

污水处理厂 COD 和氨氮总量削减的成本模型

王佳伟,张天柱*,陈吉宁 (清华大学环境科学与工程系,北京 100084)

摘要: 对国内 12 个城市污水处理厂 COD 和氨氮总量削减所需单位成本的调研结果显示,根据污水处理量确定运行费用的传统方法不能直接反映污染物总量削减的成本.在处理能力范围内,COD 和氨氮总量削减所需的单位电耗随着其去除负荷增加而降低,并逐渐趋向定值.因此本研究以 COD 和氨氮总量削减所需电耗为基础,建立了污水处理厂的运行成本模型,其影响因素包括进水和出水浓度、设计规模、水量负荷率等,根据该计算模型确定运行成本可以有效激励污水处理厂削减更多的 COD 和氨氮总量.

关键词: 总量削减; COD; 氨氮; 成本模型

中图分类号: X323 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2009)04-0443-06

Cost model for reducing total COD and ammonia nitrogen loads in wastewater treatment plants. WANG Jia-wei, ZHANG Tian-zhu*, CHEN Ji-ning (Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2009,29(4): 443~448

Abstract: An investigation on the cost for reducing total COD and ammonia nitrogen loads in 12 wastewater treatment plants (WWTPs) showed that the operation cost calculated by the amount of treated wastewater could not reflect the cost to treat the pollutants correctly. Within the treatment capacity of WWTPs, the electrical energy consumption for elimination of one kilogram COD or ammonia nitrogen COD decreased as the load reduction of COD or ammonia nitrogen increases, which became stable finally. Therefore, the model to determine the cost for reducing total COD and ammonia nitrogen loads was established based on energy consumption. The impact factors include influent and effluent concentration, treatment capacity and hydraulic load ratio. The deduction from this model would encourage WWTPs to reduce more loads of COD and ammonia nitrogen.

Key words: total amount reduction; COD; ammonia nitrogen; cost model

总量控制是国家节能减排的主要手段,COD 和氨氮排放总量是水污染物削减的主要控制指标,而城市污水处理厂既是 COD 和氨氮减排的主要承担者,也是能源密集的高能耗产业之一^[1].通过技术和经济方法降低污水厂的运行成本存在很大潜力^[2-4],其中将排污权交易为核心的总量控制纳入市场经济轨道是重要的手段^[5-7].我国目前以污水处理量来确定污水厂运行费用的方法不能直接反映削减污染物的成本^[8-9],难以使排污权交易公平进行,也不能有效激励污水厂削减更多的污染物.

本研究通过对国内 12 个城市污水处理厂 COD 和氨氮总量削减所用电耗进行调研,分析确定其主要影响因素.在此基础上,建立以 COD 和氨氮污染物总量削减所需电耗为基础的成本模型,计算污水处理厂削减 COD 和氨氮总量所需

的运行成本,以推动污水厂对污染物总量的削减.

1 研究方法

1.1 调研范围

调查全国城市污水处理厂 12 座,其中北京市 7 座、广州市 1 座、无锡市 2 座、成都市 2 座.调查数据为 2005 年和 2006 年全年的每日运行数据.

1.2 分析方法

城市污水处理厂 COD 的削减是通过微生物在有氧条件下对有机物的氧化和合成而去除,氨氮的削减除了生物合成一部分以外,主要也是在有氧条件下利用硝化菌将氨氮氧化成硝酸盐而

收稿日期: 2008-09-11

基金项目: “十一五” 国家科技支撑计划资助项目(2006BAC19B06)

* 责任作者, 教授, zhangtz@mail.tsinghua.edu.cn

去除,因此 COD 和氨氮的总量削减越多,所需的供氧量越大.在城市污水处理厂中,供氧设备(鼓风机、转刷等)的电耗约占城市污水处理厂全部电耗的 50%~70%^[10],电费约占运行成本的 40%~60%.因此本研究以削减单位 COD 或氨氮总量所用的电耗(kW·h/kg, 简称单位电耗)为基础,并结合影响污水处理厂运行成本的主要因素,建立污水处理厂的污染物削减成本模型.

2 典型污水厂 COD 和氨氮总量削减电耗分析

城市污水处理厂通常存在夏季处理水量相对较大、污染物浓度相对较低;冬季处理水量较小、污染物浓度较高的特点,以调研中的一个典型污水处理厂为例,处理水量与 COD 或氨氮削减负荷之间不存在明显的相关性(图 1).因此按传统的吨水费用来确定污水厂的运行费用时,不能激励污水厂更多地削减 COD 和氨氮负荷.而该厂削减 COD 或氨氮负荷与其单位电耗之间存在明显的相关性(图 2),即削减的负荷越大,单位电耗越低.

按照 COD 和氨氮的出水浓度,进一步分析该厂在出水 COD 浓度<40mg/L、40~50mg/L、50~60mg/L、>60mg/L 时,氨氮浓度为<3mg/L、3~5mg/L、5~8mg/L、>8mg/L 时,削减 COD 或氨氮负荷与其单位电耗之间的关系(图 3,图 4),并计算电耗的算术平均值和最小值(表 1).由图 3,图4 可见,在不同出水 COD 或氨氮浓度下,削减的污染物负荷与单位电耗之间均表现为随着削减负荷的增加电耗降低,并逐渐趋向稳定值.这是由于当 COD 或氨氮的进水负荷较小时没有及时减少供氧量,从而使供氧过度造成电耗浪费,单位电耗增加.因此,在处理能力允许的范围,当削减的 COD 和氨氮负荷逐渐增加时,单位电耗逐步降低,并逐渐逼近稳定值.

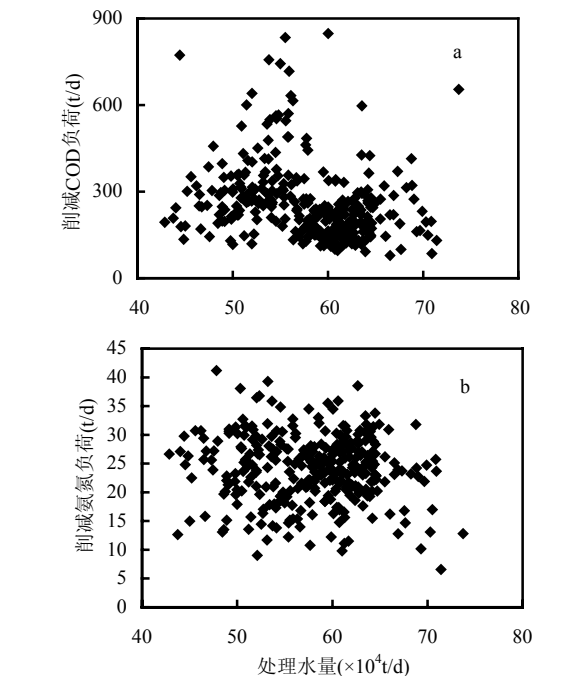


图 1 典型污水厂处理水量与削减污染物负荷的关系
Fig.1 Load reduction of COD or ammonia nitrogen with respect to the amount of treated wastewater in a typical wastewater treatment plant

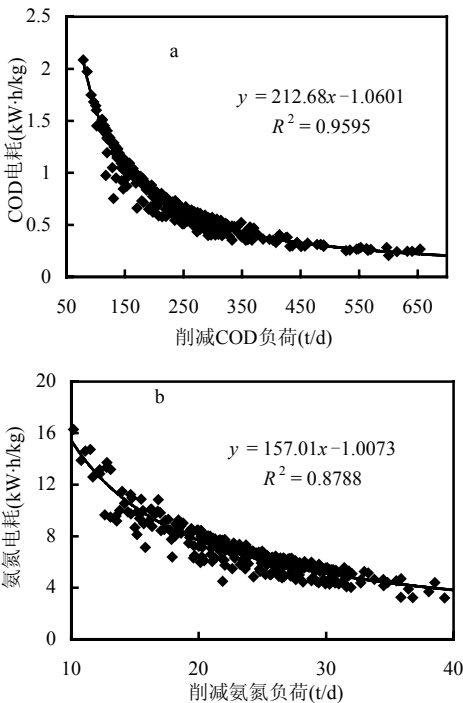


图 2 典型污水处理厂污染物削减负荷与电耗的关系
Fig.2 Load reduction of COD or ammonia nitrogen with respect to energy consumption in a typical wastewater treatment plant

由于削减 COD 所用电耗中包含对氨氮进行硝化的费用,因此采用其最低电耗来代表 COD 削减电耗比较合理.而削减氨氮所用电耗中含有削减 COD 的电耗,所以采用其平均电耗表示同时削减 COD 和

氨氮所需的电耗,因为去除氨氮的前提是 COD 已被基本去除.由表 1 可见,所有削减 COD 的最低电耗和在氨氮出水浓度<5mg/L 时的平均电耗均随着出水浓度的增加而减少,有明显的相关性.而当出水氨氮浓度>5mg/L 时所用的平均电耗均高于出水浓度<3mg/L 的平均电耗,这是因为硝化效果主要受到污泥龄(SRT)的影响,当 SRT 满足硝化要求时,增加供

氧可以解决氨氮负荷升高对硝化的影响,但是当系统的 SRT 低于硝化要求时,增加供氧不能有效改善硝化效果,造成出水氨氮过高,电耗浪费.在科学管理情况下,系统的 SRT 应当满足硝化要求,因而当出水氨氮浓度越低时,电耗会越高.总之,该厂削减单位 COD 和氨氮总量所用的电耗随着出水浓度降低而增加,污染物削减总量的增加而降低.

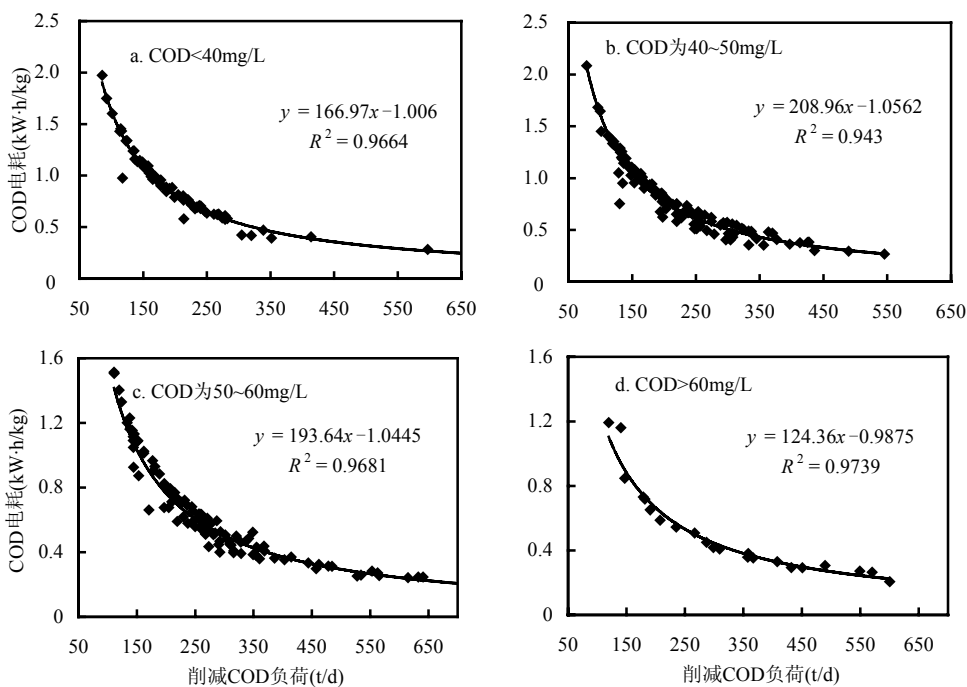


图 3 典型污水厂不同出水 COD 浓度时削减负荷与电耗的关系

Fig.3 Energy consumption for elimination of one kilogram COD with respect to the reduction of COD load under different COD effluent concentration in a typical wastewater treatment plant

表 1 典型污水厂每 kg COD 或氨氮削减的电耗

Table 1 Energy consumption for elimination of one kilogram COD or ammonia nitrogen under different effluent concentration in a typical wastewater treatment plant

COD 出水浓度(mg/L)	电耗(kW·h/kg)		氨氮出水浓度(mg/L)	电耗(kW·h/kg)	
	均值	最小值		均值	最小值
<40	0.90	0.32	<3	6.68	4.67
40~50	0.80	0.30	3~5	6.16	5.28
50~60	0.61	0.29	5~8	7.53	4.85
>60	0.51	0.27	>8	7.59	5.20

硝化的费用,因此采用其最低电耗来代表 COD 削减电耗比较合理.而削减氨氮所用电耗中含有削减 COD 所消耗的电耗,所以采用其平均电耗表示同时削减 COD 和氨氮所需的电耗,因为去除氨氮的前提是 COD 已被基本去除.由表 1 可见,所有削减 COD 的最低电耗和在氨氮出水浓度<5mg/L 时的平均电耗均随着出水浓度的增加而减少,有明显的相关性.而当出水氨氮浓度>5mg/L 时所用的平均电耗均高于出水浓度<3mg/L 的平均电耗,这是因为硝化效果主要受到污泥龄(SRT)的影响,当 SRT 满足硝化要求时,增加供氧可以解决氨氮负荷升高对硝化的影响,但是当系统的 SRT 低于硝

化要求时,增加供氧不能有效改善硝化效果,造成出水氨氮过高,电耗浪费.在科学管理情况下,系统的 SRT 应当满足硝化要求,因而当出水氨氮浓度

越低时,电耗会越高.总之,该厂削减单位 COD 和氨氮总量所用的电耗随着出水浓度降低而增加,污染物削减总量的增加而降低.

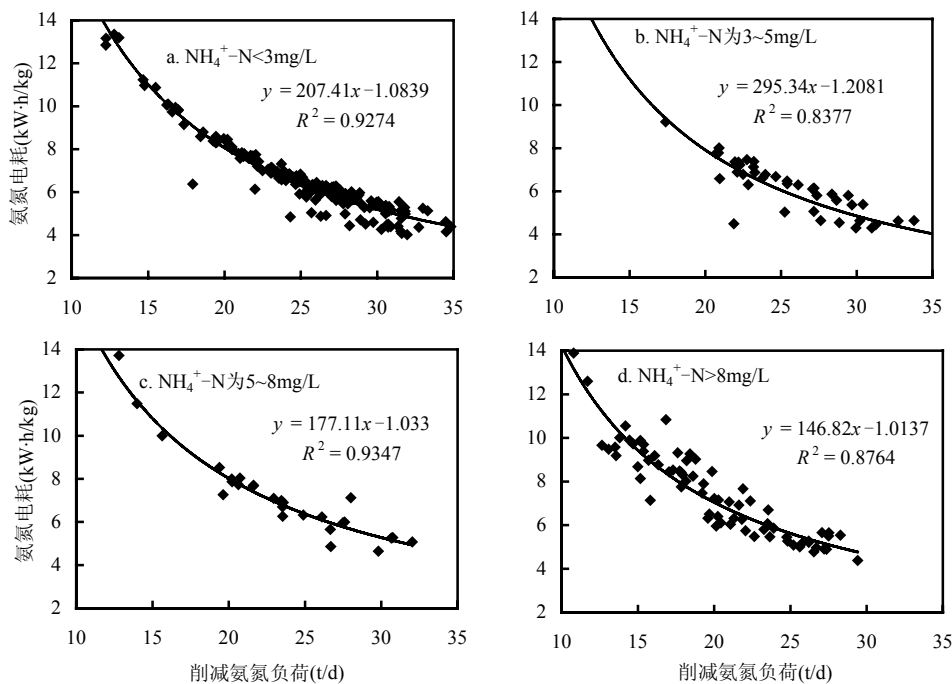


图 4 典型污水厂不同出水氨氮浓度时削减氨氮负荷与电耗的关系

Fig.4 Energy consumption for elimination of one kilogram ammonia nitrogen with respect to the reduction of ammonia nitrogen load under different ammonia nitrogen effluent concentration in a typical wastewater treatment plant

3 全国污水厂 COD 和氨氮总量削减成本分析

分析全国 12 个污水厂削减 COD 和氨氮所用电耗,发现各厂均具有与选择的典型污水厂相似的情况.由表 2 可见,削减单位 COD 总量所用的最低电耗和削减单位氨氮总量所用的平均电耗各厂有较大的差别.F 厂由于采用氧化沟工艺,电耗略为偏高,H、K、L 厂由于进水浓度较低,电耗也偏高.从加权平均值可见,在所有 COD 出水浓度范围内和小于 5mg/L 的氨氮出水浓度范围内,随着出水浓度的升高,所用电耗降低.由于 F 厂为氧化沟工艺,其他 11 个厂均为 A²O 或 AO 工艺,因此只针对 A²O 工艺(含 AO 工艺)建立不同进水浓度下的运行成本模型,其他工艺可参考 A²O 工艺确定.

由于各厂进水浓度对电耗的影响较大,并且单位电耗和进水浓度有较好的相关性(图 5).同时,根据表 2 中的加权均值,即当出水 COD 和氨氮浓

度降低 10mg/L 和 1mg/L 时,增加电耗分别为 0.01 kW·h/kg 和 0.2 kW·h/kg,计算不同进出水浓度下削减 COD 和氨氮所需电耗的模型如下:

$P_{\text{COD}}=58.503\text{COD}_{\text{in}}^{-0.8431}+0.01(50-\text{COD}_{\text{eff}})/10$ (1)

式中: P_{COD} 为削减单位 COD 总量所需电耗, kW·h/kg; COD_{in} 为 COD 进水浓度,mg/L; COD_{eff} 为 COD 出水水浓度,mg/L.

$P_{\text{N}}=74.800\times\text{NH}_{\text{in}}^{-0.6063}+0.2\times(4-\text{NH}_{\text{eff}})$ (2)

式中: P_{N} 为削减单位氨氮总量所需电耗,kW·h/kg; NH_{in} 为氨氮进水浓度,mg/L; NH_{eff} 为氨氮出水浓度,mg/L.

由于电耗占运行成本的比例受到设计规模、水量负荷率的影响,如处理水量不足和规模较小都会造成电耗所占的比例较低.选取满负荷运行的污水厂确定不同设计规模对电耗占运行成本比例的影响(图 6).而由不同水量负荷率时电耗占运行成本的比例可见这两者之间有良好的线性关系(图 7).

表 2 各厂不同出水浓度条件下削减每 kg COD 和氨氮的电耗

Table 2 Energy consumption for elimination of one kilogram COD or ammonia nitrogen under different effluent concentration in various plants

污水厂代号	削减 COD 的最低电耗(kW·h/kg)				削减氨氮的平均电耗(kW·h/kg)			
	出水 COD 浓度(mg/L)				出水氨氮浓度(mg/L)			
	<40	40~50	50~60	>60	<3	3~5	5~8	>8
A	0.36	0.36	0.33	—	6.29	7.1	7.54	22.91
B	0.32	0.32	0.33	—	6.52	6.47	6.78	9.71
C	0.32	0.29	0.29	0.27	6.68	6.16	7.53	7.59
D	0.44	0.42	0.42	0.43	8.21	6.58	7.49	11.47
E	0.45	0.45	0.45	0.37	6.72	6.46	6.99	16.4
F	0.48	0.49	0.5	0.43	8.82	8.37	10.49	10.72
G	0.23	0.22	0.21	0.21	6.08	6.29	6.9	7.66
H	0.74	0.92	—	—	13.82	10.72	10.7	—
I	0.22	0.23	0.22	0.23	12.6	11.9	11.7	12
J	0.26	0.26	0.26	—	10.5	11	11.5	11.5
K	0.76	0.72	0.52	—	11.5	10.4	10.5	15.9
L	0.62	0.53	0.46	—	9.4	8.9	8.7	—
加权均值	0.36	0.35	0.34	0.33	7.62	7.22	8.06	11.77

注：—表示该厂没有这类出水浓度的数据

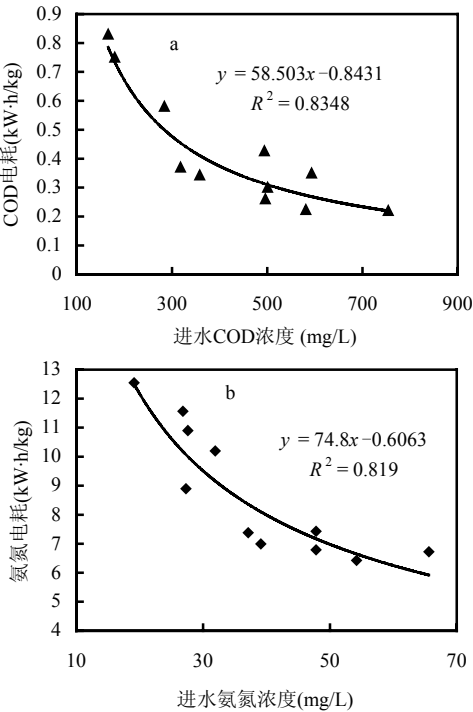


图 5 各厂削减单位污染物负荷的电耗与进水浓度的关系

Fig.5 Energy consumption for elimination of one kilogram COD or ammonia nitrogen with respect to influent concentration in various wastewater treatment plants

因此,污水处理厂的运行成本主要受到进出水浓度、设计规模、水量负荷率的影响,其计算模型可采用如下的表达式:

$$C_i = \frac{aP_i}{\left(37.001 \times Q^{0.0654}\right) f 100}$$

(3)

式中: C_i 为削减单位 COD 总量或氨氮总量所需成本,元/kg; P_i 为 P_{COD} 或 P_{N} ,kW·h/kg; a 为当地电价,元/(kW·h); Q 为设计规模,万 t/d; f 为水量负荷率(实际水量/设计水量×100),%.

当进水和出水 COD 浓度分别为 200~600mg/L 和 30~100mg/L,进水和出水氨氮浓度分别为 20~60mg/L 和 0.5~8mg/L,设计规模为 5~50 万 m³/d,水量负荷率为 70%~100%,当地电价为 0.6 元/(kW·h) 时,采用该成本模型计算污水厂去除 COD 和氨氮所需的电耗分别为 0.22~0.69kW·h/kg 和 5.4~12.8kW·h/kg,所需的运行成本分别为 0.15~0.79 元/kg 和 3.7~14.6 元/kg.污水处理厂出水水质浓度越低,削减单位 COD 和氨氮总量所需的运行成本越高;而当要求出水水质一定时,削减的 COD 和氨氮污染物总量越多,该成本值越低.因此在某一段时间内按照出水浓度确定削减单位 COD 和氨氮总量的运行成本为某一定值并按该值支付运行费用时,污水处理厂削减的

COD 和氨氮污染物总量越多,实际所用的单位污染物总量削减成本越低,从而可以有效激励污水处理厂多削减污染物总量,并促进出水水质的不断改善.

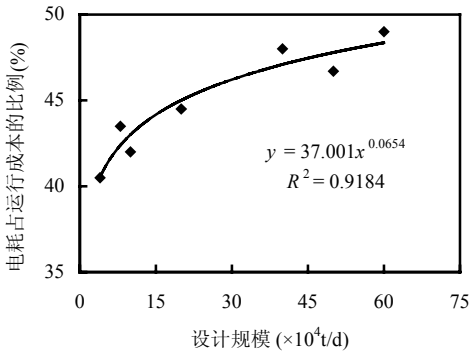


图 6 不同规模污水厂满负荷时电耗占运行成本的比例
Fig.6 Ratio of energy cost to operation cost with respect to treatment capacities under full hydraulic load

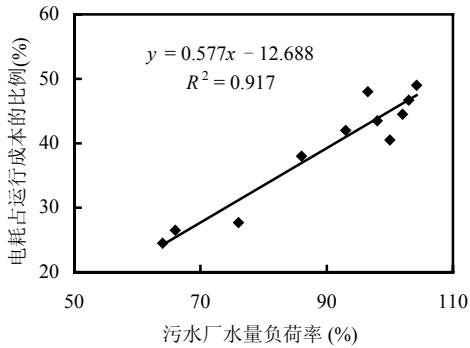


图 7 不同水量负荷率时电耗占运行成本的比例
Fig.7 Ratio of energy cost to operation cost with respect to hydraulic load

4 结论

4.1 污水处理厂的处理水量与削减 COD 和氨氮的总量负荷之间不存在明显的相关性,按吨水费用支付运行成本不能激励污水厂削减更多的 COD 和氨氮总量负荷.

4.2 在处理能力范围内,削减单位 COD 和氨氮总量所用的电耗随着削减负荷的增加而降低,并逐渐趋向稳定值.以削减单位 COD 和氨氮污染物总量所需的电耗为基础核算运行成本可以有效激励污水处理厂更多的削减污染物总量.

4.3 污水处理厂的运行成本主要受到进出水浓度、设计规模、水量负荷率等影响,根据上述因素建立的成本模型直接反映了污水处理厂削减 COD 和氨氮总量所需的运行成本.在给定范围内,该成本模型核算的 COD 和氨氮单位电耗分别为 0.22~0.69kW·h/kg 和 5.4~12.8kW·h/kg,所需的运行成本分别为 0.15~0.79 元/kg 和 3.7~14.6 元/kg.

参考文献:

[1] 仇保兴.落实节能减排任务推进城乡污水处理与安全供水 [J]. 住宅产业, 2007,(11):10-12.

[2] Schulz A, Obenaus F, Egerland B, et al. Elimination costs for different wastewater compounds [J]. Water Sci. Technol., 2003, 47(12):119-124.

[3] Önnérth T B, Nielsen M K, Stamer C. Advanced computer control based on real and software sensors [J]. Water Sci. Technol., 1996, 33(1):237-245.

[4] Samuelsson P, Halvarsson B, Carlsson B. Cost-efficient operation of a denitrifying activated sludge process [J]. Water Research, 2006,41(11):2325-2332.

[5] Yamanaka O, Obara T, Yamamoto K. Total cost minimization control scheme for biological wastewater treatment process and its evaluation based on the COST benchmark process [J]. Water Sci. Technol., 2006,53(4/5):203-214.

[6] 王勤耕,李宗凯,陈志鹏,等.总量控制区域排污权的初始分配方法 [J]. 中国环境科学, 2000,20(1):68-72.

[7] Committee to Assess the Scientific Basis of the Total Maximum Daily Load Approach to Water Pollution Reduction. Assessing the TMDL approach to water quality management [M]. Washington D.C.: National Academy Press, 2001:12-21.

[8] 刘雪梅,何逢标.基于成本性态与 CVP 法的污水处理企业经济分析 [J]. 中国给水排水, 2006,22(14):83-85.

[9] 周 斌.华东地区城市污水处理厂运行成本分析 [J]. 中国给水排水, 2001,17(8):29-30.

[10] OWEN W F. 污水能效与能耗 [M]. 章北平,车 武译.北京:能源出版社, 1989:25-37.

作者简介: 王佳伟(1976-),男,浙江诸暨人,清华大学环境科学与工程系在读博士生,主要从事环境系统分析和污水处理工艺的研究.发表论文 5 篇.