

城镇污水处理工艺优选可持续决策目标 及指标体系探讨

唐 然,龙腾锐,龙向宇

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室,重庆 400045)

摘 要: 分析了我国城镇污水处理工艺优选决策目标,提出污水处理工艺的可持续性符合社会发展方向的工艺优选决策目标,根据污水处理工艺可持续性的定义和我国国情,构建了客观且有可操作性的决策指标体系,为城镇污水处理工艺的优选提供了科学的决策依据。

关键词: 城镇污水处理;工艺优选;可持续性;决策指标

中图分类号: X703. 1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-1556(2008)01-0046-04

Sustainable Target and Indicator System for Urban Wastewater Treatment Processes Selection

TANG Ran, LONG Teng-rui, LONG Xiang-yu

(Key Lab of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The present situation and problems of decision target for urban wastewater treatment process selection are analyzed, and it is advised that sustainability of wastewater treatment process is an advisable and advanced optimal process selection target. On the basis of the definition of sustainable wastewater treatment and China's situation, the indicator system is constructed.

Key words: urban wastewater treatment; optimal process selection; sustainability; indicator system

0 引 言

至 2005 年底,我国 661 个设市城市中,共有 383 个城市建成污水处理厂 792 座,城市污水处理率已达 52%;然而,县城镇的污水处理率仅在 11% 左右,乡镇的不足 1%,乡村更是空白。按照国家“十一五”发展规划要求,到 2010 年,全国设市城市和县城所在建制镇均应规划建设污水集中处理设施,全国设市城市污水处理率不低于 70%,可以预测,城镇污水设施的建设将得到迅猛发展。

污水处理工艺影响工程总投资、污水处理运行费和污染物去除效果,因此处理工艺的优选一直受

到决策者的重视。定性给出选择工艺范围和(或)采用评价指标定量决策最佳工艺是目前常用的工艺优选决策手段,但现有决策目标与指标普遍存在科学性与合理性不足或可操作性差等问题。科学的决策目标是工艺优选的前提,可操作的量化指标体系是实现决策目标的基础,笔者针对我国国情与社会状况,结合可持续发展的要求,提出污水处理工艺优选可持续决策目标,并构建可操作性较强的量化指标体系,为可持续污水处理工艺的选择提供参考。

1 工艺优选决策目标及其可持续性

污水处理过程是人类保护和改善水体水质的重要

* 收稿日期:2007-08-22 修回日期:2007-09-17

基金项目:中国建设部荷兰赠款项目(MOC-NGGP-2003-3)资助。

作者简介:唐 然(1979—),女,博士研究生,主要研究方向为水污染控制与规划。E-mail: tangranhncq@126.com

工程手段,然而该过程同时也消耗了能源、资源(如钢材),并向环境排放废渣(如剩余污泥)、废气(如二氧化碳)等污染物,因此在污水处理工艺的选择过程中,有必要考虑污水处理过程可能产生的负面影响。此外,选择污水处理工艺时还应该结合当地的社会状况与文化习俗,以便更好地发挥环境效益和社会效益。

长期以来,成本效益分析是工程界常用的决策手段——费用最小且收益最大的工艺为最优工艺。由于污水处理收益函数的建立尚未成熟,一般只考虑费用^[1],将这种决策思想用于污水处理工艺决策,其优选结果往往会轻视或忽视环境和资源的价值,导致污水中污染物的转移或造成新的污染。基于上述原因,一些研究者将外部化理论用于污水处理工艺的优选决策,该理论认为费用应由内部费用(如基建费用和运行费用)与外部费用(如对环境、经济和社会造成的损失)组成,然而由于外部费用难以准确量化,在实际应用中通常仍以内部费用最小作为优选决策目标。

随着环境与资源等问题日益突出,近年来有研究者^[2]提倡将“绿色”引入污水处理工艺优选决策的目标,即环境影响小、资源消耗低的工艺是最优工艺。这种决策目标显然是片面的,它轻视了污水处理工艺的经济因素,甚至容易忽略当地居民的接受程度,导致决策结果难以为社会接受。因此,污水处理工艺的决策过程单从经济或环境角度优选工艺是片面的,需要综合考虑技术、经济、环境和社会诸因素。笔者认为,正确的工艺优选决策目标应当着眼于人类与自然环境的和谐统一,正确处理人口、社会经济和资源环境间的关系,实现污水处理的经济性、社会性、资源耗用与环境影响之间的协调。用可持续理论指导污水处理工艺的优选决策——以工艺可持续性的大小作为优选决策的依据,可以实现污水处理的经济性、社会性、资源耗用与环境影响之间的协调。可持续理论是科学处理人口、资源与环境之间矛盾的重要理论^[3],其内涵随着人们价值观和哲学观的发展而完善,通常认为,可持续应从三个方面来理解^[4]:一是经济可持续,即效益超过或等于成本;二是环境可持续,要求保持好各种陆地和水体的环境系统;三是社会可持续,即与一个民族或地区的社会准则相吻合。

2 可持续决策目标的量化指标体系

实现可持续污水处理工艺的优选决策需要建立具有科学性、代表性、意义明确、度量规范、获取方便与结构合理的指标。笔者认为,应当从四个方面来

衡量污水处理工艺可持续性,即技术指标、经济指标、环境指标和社会指标(见图 1)。

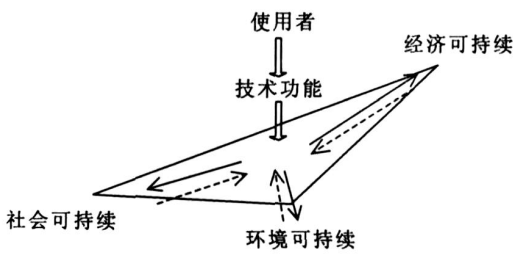


图 1 可持续的污水处理工艺
Fig. 1 Sustainable wastewater treatment process

2.1 技术指标

污水处理工艺的基本作用是保证受纳水体的使用功能,因而工艺的技术可持续性首先应以污水处理过程能达到相应的污水排放标准为准则。当前,我国沿陆海域、各主要淡水湖泊以及三峡库区都有不同程度的富营养化现象,新建城镇污水处理厂大都必须达到脱氮除磷的要求。绝大部分二级处理工艺处理后出水的 BOD、COD、SS 值能达到国家排放标准,对于 TN、TP,只有部分二级处理工艺的出水能满足排放要求^[5]。一方面,磷是造成水体富营养化的主要因素;另一方面,磷是一种重要的不可再生资源,我国的富磷矿储量仅能维持我国使用 10~15 a 时间^[6],从这个角度而言,从污水中回收磷具有重要意义。因此,在满足排放标准的基础上,应考虑污水处理过程从污水中回收磷的潜力。所以,污水处理工艺的技术可持续性应在工艺满足排放标准的基础上结合其对污水中磷的回收潜力来赋值。

目前,从污水中回收磷的主要方式是选取处理过程中溶解性磷富集处,如厌氧池或污泥厌氧消化池的上清液,以鸟粪石或磷酸钙等形式回收磷,而且,富磷液浓度是影响回收量的关键参数之一。厌氧环境可以形成富磷液,富磷污泥有利于提高上清液的含磷量,也就是说生物除磷是磷回收的基础,因此可以工艺的二级处理的除磷效果间接反映处理过程中磷的回收潜力。衡量技术可持续的函数(T)可在工艺满足排放标准的前提下,结合其中二级处理系统对磷的去除率来建立,其表达式为

$$T = \begin{cases} 0 & \text{不达标时} \\ 0.6 + (0.4c) / b_0 & \text{达标时} \end{cases} \quad (1)$$

式中:c 为待选污水处理工艺中二级处理过程的总磷去除率;b₀ 为经典生物除磷工艺的总磷去除率,笔者以 A/O 工艺为参照,取 b₀ = 100 %。该函数借鉴“0 - 1”函数的思想,工艺不满足排放标准,则函数

值为 0;若满足排放标准,先赋值0.6,再以(0.4c)/b描述工艺的磷回收潜能。

2.2 环境指标

目前,国际上已用生命周期法(Life Cycle Assessment, LCA)来评价污水处理工艺的环境影响^[2,7]。然而,LCA要求量大且质高的原始数据,其实际应用受到很大的限制^[7]。而生命周期清单法^[8]可能更适用于衡量污水处理工艺在生命周期内的能量/资源消耗和其他环境影响(如全球变暖、臭氧耗竭等)。生命周期清单法是指对工艺在其整个生命周期阶段的能量与资源消耗,以及向环境的排放进行数据量化分析,以简洁明了的方式表明工艺的环境影响。

2.2.1 能耗

污水处理工艺的能耗包括直接能耗与间接能耗。前者指处理过程耗费的能量,后者包括建材生产和运输、建筑施工、耗用药剂的生产和运输以及工艺拆除报废阶段的能耗。

2.2.1.1 直接能耗

我国城镇污水处理运行能耗主要发生在二级处理系统、污水提升泵房,且前者能耗占总能耗的60%以上。由于各工艺的提升能耗相近,故优选工艺时,可采用二级处理系统的能耗(包括曝气池、二沉池、混合液回流和污泥回流系统、剩余污泥排放单元)反映整个工艺的直接能耗。

衡量污水处理工艺能耗的传统指标是比能耗,它指处理单位体积污水所耗费的外界供给能量。对处理工艺而言,剩余污泥的能量若不回收则会影响环境,若回收则会降低外界供能;其次,有研究者^[9]提出,可持续的污水处理工艺应尽量不用外界供能来生物降解进水有机污染物,并以甲烷等反应产物形式回收进水污染物的能量,即进水污染物的能量也会影响外界供能,而此能耗不能反映它们对总能耗的影响。如果采用能量利用率表示污水处理系统的直接能耗可能更为合理,它不仅考虑了剩余污泥对工艺能耗的影响,而且兼顾了进水污染物本身能量和外界供给能量间的关系。

能量利用率(η)为系统有效耗用能量与外界供给总能量的比值。对于稳定运行的二级处理系统,输入系统的能量包括进水中有机污染物的含能量(简称 $E_{进水}$, $1\text{gCOD} = 13.91\text{ kJ}^{[10]}$)与外界输入系统的能量(简称 $E_{输入}$, 主要指电能, $1\text{ kW} \cdot \text{h} = 3\,600\text{ kJ}$),输出系统的包括出水中有机物含能量(简称 $E_{出水}$)与剩余污泥蕴含的能量(简称 $E_{剩余污泥}$, $1\text{gVSS} = 22.15\text{ kJ}^{[10]}$),系统损失的能量为 $E_{热}$,如图2所示。二级处理系统有效降低的能量为($E_{进水} - E_{出水} - E_{剩余污泥}$),且

二级处理系统回收的能量(简称 $E_{回收}$)也是被系统有效利用的部分,因此系统总有效耗能为($E_{进水} - E_{出水} - E_{剩余污泥}$) + $E_{回收}$ 。 η 的计算公式为

$$\eta = \frac{\text{总有效耗能}}{\text{外界供给总能}} = \frac{(E_{进水} - E_{出水} - E_{剩余污泥}) + E_{回收}}{E_{进水} + E_{输入}} \tag{2}$$

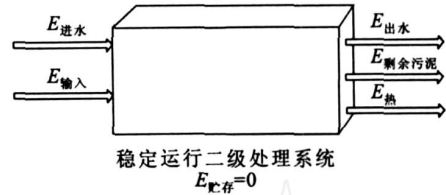


图2 二级处理系统能量平衡图

Fig.2 Energy balance of secondary treatment system

2.2.1.2 间接能耗

分析污水处理工艺间接能耗时,空间边界一般界定为厂界,时间边界通常为15~20a,污水处理工艺的间接能耗体现在施工建设阶段、运行阶段和拆除作业阶段^[11],如图3所示。间接能耗的计算公式为

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = (e_{11} + e_{12} + e_{13}) + (e_{21} + e_{22}) + (e_{31} + e_{32}) \tag{3}$$

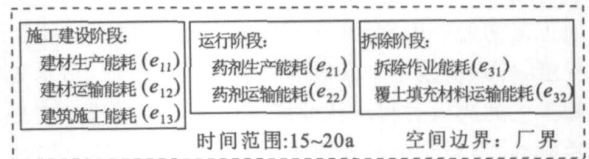


图3 间接能耗示意图

Fig.3 Indirect energy usage

2.2.2 物耗

污水处理工艺的物耗由直接物耗与间接物耗两部分组成,前者主要指处理过程耗费的药剂,后者包括建材、建筑施工与工艺拆除报废阶段的耗用物质。传统的工艺优选决策手段——成本效益分析,采用运行费、征地费和材料费来反映物耗,但是社会的高速发展使土地的珍贵性日益突出,且土地是直接关系到人类可持续发展的重要资源,从这个意义上讲,征地费无法全面反映土地资源的价值。因而,有必要单独考虑处理厂占地,并将其作为物耗指标的重要组成,以便在决策中体现土地资源的价值。

以往研究者常根据《城市污水处理工程项目建设标准》和《小城镇污水处理工程项目建设标准》来对工艺占地赋值^[11],但标准给出的仅是不同建设规模下处理厂的占地指标,不能反映同一建设规模下工艺变化对占地的影响。鉴于二级处理系统占地是工艺占地的主要组成,假设各工艺方案预处理的流程与构筑物通常相似,并且各方案的道路、绿化等公

共设施与辅助建筑物的占地面积类似,工艺优选决策时,可通过二级处理系统(包括生化池、二沉池、污泥处理与处置单元)的占地来大体反映工艺的占地情况。工艺的占地表达式为

$$A = \sum a_i \tag{4}$$

式中: a_i 为二级处理系统各构筑物的平面面积(m^2)。

2.2.3 其他环境影响

近年来,有学者开始研究污水处理厂在全球变暖、臭氧耗竭、光化学烟雾等方面产生的环境影响,然而我国的相关数据极其缺乏,从决策过程的可操作性考虑,目前暂不将其作为评价指标。

2.3 经济指标

由于工艺的能量/资源消耗和产生的环境影响已体现在环境指标中,因而在经济指标中没有必要考虑外部费用,可直接用内部费用的动态年费用指标来衡量经济可持续^[12],计算公式为:

$$W = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot C + Y \tag{5}$$

式中: W 为年费用(万元); C 为工程项目基建投资(万元); Y 为年运行费用(万元/a); i 为年利率; n 为工程寿命期(a)。

2.4 社会指标

污水处理过程的运行与操作人员以及当地居民有紧密的联系,因此其社会可持续性可从居民可接受度与运行管理难易程度两个方面来描述。

可接受度指标可采用“0 - 1”函数来赋值,当工艺被当地人接受时,取值为“1”;若不被接受,则取值为“0”。只有可接受度指标取值为“1”的方案才有资格参与优选决策。

运行管理难易程度主要包括工艺运行稳定性、工艺简洁程度、对自动化要求程度和污泥处理难易4方面,可采用层次分析法(简称 AHP)来量化运行管理难易程度。对于每一个方面,建议采用三级划分法,即优、中、劣3个等级,以0.9、0.5、0.1作为相应取值。

综上所述,笔者构建的污水处理工艺可持续决策指标如表1所示。

3 结 语

污水处理工艺优选的可持续决策目标应能全面、合理地考虑与工艺优选有关的各因素,符合社会发展方向。为便于该目标指导城镇污水处理工艺优选决策,根据污水处理工艺可持续的定义从技术、经济、环

表 1 可持续决策目标的量化指标		
Table 1 Indicators for sustainable selection target		
	指 标	量化方法
技术	技术指标	0 或 $0.6 + (0.4c) / b_0$
	能量利用率	$\frac{(E_{\text{进水}} - E_{\text{出水}} - E_{\text{剩余污泥}}) + E_{\text{回收}}}{E_{\text{进水}} + E_{\text{输入}}}$
环境	间接能耗	$E_1 + E_2 + E_3$
	占地	$\sum a_i$
经济	年费用	$\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \cdot C + Y$
社会	可接受度	0 - 1 函数
	运行管理难易程度	AHP

境和社会4方面建立了可操作的量化指标体系。如果进一步以可持续决策指标体系构建优化决策模型,将能帮助决策者选择可持续的污水处理工艺。

参考文献:

[1] 傅国伟,程声通.水污染控制系统规划[M].北京:清华大学出版社,1985.

[2] Brix, H. How ‘green’ are aquaculture constructed wetlands and conventional wastewater treatment systems? [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 40(3): 45 - 50.

[3] 魏一鸣,傅小锋,陈长杰.中国可持续发展管理理论与实践[M].北京:科学出版社,2005.

[4] 张坤民.可持续发展论[M].北京:中国环境科学出版社,1999.

[5] Von Sperling, M., C. A. L. Chemicharo. Urban wastewater treatment technologies and the implementation of discharge standards in developing countries[J]. *Urban Water*, 2002, (4): 105 - 114.

[6] 荆肇乾,吕锡武.污水处理中磷回收理论与技术[J]. *安全与环境工程*, 2005, 12(1): 29 - 32.

[7] Dixon, A., M. Simon, T. Burkitt. Assessing the environmental impact of two options for small scale wastewater treatment: comparing a reedbed and an aerated biological filter using a life cycle approach[J]. *Ecological Engineering*, 2003, 20: 297 - 308.

[8] 夏青. ISO 14020 系列国际标准教程[M].北京:中国环境科学出版社,2004.

[9] Van Lier J.B., G. Lettinga. Appropriate technologies for effective management of industrial and domestic waste water: the decentralized approach[J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1999, 40(7): 171 - 183.

[10] Owen, W. F. 章北平,车武译.污水处理能耗与能效[M].北京:能源出版社,1989.

[11] Zeng, G., J. Ru, G. Huang, et al. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis [J]. *Environmental Management*, 2007, 82: 250 - 259.

[12] 严煦世,刘遂庆.给水排水管网系统[M].北京:中国建筑工业出版社,2002.

[13] 王洪臣.城市污水处理厂运行控制与维护管理[M].北京:科学出版社,1999.

通讯作者:龙腾锐(1939 -),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为水污染控制与规划。E-mail:long TR @126. com