

城市污水回用系统研究的整数规划模型

吴丽梅 吴峙山 栗文辉

(北京市环境保护科学研究所, 北京 100037)

摘要 本文介绍研究工作中建立的城市污水回用系统规划的 0-1 整数规划数学模型。重点探讨了在规划的污水收集系统、污水处理厂位置、处理等级已确定的条件下, 如何选择再生水回用对象、回用规模, 追加的深度处理规模等经济合理、技术可行的再生水分配系统。通过某地区城市污水土地处理回用系统的实例研究, 验证了所建模型的合理性与实用性。

关键词 城市污水回用, 整数规划, 水分配系统。

水资源短缺与水处理技术的发展, 促使人们积极开展和利用污水资源, 并进行污水回用系统的规划研究。城市污水回用系统具有多阶段过程的特点, 其组成如图 1 所示。

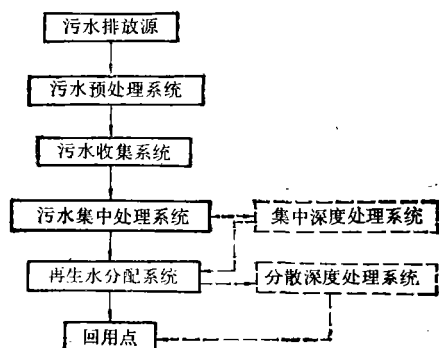


图 1 城市污水回用系统的组成

该系统的核心问题是水质控制与水量分配。本文根据污水回用系统各子系统之间存在信息传递与反馈, 可进行分级、分层进行研究的特点, 采用 0-1 整数规划方法进行了城市污水回用系统规划的研究。

一、城市污水回用系统的 0 1 整数规划模型

近年来, 一些发达国家开始进行城市污水回用系统规划的研究, 采用了非线性规划、动态规划等大系统优化方法, 由于大系统多维的非线性, 往往受到计算容量和计算速度的限制, 在数学上经常出现无解的情况, 目前还没有一个

成熟的解法, 难于使得模型在实践中推广应用。自线性规划作为应用数学的一个工具以后, 出现的一个突出的计算问题是, 要求一个线性规划的解部分是整数或完全是整数。前者称为混合整数规划, 后者称为纯整数规划。而 0-1 整数规划是整数规划的特殊情形, 它的变量 x_i 仅取 0 和 1, x_i 即称为 0-1 变量。 x_i 取 1 用于回答问题的肯定答案, 如方案被选择、设备分配给予等, 取 0 则回答不选用、不给予等的否定答案。

0-1 整数规划能很好地解决城市污水回用对象的选择问题, 即当回用给第 i 个用户时, $x_i = 1$, 当不回用给第 i 个用户时 $x_i = 0$ 。用户的可回用量按最大可能回用量设计。污水回用是以较高的费用支出为代价的, 在污水回用规划具有多目标性的前提下, 应以经济最优性作为一个基本的判断标准。

将初步筛选的可能的回用户作为一个回用系统, 以费用最小作为优化的目标, 可建立如下 0-1 整数规划模型:

$$\text{目标函数 } \min C = \sum_{i=1}^3 C_i \quad (1)$$

约束条件 目标回用量约束:

$$\left| \sum_{i=1}^m y_i x_i - Q_i \right| \leq \xi \quad (2)$$

流量连续性约束:

收稿日期: 1992 年 3 月 30 日

$$\sum Q_k = \sum Q_{\text{出}} \quad (3)$$

任一输水管段的设计流量应不大于某个限制流量:

$$Q_k \leq Q_{\max} \cdot W_k \quad (k=1, 2, \dots, p) \quad (4)$$

逻辑变量约束:

$$x_i = \begin{cases} 0 & (\text{第 } i \text{ 个用户不回用}) \\ 1 & (\text{第 } i \text{ 个用户回用}) \end{cases}$$

$$W_k = \begin{cases} 0 & (Q_k = 0) \\ 1 & (Q_k \neq 0) \end{cases}$$

式中, C_1 : 回用水分配系统基建费用,

$$\text{表示为 } C_1 = \sum_{k=1}^p a_1 Q_k^{\epsilon_1} L_k$$

C_2 : 回用水分配系统运转费用,

$$\text{表示为 } C_2 = a_2 C_1 + b_2$$

C_3 : 用户追加的深度处理费用,

$$\text{表示为 } C_3 = a_3 Q_k^{\epsilon_3}$$

$a_i, b_i (i=1, 2, 3)$ 为回归系数

k : 管段编号

p : 回用水分配系统的管段数

Q_k : 第 k 条管段流量

y_i : 第 i 个用户的设计回用水量

Q_i : 目标回用量

ϵ_i : 偏差(实际回用量与目标回用量之间的差异)

$Q_{\max}$: 第 k 条回用管段可能的最大流量

X_i, W_k : 0-1 变量

污水回用系统的 0-1 整数规划模型的求解方法可用完全枚举法, 即检查每一种等于 0 或 1 变量的组合, 满足所有约束并使目标函数为最小的变量组合即为最优解。但这种方法需要检查 2^n 个变量组合, 当 $n > 15$ 的情况下这是不可能的。而隐枚举法 (Implicit Enumeration method) 弥补了完全枚举法的不足, 隐枚举法在开始时令所有变量都等于 0, 然后有规律的让某些变量等于 1, 直到得到一个可行解为止。那么这第一个可行解被认为是迄今为止最好的可行解。由于选择哪个变量等于 1 是试探性的, 所以完全有可能这第一个可行解不是最优解, 因而该算法将有规律地考查变量等于 0 或 1 的某些可能的组合, 它们都有可能改善

迄今为止的最好可行解, 一直进行到获得最优解为止。而那些没有可能导致更好可行解的组合将不予考查, 所以说是已被隐含枚举过了。

应用隐枚举法解 0-1 整数规划数学模型时, 需首先将模型划为如下的标准形式^[1]:

$$\text{目标函数 } \min S = \sum_{j=1}^m C_j X_j \quad (5)$$

$$\text{约束条件 } Q_i = -b_i + \sum_{j=1}^m a_{ij} X_j \geq 0$$

$$(i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

$$C_j \geq 0 \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

X_j ——0-1 变量

a_{ij}, b_i, C_j 均为系数

然后即可按图 2 中的程序框图, 编写程序上机运算, 求得问题的解。

二、实例研究

初步设想在某地区拟建污水土地处理系统, 规划流域面积 20326 公顷, 处理规模每日 69 万吨, 处理工艺采用预处理(水解酸化)与土地快速渗滤处理相结合的技术, 预计再生水水量为每日 62.1 万吨, 水质基本能达到中水水质标准及地面水 III 类标准。

根据我国的实际情况, 初选回用对象时应选择对水质要求低, 所需费用低并安全性强的方面, 确保回用水不影响生产、不损害生产设备, 不降低产品质量、不危害操作环境。结合本地区用水情况、区域发展规划, 并遵循就近回用的原则, 初步拟定土地处理出水回用对象为农业灌溉用水、工业用水、景观用水。工业回用主要用于电厂冷却水、建材中混凝土、水泥等搅拌用水、机械行业间接冷却水及部分工艺用水、化工行业冷却水等等, 涉及 22 个工业回用户, 再生水分配系统的管网较复杂, 在回用量一定的条件下, 选择哪些回用户能使得再生水分配系统的费用最小是我们要回答的问题。

运用前面所建立的城市污水回用系统的 0-1 整数规划模型进行优化研究。

$$\text{目标函数 } \min C = \min \sum_{i=1}^3 C_i$$

表 1 回用水管道综合指标^[9]

流量 $Q(t/d)$	2500	3847*	5000	10000	20000	50000	100000	200000
投资 $C(元/km)$	70000	92328*	102500	170000	260000	475000	750000	1000000

* 为自拟值。

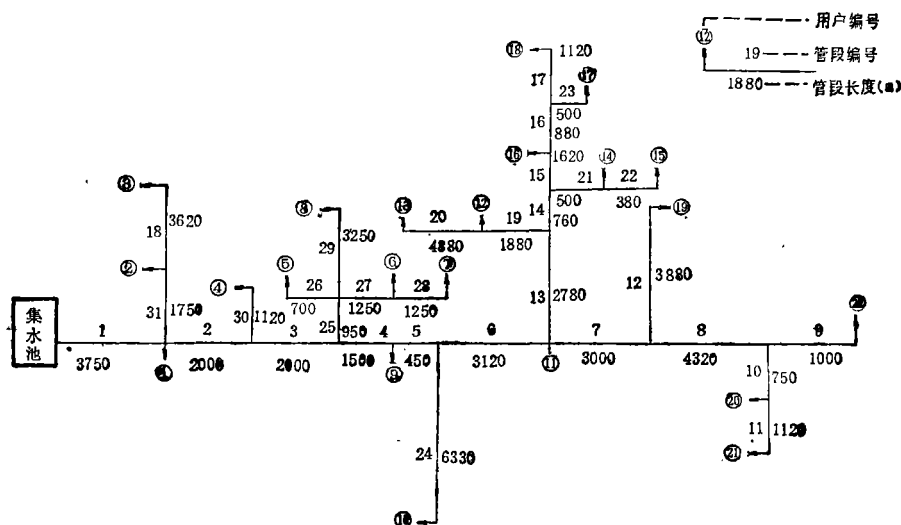


图 3 回用水分配管网初始方案示意图

$$C_1 = \begin{cases} a + bQ & (\text{当 } Q \neq 0 \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } Q = 0 \text{ 时}) \end{cases} \quad (8) \quad (4)$$

此时, 目标函数为:

$$\begin{aligned} \min C_1 &= \min \sum_{k=1}^p (aW_k + bQ_k) \cdot L_k \\ &= \min \left(\sum_{k=1}^p aW_k \cdot L_k + \sum_{k=1}^p bQ_k \cdot L_k \right) \\ &= \min \left(\sum_{k=1}^p aW_k \cdot L_k + \sum_{i=1}^m e_i X_i \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, W_k : 0—1 变量, 当 $Q_k = 0$ 时 $W_k = 0$ 当 $Q_k \neq 0$ 时 $W_k = 1$

X_i : 0—1 变量, 当第 i 个用户不回用时, $X_i = 0$; 当第 i 个用户回用时 $X_i = 1$ 。

 e_i : 系数 m : 初选回用户个数

其它符号意义同前, 约束条件同式(2)一

下面确定上述模型中的主要参数及建立费用函数。

回用水管段费用函数根据表 1 中基础数据进行回归。

回归得 $a = 1424.171$, $b = 0.044$, 相关系数 $r = 0.993$ 。费用函数为:

$$C = 1424.171 + 0.044Q \quad (10)$$

因此, 模型中回用水管道线性费用函数可表示为:

$$C_1 = \begin{cases} 1424.171 + 0.044Q & (\text{当 } Q \neq 0 \text{ 时}) \\ 0 & (\text{当 } Q = 0 \text{ 时}) \end{cases}$$

本例中回用水分配管网系统如图 3 所示。

从图 3 可知, 管段数 $p = 31$, 初选回用户个数 $m = 22$, 管段长度 $L_k (k = 1, 2, \dots, p)$, 初选回用户的最大可能回用量 y_i 见表 2

$Q_{\max}$ 为每个初选回用户均按设计可回用量进行回用水分配时, 第 k 条管线的流量, 即为

表2 初选回用户的最大可能回用量 (t/d)

编号	变量名	设计最大可回用量	编号	变量名	设计最大可回用量
1	y_1	366.08	12	y_{12}	23393.30
2	y_2	5227.04	13	y_{13}	1851.79
3	y_3	16320.00	14	y_{14}	6390.79
4	y_4	10967.68	15	y_{15}	4052.60
5	y_5	9381.76	16	y_{16}	1817.80
6	y_6	565.12	17	y_{17}	989.40
7	y_7	932.80	18	y_{18}	7912.30
8	y_8	5252.30	19	y_{19}	699.20
9	y_9	1717.40	20	y_{20}	2727.00
10	y_{10}	10747.20	21	y_{21}	1267.30
11	y_{11}	1351.70	22	y_{22}	302400.00

第 k 条回用管段可能的最大流量, 根据上述已知数可计算出。

Q_r 为目标回用量, 可根据实际情况设定。

将上述确定的参数值代入模型 (9), (2), (3), (4) 中即得到以费用最小为目标函数, 53 个 0—1 变量 ($X_i, i = 1, \dots, 22, W_k, k = 1, \dots, 31$), 64 个约束方程的 0—1 整数规划数学模型。(因方程占篇幅较长, 此处略)。

采用隐枚举法, 根据图 2 中的程序框图, 用 FORTRAN 语言编写了计算程序, 求解模型中 53 个 0—1 变量。计算结果列于表 3。

表3 模型运算结果

0—1 变量 计算结果	X_1 0	X_2 1	X_3 1	X_4 1	X_5 1	X_6 0	X_7 0	X_8 0	X_9 0	X_{10} 1	X_{11} 1
0—1 变量 计算结果	X_{12} 1	X_{13} 0	X_{14} 0	X_{15} 1	X_{16} 0	X_{17} 0	X_{18} 0	X_{19} 0	X_{20} 0	X_{21} 0	X_{22} 1
0—1 变量 计算结果	W_1 1	W_2 1	W_3 1	W_4 1	W_5 1	W_6 1	W_7 1	W_8 1	W_9 1	W_{10} 0	W_{11} 0
0—1 变量 计算结果	W_{12} 0	W_{13} 1	W_{14} 1	W_{15} 0	W_{16} 0	W_{17} 0	W_{18} 1	W_{19} 1	W_{20} 0	W_{21} 1	W_{22} 1
0—1 变量 计算结果	W_{23} 0	W_{24} 1	W_{25} 1	W_{26} 1	W_{27} 0	W_{28} 0	W_{29} 0	W_{30} 1	W_{31} 1		

运用所建立的城市污水回用系统的 0—1 整数规划模型, 解决了回用户优选问题, 对某地区回用水分配系统进行了优化计算。结果表明: 在用户均不需追加深度处理时, 用户的回用规模、与再生水水源及相邻用户的距离和高差是影响回用水分配费用的主要因素。在一定的目标回用量条件下, 选择回用规模较大(规模效益)、距再生水水源较近、高程较低的用户比较经济。

三、结 论

1. 城市污水回用系统中 n 个子系统之间相互联系, 又相互独立, 它们之间存在信息传递与反馈, 根据各子系统的特点及解决问题的需要, 可分层分级进行研究。

2. 在规划的污水收集系统、污水处理厂位

置、处理等级已确定的条件下, 选择再生水回用目标、回用规模、追加的深度处理规模等经济合理的再生水分配系统是污水回用研究的核心内容。

3. 城市污水回用系统的 0—1 整数规划模型, 体现了污水回用系统的规模经济效益。以总费用最小为目标函数, 在水质水量约束条件下, 优选再生水回用对象, 进而确定再生水回用分配系统方案。该模型克服了以往研究方法的多维非线性在解法上的困难, 使问题求解简单、明了, 且具有系统优化的特点。

4. 以某地区城市污水土地处理系统为例, 运用所建立的城市污水回用系统的 0—1 整数规划模型, 进行了回用水分配系统的优化研究, 验证了所建模型的合理性与实用性。

0—1 整数规划模型在解法上、计算机编程

以及应用范围上还有待进一步探索与研究,使之更加完善。

参 考 文 献

- 1 范鸣玉等. 最优化技术基础. 北京: 清华大学出版社,

1982: 47—59

- 2 王兆奎等. 城市基础设施工程投资估算指标 (第一册). 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 8
- 3 程理民等编. 运筹学 (I). 北京: 科学技术文献出版社, 1988: 146—159

• 环境信息 •

1993 年国际会议

3 月 美国佐治亚州亚特兰大

第 44 次匹兹堡分析化学和应用光谱学会议和展览

联系地址: Mrs. Alma Johnson, Program Secretary, The Pittsburgh Conference, Department CFP, 300 Penn Centre Boulevard, Suite 332, Pittsburgh, Pennsylvania 15235, U.S.A.

3 月 28—4 月 2 日 科罗拉多州丹佛

美国化学会第 205 次全国会议(同时举行分析化学、环境化学、化学品卫生与安全各分会会议)

联系地址: B. R. Hodsdon, American Chemistry Society, 1155-16th Street N. W. Washington D. C. 20036. U. S. A.

4 月 3—4 日 德国曼海姆

德国工程师协会热、催化和吸着法排气净化进展会议

联系地址: VDI Verein Deutscher Ingenieure (Kommission Reinhaltung der Luft), Graf Recke-Strasse 84, P. O. Box 1139, D-W-4000 Düsseldorf 1, Federal Republic of Germany.

4 月 4—8 日 印度新德里

第 13 次世界职业安全与健康会议

联系地址: National Safety Council, P. O. Box 26754, Siom, Bombay 400022, India.

4 月 6—7 日 英国英格兰坎特伯雷、肯特大学英国毒理学学会致癌作用早期标志学术讨论会

联系地址: Dr. E. S. Harpur, Sterling Winthrop Research Centre, Willowburn Avenue, Alnwick, Northumberland, NE66 2JH, United Kingdom.

4 月 意大利罗马

室内治疗活动研讨会

联系地址: M. Olast, Commission of the European Communities DG XII. D. 3, rue de la Loi 200, B-1049 Brussels, Belgium.

4 月 26—5 月 2 日 柏林

“水”展览和讨论会 (AMK BERLIN' 93)

联系地址: Company for Exhibitions, Fairs and Congresses, Messedamm 22, P. O. Box 191740, D-W-1000 Berlin 19, Federal Republic of Germany.

5 月 3—5 日 意大利格拉多

患者质量控制和辐射防护数据分析研讨会

联系地址: H. Schibilla, Commission of the Euro-

pean Communities DG XII. D. 3, rue de la Loi 200, B-1049 Brussels, Belgium.

5 月初 美国佐治亚州杰基尔岛

第 23 届 IAEAC 环境分析化学年会

联系地址: Dr. A. Wayne Garrison, E. P. A. Environmental Research Laboratory, College Station Road, Athens, Georgia 30613, U. S. A. or Dr. Ernest Merian, Im Kirsgarten 22, CH-4106 Therwil, Switzerland.

5 月 9—14 日 德国汉堡

第 17 次柱液体色谱国际学术讨论会 (HPLC' 93)

联系地址: Gesellschaft Deutscher Chemiker e. U., Varrentrappstrasse 40—42, P. O. Box 900440, D-W-6000 Frankfurt am Main 90, Federal Republic of Germany.

5 月 美国

第 27 次环境健康痕量物质年会

联系地址: Dr. D. D. Hemphill, Environmental Trace Substances Research Centre, University of Missouri, 5450 S. Sinclair Road, Columbia, Missouri 65203, U. S. A.

5 月 24—26 德国法兰克福

第 11 次 DECHEMA 生物技术年会

联系地址: DECHEMA, P. O. Box 970146, D-W-6000 Frankfurt am Main 97, Federal Republic of Germany.

6 月 14—20 日 芬兰赫尔辛基

欧洲质量控制组织

联系地址: Mrs. Tarja Jalasto, Finnish Society for Quality Control, Laaksolahdentie 41, P. O. Box 1, SF-02730 Espoo, Suomi-Finland.

7 月 4—8 日 芬兰赫尔辛基

第 6 次室内空气质量和气候国际讨论会 (INDOOR AIR' 93)

联系地址: Prof. Olli Seppänen, SF-02150 Espoo.

秋天 捷克斯洛伐克布拉格

第 14 次 IAEAC 现代农药化学和归宿研讨会

联系地址: Dr. Damia Barcelo, Centre de Investigacion y Desarrollo, Jorge Girona Salgado 18-26, E-08034 Barcelona, Spain.

Abstracts

Chinese Journal of Environmental Science

dyeing wastewater, microbial distribution.

Preliminary Studies on the Buffering Effects of Forest Litter on Soil Acidification. Wang Silong, Chen Chuying (Institute of Applied Ecology, Academia Sinica, Shenyang 110015): *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 25—30

The ash element content and decomposition rate of the litter of *S. Superba* were found to be much higher than those of the litter of *C. lanceolata*. Subsequently, it is inferred that the former possesses a higher potential to buffer acidification of the soil compared with the latter. When the soil was covered with litter of *S. superba*, the base cation content and pH-value of leachate down from the litter and soil were evidently higher than the control; the basesaturation percentage and pH-value of the soil itself were also markedly higher, and the acidity and Al/Ca of the soil were far lower than the control. That is, the buffering ability of litter of *S. superba* to soil acidification is very strong, while the litter of *C. lanceolata*, is not.

Key words: *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) hook, *Schima superba* gardn. et champ, litter, buffering ability, soil acidification.

Studies on the Effects of Heavy Metals on the Contents of Nucleic Acids and Activities of Nucleases in the Root Tips of *Vicia faba*. Duan Changqun, Wang Huanxiao, [Qu Zhongxiang] (Biology Department, Yunnan University, Kunming 650091): *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 31—35

Under the treatment of Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} ions at low concentrations the contents of DNA (treated with the concentration less than 10.0, 0.50 and 50.0 ppm), and RNA (treated with the concentration less than 10.0, 50.0 and 50.0 ppm) and the activities of DNase (all less than 10.0 ppm) and RNase (less than 20.0, 10.0 and 50.0 ppm) in the root tips of *Vicia faba* L. increased with the increase of the concentrations of metal ions; however, the contents of DNA and RNA and the activities of DNase and RNase decreased when the concentrations of the metal ions were higher than the concentrations stated above. Hg^{2+} did not exert regular effects except that the activities of RNase increased with the treatment concentration of Hg^{2+} below 0.05 ppm, and decreased when the concentration of Hg^{2+} was above 0.05 ppm. The results demonstrate that the effects of heavy metals on nucleic acids metabolism depend on the interaction between the extents of the adaptive response of plant tissues and the toxic action of heavy metal ions. Metal ion characteristics and the tolerant inducible system of different metabolism that might exist in plants, and the effects of protein metabolism on the adaptive actions of plants were also discussed.

Key words: *vicia faba* L., heavy metals, nucleic acids, nucleases, adaptive responses.

Research on Integer Programming Model of Urban Waste Water Reuse System. Wu Limei et al. (Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037): *Chin. J. Environ.*

Sci., 1992, 13(5), pp. 36—41

A 0—1 integer programming model for the planning of urban wastewater reuse system were established. The planning of the wastewater collection system, location of the treatment plant and the efficiency of the treatment were formulated. Emphases were put on discussions of how to determine the user of the renovated water, the quantity of the reused water and the scale of additional advanced treatment so as to establish renovated water allocation system. The model was validated to be rational and applicable by examining a wastewater land treatment system.

Key words: urban wastewater reuse, integer programming, water allocation system, wastewater treatment. **A Study on the Characteristics of Phosphate Metabolism of *Pseudomonas* sp.** Zhou Yuexi, Qian Yi, Gu Xiasheng (Department of Environmental Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084): *Chin. J. Environ. Sci.*, 13(5), 1992, pp. 42—45

The characteristics of the phosphate metabolism of *Pseudomonas* sp., the predominate genus in the activated sludge mixed liquor from the sequencing biological batch system which effectively removes nitrogen, phosphorus and organic matter, were investigated. Experimental results demonstrate: (1) Under aerobic conditions and with acetates as carbon source, the addition of sulphuric acid causes *Pseudomonas* sp. to release phosphates, and the addition of NaOH and $NaHCO_3$ causes *pseudomonas* sp. to excessively take phosphate. (2) The phosphate uptake capacity of *Pseudomonas* sp. is nearly the same in the aerobic system as in the anaerobic-aerobic system with acetate as carbon source.

Key words: waste water treatment, *pseudomonas* sp., phosphorus.

Study on Comprehensive Treatment of Waste Water from Furfural Production. Chen Yulian et al. (Department of Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024): *Chin. J. Environ. Sci.*, 1992, 13(5), pp. 46—49

During the process of furfural production, waste liquor containing 1—2.5 % acetic acid is discharged. Not only is acetic acid wasted but also the surrounding environment is polluted. In the operation described in this paper, the waste water passes through a 400×1600 mm electrodialyzer equipped with 90—120 pairs of membrane modules, recovering acetic acid with concentrations of 18—20%. The treated waste water contains only 0.02% of acetic acid, and could be safely discharged or reused. Furthermore, an industrial graded acetic acid with purity of 99% could be produced by means of extraction-distillation of the recovered acetic acid solution. Industrialization of the comprehensive technology of electrodialysis-extraction-distillation for the treatment of the waste water from furfural production mentioned here has been achieved.

Key words: waste water treatment, membrane separation, electrodialysis, acetic acid, recovery.

Effect of Sulfate Ion on Anaerobic Biological Treatment of Waste water. Liu Yan (Department of