

我国东北地区城市污水处理效率研究

赵泽斌^{1,2}, 安实³, 马放²

(1. 哈尔滨工业大学 管理学院, 哈尔滨 150001, zhaozebin@hit.edu.cn; 2. 哈尔滨工业大学
城市水资源与水环境国家重点实验室, 市政环境工程学院, 哈尔滨 150090;
3. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 为更有效地分析我国东北地区城市污水处理效率, 采用相关分析确定污水处理效率的各种影响因素, 通过二阶二级逼近形式的污水投资和运行费用函数对实际数据进行拟合, 在此基础上应用所建立的费用函数结合城市污水处理相关指标进行污水处理效率分析. 结果表明, 我国东北地区城市污水处理效率分析应重点考察设计处理能力、实际处理能力、出水 COD 质量浓度和污泥处理量等指标, 这些指标值的改变将引起投资和运行费用的相应变化, 并且边际费用呈现递减规律, 随着费用的增加, 我国东北地区城市污水处理效率是递增的.

关键词: 污水处理效率; 二阶二级逼近; 费用函数; 城市污水

中图分类号: X829

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)04-0588-04

Efficiency of wastewater treatment in northeast cities of China

ZHAO Ze-bin^{1,2}, AN Shi³, MA Fang²

(1. School of Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China, zhaozebin@hit.edu.cn; 2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
3. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to analyze the urban wastewater treatment efficiency in northeast China more effectively, this paper uses correlation analysis to determine the efficiency of various relevant factors, combined with second-order quadratic approximation of the investment and operation cost function to fit the actual data, based on which the efficiency of wastewater treatment is analyzed with corresponding indexes. The result shows that the analysis of urban wastewater treatment efficiency in northeast China should be concentrated on designed capacity, actual processing capacity, effluent COD concentration and sludge treatment volume. All the indices above have a positive relation with investment and operation cost, and the margin cost shows a decreasing trend, which means that the efficiency of urban wastewater treatment in northeast China is improved with increasing cost.

Key words: efficiency of wastewater treatment; second-order quadratic approximation; cost function; urban wastewater

城市污水处理效率需要考虑污水处理规模、污染物去除率等环境指标, 还需要考虑污水处理

投资和运行费用等经济指标, 而费用函数则可以较好地体现处理效率中环境指标和经济指标之间的关系.

收稿日期: 2009-08-12.

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项资助项目
(2009ZX07631-002-05).

作者简介: 赵泽斌(1976—), 男, 讲师, 博士, 博士后;
安实(1968—), 男, 教授, 博士生导师;
马放(1965—), 男, 教授, 博士生导师.

国内外关于污染物处理费用函数的研究主要集中在两个方面, 一是针对污水处理厂不同处理水平^[1]、污水处理流程^[2]、新型污水排放系统^[3]或厂级治理^[4-6]等不同分析对象的需要选择不同参数, 构建相应的投资或运行费用函数, 或者构建企业污

染物联合削减费用函数^[7],二是针对不同费用函数研究相应参数拟合方法,如模糊性回归^[8-9]、遗传算法^[10],或对不同拟合方法进行比较^[11]。

与上述研究不同,一方面本文的研究考虑了相对比较全面的污水处理影响因素,另一方面并没有局限于构建费用函数,而是以东北地区为例更进一步地应用所建立的费用函数对城市污水处理效率进行系统全面的分析,为我国城市污水处理决策制定和效率提高提供依据。

1 城市污水处理投资和运行费用函数参数确定和模型构建

1.1 费用函数参数的确定

一般情况下,影响城市污水处理投资和运行费用的因素有污水处理规模、污水处理水平、污染物去除率、污泥处置量、污水回用量等,本文将通过相关系数法研究城市污水处理投资和运行费用与若干变量之间的相关性,根据费用模型构建的经济目标和使用目标,选择对费用函数研究起决定性影响的最主要变量,并根据费用函数模型参数是否便于计算和应用的要求,最终确定城市污水处理投资和运行费用函数参数。

所采用数据主要来源于东北地区重点城市的典型污水处理厂,污水处理主流工艺为活性污泥法 A/O 工艺和 SBR 工艺以及以此为基础的各种变型工艺,调查指标包括污水处理厂的设计与实际处理规模、排放标准、来水构成及进水质量浓度、污水处理情况、污泥处理情况等。为了便于分析,对所有原始数据进行对数化处理。考虑到对数化处理后各种污染物的进出质量浓度之比和实际与设计规模之比等指标可以表示为其分子和分母对数的线性组合,本文在费用函数的参数选择中不再单独考虑上述比率类指标。

通过相关分析可知,在 0.01 的显著性水平下,投资费用与设计处理能力之间的相关系数是 0.844 ($p = 0$),存在显著相关关系。类似地可以得到运行费用与各指标相关系数,如表 1 所示。

从表 1 中可看出,运行费用与实际处理能力、出水 COD 质量浓度和污泥处理量分别在 0.05 和 0.01 的显著性水平下显著相关,而运行费用与进水 COD 质量浓度、进出水氨氮质量浓度等其他指标,尽管相关系数不为 0,但其对应 p 值过大,使得相关系数不具有统计学意义,其原因之一在于相关样本量与其他指标相比还不够充分,在后续研究中,随着可用样本量的增大,可对其相关性进

行进一步分析。

表 1 运行费用与各指标的相关系数

指标	皮尔逊相关系数
实际处理能力	0.484 * ($p = 0.019$)
COD 进水	0.121 ($p = 0.583$)
COD 出水	0.512 * ($p = 0.013$)
氨氮进水	0.143 ($p = 0.583$)
氨氮出水	0.143 ($p = 0.583$)
总磷进水	-0.413 ($p = 0.270$)
总磷出水	-0.065 ($p = 0.868$)
总氮进水	0.454 ($p = 0.365$)
总氮出水	0.526 ($p = 0.284$)
污泥处理量	0.727 * * ($p = 0$)
处理后污泥含水率	0.245 ($p = 0.261$)
污水回用量	-0.144 ($p = 0.818$)

* 表示显著性水平是 0.05, * * 表示显著性水平是 0.01。

综合上述结果,东北地区城市污水处理厂投资费用函数选择设计处理能力作为参数,而运行费用函数可以选择实际处理能力、出水 COD 质量浓度和污泥处理量作为参数。

1.2 城市污水处理投资和运行费用函数的构建

在建立城市污水处理投资和运行费用函数的过程中,需要考虑多种污染物,也要考虑定性和定量参数,对于处理 n 种污染物的污水处理厂,其费用可表示为函数 $C_i = f(Q_j, \frac{E_k}{I_k})$,式中 C_i 为污水处理费用, Q_j ($j = 1, 2, \dots, M$) 为污水处理水平、污水回用量等变量, E_i 和 I_i ($i = 1, 2, \dots, N$) 分别表示污染物 i 出口和进口质量浓度。采用二阶二级函数对上式逼近,可得如下费用函数形式

$$\ln C_i = \sum_{j=1}^M \alpha_j \ln Q_j + \sum_{i=1}^N \beta_i \ln \left(\frac{E_i}{I_i} \right) + \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \gamma_{ij}^{(1)} \ln Q_j \ln \left(\frac{E_i}{I_i} \right) + \sum_{j=1}^M \sum_{j=1}^M \gamma_{jj}^{(2)} \ln Q_j \ln Q_j + \sum_{i=1}^N \sum_{i=1}^N \gamma_{ii}^{(3)} \ln \left(\frac{E_i}{I_i} \right) \ln \left(\frac{E_i}{I_i} \right) \quad (1)$$

根据投资费用函数参数确定结果,可得东北地区城市污水处理厂投资费用函数基本形式为 $C_1 = f(Q_{1\text{污水}})$,式中 C_1 为投资费用(亿元), $Q_{1\text{污水}}$ 为污水设计处理能力(t/d),采用二阶二级函数进行逼近,可得 $\ln C_1 = a_0 + a_1 \ln Q_{1\text{污水}} + a_2 (\ln Q_{1\text{污水}})^2$ 。根据世界银行的 Susmita Dasguptad 等研究成果可知,采用简单固定弹性模型不仅拟合度较好,而且各变量符号合理,显著性高,能够较好解释变量之间关系。由此,投资费用函数可简化为 $C_1 = e^{a_0} Q_{1\text{污水}}^{a_1}$ 。在此基础上,结合样本数据回

归分析结果,如表 2 所示,可得到我国东北地区城市污水处理厂投资费用函数为 $C_1 = e^{-1.380} Q_{1\text{污水}}^{0.837}$.

表 2 投资费用函数回归结果

回归统计量	回归结果
回归系数 R	0.883 091 552
回归系数 R 平方	0.779 850 69
调整了的 R 平方	0.768 263 884
标准误差	0.484 664 675
截距	-1.380 284 197
斜率	0.837 201 83

根据运行费用函数参数确定结果,可得东北地区城市污水处理厂的运行费用函数模型基本形式为 $C_2 = f(Q_{2\text{污水}}, Q_{2\text{污泥}}, \rho_{\text{COD出}})$. 式中, C_2 为年运行费用(万元), $Q_{2\text{污水}}$ 为污水实际处理量(t/d), $Q_{2\text{污泥}}$ 为污泥实际处理量(t/d), $\rho_{\text{COD出}}$ 为 COD 出口质量浓度. 采用二阶二级函数对 $C_2 = f(Q_{2\text{污水}}, Q_{2\text{污泥}}, \rho_{\text{COD出}})$ 进行逼近,可得

$$\ln C_2 = a_0 + a_1 \ln Q_{2\text{污水}} + a_2 \ln Q_{2\text{污泥}} + a_3 \ln \rho_{\text{COD出}} + a_4 (\ln Q_{2\text{污水}})^2 + a_5 (\ln Q_{2\text{污泥}})^2 + a_6 (\ln \rho_{\text{COD出}})^2 + a_7 \ln Q_{2\text{污水}} \ln Q_{2\text{污泥}} + a_8 \ln Q_{2\text{污水}} \ln \rho_{\text{COD出}} + a_9 \ln Q_{2\text{污泥}} \ln \rho_{\text{COD出}} \quad (2)$$

按照投资费用函数的处理方法,我国东北地区城市污水处理运行费用函数可简化为 $C_2 = e^{a_0} Q_{2\text{污水}}^{a_1} Q_{2\text{污泥}}^{a_2} \rho_{\text{COD出}}^{a_3}$. 在此基础上结合样本数据进行回归分析,结果如表 3 所示.

表 3 运行费用函数回归结果

回归统计量	回归结果
回归系数 R	0.785 228 272
回归系数 R 平方	0.616 583 439
调整了的 R 平方	0.576 223 801
标准误差	0.515 159 821
截距	4.808 407 557
斜率 a_1	0.186 180 946
斜率 a_2	0.339 228 238
斜率 a_3	0.221 892 822

根据表 3,可以得到城市污水处理厂运行费用函数为

$$C_2 = e^{4.808} Q_{2\text{污水}}^{0.186} Q_{2\text{污泥}}^{0.339} \rho_{\text{COD出}}^{0.222}$$

2 基于费用函数的城市污水处理效率分析

对 $C_1 = e^{-1.380} Q_{1\text{污水}}^{0.837}$ 求一阶导数可得 $\frac{dC_1}{dQ_{1\text{污水}}}$

$= 0.837e^{-1.380} Q_{1\text{污水}}^{-0.163} > 0$, 表明设计处理能力的增加将使投资费用随之增加,进一步的 $\frac{d^2 C_1}{dQ_{1\text{污水}}^2} = -0.136e^{-1.380} Q_{1\text{污水}}^{-1.163} < 0$, 表明在设计处理能力增大过程中,相同单位设计处理能力增加,其边际投资是递减的,即投资费用使用效率是逐渐增大的.

根据 $C_2 = e^{4.808} Q_{2\text{污水}}^{0.186} Q_{2\text{污泥}}^{0.339} \rho_{\text{COD出}}^{0.222}$ 可得 $\frac{\partial C_2}{\partial Q_{2\text{污水}}} = 0.186e^{4.808} Q_{2\text{污水}}^{-0.814} Q_{2\text{污泥}}^{0.339} \rho_{\text{COD出}}^{0.222} > 0$, $\frac{\partial^2 C_2}{\partial Q_{2\text{污水}}^2} = -0.151e^{4.808} Q_{2\text{污水}}^{-1.814} Q_{2\text{污泥}}^{0.339} \rho_{\text{COD出}}^{0.222} < 0$, 表明在污水处理量增大的过程中,相同单位污水处理量增加,其边际运行费用是递减的,即运行费用在污水处理方面使用效率是逐渐增大的. 同样,可以得到 $\frac{\partial C_2}{\partial Q_{2\text{污泥}}} > 0$, $\frac{d^2 C_2}{dQ_{2\text{污泥}}^2} < 0$, 表明运行费用在污泥处理方面的使用效率与其在污水处理方面的使用效率变化趋势是相同的. 同时,还可以得到 $\frac{\partial C_2}{\partial \rho_{\text{COD出}}}$

> 0 , $\frac{\partial^2 C_2}{\partial \rho_{\text{COD出}}^2} < 0$. 与前述分析结果不同, $\frac{\partial C_2}{\partial \rho_{\text{COD出}}} > 0$ 意味着随着出水 COD 质量浓度的增大,相应的运行费用也呈现增大趋势,从直观角度看,这一结论并不合理,但注意到 $\rho_{\text{COD出}} = \left(\frac{\rho_{\text{COD出}}}{\rho_{\text{COD进}}}\right) \times \rho_{\text{COD进}}$,

$\rho_{\text{COD进}}$ 对费用的影响可以看作 $\frac{\rho_{\text{COD出}}}{\rho_{\text{COD进}}}$ 和 $\rho_{\text{COD进}}$ 对费用影响的综合,前文的相关性分析表明 $\rho_{\text{COD进}}$ 对费用不产生直接影响,但其影响可以通过 $\rho_{\text{COD出}} = \left(\frac{\rho_{\text{COD出}}}{\rho_{\text{COD进}}}\right) \times \rho_{\text{COD进}}$ 这一形式得以间接体现. $\rho_{\text{COD进}}$ 增大和 $\frac{\rho_{\text{COD出}}}{\rho_{\text{COD进}}}$ 增大分别对应于运行费用的增加和减小,对于本文所涉及样本, $\rho_{\text{COD进}}$ 对费用的影响超过了 $\frac{\rho_{\text{COD出}}}{\rho_{\text{COD进}}}$ 的影响程度,从而使得二者的综合影响以 $\frac{\partial C_2}{\partial \rho_{\text{COD出}}} > 0$ 的形式得以体现, $\frac{\partial^2 C_2}{\partial \rho_{\text{COD出}}^2} < 0$ 则表明其增加的幅度在逐渐减小,即运行费用在 COD 处理方面使用效率也是逐渐增大的.

运行费用受各种因素的影响可以直观地从图 1~3 中看出. 图 1 中的实际处理能力取值为 $12 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 出水 COD 质量浓度取值为 52 mg/L ; 图 2 中的污泥处理量取值为 40 t/d , 出水 COD 质量浓度取值为 30 mg/L , 图 3 中的实际处理能力取值为 $10 \text{ 万 m}^3/\text{d}$, 污泥处理量取值为 40 t/d .

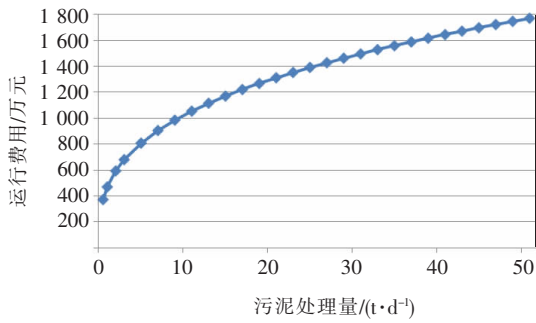


图1 运行费用与污泥处理量的关系

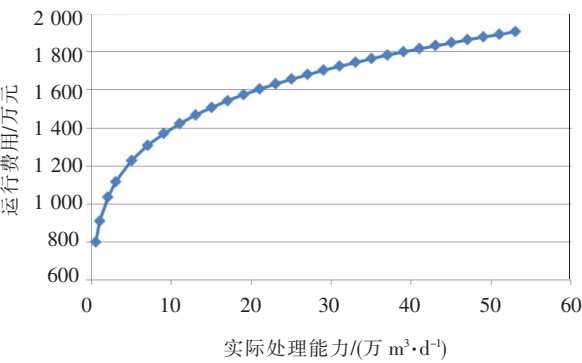


图2 运行费用与实际处理能力的关系

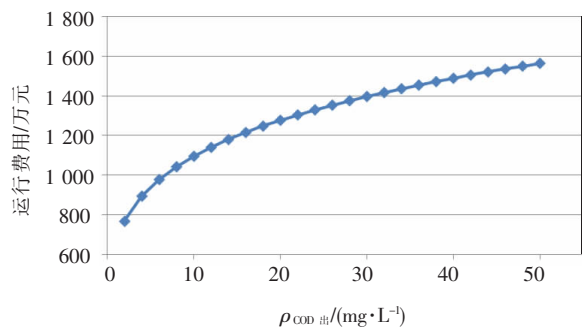


图3 运行费用与出水 COD 质量浓度的关系

3 结 论

1) 费用函数 $C_i = f\left(Q_j, \frac{E_k}{I_k}\right)$ 的二阶二级逼近

形式可较好地反映城市污水处理投资和运行费用的构成及各变量之间的关系,基于所建立费用函数可对城市污水处理效率开展更系统的研究。

2) 我国东北地区城市污水处理投资费用最主要影响因素为设计处理能力,设计处理能力的增加将使投资费用随之增加,但其边际投资是递减的,表明随着投资费用的增加,污水处理效率逐渐增大。

3) 我国东北地区城市污水处理运行费用的

主要影响因素包括实际处理能力、出水 COD 质量浓度和污泥处理量.上述变量的增大所对应的边际运行费用呈递减趋势,相应的污水处理效率随着运行费用的增加逐渐增大。

参考文献:

- [1] ERAN F. Water reuse - an integral part of water resources management: Israel as a case study[J]. Water Policy, 2001, 3(1):29-39.
- [2] WENDELL Q L, JOSE L S, GIORGIO E O, et al. Development of a methodology for cost determination of wastewater treatment based on functional diagram[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 7(10):2061-2071.
- [3] YEH S F, LIN M D, TSAI K T. Development of cost functions for open-cut and jacking methods for sanitary sewer system construction in central Taiwan[J]. Pract Periodical of Haz, Toxic, and Radioactive Waste Mgmt, 2008, 4(12):282-289.
- [4] RIBIC R K, KOMPARE B, ROS M, et al. Cost optimization of integrated wastewater drainage and treatment systems [J]. Water Environment Research, 2008, 80(7):581-595.
- [5] TSAGARAKIS K P, MARA D D, ANGELAKIS A N. Application of cost criteria for selection of municipal wastewater treatment systems [J]. Water, Air, Soil Pollute, 2003, 142(1/4):187-210.
- [6] 杜娜, 曹东, 杨慧芬, 等. 工业企业大气污染治理费用函数的研究[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(6):1116-1127.
- [7] 曹东, 宋存义, 王金南, 等. 污染物联合削减费用函数的建立及实证分析[J]. 环境科学研究, 2009, 3(22):371-376.
- [8] WEN C G, LEE C S. Development of a cost function for wastewater treatment systems with fuzzy regression [J]. Fuzzy Sets Syst, 1999, 106:143-153.
- [9] BASIL P, KONSTANTINOS P, TSAGARAKIS R Y. Cost and land functions for wastewater treatment projects: Typical simple linear regression versus fuzzy linear regression[J]. Journal of Environmental Engineering, 2007, 133(6):581-586.
- [10] 林澍, 黄平. 运用遗传算法进行污水厂费用函数拟合[J]. 四川环境, 2007, 6(26):123-126.
- [11] CHEN H W, CHANG N B. A comparative analysis of methods to represent uncertainty in estimating the cost of constructing wastewater treatment plants[J]. Journal of Environmental Management, 2002, 65(4):383-409.

(编辑 刘 彤)