

# 运用 LCA 方法分析污水再生处理的成本效益

吉倩倩 张琼华 熊家晴 陈荣 王晓昌

(西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710055)

**摘要** 运用生命周期评价(LCA)方法,以西安市北石桥污水净化中心的污水处理与再生利用全过程为例进行环境影响评价,通过清单分析、当量计算和权重分析等一系列分析过程,计算出污水处理过程的投入成本及污水再生处理前后对环境的影响,得出污水在经过处理后,能够很大程度上减小其对环境的影响,从而产生环境正效益。该研究明确了污水处理在环境保护中的重要地位,同时对优化污水处理与再生利用工艺过程具有重要的参考价值和指导意义。

**关键词** 生命周期评价 污水再生处理过程 成本效益 环境效益

中图分类号 X820.3 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2010)03-0517-04

## Application of LCA on cost-effectiveness of urban wastewater reclamation

Ji Qianqian Zhang Qionghua Xiong Jiaqing Chen Rong Wang Xiaochang

(1 Key Laboratory of Northwest Water Resource, Environment and Ecology of Ministry of Education

School of Environmental and Municipal Engineering Xi'an University of Architecture and Technology Xi'an 710055, China)

**Abstract** Life cycle assessment (LCA) is applied in this paper to evaluate the environmental impact of the whole process of urban wastewater treatment and reuse in Xi'an Beishiqiao Sewage Purification Centre. Inventory analysis, equivalent calculation and weight balance were used to calculate input costs and unified the environmental impacts before and after treatment. The conclusion is that after the sewage treatment, the environmental impact is greatly reduced. This paper defines the important position of sewage treatment and has reference value in optimizing wastewater treatment and recycling technology.

**Key words** life cycle assessment, wastewater reclamation process, cost-effectiveness, environmental benefits

随着经济的发展,城市用水量剧增,水资源短缺现象日益严重,污水的再生利用研究越来越受到人们的重视。目前关于污水再生处理工程环境效益的研究主要集中在定性分析上<sup>[1]</sup>,定量的分析还很少,主要集中在价值理论方面,如万玉山等<sup>[2]</sup>采用分类计算和排污收费的方法分析了再生水的环境成本;王巧<sup>[3]</sup>从工程建设的角度分析了污水再生利用工程整个生命周期的环境影响。本研究运用生命周期评价(LCA)方法,以西安市北石桥污水净化中心为研究对象,对城市污水二级处理和深度处理各单元过程的材料消耗、能量消耗以及污染物的排放进行定量化分析,运用负荷模型、当量模型和层次分析法对多种环境影响因素进行单一化处理,得出城市污水处理前后的环境效益值,反映了污水经过处理能减少其对环境的影响。

### 1 研究方法与研究对象

生命周期评价是一种评价产品、工艺或活动从

原材料采集,到产品生产、运输、分配、使用以及最终处置整个生命周期阶段有关的环境负荷的方法。首先确定出整个生命周期阶段的物质能量消耗以及环境释放,再评价其对环境的影响。生命周期评价的主要环境影响是资源消耗、人体健康以及生态影响3个方面<sup>[4]</sup>。国际环境毒理学和化学学会(SETAC)以及ISO14040标准把LCA的实施步骤分为目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释4个步骤。

选取西安市北石桥污水净化中心为研究对象,该污水净化中心的处理工艺为二级处理+深度处理,如图1所示。评价的规模为50000 m<sup>3</sup>/d。

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50838005);“水体污染控制与治理”国家科技重大专项课题(2008ZX07317-004)

收稿日期:2009-05-07 修订日期:2009-07-02

作者简介:吉倩倩(1985~),女,硕士研究生,主要从事城市水环境系统研究工作。E-mail:jqq029@yahoo.com.cn

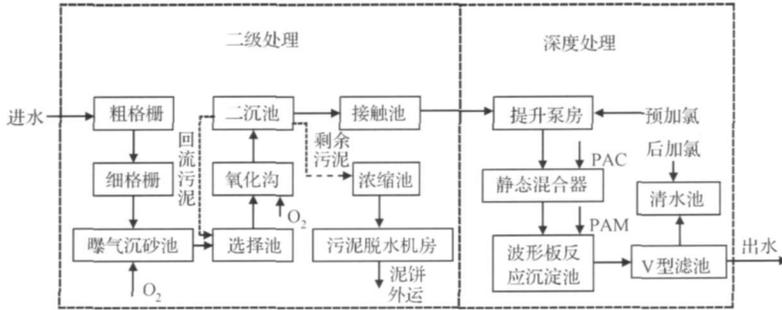


图1 北石桥污水净化中心再生水处理工艺流程

Fig. 1 Treatment process of reclaimed water in Beishiqiao sewage purification center

2 评价过程

2.1 清单分析

清单分析是指对生产过程中各单元的输出和输入数据进行分析统计和计算。通过对北石桥污水净化中心二级处理、深度处理及污泥处理各单元分析,结合处理水量计算可得资源消耗清单<sup>[5]</sup>(表1)。根据各处理单元机械设备的功率以及利用系数,可得能量消耗清单<sup>[6]</sup>(表2)。根据处理过程中的物质消耗和能量消耗查阅相关资料得到环境排放清单<sup>[7]</sup>(表3)。

表1 北石桥污水净化中心处理过程资源消耗清单

Table 1 Material consumption of treatment process in Beishiqiao sewage purification center

处理单元	物料种类	物料数量
二级处理	鼓风量	972.68m <sup>3</sup> /h
	Cl <sub>2</sub> 投加量	50 kg/d
深度处理	PAC	1.500 kg/d
	PAM	10 kg/d
污泥处理	剩余污泥量	2.273.68 kg/d

表2 北石桥污水净化中心处理过程能量消耗清单

Table 2 Energy consumption of treatment process in Beishiqiao sewage purification center

处理工艺	能耗 (10 <sup>6</sup> kJ/d)		
	直接能耗	间接能耗	
二级处理	粗格栅与提升泵房	3.63	-
	细格栅与曝气沉砂池	0.63	-
	厌氧混合池与氧化沟	16.06	-
	二沉池与污泥泵房	1.37	-
深度处理	提升泵房	2.00	0.32
	静态混合器	-	11.80
	反应沉淀池	-	0.08
	滤池	1.32	-
污泥处理	清水池及加压泵房	10.54	0.79
	污泥浓缩池	-	-
	匀质池	1.5	-
	污泥脱水机房	-	0.07
合计		50.11	

表3 北石桥污水净化中心处理过程环境排放清单

Table 3 Environmental emissions of treatment process in Beishiqiao sewage purification center

大气污染物		液体污染物		固体污染物	
种类	数量 (kg/d)	种类	数量 (kg/d)	种类	数量
CO <sub>2</sub>	27.8	N	375	栅渣量	2.5m <sup>3</sup> /d
CO	3.64	P	75	沉砂量	1.5m <sup>3</sup> /d
NO <sub>x</sub>	0.11	Hg	2.5	泥饼外运	121.32 kg/d
SO <sub>2</sub>	34.27	Cd	5		
NH <sub>3</sub>	0.104	Cu	50		
NO <sub>2</sub>	13.82				

2.2 影响评价

影响评价是LCA评价的最终目的,是对清单分析的结果进行定性或定量分析。包括分类、特征化和量化3个步骤。

2.2.1 分类

分类就是将生命周期清单分析(life cycle inventory, LCI)中输入和输出数据归到不同的环境类型的过程<sup>[8]</sup>。

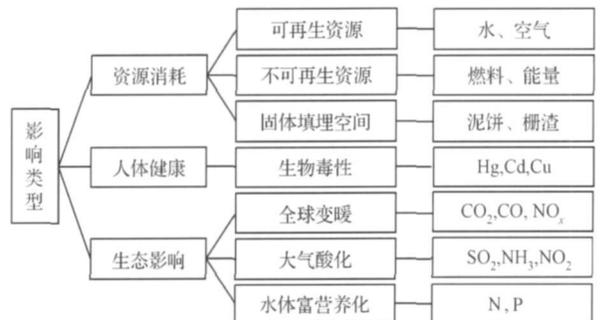


图2 生命周期评价的环境影响分类

Fig. 2 Categories of environmental impact in life cycle assessment

2.2.2 特征化

特征化模型主要有负荷模型、当量模型。根据不同的环境影响类型选择不同的模型<sup>[9]</sup>。本研究对资源消耗采用负荷模型、对生态影响和人体健康采用当量模型。

(1) 负荷模型 (成本模型)

资源消耗中不可再生资源在投入成本中占有很大的比重, 可再生资源和土地占用比重较小, 不予考虑。根据清单分析结果, 再生水生产过程的总能耗为  $50.11 \times 10^6 \text{ kJ/d}$  相当于  $13919 \text{ kW h/d}$  ( $1 \text{ kW h} = 3600 \text{ kJ}$ )。按  $1 \text{ kg}$  标准煤可以发  $3 \text{ kW h}$  电计算<sup>[10]</sup>,  $13919 \text{ kW h}$  电耗等价于消耗  $4.6 \text{ t}$  标准煤。通过负荷模型将能耗转化为不可再生资源的消耗, 从而分析出污水处理过程的投入成本。资源消耗种类和数量如表 4 所示。

表 4 资源消耗种类与数量

Table 4 Species and quantity of resource consumption

影响类型	影响物质	数量
可再生资源消耗	空气	$972.68 \text{ m}^3/\text{h}$
不可再生资源消耗	标准煤	$4.6 \text{ t/d}$
土地占用	泥饼外运	$121.32 \text{ kg/d}$
	栅渣	$2.5 \text{ m}^3/\text{d}$

(2) 当量模型 (效益模型)

当量模型主要用来分析生态影响和人体健康影响。采用的方法是对每一种影响类型选定一种物质作为指示物, 其他物质对环境的影响就用该指示物来衡量。每一种物质与指示物之间有一个当量关系, 其数值即为当量值, 指示物的当量值为 1。当量值一般由实验测定, 或用经验公式算得。研究采用英国 ICI 公司评价和报告环境状况的新指标——环境负荷 (EB)<sup>[11]</sup>。首先确定每种排放物对各自影响类型的潜能因子 PF (即当量值), 再用每一种物质的排放量与 PF 相乘得到 EB 的值。

为了量化污水处理再生过程的环境效益, 利用当量模型对污水处理前后的环境效益进行对比。由于污水处理过程中的环境影响相对处理前后的环境影响较小。所以只计算出污水未处理时与处理后的环境影响。根据北石桥污水净化中心进厂水水质<sup>[12]</sup>、深度处理后回用水水质<sup>[14]</sup>以及处理水量, 再综合 ICI 公司确定的环境类别及各物质的 PF 值<sup>[11]</sup>, 得出各阶段的环境影响 (表 5)。

表 5 各类排放物的环境负荷统计表

Table 5 Environmental load of various types of emissions

影响类型	影响物质	数量	PF	EB	总 EB
全球变暖	① 有机物	6600	3852	$2.5 \times 10^7$	$2.5 \times 10^7$
	$\text{NO}_x$	5	40	200	
大气酸化	② 有机物	500	3852	$1.9 \times 10^6$	$1.9 \times 10^6$
	① 酸性物质	$1.3 \times 10^{-3}$	1	$1.3 \times 10^{-3}$	
水体富营养化	$\text{NH}_3$	1725	1.88	3243	940
	② 酸性物质	$1.6 \times 10^{-3}$	1	$1.6 \times 10^{-3}$	
生物毒性	$\text{NH}_3$	500	1.88	940	3243
	N	935	1	935	
富营养化	① P	410	0.067	27.47	753.35
	N	750	1	750	
②	P	50	0.067	3.35	17.65
	Cu	0.15	1	0.15	
①	Zn	1.6	0.125	0.2	17.65
	Mn	13	1	13	
②	Cr	13	0.33	4.3	5.075
	Fe	15	0.005	0.075	
	$\text{Cl}_2$	10	0.5	5	

注: ①未处理的污水; ②处理后的回用水

2.2.3 量化

量化过程主要针对生态影响和人体健康影响。通过确定不同环境影响类型的权重, 得到总的环境影响水平。因此为了计算出综合环境影响指标, 必须给出各影响类型的权重系数。研究中采用层次分析法 (AHP) 来计算权重, 以西安市当地不同环境影响的重要性为判断依据, 将不同环境因子的生态重要性进行标度, 详见表 6。

表 6 环境影响重要性标度表

Table 6 Important degree of environmental impact

影响类型 ( $b_{ij}$ )	全球变暖	大气酸化	水体富营养化	生物毒性
全球变暖	1	2	3	4
大气酸化	1/2	1	2	3
水体富营养化	1/3	1/2	1	2
生物毒性	1/4	1/3	1/2	1

由标度结果组成的判断矩阵按列正规化:

$$\bar{b}_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{k=1}^n b_{kj}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \text{ 结果为:}$$

$$\begin{bmatrix} 0.48 & 0.52 & 0.46 & 0.4 \\ 0.24 & 0.26 & 0.31 & 0.3 \\ 0.16 & 0.13 & 0.15 & 0.2 \\ 0.12 & 0.087 & 0.077 & 0.1 \end{bmatrix}, \text{按 } \bar{W}_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \bar{b}_{ij}}$$

每行相加, 再经过正规化, 可得向量  $\bar{W}_i =$

$[0.47 \quad 0.278 \quad 0.160 \quad 0.09]^\top$ , 此即所求特征向量的近似解。

特征向量  $W$  反映了全球变暖、大气酸化、水体富营养化以及生物毒性 4 种影响因素的权重, 用污水处理前后对环境影响的总 EB 值构成的行向量分别与特征向量  $W$  构成的列向量对应相乘, 可得环境效益值分别为  $1.18 \times 10^7$  和  $8.93 \times 10^5$ 。说明污水经过处理后其环境影响减小了 90%, 从而说明了污水处理过程具有较大的环境效益, 其正效益为  $1.09 \times 10^7$ 。

### 3 评价结论

(1) 将生命周期评价方法运用于城市污水处理的成本效益分析上, 使其有了具体的评价指标, 对推进城市污水的资源化及再生水回用具有积极作用和重要的意义。

(2) 通过资源及能量消耗清单分析, 北石桥污水净化中心污水再生处理工艺过程的投入主要是不可再生能源的消耗。

(3) 北石桥污水净化中心再生处理  $5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  污水的能耗折算成标准煤的消耗为 4.6 t/d, 即每天的投入相当于消耗 4.6 t 标准煤。

(4) 通过环境效益的分析, 可以看出污水经过再生处理, 其对环境的影响将减小 90%, 很大程度上缓解了污水对环境造成的影响。

污水再生处理过程的 LCA 成本和环境效益分析为城市污水处理与再生回用工程分析提供了一种行之有效的量化方法, 对同领域其他问题的研究有重要的参考作用。

### 参 考 文 献

[1] 靳俊伟, 刘项, 叶涛. 城市污水处理厂环境影响评价案例

分析. 中国给水排水, 2007, 23 (6): 99~101

- [2] 万玉山, 冯俊生, 王利平, 等. 再生水的环境成本分析. 中国给水排水, 2006, 22(10): 102~105
- [3] 王巧. 污水再生利用工程生命周期评价研究. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2007
- [4] 王寿兵, 杨建新, 胡聃. 生命周期评价方法及其进展. 上海环境科学, 1998, 17(11): 7~8
- [5] 韩洪军, 杜茂安. 水处理工程设计计算. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- [6] 王社平, 王小林. 北石桥污水深度处理再生利用工程设计与运行. 给水排水, 2005, 31(3): 16~20
- [7] 杨健, 陆雍森, 施鼎方. 运用生命周期分析(LCA)评估和选择废水处理工艺. 工业用水与废水, 2000, 31(3): 4~6
- [8] Renou S, Thomas J S, Aoustin E, *et al*. Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA. Journal of Cleaner Production, 2008, 16: 1098~1105
- [9] 邓南圣, 王晓兵. 生命周期评价. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [10] François Vince, Emmanuelle Aoustin. LCA tool for the environmental evaluation of potable water production. Desalination, 2008, 220: 37~56
- [11] 胡尧良. 环境负荷—ICI公司环境评价的新指标. 环境导报, 1999, (2): 29~32
- [12] 王晓昌, 金鹏康, 赵红梅, 等. 城市生活污水中的污染物分类及处理性评价. 给水排水, 2004, 30(9): 38~40
- [13] 董维广, 吕孝江, 刘志涛. 生活污水中金属离子含量的测定与分析. 牡丹江师范学院学报(自然科学版), 2006, 55(3): 35~36
- [14] 王社平, 乔华. 西安市北石桥污水深度处理回用工程设计. 中国市政工程, 2003, 102(2): 38~41