

污水处理工艺的技术经济综合评价方法

徐 冉^{1,2}, 迟成龙^{1,2}, 陈书怡^{1,2}

(1. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 采用八种国内污水处理厂常见的工艺进行技术经济综合评价, 包括普通曝气工艺、水解-好氧工艺、AB 工艺、A/O 工艺、A²/O 工艺、交替式氧化沟工艺、一体化氧化沟工艺和 SBR 工艺。通过抽样调查分析比较了这些处理工艺的处理效果、经济水平和工程实施三大类 13 个评价因子, 建立了多评价因子的参数评价体系并设定其中各项因子的权值。评价采用模糊数学的改进方法, 并将评价结果与专家评价进行比较。结果表明: A²/O、A/O 和交替式氧化沟三大工艺较为适用于大中型城市建设中的污水处理厂, 其中 A²/O 的表现尤为突出。

关键词: 城市污水; 处理工艺; 技术评价; 经济评价; 评价体系

中图分类号: X703

文献标志码: A

Comprehensive Technical and Economic Evaluations of Sewage Treatment Processes

XU Ran^{1,2}, CHI Chenglong^{1,2}, CHEN Shuyi^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Comprehensive technical and economic evaluations were performed for eight kinds of domestic sewage treatment processes commonly used in wastewater treatment plants in China, including conventional aeration, hydrolysis-aerobic process, adsorption biodegradation (AB) method, anacrobic oxic (A/O) method, (A²/O) anaerobic-anoxic-Oxic method, alternating type oxidation ditch, integrated oxidation ditch and sequencing batch reactor (SBR). Three major categories of total 13 evaluation factors, including treatment effect, economic aspect and project implementation were analyzed and compared through a sampling investigation. A multi-factor evaluation system was established and the factor weights were set. Evaluations were performed with fuzzy mathematics method and the results were compared with those of expert

evaluations. Research results show that A²/O, A/O and oxidation ditch are more applicable to the sewage treatment plants in large or medium-sized cities, among which A²/O is particularly prominent.

Key words: urban sewage; treatment process; technical evaluation; economic evaluation; evaluation system

近年来,在加强对工业污染源治理的同时,对城市生活污水的治理已得到了各级政府的重视,选择符合经济发展的污水处理技术就显得至关重要。就当前国际上污水处理发展现状看,并不存在适用于任何场合、有百利而无一弊的污水处理技术,每一种工艺都有一个适用性问题。目前我国城镇污水处理厂设计采用的工艺基本涵盖世界各国的先进工艺,工艺技术水平与国外同类技术水平比较接近,基本满足我国不同地区不同水平的需求。本文抽样调查的污水处理厂为城镇污水厂,涉及的工艺有八大类:普通曝气工艺、水解-好氧工艺、AB 工艺、A/O 工艺、A²/O 工艺、交替式氧化沟工艺、一体化氧化沟工艺、SBR 工艺。建立了多评价因子的参数评价体系,用评价体系对评价样本进行评价,然后将评价结果交由专家再评价,得到建立在科学数据、专家经验和市场认可基础上的结果,评价结果对因地制宜地选择经济适用的污水处理技术以及城市的污水处理工程设计和建设都有着十分重要的意义。

1 污水处理工艺的技术经济综合评价

污水处理工艺技术经济综合评价的评价种类、工具方法很多,而且评价系统的属性、特征及事件的随机性千变万化,各不相同,但究其思维方式却是一致的^[1]。由于这项工作不但具有较复杂的技术性,而且还有很强的政策性,必须同时考虑国民经济发展

战略、地区经济发展战略和行业发展战略,因此必须以被评价项目的具体情况为基础,以国家安全法规及有关技术标准为依据,全面、仔细、深入地开展和完成评价任务。

1.1 污水处理工艺的技术经济综合评价的原则

针对污水处理方案进行技术经济综合评价时,应当坚持以下三个基本原则^[2]:①整体性原则.把污水处理工程如实地看作一个多层次的多维结构的整体,进行技术经济综合分析评价时,既要看到它的内部关系,也要看到它的外部关系,在具体的技术经济综合分析的实践中,尤应注意.②经济性原则.技术方案的经济标准是一个十分重要的评价标准,它不仅在综合衡量和评价技术方案的时候非常重要,而且当不同的技术方案基本上都能满足其他各方面的要求和标准时,经济性对方案的取舍尤为重要,实际上经济性已成为技术方案评价的核心^[3].③可比性原则.技术经济综合分析的实质就是对可以实现某一预定目标的多个方案的选优工作,只有通过比较才能从中选优,要比较就必须建立共同的比较基础和条件,包括需求性的满足、消耗费用、价格指标以及时间上的可比性。

1.2 污水处理工艺技术经济综合评价的内容

污水处理工艺的技术经济综合评价就评价对象而言,可分为工艺的处理效果评价、工艺的经济评价、工艺的工程实施综合评价等方面内容。

就生活污水的处理效果而言,目前主要关注和测定的数值包括:综合型参数(COD, BOD)、富营养化参数(TP, TN)和水质感官类参数(SS)。

经济类参数部分,主要考量前期投入和运行过程中产生的经济费用.这里主要从四个问题来描述其经济性,包括:初期投资、运行费用、占地以及能耗.其中,为消除不同污水处理厂处理负荷对参数的影响,其取值均为单位水处理情况下的结果,即单位均为 $\text{RMB} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

实施类参数,主要评定的是污水处理厂在长期运营过程中的情况,包括其工艺的稳定性、自控实现可能性、二次污染问题(主要针对处理过程中产生的废气、废渣)以及翻修难度四大部分。

1.3 评价方法的选择

污水处理工艺的技术经济综合评价方法主要有专家调查法、单因子评价法、多因子加权评价法和多目标模糊优选模型法等.单因子评价法是指在所有参与评价的因子中,仅使用单项指标所属类作为评价对象,来确定评价目标类别,对照该项目的分类标

准,确定其好坏优劣的方法.这种评价方法简单、直观,通常是对关键因子有特殊要求时采取的一种评价方法,单独评价的因子往往成为整体评价的决定性因子,在污水处理工艺的生态经济综合评价中也经常用到.多目标模糊优选模型评价法是用模糊数学的理论方法,将评价中的模糊信息数值化,再进行定量评价的方法.在进行污水处理工艺技术经济综合评价时,要不可避免地考虑多目标问题.有些影响因素是确定的,有些因素是模糊的,为了协调这些复杂的关系,需要寻找一种能够有效地进行客观评价的方法^[4-5]。

单因子评价法的优点在于结果一目了然,计算简便,但难以达到综合的考量.对于污水处理工艺这一复杂的信息,无法实现客观综合的评价.而常规的模糊优选模型评价法,由于其过程涉及大量数学矩阵计算与专家调查的结果数据,更适合于纯学术概念讨论.本文结合传统的单因子评价与多目标模糊优选模型评价两种方法,在此基础上进行改进,采用改进的多目标综合优选方法。

对于单项因子 $X_j (1 \leq j \leq 13)$, 针对工艺 $A_i (1 \leq i \leq 8)$, 令该因子的平均水平为 \bar{X}_j , 则工艺集 A_{ji} 在单项因子 X_j 中的平均水平则为 \bar{X}_{ji} . $A_1 \sim A_8$ 对应的处理工艺见表1。

为消除不同单项因子之间的数值差,则工艺 A_i 在单项因子 X_j 中的实际表现为 $K_{ji} = X_{ji} / \bar{X}_j$ 。

此外,由于不同评价因子评价的取向不同,分为越大越优型和越小越优型两种.本文中的处理效果类评价因子、技术实施类评价因子中的运行稳定性因子、自控实现可能性因子、二次污染因子属于越大越优型评价因子,而经济类评价因子、技术实施类评价因子中的翻修难度因子则属于越小越优型评价因子.为消除不同因子之间的极限差别,进行综合打分评价,对于越大越优型评价因子,工艺 A_i 在其中的得分为 $K'_{ji} = X_{ji} / \bar{X}_j - 1$; 对于越小越优型评价因子,工艺 A_i 在其中的得分为 $K'_{ji} = 1 - X_{ji} / \bar{X}_j$. K'_{ji} 应落在 $(-1, 1)$ 之间.为了使计算结果更易于比较,对 K'_{ji} 进行进一步归一化处理,使之处于 $(0, 1)$ 之间。

2 污水处理工艺的技术经济综合评价与优化

本文以污水处理厂的 COD, BOD 去除效率, 脱氮、脱磷效率, SS 去除效率, 占地面积, 投资, 运行费用, 能耗, 运行稳定性, 自控实现可能性, 翻修难度,

二次污染,共计 13 个评价因子($X_1 \sim X_{13}$),从处理效果、经济可接受程度、工程实施评价等角度,探讨对污水处理工艺的评价方法.文中的处理效果及经济性参数,以《2010 中国污水处理厂名录》^[6]和调查文献为基本数据来源,分八大类目前国内最常见的处理工艺,各取 10 家目前正在运行的污水处理厂作为代表样本,共 80 家污水处理厂;而工程实施效果评分数据,则以前人进行的专家评分结果为参考^[7-8].其中,污水处理厂选取满足如下条件:①大中型城市污水处理厂,主要处理城市生活污水,日处理规模在 $5 \text{ 万 m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 以上.②投入运行时间超过五年,建厂五年内没有大的工艺变动.

2.1 处理效果部分评价因子

以 COD 处理效率的单因子评价为例.首先转

化可比性,将采集的原始数据经处理换算成单位指标值.在此项比较中,取样本污水处理厂的各自 COD 处理效率为单位指标值($S_{1i} \sim S_{10i}$),具体数据如表 1 所示.其次计算出同一工艺所有污水处理厂的单位指标值的平均值 X_{1i} .在 COD 处理效率因子的比较中,同一污水处理工艺的单位指标平均值为

$$X_{1i} = (S_{1i} + S_{2i} + S_{3i} + S_{4i} + S_{5i} + S_{6i} + S_{7i} + S_{8i} + S_{9i} + S_{10i})/10 \quad (1)$$

然后计算出被调查评价所有工艺的单位指标平均值之和,再求平均值作为该项目定量评价标准,如下式所示:

$$\bar{X}_1 = (X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18})/8 \quad (2)$$

表 1 COD 处理效率表

Tab.1 Chemical oxygen demand (COD) treatment efficiency

处理工艺	A_i	S_{1i}	S_{2i}	S_{3i}	S_{4i}	S_{5i}	S_{6i}	S_{7i}	S_{8i}	S_{9i}	S_{10i}	X_{1i}
普通曝气	A_1	93	91	91	92	94	92	89	93	91	92	91.8
水解-好氧	A_2	93	94	95	92	93	94	96	95	93	91	93.6
AB	A_3	88	87	90	91	90	91	87	91	90	86	89.1
A/O	A_4	96	95	93	94	96	93	94	96	94	94	94.5
A ² /O	A_5	95	96	94	93	94	94	93	94	96	96	94.5
交替式氧化沟	A_6	88	87	90	91	90	91	87	91	90	86	89.1
一体化氧化沟	A_7	84	86	87	85	88	89	85	86	88	86	86.4
SBR	A_8	91	92	92	91	91	89	92	93	94	93	91.8

COD 处理效率指标平均值 X_{1i} 与评价标准 \bar{X}_1 间的比值,即该工艺在 COD 处理效率上的定量评价因子比平均值

$$K_{1i} = X_{1i} / \bar{X}_1 \quad (3)$$

将所得的比平均值转化成带有正负号,可在不同参数间比较的加减评分数.对于 COD 的处理效率,属于越大越优型评价因子,即

$$K'_{1i} = X_{1i} / \bar{X}_1 - 1 \quad (4)$$

将所得的 COD 处理效率评分数进行归一化处理,由此可得 COD 处理效率评价如表 2 所示.

表 2 各处理工艺的 COD 处理效率评价因子评价表

Tab.2 Impact factors of chemical oxygen demand (COD) treatment efficiencies with different treatment processes

处理工艺	比平均值(K_{1i})	COD 处理效率评价因子(K'_{1i})	归一得分
普通曝气	1.005	0.005	0.667
水解-好氧	1.025	0.025	0.889
AB	0.975	-0.025	0.333
A/O	1.035	0.035	1.000
A ² /O	1.035	0.035	1.000
交替式氧化沟	0.975	-0.025	0.333
一体化氧化沟	0.945	-0.055	0.000
SBR	1.005	0.005	0.667

使用同样方法得出处理效果类参数评价表,表 3~6 依次为 BOD 处理效率、TN 处理效率、TP 处理效率和 SS 处理效率评分表.

表 3 各处理工艺的 BOD 处理效率评价因子评价表

Tab.3 Impact factors of biology oxygen demand (BOD) treatment efficiencies with different processes

处理工艺	比平均值(K_{2i})	BOD 处理效率评价因子(K'_{2i})	归一得分
普通曝气	0.998 386	-0.001 610	0.572
水解-好氧	1.008 132	0.008 132	0.714
AB	0.986 946	-0.013 050	0.405
A/O	1.027 729	0.027 729	1.000
A ² /O	1.027 729	0.027 729	1.000
交替式氧化沟	0.998 386	-0.001 610	0.572
一体化氧化沟	0.959 193	-0.040 810	0.000
SBR	0.998 386	-0.001 610	0.572

从处理效率上来看,A/O 和 A²/O 在各项参数中,都占据领先地位,这与目前此两种工艺较为成熟,并被大量使用的现状基本吻合.就脱磷、脱氮效率来看:A/O 工艺、A²/O 工艺、交替式氧化沟工艺明显具有优势,一体化氧化沟类工艺、SBR 工艺、水解-好氧工艺相对来讲也可以根据实际情况选择采用,AB 工艺、普通曝气工艺在这方面显得相对不足.

表 4 各处理工艺的 TN 处理效率评价因子评价表

Tab.4 Impact factors of total nitrogen (TN) treatment efficiencies with different processes

处理工艺	比平均值 (K_{3i})	TN 处理效率 评价因子(K'_{3i})	归一得分
普通曝气	0.803	-0.197	0.000
水解-好氧	0.954	-0.046	0.375
AB	0.934	-0.066	0.325
A/O	1.094	0.094	0.725
A ² /O	1.205	0.205	1.000
交替式氧化沟	1.034	0.034	0.575
一体化氧化沟	0.984	-0.016	0.450
SBR	0.994	-0.006	0.475

表 5 各处理工艺的 TP 处理效率评价因子评价表

Tab.5 Impact factors of total phosphorous (TP) treatment efficiencies with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{4i})	TP 处理效率 评价因子(K'_{4i})	归一得分
普通曝气	0.800	0.796	0.000
水解-好氧	1.000	0.995	0.500
AB	0.980	0.975	0.450
A/O	1.130	1.124	0.825
A ² /O	1.200	1.194	1.000
交替式氧化沟	1.000	0.995	0.500
一体化氧化沟	0.940	0.935	0.350
SBR	0.990	0.985	0.475

表 6 各处理工艺的 SS 处理效率评价因子评价表

Tab.6 Impact factors of suspend solid (SS) treatment efficiencies with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{5i})	SS 处理效率 评价因子(K'_{5i})	归一得分
普通曝气	1.040	1.015	0.800
水解-好氧	1.040	1.015	0.800
AB	1.000	0.976	0.400
A/O	1.060	1.034	1.000
A ² /O	1.060	1.034	1.000
交替式氧化沟	1.020	0.995	0.600
一体化氧化沟	0.960	0.937	0.000
SBR	1.020	0.995	0.600

2.2 经济类评价因子

对于经济类评价因子,以评价因子单位处理水量占地面积为例,采用式(4)得到的各工艺的比平均值如表 7 所示。

从表 7 中可以看出:就单位处理水量的占地面积而言,普通曝气工艺占据明显优势,其次高于平均水平的方法还依次包括 AB 工艺、A²/O 工艺、交替式氧化沟工艺和 A/O 工艺。

依照同样的处理方法,得到其余经济类参数评分见表 8~10。根据表 8,除 SBR 工艺、水解-好氧工艺、交替式氧化沟工艺外,其他工艺的前期投资差别并不大。这是因为工艺研究开始时,经济性是决定其

表 7 各处理工艺的占地面积评价因子评价表

Tab.7 Impact factors of cover area evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{6i})	占地面积评价 因子(K'_{6i})	归一得分
普通曝气	0.911	0.089	1.000
水解-好氧	1.010	-0.010	0.500
AB	0.980	0.020	0.650
A/O	1.000	0.000	0.550
A ² /O	0.990	0.010	0.600
交替式氧化沟	0.990	0.010	0.600
一体化氧化沟	1.010	-0.010	0.500
SBR	1.109	-0.109	0.000

表 8 各处理工艺的投资评价因子评价表

Tab.8 Impact factors of investment evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{7i})	投资评价 因子(K'_{7i})	归一得分
普通曝气	0.981	0.019	0.778
水解-好氧	1.032	-0.032	0.222
AB	0.960	0.040	1.000
A/O	0.981	0.019	0.778
A ² /O	0.981	0.019	0.778
交替式氧化沟	1.032	-0.032	0.222
一体化氧化沟	0.981	0.019	0.778
SBR	1.053	-0.053	0.000

表 9 各处理工艺的运行费用评价因子评价表

Tab.9 Impact factors of operation cost evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{8i})	运行费用评价 因子(K'_{8i})	归一得分
普通曝气	1.009	-0.009	0.556
水解-好氧	1.060	-0.060	0.000
AB	0.968	0.032	1.000
A/O	0.989	0.011	0.778
A ² /O	0.978	0.022	0.889
交替式氧化沟	0.978	0.022	0.889
一体化氧化沟	0.978	0.022	0.889
SBR	1.039	-0.039	0.222

能否被广泛使用的最关键因素之一。

运行费用与投资一样,是决定该工艺能否被广泛使用的最根本也是最关键因素之一,由表 9 可知,除普通曝气工艺、水解-好氧工艺和 SBR 工艺外,其他工艺运行费用相差无几。由此可知,工艺机理没有大的相异,运行费用相差不会很大。

从表 10 可以看出,除水解-好氧工艺外各个工艺能耗相差不大,这是因为能耗很大部分在于提升泵房和鼓风机房的电耗,而提升泵房的电耗主要取决于受纳水体水面高程、进水管底标高以及工艺水力损失,鼓风机房的电耗主要取决于进出水水质情况。

2.3 技术实施类评价因子

就运行稳定性来看,根据表11可以判断出:普通曝气工艺由于出现最早,应用最多,经验积累也最为丰富,运行稳定性最高。A/O工艺、A²/O工艺、氧化沟类工艺(除一体化氧化沟)、SBR工艺运行稳定性良好。相对来讲,应用经验较少的水解-好氧工艺与AB工艺和最近出现的新改型工艺(一体化氧化沟工艺)运行稳定性尚无确切保证。

表10 各处理工艺的能耗评价因子评价表

Tab.10 Impact factors of energy consumption evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{9i})	能耗评价 因子(K'_{9i})	归一得分
普通曝气	1.000	0.000	0.714
水解-好氧	1.053	-0.053	0.000
AB	1.000	0.000	0.714
A/O	0.989	0.011	0.857
A ² /O	0.989	0.011	0.857
交替式氧化沟	0.979	0.021	1.000
一体化氧化沟	0.979	0.021	1.000
SBR	1.011	-0.011	0.571

表11 各处理工艺的运行稳定性评价因子评价表

Tab.11 Impact factors of stability evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{10i})	稳定性评价 因子(K'_{10i})	归一得分
普通曝气	1.059	0.059	1.000
水解-好氧	0.989	-0.011	0.364
AB	0.968	-0.032	0.182
A/O	1.019	0.019	0.636
A ² /O	1.009	0.009	0.545
交替式氧化沟	0.999	-0.001	0.455
一体化氧化沟	0.948	-0.052	0.000
SBR	1.009	0.009	0.545

工艺对于自控要求的高低,将影响工艺稳定性、投资、员工素质等多方面因素。自控要求越低,相对工艺来讲稳定性越高,投资越省,员工素质要求越低。从表12中可以看出:一体化氧化沟类工艺自控水平要求相对低,这也是机械曝气的特点;而SBR工艺、A²/O工艺自控水平要求较高;此外,普通曝气工艺自控水平要求非常高,因为目前普通曝气工艺主要应用于大型和超大型污水处理项目中的缘故。

维修难易是困扰污水处理企业的难题之一,90年代氧化沟工艺代替普通曝气工艺而大量应用,主要是因为微孔曝气器的寿命较短且维修十分不便。从表13可以看出:交替式氧化沟工艺维修最容易;相对而言,SBR工艺由于自控要求高,其维修也比较困难。

表14是对各工艺过程中二次污染可能性的评

表12 各处理工艺的自控实现可能性评价因子评价表

Tab.12 Impact factors of self-control feasibility evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{11i})	自控实现可能性 评价因子(K'_{11i})	归一得分
普通曝气	0.974	-0.026	0.000
水解-好氧	1.014	0.014	0.571
AB	0.994	-0.006	0.286
A/O	1.014	0.014	0.571
A ² /O	0.984	-0.016	0.143
交替式氧化沟	0.994	-0.006	0.286
一体化氧化沟	1.044	0.044	1.000
SBR	0.984	-0.016	0.143

表13 各处理工艺的翻修难度评价因子评价表

Tab.13 Impact factors of repair difficulty evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{12i})	翻修难度 评价因子(K'_{12i})	归一得分
普通曝气	1.026	0.026	0.800
水解-好氧	0.984	-0.016	0.000
AB	0.984	-0.016	0.000
A/O	1.026	0.026	0.800
A ² /O	1.021	0.021	0.700
交替式氧化沟	1.036	0.036	1.000
一体化氧化沟	0.995	-0.005	0.200
SBR	0.984	-0.016	0.000

分汇总结果,除AB法工艺容易产生二次污染问题,其他工艺在此问题上的效果基本相同。AB法由于其前端难控制,容易产生废气,包括硫化氢、大粪素等恶臭气体,加上其A段污泥产量高,需要大量后续处理,相对其他工艺,更容易出现二次污染问题。

表14 各处理工艺的二次污染评价因子评价表

Tab.14 Impact factors of secondary pollution evaluation with different treatment processes

处理工艺	比平均值 (K_{13i})	二次污染 评价因子(K'_{13i})	归一得分
普通曝气	1.013	0.013	1.000
水解-好氧	1.013	0.013	1.000
AB	0.910	-0.090	0.000
A/O	1.013	0.013	1.000
A ² /O	1.013	0.013	1.000
交替式氧化沟	1.013	0.013	1.000
一体化氧化沟	1.013	0.013	1.000
SBR	1.013	0.013	1.000

2.4 综合评价结果

设多目标评价问题的工艺集为 $A=(A_1, A_2, \dots, A_8)$, 目标集为 $X=(X_1, X_2, \dots, X_{13})$, 则8个工艺对13个评价因子的决策特征值矩阵为

$$M = (X_{ji}), \quad i = 1, 2, \dots, 8, j = 1, 2, \dots, 13$$

(5)

将式(5)中各指标按照越大越优或越小越优,进行归一化处理,转化为各指标相对于优的相对隶属度,计

算公式分别为
越大越优型指标

$$K''_{ji} = \frac{X_{ji} - X_{ji}^{\min}}{X_{ji}^{\max} - X_{ji}^{\min}} \quad (6)$$

越小越优型指标

$$K''_{ji} = \frac{X_{ji}^{\max} - X_{ji}}{X_{ji}^{\max} - X_{ji}^{\min}} \quad (7)$$

式中: K''_{ji} 为工艺 i 第 j 个评价因子对优的相对隶属度; X_{ji}^{\min} , X_{ji}^{\max} 分别为工艺 i 第 j 个评价因子的最小和最大值。

评价因子权重的确定, 熵是一个系统的状态函数, 是系统无序度的一种度量工具, 熵值大小标志着系统发展的阶段和层次。熵越大, 系统越不确定、越无序; 反之, 系统越确定、越有序。根据分层多目标矩阵指标的构成(见式(5)), 对式(5)进行归一化转化为相应的隶属度矩阵, 结合熵的性质, 定义工艺 i 的第 j 个评价因子的熵为

$$H_j = k \sum_{i=1}^8 f_{ji} \ln f_{ji}, j = 1, 2, \dots, 13, 0 \leq H_j \leq 1 \quad (8)$$

式中: $f_{ji} = \frac{K_{ji}}{\sum_{i=1}^8 K_{ji}}$, 假定当 $f_{ji} = 0$ 时, $f_{ji} \ln f_{ji} = 0$,

$k = \frac{-1}{\ln 8}$. 第 j 个评价因子的权重

$$\omega_j = \frac{1 - H_j}{13 - \sum_{j=1}^{13} H_j} \quad (9)$$

根据权重的性质, 评价对象的熵与其权重成反比, 熵越大, 权重越小, 且满足 $0 \leq \omega_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^{13} \omega_j = 1$; 各评价对象在评价因子 X_j 上的值完全相同时, 熵值为最大值 1, 权重为 0, 意味着该指标向决策者未提供任何有用的信息, 可以考虑取消该指标。

因此, 通过对各个评价因子权重的确定, 综合三大类项目 13 个评价因子的综合比较(见表 15), 其中每个工艺 A_i 的得分为 X_j 与对应权重 ω_j 的乘积之和。对于大中型城市, 更为合理的污水处理方法排序如下: A^2/O 工艺 > A/O 工艺 > 交替式氧化沟工艺 > 普通曝气工艺 > 一体化氧化沟工艺 > 水解-好氧工艺 > AB 工艺 > SBR 工艺。结果与目前的大型污水处理厂选择工艺的方向基本一致, 评价结果与专家评价的结果基本一致, 说明此技术经济综合评价的方法是合理的。

表 15 综合评价结果

Tab. 15 Comprehensive evaluation results

评价因子	ω_j	H_j	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8
X_1	0.078	0.898	0.667	0.889	0.333	1.000	1.000	0.333	0.000	0.667
X_2	0.067	0.913	0.572	0.714	0.405	1.000	1.000	0.572	0.000	0.572
X_3	0.075	0.902	0.000	0.375	0.325	0.725	1.000	0.575	0.450	0.475
X_4	0.073	0.905	0.000	0.500	0.450	0.825	1.000	0.500	0.350	0.475
X_5	0.064	0.916	0.800	0.800	0.400	1.000	1.000	0.600	0.000	0.600
X_6	0.060	0.921	1.000	0.500	0.650	0.550	0.600	0.600	0.500	0.000
X_7	0.091	0.882	0.778	0.222	1.000	0.778	0.778	0.222	0.778	0.000
X_8	0.075	0.902	0.556	0.000	1.000	0.778	0.889	0.889	0.889	0.222
X_9	0.056	0.927	0.714	0.000	0.714	0.857	0.857	1.000	1.000	0.571
X_{10}	0.086	0.888	1.000	0.364	0.182	0.636	0.545	0.455	0.000	0.545
X_{11}	0.091	0.881	0.800	0.000	0.000	0.800	0.700	1.000	0.200	0.000
X_{12}	0.128	0.834	0.000	0.571	0.286	0.571	0.143	0.286	1.000	0.143
X_{13}	0.049	0.935	1.000	1.000	0.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
总得分	1	11.704	0.608	0.359	0.357	0.878	0.898	0.657	0.429	0.298

3 结论

以污水处理厂的 COD, BOD, SS 去除效率, 脱氮脱磷效率, 运行稳定性, 自控实现可能性, 翻修难度, 二次污染, 能耗, 投资, 运行费用和占地面积为评价因子, 从处理效果、经济可接受程度、工程实施评价等角度, 综合评价了普通曝气工艺、水解-好氧工艺、

AB 工艺、 A/O 工艺法、 A^2/O 工艺、交替式氧化沟工艺、一体化氧化沟工艺和 SBR 工艺等国内八种常见的污水处理工艺。研究发现 A^2/O , A/O 和氧化沟三大工艺较为适用于大中型城市建设中的污水处理工艺, 其中 A^2/O 工艺的表现尤为突出。污水处理工艺多种多样, 目前存在且仍被采用即说明有其特点和适用性, 当评价污水处理工艺的技术与经济综合评

(下转第 931 页)