

基于层次分析法的屠宰废水处理技术性能评估*

何 祥 谷文艺 王勇勇 王 凡 傅金祥

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要 对废水处理技术性能的综合评估是提高废水处理效率的主要途径,同时也能提高处理技术的经济性。采用层次分析法(AHP)对屠宰废水的处理技术进行优选。利用实验室中试实测 COD、TN 和 TP 的去除率,并结合专家咨询法对判断矩阵进行赋值。以 3 套组合工艺作为方案层,综合效益作为目标层,经济效益、技术性能、管理效益作为准则层建立层次模型和判断矩阵。通过判断矩阵中各因素标度与权重,优选了屠宰废水最佳处理方案为上流式厌氧污泥床(UASB)/序批式活性污泥法(SBR)组合工艺。AHP 为屠宰废水处理技术产业化过程中的性能评估提供了科学依据。

关键词 屠宰废水 中试 层次分析法 优选

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.09.019

Performance evaluation of slaughter wastewater treatment technology based on AHP HE Xiang, GU Wenyi, WANG Yongyong, WANG Fan, FU Jinxiang, (School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang Liaoning 110168)

Abstract: Evaluating wastewater treatment performance is a main approach to improve treatment efficiency and can play an important role in strengthening the economic benefits. AHP was used to optimize slaughter wastewater treatment technology. The removal efficiencies of COD, TN and TP obtained from pilot test were combined with expert judgments to assign the judgement matrix. Three slaughter wastewater treatment combined processes were taken as the project layer, comprehensive benefit as the target layer, the feasibility of three combined processes in economy, technology and management benefit as the objective evaluation layer, then hierarchical model and judgement matrix were established. The optimum slaughter wastewater treatment process was UASB/SBR through calculating the scale and priority of factors in judgement matrix. AHP provided scientific evaluation basis for industrialization of slaughter wastewater treatment.

Keywords: slaughter wastewater; pilot test; AHP; optimization

层次分析法(AHP)是一种定性分析与定量分析相结合的多准则决策方法,还可作为一种优化技术,特别是将决策者的经验判断给予量化,在目标或因素结构复杂且缺乏必要数据的情况下显得更实用^[1]。AHP 的整个分析过程体现了人的决策思维的基本特征,即分解、判断和综合^[2]。目前 AHP 已经发展成为成熟的方法,并被广泛应用于社会、经济、生活污水处理厂工艺筛选等多方面领域^[3-6],但鲜有 AHP 被应用于特种污水处理技术优选的报道。

屠宰废水作为一种典型的高浓度有机废水,其所含的污染物主要以溶解性有机物、胶体和悬浮物的形式存在^[7]。已有大量针对屠宰废水的工艺研究与设计^[8-9],但在实际产业化过程中,包括投资成本、环境效益、设备稳定性在内的部分定性定量指标没

有合理统筹,造成实验室最佳方案与实际工程存在偏差。本研究选用 3 套实验室中试组合工艺:上流式厌氧污泥床(UASB)/膜生物反应器(MBR)、UASB/序批式活性污泥法(SBR)、厌氧生物滤池(AF)/生物接触氧化,根据其处理效果,采用 AHP 从经济效益、技术性能和管理效益 3 方面优选出最佳处理方案。

1 层次模型

1.1 层次模型的建立

层次模型的建立是 AHP 的基础,构建合理有效的层次模型有助于 AHP 分析结果的可靠性和科学性^[10-12]。构建的层次模型如图 1 所示。本研究将工艺综合效益(A)作为目标层,经济效益(B₁)、技术

第一作者:何 祥,男,1989 年生,博士研究生,主要从事水污染控制工程研究工作。

*“十二五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(No.2012ZX07505-003-01)。

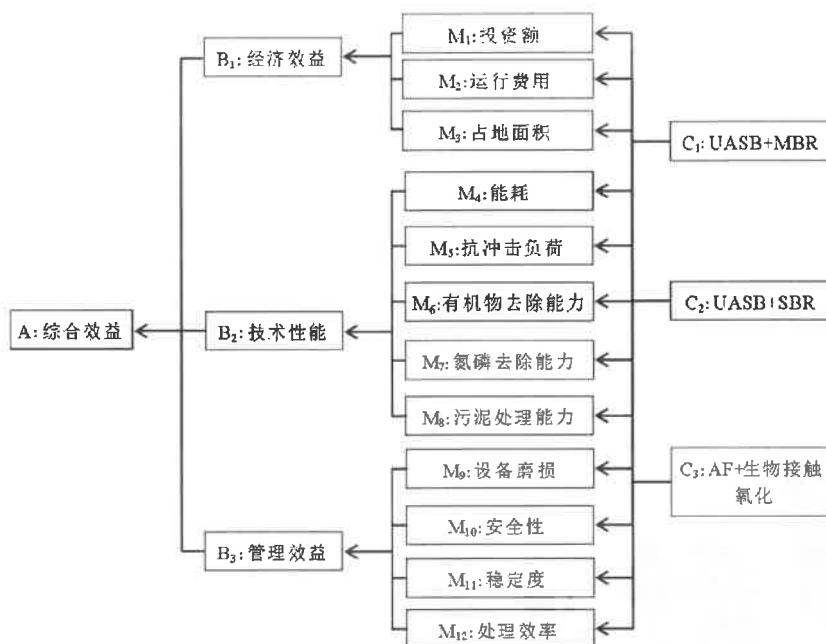


图1 屠宰废水处理方案的评价指标体系

Fig.1 Evaluation criteria system of slaughter wastewater treatment process

性能(B₂)和管理效益(B₃)作为第1准则层,投资额等12个指标(M₁~M₁₂)作为第2准则层,各组合工艺(C₁~C₃)作为方案层。

1.2 取值标准的确定

AHP的应用过程中,需要针对评价对象的性质和特点,建立相应的指标体系,再按照指标体系确定多层次的评价结构模型。其中指标体系包括体系参数、指标间的关系和取值标准3个方面的内容。取值标准的确定可采用专家咨询法和实验数据结论法。

1.2.1 专家咨询法

选择不同层次的环保技术人员和管理人员,通过参加讨论会和专家咨询会这两种方式,了解这些人员对工业污水处理关键技术评价的认识以及对影响污水处理设计运行中关键点的认知,再对结果进行统计分析;在所给出的众多的影响因素中选出3个指标作为AHP准则层的指标;然后,通过问卷调查的形式进行调查分析,最终确定每个指标的相对重要性权值及取值范围;最后,根据以上调查结果归纳统计出每个准则的相对重要性权值及取值标准。

1.2.2 实验数据结论法

对专家模糊判断或可通过实验室准确得出结论的目标,采取实验室中试进行测定,获得包括M₅、M₆、M₇、M₈及M₁₁等指标的优劣性,列入判断矩阵。

2 实验室中试结果及相应判断矩阵的构建

中试从启动到结束共进行了16个月,期间记录各反应器启动及运行情况,通过调节水力停留时间(HRT)及回流比,使系统出水稳定并达到最佳情况。屠宰废水试验的原水取自沈阳某屠宰场,经混凝/气浮预处理后进入生物段处理,3套组合工艺中涉及的装置见图2。

2.1 组合工艺的COD去除效果及M₆判断矩阵

2.1.1 组合工艺COD去除效果

由图3可知,预处理后进入生物段处理的屠宰废水COD平均值为836.5 mg/L。通过C₁、C₂和C₃处理后,出水COD分别维持在35.5、32.4、41.4 mg/L左右,去除率分别约为95.8%、96.2%、95.1%,3套组合工艺的COD去除效果表现为C₂>C₁>C₃。3套组合工艺的COD出水小于《污水综合排放标准》(DB 21/1627—2008)中的COD排放限值(50 mg/L)。

2.1.2 构建M₆判断矩阵

判断矩阵中各元素的取值反映了人们对各元素相对重要性(如优劣、偏好、强度等)的认识,一般采用1~9及其倒数的标度方法^[13],见表1。

根据实验数据对3套组合工艺进行对比赋值,建立M₆判断矩阵后计算特征向量(W)并检验判断矩阵一致性,见表2。

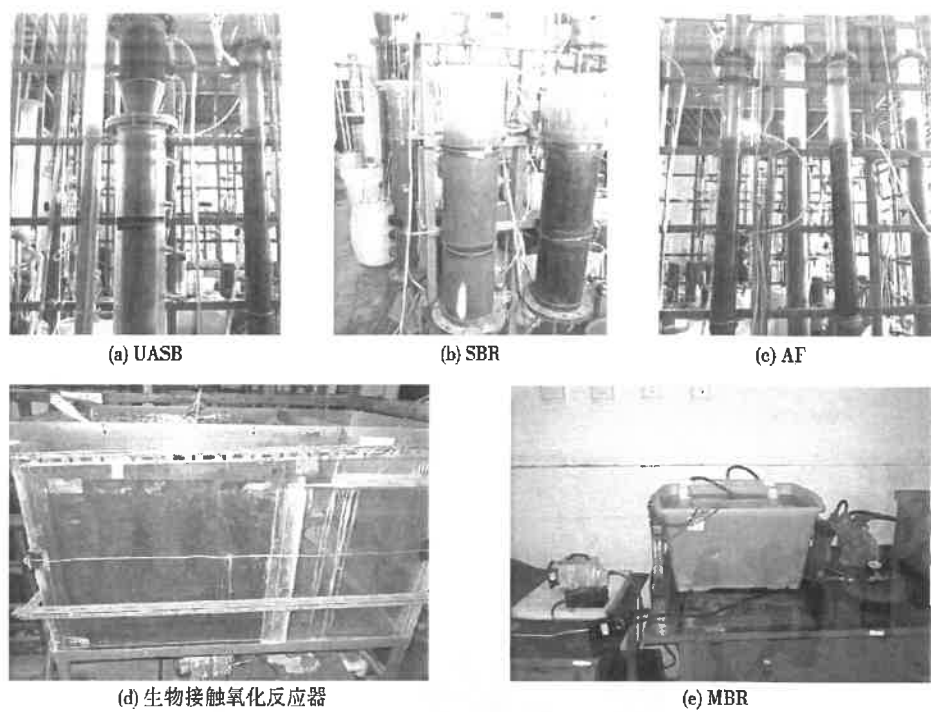


图2 中试装置图
Fig.2 The pilot test devices

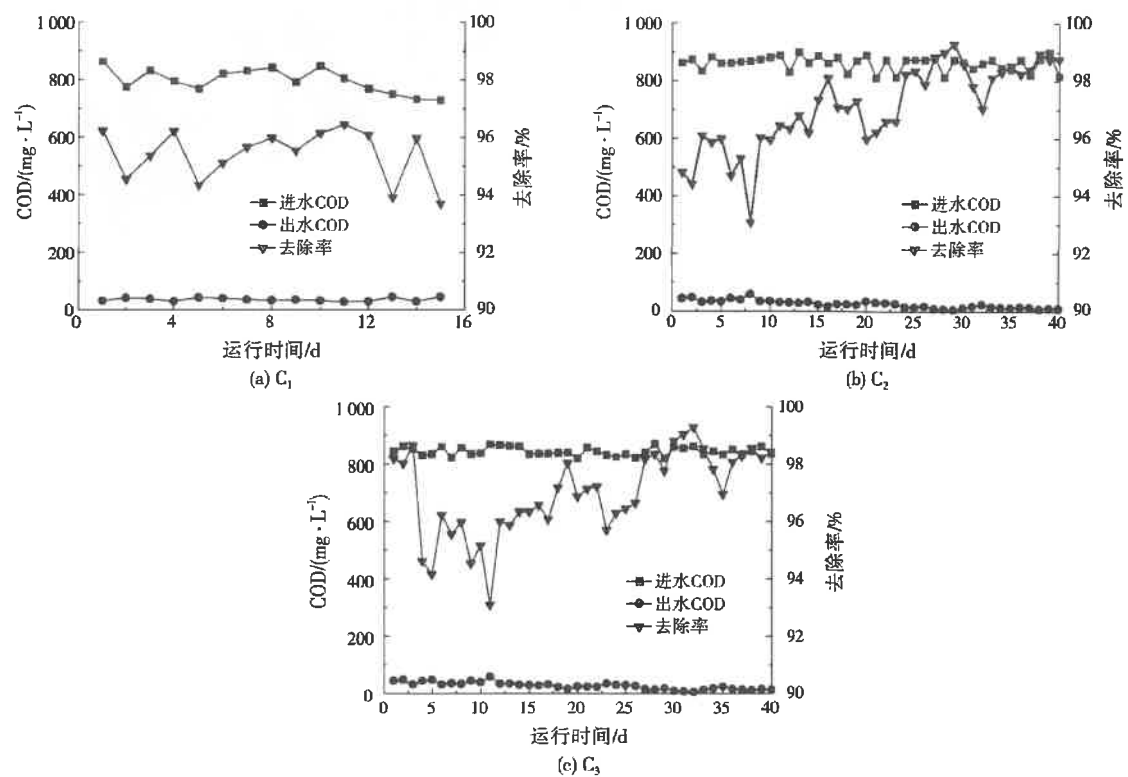


图3 组合工艺稳定运行期间对 COD 的去除效果
Fig.3 COD removal effect of combined processes during the stable operation

根据表 2 计算得出 M_6 判断矩阵的最大特征根 判断矩阵的一致性。
($\lambda_{\max}$) 为 3.018 3, 再根据式 (1) 和式 (2)^[14] 检验 M_6

$$CI = (\lambda_{\max} - N) / (N - 1) \tag{1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

式中: CI 为判断矩阵偏离度; N 为判断矩阵阶数; CR 为判断矩阵随机一致性比率; RI 为判断矩阵具有一致性的临界值。

表1 判断矩阵标度及其含义

Table 1 Judgement matrix scale and its meaning

标度	含义
1	表示两个元素同等重要
3	表示一个元素比另一个元素稍微重要
5	表示一个元素比另一个元素明显重要
7	表示一个元素比另一个元素强烈重要
9	表示一个元素比另一个元素极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值

表2 M_6 判断矩阵及其特征向量

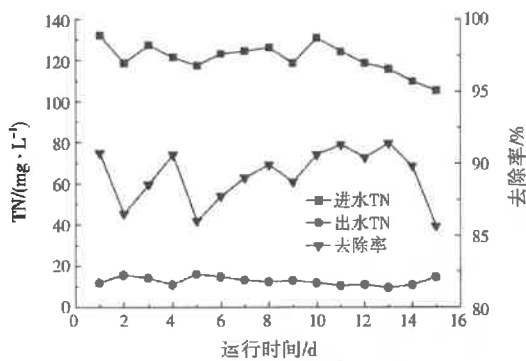
Table 2 Judgement matrix for M_6 and its eigenvector

组合工艺	C_1	C_2	C_3	W
C_1	1	1/2	2	0.297 2
C_2	2	1	3	0.539 0
C_3	1/2	1/3	1	0.163 8

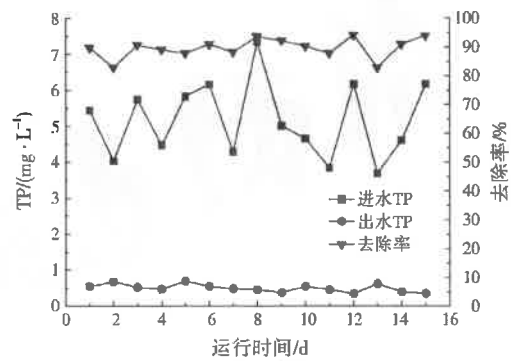
当 $N=3$ 时, $RI=0.58$, 则计算可得 $CR=0.015 8$, $CR<0.1$, 因此该判断矩阵满足一致性, 判断矩阵的赋值合理。其他判断矩阵也依照相同原理构造并检验一致性。

2.2 组合工艺对 TN、TP 的去除效果及判断矩阵

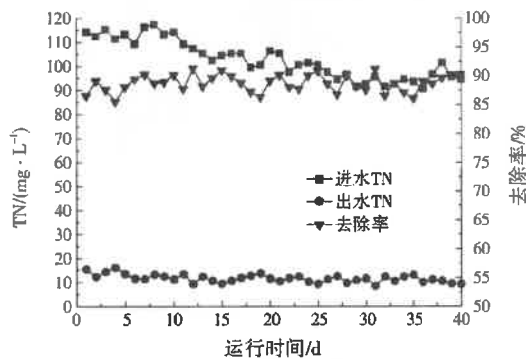
由图4可见, 进水 TN 维持在 110 mg/L 左右, 通过 C_1 、 C_2 和 C_3 处理后, 出水 TN 分别维持在 13.0、



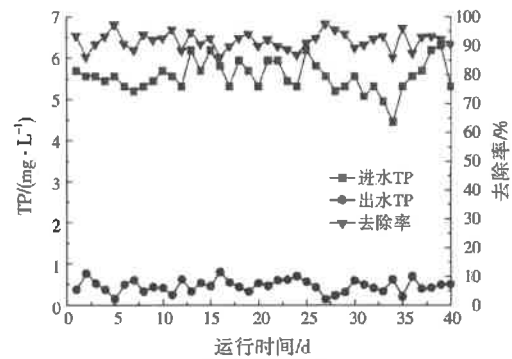
(a) C_1 的除氮效果



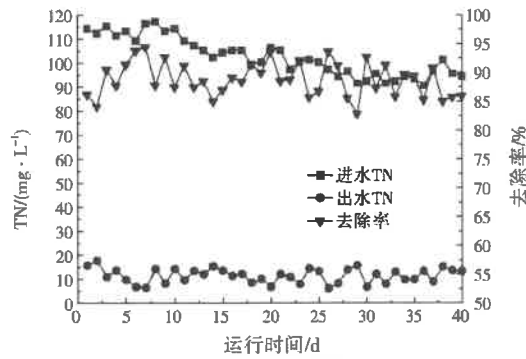
(b) C_1 的除磷效果



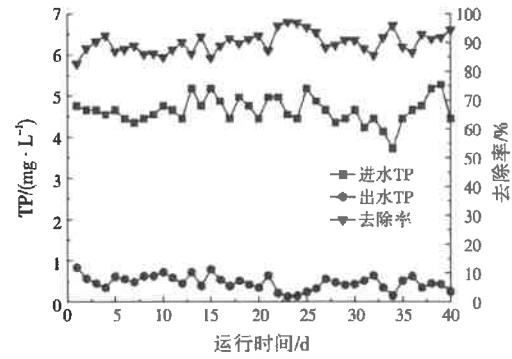
(c) C_2 的除氮效果



(d) C_2 的除磷效果



(e) C_3 的除氮效果



(f) C_3 的除磷效果

图4 组合工艺稳定运行期间对 TN、TP 的去除效果

Fig.4 TN and TP removal effect of combined processes during the stable operation

13.8、15.7 mg/L左右,去除率分别约为 88.2%、86.5%、85.2%。进水 TP 维持在 5.5 mg/L左右,通过 C₁、C₂和 C₃处理后,出水 TP 分别维持在 0.43、0.48、0.45 mg/L左右,去除率分别约为 92.2%、88.1%、91.8%。通过实验结果可知,C₃存在出水 TN 不达标情况,其他两套组合工艺均能满足 DB 21/1627—2008 中 TN 小于 15 mg/L、TP 小于 0.5 mg/L 的排放限值要求。总体上看,3 套组合工艺对 TN、TP 的去除效果为 C₁>C₂>C₃,由此构建 M₇判

断矩阵并计算特征向量,结果见表 3。

表 3 M₇判断矩阵及其特征向量
Table 3 Judgement matrix for M₇ and its eigenvector

组合工艺	C ₁	C ₂	C ₃	W
C ₁	1	2	5	0.581 2
C ₂	1/2	1	3	0.309 2
C ₃	1/5	1/3	1	0.109 6

2.3 其他中试结果及判断矩阵

C₁、C₂、C₃的其他进出水水质指标见表 4。

表 4 其他进出水水质指标
Table 4 The other water quality indexes of influent and effluent

组合工艺	氨氮/(mg·L ⁻¹)		悬浮物/(mg·L ⁻¹)		色度		动植物油/(mg·L ⁻¹)	
	进水	出水	进水	出水	进水	出水	进水	出水
C ₁		6.5		4.7		6		1.5
C ₂	24.5	7.3	71.5	18.4	70	10	17.5	2.5
C ₃		8.2		12.3		8		2.4

从整体上看,3 套组合工艺在稳定运行过程中对污染物的去除能力较强,出水基本满足 DB 21/1627—2008(氨氮<8 mg/L,悬浮物<20 mg/L,色度<30)的排放要求。组合工艺的优缺点也较为明显。

C₁运行情况较好,经过 UASB 处理后的水质较适合后续 MBR 处理,出水指标较好;但 MBR 出水用泵抽吸,耗电量远高于 C₁和 C₃;且 MBR 膜丝容易断丝、堵塞,影响膜通量,导致负压增大,耗电量也相应增加。

对 C₂而言,整体运行情况较好,但对于突然的水质冲击,需要较长的恢复时间。分析其原因可能是 SBR 使用悬浮型污泥,相比生物接触氧化和 MBR,其形成的生物膜系统微生物菌群单一,抗冲击负荷能力较弱。且 C₂的污泥产量比 C₁、C₃大,在工程操作中会带来额外的经济负担。

对 C₃而言,AF 启动速率比 UASB 快,UASB 需 6 周启动时间,而 AF 只用了 4 周;但堵塞问题是影响 AF 应用的最主要问题之一,每隔 4 周 AF 需要反冲洗,反冲洗过程中,生物膜脱落影响水质处理效果;AF 进水之前,需要通过物化处理控制水中悬浮物。

建立 M₅、M₈和 M₁₁的判断矩阵并计算特征向量,结果分别见表 5、表 6 和表 7。

表 5 M₅判断矩阵及其特征向量
Table 5 Judgement matrix for M₅ and its eigenvector

组合工艺	C ₁	C ₂	C ₃	W
C ₁	1	4	2	0.543 7
C ₂	1/4	1	1/4	0.110 3
C ₃	1/2	4	1	0.346 0

表 6 M₈判断矩阵及其特征向量

Table 6 Judgement matrix for M₈ and its eigenvector

组合工艺	C ₁	C ₂	C ₃	W
C ₁	1	3	5	0.633 3
C ₂	1/3	1	3	0.260 5
C ₃	1/5	1/3	1	0.106 2

表 7 M₁₁判断矩阵及其特征向量

Table 7 Judgement matrix for M₁₁ and its eigenvector

组合工艺	C ₁	C ₂	C ₃	W
C ₁	1	3	6	0.639 4
C ₂	1/3	1	4	0.273 7
C ₃	1/6	1/4	1	0.086 9

3 屠宰废水处理技术性能评价

根据屠宰废水处理方案评价指标体系分别构建各层指标的判断矩阵,并计算特征向量,最终得到 AHP 排序结果,见表 8。

表 8 屠宰废水处理方案 AHP 排序结果
Table 8 AHP results of slaughter wastewater treatment scheme

目标层	第 1 准则层 ¹⁾	第 2 准则层 ¹⁾	方案层 ²⁾
A	B ₁ (0.615 0)	M ₁ (0.205 3)	C ₁ (0.255 9)
		M ₂ (0.363 3)	
		M ₃ (0.046 4)	
		M ₄ (0.049 6)	C ₂ (0.420 7)
		M ₅ (0.014 1)	
		M ₆ (0.130 5)	
	B ₂ (0.292 4)	M ₇ (0.079 6)	C ₃ (0.323 4)
		M ₈ (0.018 6)	
		M ₉ (0.017 9)	
		M ₁₀ (0.030 1)	C ₃ (0.323 4)
		M ₁₁ (0.011 6)	
		M ₁₂ (0.033 0)	

注:¹⁾括号里的数值表示权重;²⁾括号里的数值表示 AHP 综合指数。

从表8中方案层总排序可看出,实现屠宰废水处理达标排放,3套组合工艺的排序为 C_2 最优、 C_3 其次、 C_1 最差。因此, C_2 为筛选出的最佳处理方案,这与江涛^[15]得到的结论基本相同。

4 结 语

屠宰废水的方案优选是一个多决策的过程,实验数据结论法多停留在最佳条件或最优化结果,但忽略了实际工程中的复杂性与多层次性。因此,仅依靠实验数据结论法不能满足成果产业化的需求。同时,仅依靠专家咨询法对AHP中的权重进行赋值,也不能准确衡量特定废水的处理效果。本研究将屠宰废水处理的实际成果纳入处理方案优选体系,提高了AHP的准确性,并结合专家咨询法调整层次权重,科学筛选屠宰废水的最佳处理方案。根据3个第1准则层和12个第2准则层,对 C_1 、 C_2 和 C_3 判断矩阵中各因素标度与权重赋值,并进行排序,得出方案层中 C_2 综合指数最高,为0.4207。因此,3套组合工艺中, C_2 综合效益最高,最适用于屠宰废水处理产业化应用。

参考文献:

- [1] 朱建军.层次分析法的若干问题研究及应用[D].沈阳:东北大学,2005.
- [2] 高燕云.研究与开发评价[M].西安:陕西科学技术出版社,1996:85-91.
- [3] HYUN K C, MIN S, CHOI H S, et al. Risk analysis using fault-tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) applicable to shield TBM tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49(4): 121-129.
- [4] 谢礼国, 张照清, 谭铭卓, 等. 层次分析法优选三峡库区农村生活污水处理技术研究[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(6): 20-22.
- [5] LEE S, KIM W, KIM Y M, et al. Using AHP to determine intangible priority factors for technology transfer adoption[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(7): 6388-6395.
- [6] 高雪, 傅金祥, 由昆. 辽河流域水污染源在线监测问题[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2014, 33(6): 816-819.
- [7] 邓晓钦. 厌氧与好氧组合工艺在屠宰废水处理中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [8] JENSEN P D, YAP S D, BOYLE GOTLA A, et al. Anaerobic membrane bioreactors enable high rate treatment of slaughterhouse wastewater[J]. Biochemical Engineering Journal, 2015, 97(5): 132-141.
- [9] 赵永生, 洗萍. 屠宰废水预处理后的SBR工艺处理工程[J]. 广

西科学院学报, 2008, 21(2): 117-119.

- [10] 胡天觉, 陈维平, 曾光明, 等. 运用层次分析法对株洲霞湾污水处理厂污水处理工艺方案择优[J]. 环境工程, 2000, 18(1): 61-63.
- [11] 李吉鹏, 马丽, 陆志强. 运用模糊层次分析法优选制浆造纸废水深度处理方案[J]. 环境工程学报, 2012, 6(11): 4089-4096.
- [12] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structures[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281.
- [13] BADEA F, PROSTEAN G. Assessing risk factors in collaborative supply chain with the analytic hierarchy process (AHP)[J]. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2014, 124: 114-123.
- [14] VARGAS L. G. Reciprocal matrices with random coefficients[J]. Mathematical Modelling, 1982, 3(1): 69-81.
- [15] 江涛. 分散式屠宰废水处理工艺耦合与优化试验研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2014.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2016-02-08)

(上接第104页)

4 结 语

2013年6月,最高人民法院、最高人民检察院《关于办理环境污染刑事案件适用法律若干问题的解释》中进一步明确了超过污染物排放标准所对应的法律责任,污染物排放标准的法律属性得到进一步加强。40余年来,水污染物排放标准作为我国水环境管理中重要的制度措施之一,始终直接反映着我国水污染防治管理的基本思路 and 原则。在我国环境保护新时期,水污染物排放标准需要在继承现有体系优点的基础上,进一步创新思路,不断优化完善,以满足国家环境管理的新需求。

参考文献:

- [1] GB J4—73, 工业“三废”排放试行标准[S].
- [2] 城乡建设环境保护部环境保护局标准处. 11项国家排放标准[Z]. 北京: 城乡建设环境保护部环境保护局标准处, 1983.
- [3] 城乡建设环境保护部环境保护局标准处. 国家排放标准编制说明和分析方法[Z]. 北京: 城乡建设环境保护部环境保护局标准处, 1985.
- [4] GB 8978—88, 污水综合排放标准[S].
- [5] 陆昌森, 马世豪, 张忠祥. 污水综合排放标准详解[M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [6] GB 8978—1996, 污水综合排放标准[S].

编辑: 陈泽军 (收稿日期: 2015-08-25)