥量为  $V_e$ ,在某一天的红斑体虫密度为  $N$ ,如果通过排泥  $V_e$  可以将每天增长的红斑体虫排出,则:

$$N(e^{0.45} - 1)V = V_e N e^{0.45} \tag{1}$$

得到  $V_e/V = 0.36$ 。

上述分析表明,当每天排泥占反应器体积的 36% 左右时,可将每天新增的红斑体虫排出;而当反应器的排泥量 > 36% 时,可能造成由于过量排泥使得虫体流失;当排泥量 < 36% 时,则可以保证红斑体虫的生长。因此可以将 36% 作为增长率为  $0.45 d^{-1}$  时的排泥上限,即当红斑体虫的净增长率为  $0.45 d^{-1}$  时, $SRT > 3 d$  方可使红斑体虫保持在反应器中,而这在活性污泥处理系统中是容易做到的。

2.2 进水负荷对红斑体虫生长的影响

关于进水负荷对红斑体虫生长的影响,一般认为在实际污水处理中,低负荷条件下出现红斑体虫等后生动物的可能性较大,例如:在  $F/M$  为  $0.05 \sim 0.1 mgBOD_5/(mgVSS \cdot d)$  条件下出现的红斑

体虫高达  $9.6 \times 10^5$  ind/L。但对于红斑点体虫生长所能耐受的最大负荷,尚没有明确的报道。为此,考察了红斑点体虫密度和进水负荷之间的关系(如图3所示)。

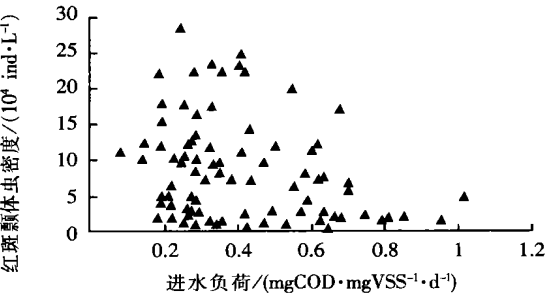


图3 红斑点体虫密度与进水负荷的关系

从图3可以看出,在进水负荷  $< 0.4$  mgCOD/(mgVSS·d)时,红斑点体虫的密度在  $0 \sim 25 \times 10^4$  ind/L之间变动,和进水负荷关系不大;当进水负荷提高到  $0.6$  mgCOD/(mgVSS·d)时,红斑点体虫出现的最大密度有所下降,但仍在  $0 \sim 15 \times 10^4$  ind/L之间变化;当进水负荷  $> 0.7$  mgCOD/(mgVSS·d)时,红斑点体虫能够出现的最大密度降至  $2 \times 10^4$  ind/L左右。因此可以认为,在进水负荷  $< 0.6$  mgCOD/(mgVSS·d)时,对红斑点体虫的出现没有大的影响,而当进水负荷  $> 0.7$  mgCOD/(mgVSS·d)后,可能会对红斑点体虫的出现造成影响。

2.3 污泥表观产率系数与红斑点体虫密度的关系

污泥表观产率系数按下式进行计算:

$$Y = \frac{V \frac{dX}{dt} + Q_w X_w + Q_e X_e}{Q(C_i - C_e)} \quad (2)$$

① 不同 SRT 条件下二者的关系

不同 SRT 条件下反应器中污泥表观产率系数和红斑点体虫密度的关系见图4。为了消除污泥浓度不同对红斑点体虫密度的影响,以下红斑点体虫密度用 ind/mgVSS 表示。

图4表明,总体上由于引入红斑点体虫,在三种 SRT 条件下污泥表观产率系数都与红斑点体虫密度呈负相关。已有报道,红斑点体虫密度  $> 50$  ind/mgVSS 时,开始产生污泥减量效果。笔者以此值为界限,分别计算了红斑点体虫密度  $< 50$  ind/mgVSS 时的污泥产率系数  $Y_{<50}$  和高于  $50$  ind/mgVSS 时的平均污泥产率系数  $Y_{>50}$ (见表3)。根据  $Y_{<50}$  和  $Y_{>50}$  的差值,算出相对的污泥减量比例为  $39\% \sim 58\%$ 。

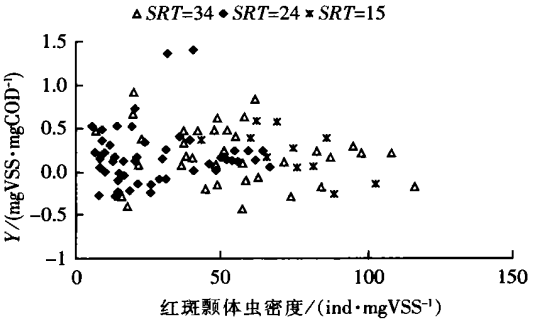


图4 不同 SRT 时 Y 与红斑点体虫密度的关系

表3 不同 SRT 条件下平均污泥产率系数 Y 的比较

| SRT<br>(d) | 污泥负荷<br>[mgCOD/(mgVSS·d)] | 表观产率系数<br>(mgVSS/mgCOD) |           |             |
|------------|---------------------------|-------------------------|-----------|-------------|
|            |                           | $Y_{<50}$               | $Y_{>50}$ | 减量比例<br>(%) |
| 34         | 0.266                     | 0.248                   | 0.113     | 54          |
| 24         | 0.258                     | 0.246                   | 0.150     | 39          |
| 15         | 0.332                     | 0.382                   | 0.160     | 58          |

② 不同进水负荷条件下二者的关系

在低进水负荷  $[0.264$  mgCOD/(mgVSS·d)] 和高进水负荷  $[0.473$  mgCOD/(mgVSS·d)] 条件下污泥表观产率系数与红斑点体虫密度的关系见图5。

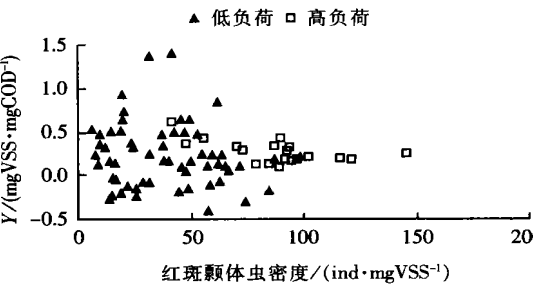


图5 不同进水负荷时 Y 与红斑点体虫密度的关系

通过污泥产率系数可以计算出污泥减量比例,具体计算公式如下:

$$E_r = (Y_{<50} - Y_{>50}) / Y_{<50} \quad (3)$$

$$E_a = (S_0 - S_e) Q (Y_{<50} - Y_{>50}) / V \quad (4)$$

式中

$E_r$  ——相对减量比例

$E_a$  ——绝对减量,mgVSS/L·d

$Y_{<50}$  ——红斑点体虫密度  $< 50$  ind/mg 污泥时系统表观产率系数,mgVSS/mgCOD

$Y_{>50}$  ——红斑点体虫密度  $> 50$  ind/mg 污泥时系统表观产率系数,mgVSS/

mgCOD

$S_0$  ——进水 COD 浓度,mg/L

$S_e$  ——出水 COD 浓度,mg/L

$V$  ——反应器体积,L

$Q$  ——反应器进水流量,L/d

不同进水负荷条件下系统的表观产率系数比较见表 4。

表 4 不同进水负荷条件下系统表观产率系数比较

| 进水负荷<br>[mgCOD/<br>(mgVSS·d)] | $Y_{<50}$<br>(mgVSS/<br>mgCOD) | $Y_{>50}$<br>(mgVSS/<br>mgCOD) | 相对减量<br>比例 (%) | VSS<br>(mg/L) | 减量绝对值<br>[mgVSS/<br>(L·d)] |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------|---------------|----------------------------|
| 0.264                         | 0.280                          | 0.099                          | 64             | 2 172         | 103.74                     |
| 0.473                         | 0.486                          | 0.270                          | 44             | 2 536         | 258.90                     |

从表 4 可以看出,不同进水负荷条件下随着红 斑 体 虫 密 度 的 增 加,系 统 表 观 产 率 系 数 降 低。随 着 处 理 系 统 进 水 负 荷 的 增 加,相 对 减 量 比 例 和 绝 对 减 量 值 变 化 趋 势 并 不 相 同。虽 然 进 水 负 荷 大 时 相 对 减 量 比 例 并 不 高,但 由 于 去 除 负 荷 绝 对 值 高,导 致 单 位 时 间、单 位 体 积 污 泥 减 量 的 绝 对 值 反 而 高。所 以 在 衡 量 污 泥 减 量 效 果 时,有 必 要 对 减 量 的 相 对 值 和 绝 对 值 都 进 行 比 较。

2.4 红 斑 体 虫 对 系 统 处 理 效 果 的 影 响

红 斑 体 虫 对 污 泥 的 捕 食 可 降 低 系 统 污 泥 的 产 量,但 也 可 能 对 系 统 处 理 效 果 产 生 影 响,因 此 有 必 要 对 红 斑 体 虫 存 在 条 件 下 系 统 处 理 效 果 的 变 化 进 行 考 察,这 里 主 要 考 察 了 COD、 $NH_4^+ - N$ 、TP 去 除 率 以 及 SVI 的 变 化。

① COD

在 试 验 过 程 中,每 隔 两 天 测 定 反 应 器 进、出 水 COD,COD 去 除 率 与 反 应 器 中 红 斑 体 虫 密 度 的 关 系 见 图 6。

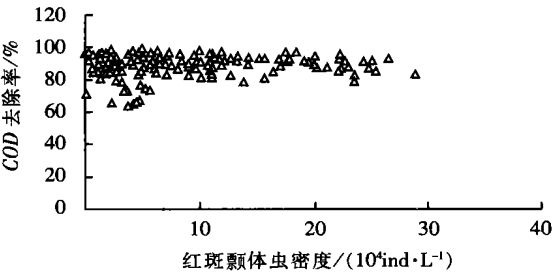


图 6 COD 去除率和红 斑 体 虫 密 度 的 关 系

从 图 6 可 以 看 出,红 斑 体 虫 在 反 应 器 中 的 数 量 多 少 并 不 影 响 反 应 器 对 COD 的 处 理 效 果。一 般

COD 去 除 率 能 达 到 85 % 以 上,极 个 别 情 况 较 低 (60 %),但 和 红 斑 体 虫 密 度 没 有 关 联。

②  $NH_4^+ - N$

有 学 者 认 为 红 斑 体 虫 在 反 应 器 中 存 在 时 可 能 会 对 硝 化 菌 群 产 生 摄 食 作 用,因 此 可 能 导 致 系 统 对 氨 氮 去 除 效 率 的 降 低。在 整 个 试 验 过 程 中 每 四 天 测 量 一 次 进、出 水 氨 氮 浓 度,反 应 器 中 氨 氮 去 除 率 和 红 斑 体 虫 密 度 的 关 系 见 图 7。

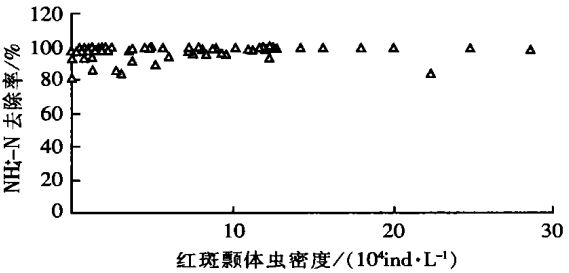


图 7 氨 氮 去 除 率 和 红 斑 体 虫 密 度 的 关 系

从 图 7 可 以 看 出,红 斑 体 虫 的 生 长 对 反 应 器 中 氨 氮 的 去 除 并 没 有 直 接 影 响,反 应 器 对 氨 氮 的 去 除 效 率 较 高 (大 多 在 98 % 以 上),而 其 中 去 除 率 较 低 的 几 次 主 要 是 由 于 反 应 器 温 度 低 (16 ~ 18 °C),从 而 降 低 了 硝 化 菌 活 性,使 氨 氮 去 除 率 下 降。

③ TP

在 普 通 活 性 污 泥 系 统 中 磷 主 要 存 在 于 VSS 中,对 其 去 除 主 要 是 通 过 排 出 剩 余 污 泥 来 实 现 的。在 引 入 红 斑 体 虫 以 后,由 于 红 斑 体 虫 的 摄 食,可 能 会 使 系 统 出 水 磷 浓 度 增 加。在 整 个 试 验 过 程 中,每 四 天 监 测 一 次 反 应 器 进、出 水 中 的 TP 浓 度,出 水 TP 与 进 水 TP 的 比 值 和 红 斑 体 虫 密 度 的 关 系 见 图 8。

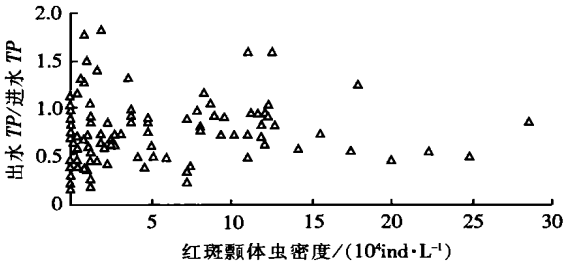


图 8 出 水 TP/进 水 TP 值 和 红 斑 体 虫 密 度 的 关 系

从 图 8 可 以 看 出,红 斑 体 虫 密 度 的 改 变 对 反 应 器 进、出 水 TP 的 比 值 没 有 产 生 明 显 影 响。

④ SVI

为研究由于红斑瓢虫对污泥的摄食,使得污泥减量的同时对污泥的沉降性能是否有所改善,在整个试验过程中每两天测量一次曝气池中污泥的沉降比,同时测量该污泥的 VSS,通过计算得到 SVI 值和红斑瓢虫密度的关系(见图 9)。

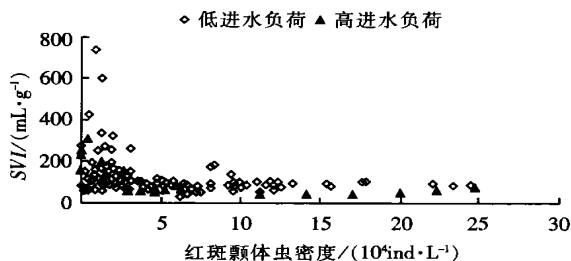


图9 SVI 值和红斑瓢虫密度的关系

如图 9 所示,在高进水负荷 $[0.47 \text{ mgCOD}/(\text{mgVSS} \cdot \text{d})]$ 与低进水负荷 $[0.26 \text{ mgCOD}/(\text{mgVSS} \cdot \text{d})]$ 条件下,红斑瓢虫的存在均能够降低污泥的 SVI 值。当红斑瓢虫在反应器中的密度 $>5 \times 10^4 \text{ ind/L}$ 时,SVI 值 $<100 \text{ mL/g}$ ,沉降性能良好。而红斑瓢虫密度低或不存在时,污泥的 SVI 值则不容易较长时间保持在 $100 \text{ mL/g}$ 以下,容易受到冲击负荷的影响而产生膨胀。一般来讲,红斑瓢虫对污泥的摄食是有选择性的,对有机物(特别是蛋白质)含量高的污泥,其摄食和生长都要高一些。所以,红斑瓢虫的存在一方面可对污泥进行减量,另一方面由于对污泥絮体外部的摄食,使得污泥中有机物含量降低,提高了污泥的可沉降性。

### 3 结论

① SRT 为 15~34 d 时对红斑瓢虫的长期

生长没有影响;进水负荷 $<0.6 \text{ mgCOD}/(\text{mgVSS} \cdot \text{d})$ 时红斑瓢虫可大量出现。

② 不同 SRT 条件下红斑瓢虫均可对污泥进行减量,由污泥表观产率系数计算得到的相对减量值为 39%~58%。

③ 不同污泥负荷导致红斑瓢虫对污泥减量的相对值和绝对值不同,红斑瓢虫时污泥减量的相对值在污泥负荷较小时要大于污泥负荷较高时,但红斑瓢虫对污泥减量的绝对值在污泥负荷较大时要大于污泥负荷较低时。

④ 有红斑瓢虫存在时,SVI 值可得到提高,但对 COD、氨氮和 TP 的去除效果没有明显影响。

### 参考文献:

- [1] Mayhew M, Stephenson T. Low biomass yield activated sludge: a review[J]. Environmental Technology, 1997, 18: 883 - 892.
- [2] 魏源送,樊耀波. 污泥减量技术的研究及其应用[J]. 中国给水排水, 2001, 17(7): 23 - 26.
- [3] 周可新,许木后,曹宏,等. 利用微型动物减量剩余污泥量的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(1): 1 - 5.
- [4] 经济部工业局. 废水处理功能生物诊断技术[M]. 台北:经济部工业局, 1995.

作者简介:梁鹏(1976 - ),男,重庆人,博士研究生,研究方向为水污染控制。

电话:(010)62777823(O)

收稿日期:2003 - 08 - 24

·信息·

## 本刊调价启事

近年来,为适应给水排水事业的迅猛发展和广大读者的需求,中国给水排水杂志的页码已由原先的 64 页增至 112 页(不计广告页),科技信息载量几乎增加了一倍。为解决刊物发行价与成本价长期倒挂的问题,并能使信息媒体得以持续发展,经批准,中国给水排水杂志自 2004 年起定价调整为:10 元/册(国内),5 US \$/册(国外)。

中国给水排水杂志发行的主渠道仍为各地的邮政局(所),发行代号为 6 - 86,请广大读者踊跃订阅。

(本刊编辑部 供稿)