

技术总结

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2022. 23. 006

# 基于改进层次分析法的氯/紫外工艺效能评估方法

张静怡<sup>1,2</sup>, 贺斌<sup>1</sup>, 陈莉<sup>1</sup>, 熊云<sup>2</sup>, 李伟光<sup>1,2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 黑龙江省极地环境与生态研究重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 哈尔滨工业大学 城市水资源与水环境国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 为明确氯/紫外工艺的技术特征与优势,开展了可量化的评估体系与方法研究。利用松花江流域牡丹江地区某供水厂中试平台,通过氯/紫外工艺中氯氮比与紫外剂量的不同组合,得出12种方案,采用改进层次分析法构建氯/紫外工艺综合效能评估模型,对其进行定量评估,得到以控制氨氮为目标的工艺最优运行参数范围,即氯氮比为5~6、紫外剂量为33.5~48.0 mJ/cm<sup>2</sup>。

**关键词:** 氯/紫外工艺; 指标体系; 改进层次分析法; 技术评估

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0038-05

## Performance Assessment Method of Chlorine/UV Process Based on Improved Analytic Hierarchy Process

ZHANG Jing-yi<sup>1,2</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, CHEN Li<sup>1</sup>, XIONG Yun<sup>2</sup>, LI Wei-guang<sup>1,2</sup>

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;  
2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Polar Environment and Ecosystem <HPKL-PEE>, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

**Abstract:** A quantifiable assessment system and method were developed to clarify the technical characteristics and advantages of chlorine/UV process. Based on the pilot test platform of a water supply plant in Mudanjiang area of Songhua River basin, 12 schemes were obtained through different combinations of chlorine to nitrogen ratio and UV dose in the chlorine/UV process. A comprehensive performance assessment model of the chlorine/UV process was constructed by the improved analytic hierarchy process (AHP), and the quantitative assessment was carried out to obtain the optimal operating parameter ranges of the process aiming at controlling ammonia nitrogen. The optimal parameters were as follows: the ratio of chlorine to nitrogen was 5~6, and the UV dose was 33.5~48.0 mJ/cm<sup>2</sup>.

**Key words:** chlorine/UV process; indicator system; improved analytic hierarchy process; technology assessment

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501-002); 黑龙江省极地环境与生态研究重点实验室自主课题(2021008)

通信作者: 李伟光 E-mail: hitlwg@126.com

保障饮用水安全是我国经济社会发展面临的重大民生问题之一,根据2018年《中国生态环境状况公报》,我国仍有一定比例地表水源的水质未达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水要求,水环境安全问题依然突出。消毒作为水处理的最后一道屏障,其工艺选择对保障水质尤为重要。氯/紫外消毒工艺采用先投氯再加紫外的方式,其结合了紫外消毒和氯消毒的优点,在有效保证灭活微生物的同时,又能达到去除氨氮的效果,且可减少“三致”消毒副产物等问题的产生。但是,该技术应用于氨氮控制方面的研究较少,为进一步推广应用,还需对工艺的适用范围及效果进行界定和评估<sup>[1]</sup>。此外,虽已开展了对环境技术评估体系方面的研究,但大多仍停留在同类技术之间的比选,而对某种技术的就绪度评估相对较少。

笔者依据氯/紫外工艺的特点,从常规水质指标、特征工况指标、绩效成本指标等3个方面构建了可量化的层次型指标体系与评估方法,并依托松花江流域牡丹江地区某水厂中试平台,开展了氯/紫外工艺综合效能评估,该评估结果有利于优化氯/紫外工艺的运行管理,并可为该技术的工程应用提供支撑。

## 1 氯/紫外工艺层次型指标体系的建立

以环境评估验证制度提出的指标体系构建原则为依据,通过对氯/紫外工艺进行文献分析和实地调研,结合专家意见、经济管理学理论及供水行业实际运行经验,筛选出能综合反映氯/紫外工艺技术和经济性的效能指标,构建氯/紫外工艺层次型指标体系。

### 1.1 评估指标体系建立的原则

采用的层次型指标体系设置为三层:总目标层、目标层和要素层。总目标层用来表达评价指标体系的总目标,即评价对象;目标层是总目标的某类性能的表达,可以反映总目标中该类性能的综合评价结果;要素层即目标层的细化,具体到某一个指标,使得评价更加清晰准确。这种结构较为常见,在实际应用中操作性较强。

本研究采用功能聚合法划分要素层,其基本原则是把评价同一个侧面或目标的要素归纳总结,划分为同一类别。

总目标层为氯/紫外工艺综合效能评估,目标层

初步确定为常规水质指标、技术特征指标和绩效成本指标。通过收集与氯/紫外工艺运行管理技术关联性较高的指标,并结合实际运行条件进行遴选,共筛选出8个要素层。

常规水质指标:①微生物灭活率,氯/紫外工艺在饮用水处理中发挥的最大效用为杀灭微生物,采用紫外前加氯的方式可以提高微生物灭活率,并且使氯消毒剂的投量明显降低<sup>[2]</sup>;②余氯浓度,关注氯/紫外工艺的出水余氯浓度可以为后续是否需要再次加氯以及相应投加量提供依据。

技术特征指标:①氨氮去除率,氯/紫外工艺通过紫外线来光解含氮氯化物(一氯胺),可有效去除水中氨氮;②消毒副产物生成浓度,消毒工艺中含碳、含氮消毒副产物的生成问题一直备受关注,而氯/紫外工艺可以在保证杀灭微生物、去除氨氮的前提下,有效控制消毒副产物的生成浓度;③一氯胺浓度,强氧化性自由基对水中由次氯酸与氨氮相结合生成的一氯胺具有光解作用,其是氯/紫外工艺去除水中氨氮的主要机理,紫外线光解一氯胺可有效去除进水中的氨氮,从而提高氨氮去除率。

绩效成本指标:①一次性投资费用,设备投资费用是影响氯/紫外耦合工艺经济效益的因素之一,主要考虑氯/紫外设备的购置费用;②年设备折旧费用,设备维护费用在水厂实际支出中占比很大,并且对制水成本有一定影响,通常情况下选用设备折旧费来代替设备维护费用,二者之间存在一定的正比关系;③运行费用,由于电耗和药耗两部分费用评估受当地经济状况和电费的影响,因此将该两项指标分摊到1 m<sup>3</sup>水上,使其具有可比性。

### 1.2 评估指标体系建立的意义

建立的氯/紫外工艺评价指标体系,可通过科学计算将指标量化来评估工艺技术,能够在一定程度上避免人为因素(专家关注的侧重点不同、运行人员根据经验判断等)产生的主观影响,从而提高技术评估的客观性与科学性;同时,其将工艺技术原理和运行管理要求相结合,可为综合效能评估研究奠定基础。

## 2 氯/紫外工艺评估方法的构建

由于对氯/紫外工艺进行综合效能评估的因素较多,因此将这些因素按照一定的原则归类建立了上述层次型结构。针对这种有序的递阶层次结构

指标体系,通常采用层次分析法对其进行评估。层次分析法首先对指标体系中同层次元素进行两两比较,确定它们的相对重要程度,再进行综合判断,对所有元素进行排序,从而确定各元素的优劣<sup>[3]</sup>。因此本研究根据氯/紫外工艺层次型指标体系,选用层次分析法构建评估模型。

常规的层次分析法在应用过程中极易出现标度倍数关系矛盾和一致性检验计算量大的问题。针对以上两点,提出通过查找和调整关键元素以保证判断矩阵具有较好的一致性,对层次分析法进行改进,使之达到简化计算步骤的目的。

## 2.1 构建比较判断矩阵

### 2.1.1 制订专家评定表

根据建立的层次型结构指标体系可知,各个元素隶属于不同层次,并且各元素之间的从属关系已确定。针对同一层次的每个指标 $P_1, P_2, \dots, P_n$ ,对其进行两两比较,通过赋值的方式表示元素的相对重要性,记为 $a_{ij}$ 。当 $P_i$ 与 $P_j$ 相同时, $a_{ij}$ 取为1;与 $P_j$ 相比,当 $P_i$ 为稍强、强、很强、绝对强、稍弱、弱、很弱、绝对弱时,相应的 $a_{ij}$ 分别取为3、5、7、9、1/3、1/5、1/7、1/9;其中,2、4、6、8表示上述相邻等级的中间值<sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 比较判断矩阵的构建

整理评定表结果,选择评估的层次元素,构建判断矩阵 $A$ 。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

且判断矩阵 $A$ 满足:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

## 2.2 查找和调整矩阵关键元素

由式(1)和式(2)可知,判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ ,以 $A$ 中某一元素 $a_{ij}$ 为例,计算 $a_{ij}$ 的值向量:

$$a_{ij} = \left( a_{ij}, \dots, \frac{a_{ik}}{a_{jk}} \right)^T \quad (3)$$

$i \neq j; k = 1, 2, \dots, i-1, i+1, \dots, n$

由此计算矩阵 $A$ 中每一元素的值向量。每一值向量中,与其他值相比差异性较大的元素 $\alpha = \frac{a_{ik}}{a_{jk}}$ 即为矩阵关键元素,显著影响比较判断矩阵 $A$ 的完全

一致性。

将矩阵关键元素 $\alpha$ 从值向量中去除,并计算值向量中剩余元素的平均值 $\theta$ ,然后调整关键元素 $a_{ik}, a_{jk}$ 为 $a_{ik}', a_{jk}'$ ,使 $\alpha$ 接近平均值 $\theta$ ,最后将判断矩阵 $A$ 中的 $a_{ik}, a_{jk}$ 用 $a_{ik}', a_{jk}'$ 代替,得到新的满足完全一致性的判断矩阵 $A'$ 。

## 2.3 计算指标权重

在MATLAB 7.12.0软件中编写指标权重的计

算程序,以一个3阶矩阵 $\begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} \end{bmatrix}$ 为例,算法编

写如下:

```
clear;
clear all;
A=[x11 x12 x13;x21 x22 x23;x31 x32 x33];
[x,y]=eig(A);
[m m]=find(y==max(max(y)));
w=x(:,m)/sum(x(:,m));
```

输入判断矩阵,即可得出各指标权重值 $\omega_i$ ,三级要素层指标因素权重为所属约束层指标权重与该指标在本层指标因素中所占比重值的乘积。

## 2.4 指标样本归一化

为了使量纲不同的评估指标实测值具有可比性,应对指标样本进行归一化处理,本研究采用极差化方法实现指标样本归一化<sup>[5]</sup>,其计算公式如下:

$$\phi_i(k) = \frac{x_i(k) - \min x_i}{\max x_i - \min x_i} \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$

$$\phi_i(k) = \frac{\max x_i - x_i(k)}{\max x_i - \min x_i} \quad (5)$$

$i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m$

式中: $\phi_i(k)$ 表示 $k$ 方案的第 $i$ 个指标的归一化值; $\max x_i, \min x_i$ 分别表示 $i$ 指标在设计方案中的最大值与最小值。

式(4)适用条件为指标要素的值越大效能越大;式(5)适用条件为指标要素的值越小效能越大。

## 3 中试平台验证

在松花江流域牡丹江地区某水厂的中试平台(进水流量为36 m<sup>3</sup>/d)开展氯/紫外工艺综合效能评估,工艺流程如图1所示。根据经验,设定进水氨氮为1.5 mg/L,水温约为0.8 °C。依据紫外剂量(33.5、42.5、48.0 mJ/cm<sup>2</sup>)与氯氮比(4、5、6、7)的不

同组合,共设计出 12 种方案,具体见表 1。

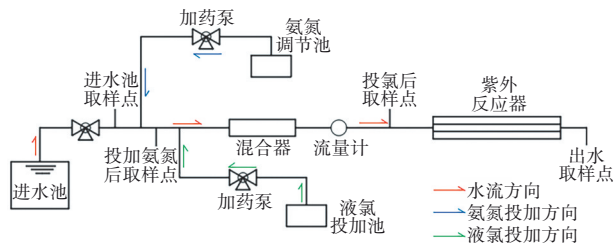


图 1 氯/紫外工艺中试装置工艺流程

Fig.1 Process flow chart of chlorine/UV pilot device

表 1 氯/紫外工艺方案

Tab.1 Schemes of chlorine/UV process

氯氮比	紫外剂量/(mJ·cm <sup>-2</sup> )		
	33.5	42.5	48.0
4	方案 1	方案 5	方案 9
5	方案 2	方案 6	方案 10
6	方案 3	方案 7	方案 11
7	方案 4	方案 8	方案 12

通过中试得到了 12 种方案下三类指标的原始数值,各方案中微生物均已失活。检测了 9 种典型含氮含碳消毒副产物的生成浓度,包括三氯甲烷、二氯一溴甲烷、一氯二溴甲烷、三溴甲烷、三氯乙腈、三氯硝基甲烷、溴氯甲烷、水合三氯乙醛和二氯乙腈,发现上述污染物的浓度均小于 10 μg/L。绩效成本指标均以牡丹江地区价格为标准进行费用计算。各指标的原始数值见表 2。

表 2 不同方案下各指标的原始数值

Tab.2 Original values of indicators under different schemes

方案编号	余氯浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮去除率/%	一氯胺浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	一次性投资费用/元	运行费用/(元·m <sup>-3</sup> )	年设备折旧费用/元
1	2.48	56.15	1.25	2 120	0.043	742
2	2.61	63.41	1.97	2 120	0.046	742
3	3.52	70.49	2.15	2 120	0.049	742
4	3.62	73.98	2.48	2 120	0.052	742
5	2.27	61.54	1.19	4 239	0.070	1 484
6	2.39	71.54	1.89	4 239	0.073	1 484
7	2.95	77.54	2.01	4 239	0.076	1 484
8	3.22	82.31	2.35	4 239	0.079	1 484
9	1.97	62.31	1.13	6 360	0.135	2 226
10	2.31	75.38	1.80	6 360	0.138	2 226
11	2.79	80.72	2.16	6 360	0.141	2 226
12	3.01	84.91	2.28	6 360	0.144	2 226

依据式(1)~(3)计算各指标权重值,并根据式(4)和式(5)对不同方案下各指标的原始数值进行归一化处理,结果如表 3 所示。微生物灭活率、余氯浓度、氨氮去除率、消毒副产物生成浓度、一氯胺浓度、一次性投资费用、年设备折旧费用、运行费用的权重分别为 0.43、0.22、0.17、0.04、0.03、0.06、0.05、0.02。根据表 3,将处理后数值按照指标权重进行加权平均,计算各方案的技术总值,方案 1 技术总值=0.43×1.00+0.22×0.65+0.17×0.00+0.04×1.00+0.03×0.91+0.06×1.00+0.05×1.00+0.02×1.00=0.770。方案 2~12 的技术总值分别为 0.810、0.741、0.737、0.784、0.805、0.761、0.731、0.760、0.770、0.734、0.708。

表 3 不同方案的指标数值处理结果

Tab.3 Numerical processing results of different schemes

方案编号	微生物灭活率	余氯浓度	氨氮去除率	消毒副产物生成浓度	一氯胺浓度	一次性投资费用	年设备折旧费用	运行费用
1	1.00	0.65	0.00	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00
2	1.00	0.56	0.45	1.00	0.38	1.00	0.97	1.00
3	1.00	0.05	0.74	1.00	0.24	1.00	0.94	1.00
4	1.00	0.00	0.83	1.00	0.00	1.00	0.91	1.00
5	1.00	0.80	0.19	1.00	0.96	0.50	0.73	0.50
6	1.00	0.71	0.53	1.00	0.44	0.50	0.70	0.50
7	1.00	0.33	0.84	1.00	0.35	0.50	0.50	0.50
8	1.00	0.15	0.90	1.00	0.10	0.50	0.64	0.50
9	1.00	1.00	0.21	1.00	1.00	0.00	0.09	0.00
10	1.00	0.77	0.66	1.00	0.50	0.00	0.06	0.00
11	1.00	0.44	0.93	1.00	0.24	0.00	0.03	0.00
12	1.00	0.29	1.00	1.00	0.15	0.00	0.00	0.00

就水处理技术而言,首先关注的是应用效能,所以从技术效能入手对上述评估结果进行再次分析。根据建立的指标体系,其中可以体现技术效能的指标为微生物灭活率、余氯浓度、氨氮去除率、消毒副产物生成浓度和一氯胺浓度,而 12 种方案的微生物灭活率和消毒副产物生成浓度基本相同;余氯浓度则是为后加氯提供指导,不直接表征技术的应用效能;一氯胺浓度与氨氮去除率相同,都是用来表征氨氮去除效果的指标,但是氨氮去除率的表征更为直接。因此,根据各方案氨氮去除率进行评估结果的再次归纳分析。将氨氮去除率相同的技术方案按照技术总值进行再次排序,技术总值越高,



代表在相同氨氮去除率下,技术经济性越强,结果见表4。

表4 不同氨氮去除率下各方案的效能

Tab.4 Efficiency of each scheme under different removal rates of ammonia nitrogen

目标氨氮去除率/%	方案编号	技术总值
50	方案1	0.770
	方案2	0.810
60	方案5	0.784
	方案9	0.760
70	方案3	0.741
	方案4	0.737
	方案6	0.805
	方案7	0.761
	方案10	0.770
80	方案8	0.731
	方案11	0.734
	方案12	0.708

由表4可知,当目标氨氮去除率为60%时,氯/紫外工艺在方案2下的技术总值为0.810,综合效能最高,其工艺参数如下:氯氮比为5、紫外剂量为33.5 mJ/cm<sup>2</sup>。当目标氨氮去除率为70%时,该工艺在方案6下综合效能最高,其工艺参数如下:氯氮比为5、紫外剂量为42.5 mJ/cm<sup>2</sup>。当目标氨氮去除率为80%时,该工艺在方案11下的技术总值为0.734,综合效能最优,其工艺参数如下:氯氮比为6、紫外剂量为48.0 mJ/cm<sup>2</sup>。由此可知,氯/紫外工艺评估得到的最优运行参数如下:氯氮比为5~6、紫外剂量为33.5~48.0 mJ/cm<sup>2</sup>。

由于氯/紫外工艺是系统控制微生物、氨氮、消毒副产物的新技术,目前处于应用初期,只在哈尔滨某水厂(12×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d)进行了工程化应用,后期水厂工艺具备适宜运行条件时,将进一步对氯/紫外工艺的技术评估进行工程验证。

#### 4 结论

① 通过常规水质指标、技术特征指标、绩效成本指标等3个层面,提出可以从技术和经济两方面反映氯/紫外工艺运行效能的指标体系,其包含了3个目标层、8个要素层。

② 基于构建的层次型结构指标体系,提出了通过查找和调整矩阵关键元素以简化计算工作量的改进层次分析法作为氯/紫外工艺综合效能评价

模型,并将模型用于中试平台的工艺效能评价。

③ 利用构建的改进层次分析法,对中试平台中的不同运行模式进行综合评估,得到以氨氮控制为目标的工艺最优运行参数范围,即氯氮比为5~6、紫外剂量为33.5~48.0 mJ/cm<sup>2</sup>,其为后续氯/紫外工艺的推广应用提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 俞洋. 基于改进层次分析法的紫外/氯耦合工艺综合效能评估研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.  
YU Yang. Study on Comprehensive Effectivity Assessment of Combined UV/Chlorine Process Based on Improved AHP [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018(in Chinese).
- [2] 夏灵冬. 紫外/氯耦合工艺对氨氮及消毒副产物的同步控制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.  
XIA Lingdong. Research on UV/Chlorine Process for Ammonia Removal and Reduction of Disinfection By-products [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016(in Chinese).
- [3] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 24(7):93-100.  
DENG Xue, LI Jiaming, ZENG Haojian, et al. Research on computation methods of AHP wight vector and its applications [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 24(7):93-100(in Chinese).
- [4] ISHIZAKA A, LABIB A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process [J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 14336-14345.
- [5] 钟霞,钟怀军. 多指标综合评价方法及应用[J]. 内蒙古大学学报(人文社会科学版), 2004, 36(4): 107-111.  
ZHONG Xia, ZHONG Huaijun. Multi-criteria estimation: its application as a method [J]. Journal of Inner Mongolia University (Humanities and Social Sciences), 2004, 36(4):107-111(in Chinese).

作者简介:张静怡(1996- ),女,山西运城人,硕士研究生,主要研究方向为饮用水处理技术。

E-mail: 1337761273@qq.com

收稿日期:2022-03-17

修回日期:2022-05-03

(编辑:任莹莹)