



文章栏目：相关研究

DOI 10.12030/j.cjee.202101046

中图分类号 TU991

文献标识码 A

贺斌, 张静怡, 李伟光. 城市给水厂紫外-氯消毒工艺运行效能的综合评价[J]. 环境工程学报, 2021, 15(10): 3463-3470.

HE Bin, ZHANG Jingyi, LI Weiguang. Comprehensive evaluation of operational efficiency of UV-chlorine disinfection process in urban water supply plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(10): 3463-3470.

城市给水厂紫外-氯消毒工艺运行效能的综合评价

贺斌, 张静怡, 李伟光✉

哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150090

第一作者: 贺斌(1995—), 女, 硕士研究生。研究方向: 饮用水处理。E-mail: hebin0208@126.com

✉通信作者: 李伟光(1962—), 男, 博士, 教授。研究方向: 饮用水安全保障技术。E-mail: hitlwg@126.com

摘要 针对城市给水厂紫外-氯消毒工艺应用过程中存在缺少技术文件指导和管理水平不足的问题, 建立了紫外-氯工艺运行效能综合评价模型, 以明确一定条件下紫外-氯工艺的最佳运行参数, 为给水厂紫外-氯工艺运行管理提供参考。基于灰色聚类关联分析模型和技术成本效益模型, 分别建立了紫外-氯工艺运行技术效能评价模型和经济收益评价模型, 从技术效能和经济收益两方面, 对不同地域的 4 座给水厂(编号为 A、B、C 和 D)进行了工艺运行综合效能评价。评价结果表明, C 厂紫外-氯工艺的综合效能最佳, 主要工艺参数为紫外剂量 $42.8 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、有效氯投量 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。本研究结果可为给水厂紫外-氯工艺的调试及运行提供参考。

关键词 紫外-氯消毒工艺; 城市给水厂; 灰色聚类关联分析; 技术成本效益分析

消毒是城市给水厂运行中的重要环节。氯消毒仍为我国大多数饮用水处理厂的主导消毒技术^[1], 但氯的使用可能会导致氯化消毒副产物的生成^[2], 进而影响水质安全。对水中出现的隐孢子虫和贾第鞭毛虫, 常规化学消毒工艺难以去除^[3]。紫外消毒工艺因其对微生物具有良好的灭活效果而受到重视, 但其消毒能力缺乏持续性, 难以保障管网水质持久安全^[4]。因此, 紫外消毒和氯消毒技术的组合使用(即紫外-氯消毒工艺, 后简称紫外-氯工艺)受到广泛关注。紫外-氯工艺具有多重保障水质的特点, 在保证微生物控制效果的同时, 可有效降低消毒副产物生成, 利于保证管网水质稳定。

目前, 紫外-氯工艺在给水厂的应用还相对较少, 存在运行标准化技术文件缺失和给水厂应用管理水平不足的问题, 已有给水厂应用案例亦存在运行成本较高的问题。因此, 研究并建立紫外-氯工艺运行效能评价模型, 明确一定条件下紫外-氯工艺的最佳运行参数具有实际应用价值。本文对已应用紫外-氯工艺给水厂的技术条件进行了梳理, 并基于灰色聚类关联分析模型和技术成本效益模型, 对不同条件下的紫外-氯工艺运行效能进行综合评价, 以为该组合技术在给水厂中的应用提供参考。

收稿日期: 2021-01-08; 录用日期: 2021-04-28

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07501-002)

1 紫外-氯工艺运行技术效能评价

1.1 指标体系构建

以紫外-氯工艺出水水质为依据进行技术效能评价。按照科学性、典型性、可靠性及动态和静态相结合^[5-6]的原则,通过文献分析确定可表征紫外-氯工艺效能的具体水质指标。共查阅相关文献85篇(其中32篇来自web of science,其余来自中国知网),对文献的统计分析结果表明:紫外-氯工艺主要用于微生物灭活(78篇)、消毒副产物控制(66篇)和出厂水余氯保证(19篇)等研究。根据文献量,选用能反映微生物灭活、消毒副产物控制效果的水质指标作为评价指标,因三卤甲烷类(46%)是氯化消毒饮用水中的主要氯化副产物^[7],所以分别选取菌落总数和三卤甲烷浓度作为评价指标。余氯和总氯2个指标和管网水质安全密切相关,故将余氯和总氯的浓度一并作为评价指标。综合以上几点,构建紫外-氯工艺运行技术效能评价指标体系(见图1)。

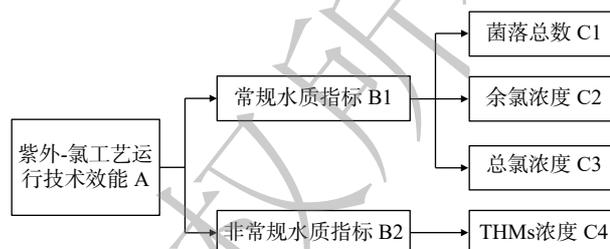


图1 紫外-氯工艺运行技术效能评价指标体系

Fig. 1 Performance evaluation index system of operating technology efficiency of UV/chlorine process

1.2 基于灰色聚类关联分析法的紫外-氯工艺技术效能评价体系建立

1.2.1 评价指标分级标准的建立

合理的指标分级标准是开展技术评价的基础。以《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)为依据,参照我国地表水环境质量标准的分类方法,结合调研梳理得到的11座典型给水厂紫外-氯工艺运行情况,建立各要素层的指标分级标准。

1) 菌落总数指标分级。进行了典型给水厂出水的菌落总数分析,结果表明,各给水厂出水的菌落总数多为“未检出”,即便偶有检出,也多分布在个位数,远小于《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)规定的 $100 \text{ cfu}\cdot\text{mL}^{-1}$,故需细分菌落总数指标分级标准,其具体分级标准见表1。

2) 余氯指标分级。当消毒剂为氯气或者游离氯制剂时,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定的出厂水余氯质量浓度应为 $0.3\sim 4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据典型给水厂出水余氯浓度分析结果,可知该值多为 $1\sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。因此,在 $1\sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 进行指标细分,并确定I类阈值为 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其余阈值按照梯度依次为0.30、0.50、0.70和 $1.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,将余氯指标分为5级,分级结果见表2。

3) 总氯指标分级。当给水厂采用氯胺作为消毒剂时,宜选用总氯浓度来表征剩余氯含量,《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006)中规定出厂水总氯质量浓度应为 $0.5\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。结合典型给水厂出水总氯质量浓度分析,可知该值一般在 $2\sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。据此建立总氯指标分级标准,见表3。

表1 菌落总数指标分级标准

Table 1 Classification standard of total colony index

total colony index					$\text{cfu}\cdot\text{mL}^{-1}$
I类	II类	III类	IV类	V类	
≤ 1	≤ 4	≤ 10	≤ 50	≤ 100	

表2 余氯指标分级标准

Table 2 Classification standard of residual chlorine index

residual chlorine index					$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I类	II类	III类	IV类	V类	
≥ 1.00	≥ 1.30	≥ 1.80	≥ 2.50	≥ 3.60	

表3 总氯指标分级标准

Table 3 Classification standard of total chlorine index

total chlorine index					$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
I类	II类	III类	IV类	V类	
≥ 1.50	≥ 2.00	≥ 2.30	≥ 2.80	≥ 3.00	

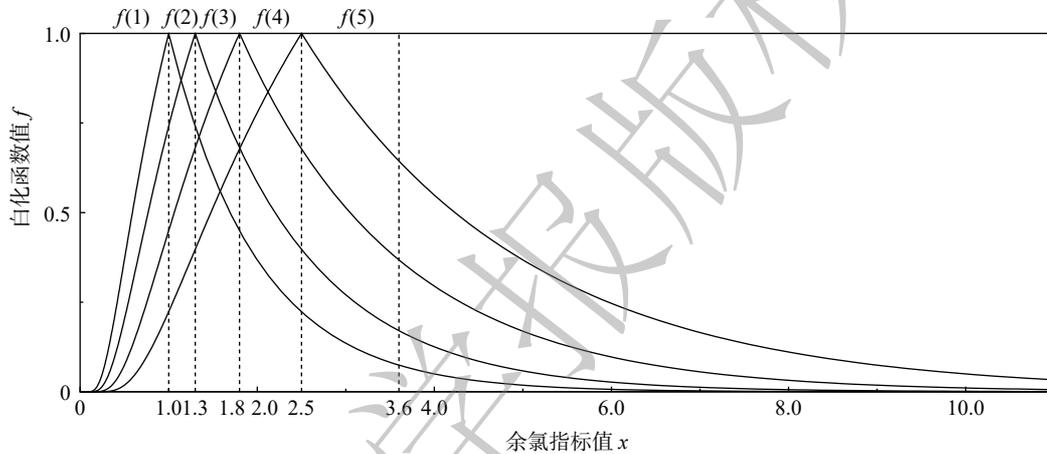
4) 三卤甲烷 (THMs) 指标分级。我国《生活饮用水卫生标准》(GB 5749-2006) 和美国国家环境保护局标准 (US EPA) 都对三卤甲烷指标限值做了相关规定, 分别规定该值不得大于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $80 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。根据典型给水厂紫外-氯工艺出水水质分析结果可知, 各给水厂三卤甲烷类指标浓度皆小于 $80 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 因此以 $80 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 为上限, 建立三卤甲烷指标的分级标准, 见表 4。

表 4 三卤甲烷指标分级标准
Table 4 Classification standard of trihalomethane index $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
≤ 10	≤ 20	≤ 30	≤ 50	≤ 80

1.2.2 白化函数建立

白化函数是用来计算某一指标对于某一灰度隶属程度的函数^[8], 本文采用指数型^[9]白化函数, 以达到“加权宽域”的目的。以余氯指标为例, 根据表 2 所列的余氯指标分级标准, 构建余氯指标在每个灰类下的白化函数 f (见图 2)。其余指标白化函数建立可参照余氯指标白化函数建立方法。



注: $f(1) \sim f(5)$ 分别代表余氯指标在第 1~5 个灰度下的白化函数。

图 2 余氯指标在各灰类下的白化函数

Fig. 2 Albino function of residual chlorine index in various kinds of gray

1.2.3 聚类权重计算

聚类权重被用来表征指标对于不同灰类的隶属程度^[10], 在各方案数据类型不同的情况下, 计算得到的聚类权重也不相同。

在进行聚类权重计算时, 首先需对各指标值进行无量纲化处理, 以消除各指标值间的量纲差异。指标无量纲化的计算公式见式 (1)~(2)。

$$x_{ij}^0 = \frac{x_{ij}}{\sum_{k=1}^n y_{jk}} \tag{1}$$

$$y_{jk}^0 = \frac{y_{jk}}{\sum_{k=1}^n y_{jk}} \tag{2}$$

式中: x_{ij} 为 i 方案中指标 j 的实测值; y_{jk} 为指标 j 隶属于 k 灰类的标准值; x_{ij}^0 表示 i 方案中指标 j 的标准化值; y_{jk}^0 表示指标 j 隶属于 k 灰类的标准化值。

$\mu_{jk}(i)$ 记为 i 方案中第 j 指标属于第 k 灰类的权重, 聚类权重计算公式见式 (3)。

$$\mu_{jk}(i) = \frac{x_{ij}^0/y_{jk}^0}{\sum_{j=1}^n x_{ij}^0/y_{jk}^0} \tag{3}$$

1.2.4 计算灰色关联度

i 方案中指标 j 对 k 灰类的隶属度记为 $z_{ik}(j)$ 。若 $z_{ik}(j)=(z_{ik}(1), z_{ik}(2), \dots, z_{ik}(n))=(1, 1, \dots, 1)$, 那么 i 方案隶属于 k 灰类, 因此以 $z_{ik}(0)=1$ 作为参考序列, $z_{ik}(j)$ 作为比较序列, 计算灰色关联度 $r_{ik}(j)$, 具体计算方法见式(4)~(5)。

$$\delta_{jk}(i) = \frac{\min_i \min_k |z_{ik}(j) - z_{ik}(0)| + 0.5 \max_i \max_k |z_{ik}(j) - z_{ik}(0)|}{|z_{ik}(j) - z_{ik}(0)| + 0.5 \max_i \max_k |z_{ik}(j) - z_{ik}(0)|} \quad (4)$$

$$r_{ik}(j) = \sum_{j=1}^n \mu_{jk}(i) \delta_{jk}(i) \quad (5)$$

1.3 给水厂紫外-氯工艺技术效能评价

综合考虑各给水厂的位置和所处流域, 从 11 座典型给水厂中最终选择 A、B、C、D 4 座给水厂进行工艺运行效能评价。这 4 座给水厂的基本情况见表 5。

表 5 紫外-氯工艺评价指标样本数据汇总

Table 5 Summary of sample data of UV / chlorine process evaluation indicators

给水厂 编号	进水来源	运行参数		评价指标样本数据			
		实际紫外剂量/ ($\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)	有效氯的质量 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	菌落总数/ ($\text{cfu}\cdot\text{mL}^{-1}$)	余氯/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	总氯/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	THMs的质量 浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
A	炭滤出水	40.0	1.8	NAD	1.41	—	0.041 6
B	砂滤出水	41.9	1.6	NAD	1.28	—	0.009 6
C	炭滤出水	42.8	1.8	1.8	1.34	—	0.013 9
D	炭滤出水	48.0	1.0	NAD	—	2.30	0.020 2

注：“—”表示给水厂未测定该指标浓度；“NAD”表示未检出菌落。

同时, 对这 4 座给水厂紫外-氯工艺进水水质指标进行分析, 主要关注与三卤甲烷生成浓度呈正相关的高锰酸盐指数, 与紫外设备运行状况密切相关的进水浊度和硬度, 以及进水菌落总数等指标, 分析结果见表 6。另外, 由于这 4 座给水厂皆没有前加氯装置, 故工艺进水没有氯检出。

根据表 6 可知, 各给水厂紫外-氯工艺进水水质相差不大, 仅菌落总数指标数值略有差异, 因此, 为简化分析条件, 后续评价时忽略各给水厂进水水质对紫外-氯工艺运行的影响。

根据 1.2 节所建立的技术评价体系, 开展 4 座给水厂紫外-氯工艺运行技术效能评价。在各评价指标样本数据和标准数据量纲一化的基础上, 按照公式(3)~(5)开展计算, 并根据计算结果判定各给水厂出水水质级别, 计算结果见表 7。

表 6 调研给水厂紫外-氯工艺进水水质

Table 6 Influent quality of UV/chlorine process in water plant

给水厂 编号	浊度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD_{Mn} / ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	硬度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	菌落总数/ ($\text{cfu}\cdot\text{mL}^{-1}$)
A	0.87	1.92	163	1 200
B	0.75	1.68	184	1 000
C	0.68	1.97	235	870
D	0.46	1.43	122	1 000

表 7 给水厂紫外-氯工艺出水水质关联度计算结果

Table 7 Correlative degree calculation results of water quality of effluent from UV/chlorine process in water plant

给水厂编号	I类	II类	III类	IV类	V类	水质级别
A	0.380	0.605	0.822	0.721	0.478	III类(0.6)
B	0.815	1.000	0.719	0.431	0.333	II类(0.8)
C	0.446	0.955	0.736	0.452	0.333	II类(0.8)
D	0.362	0.803	1.000	0.754	0.458	III类(0.6)

1.4 评价可靠性分析

将各给水厂工艺技术效能评价结果与实际情况进行对比分析，以验证评价结果可靠与否。各给水厂的评价结果与实际情况对比结果见表 8。根据表 8 可知，4 座给水厂紫外-氯工艺实际出水水质类别与评价结果相同，表明上述评价结果具有一定可靠性。

2 紫外-氯工艺运行成本效益评价

2.1 评价指标体系构建

对紫外-氯工艺运行综合效能的评价，应综合考虑工艺运行的技术效能和经济收益^[11]。其中，采用技术成本效益分析法进行工艺经济收益评价，通过分析工艺总成本和总收益间的关系，以确定技术经济收益。紫外-氯工艺运行成本效益评价应综合考虑紫外-氯工艺的日常运行成本和技术采用后所带来的经济收益，通过前期调研，确定层次指标体系，如图 3 所示。

2.2 紫外-氯工艺费用效益分析模型的建立

1) 建立运行成本效益模型。采用运行成本效益模型分析计算工艺运行成本，综合分析工艺运行产生的成本，得到工艺吨水运行成本。方案 i 的吨水运行成本 IC_i 的计算公式见式 (6)。

$$IC_i = \frac{D_i + M_i + L_i}{t \times 24 \times q} + C_{ri} \tag{6}$$

式中： D_i 为方案 i 的设备折旧成本，万元，计算公式见式 (7)^[12]； M_i 为方案 i 的设备维修成本，万元，计算公式见式 (8)^[12]； L_i 为方案 i 的运行人工成本，万元，计算公式见式 (9)^[12]； C_{ri} 为方案 i 的吨水能耗成本，元· m^{-3} ，等于单位吨水电耗和单位吨水药耗之和，其计算皆按照“单价×数量”的计算模式进行； t 为工艺总运行时间，d。其中，紫外设备的单位吨水耗电量 E 计算见式 (10)。

$$D_i = \frac{R}{n} C_0 \tag{7}$$

式中： C_0 为紫外氯消毒工艺的初始投资 (包括工程建设费和设备购置费用)，万元； n 为紫外线设备折旧年限，a； R 为紫外线设备的固定资产形成率，本文取 95%。

$$M_i = \epsilon_M C_0 \tag{8}$$

式中： ϵ_M 为维修占设备购置费比率，一般与灯管寿命、清洗频率有关。

$$L_i = mW \tag{9}$$

式中： m 为紫外氯消毒工艺运行维护工人数目，人； W 是一个工人的年薪，万元。

$$E = \frac{P(UVT)}{q} \tag{10}$$

式中： P 为紫外设备功率，kW； q 为过水流量， $m^3 \cdot h^{-1}$ 。

表 8 评价成果与实际情况的对比结果

Table 8 Comparison of the evaluation results with the actual situation of the water plant

给水厂编号	水质评价级别	水质实际情况	备注
A	Ⅲ类(0.6)	Ⅲ类(符合饮用水标准)	运行时间较短
B	Ⅱ类(0.8)	Ⅱ类(符合饮用水标准)	已进行多次调整
C	Ⅱ类(0.8)	Ⅱ类(符合饮用水标准)	已进行多次调整
D	Ⅲ类(0.6)	Ⅲ类(符合饮用水标准)	未做大量调试

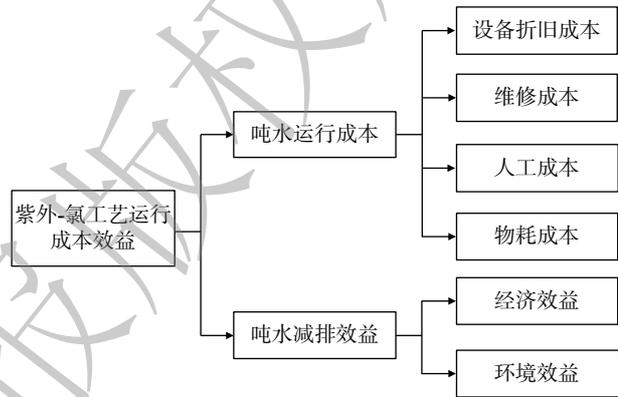


图 3 紫外-氯工艺运行成本效益评价指标体系
Fig. 3 UV / chlorine process operation cost - benefit evaluation index system

2) 减排效益模型建立。减排效益模型是根据技术采用后所带来的收益大小进行评价。与单独氯消毒工艺相比,在保证水处理效果的情况下,紫外-氯工艺所需的投氯量更少,而消毒副产物的生成浓度与投氯量之间呈线性或对数型正相关,相应的消毒副产物生成浓度也有所下降。据此综合考虑消毒副产物浓度降低带来的环境效益和投氯量减少带来的经济收益,以计算紫外-氯工艺的吨水减排效益,其具体计算公式见式(11)。

$$IM_i = \mu \left(\frac{C_i}{K} \right)^{1.8619} \quad (11)$$

式中: IM_i 为技术的吨水减排效益, $\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$; K 为经验常数,一般取2.92; μ 为氯药剂单价, $\text{元} \cdot \text{g}^{-1}$; C_i 为技术采用后, THMs浓度的减少量, $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;

3) 技术收益率计算。紫外-氯工艺的运行收益率 γ 以吨水减排效益与吨水运行成本的比值来表示,其具体计算公式见式(12)。

$$\gamma = \frac{IM_i}{IC_i} \quad (12)$$

2.3 成本效益评价模型的应用

依旧选用1.3节所述的4座给水厂开展紫外-氯工艺运行成本效益分析,4座给水厂的相关经济

表9 紫外-氯工艺经济指标数据汇总

Table 9 Summary of economic index data of UV/chlorine process

给水厂编号	单台设备初始投资/万元	单台设备流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	折旧年限/a	固定资产形成率/%	维修费用比例/%	运行维护工人数量/人	薪酬/ $(\text{万元} \cdot \text{月}^{-1})$
A	450	2 600	10	95	30	12	0.45
B	550	2 400	15	95	30	6	0.43
C	550	2 800	15	95	30	8	0.35
D	300	5 000	12	95	12	9	0.45

给水厂编号	功率/kW	电费/ $(\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$	氯消毒剂种类	药剂单价/ $(\text{元} \cdot \text{t}^{-1})$	投药量/ $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	连续运行时间/d	THMs的减少排放量/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
A	21.0	0.695	10%次氯酸钠	1 185	18	365	0.7114
B	25.2	0.703	10%次氯酸钠	1 185	16	365	0.6794
C	30.2	0.647	液氯	2 925	1.8	365	0.7331
D	22.0	0.707	氯胺(4:1)	3 260	5	365	0.1388

指标数据见表9,根据公式(6)~(12)计算得到各给水厂收益率如图4所示。

由图4可知,C厂技术收益率最佳,为0.208%,这或许是由于C厂THMs的减少排放量和氯使用减少量最大导致的。

2.4 评价可靠性分析

将评价得到的各给水厂技术收益率与实际情况进行对比分析,对比结果见表10。由表10可知,各给水厂收益率评价结果与给水厂实际情况相符,表明上述评价模型具备一定的合理性以及评价结果存在一定的可靠性。

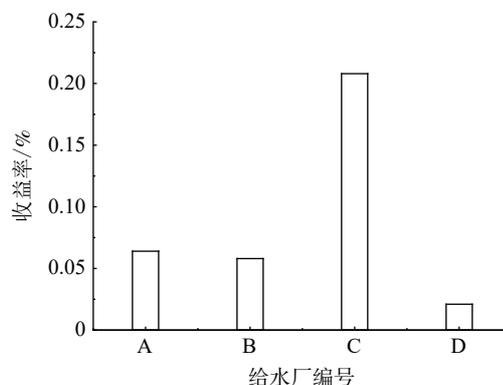


图4 给水厂运行技术收益率的计算结果

Fig. 4 Calculation result of water plant technology yield

3 紫外-氯工艺运行效能综合评价

紫外-氯工艺运行效能综合评价是基于技术效能评价和技术成本效益评价的评价结果展开的，本文综合考虑工艺运行技术效能和技术经济收益，对技术运行情况进行了全面评价。

采用加权平均的方式将技术效能评价结果和技术成本效益评价结果进行综合，分别对其赋以对应权重。根据专家意见，技术效能是给水厂运行的首要关注点，经济收益在给水厂日常运行也应给予关注。因此，确定二者权重值之比为 6:4 较为合理，则 4 座给水厂的综合评价结果如表 11 所示。

表 11 中的数据表明，C 厂紫外-氯工艺综合运行效能最佳，表明该厂紫外-氯工艺运行参数设置较为合理。这主要是由于 C 厂工艺运行时间较长，积累了较丰富的运行经验，可以在保障出水水质的条件下实现经济收益较优。

因此，该厂工艺运行参数(有效紫外消毒剂量为 $42.8 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，有效氯投加量为 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可为紫外-氯工艺在其他厂的运行提供参考。

4 结论

1) 基于灰色聚类关联模型建立了紫外-氯工艺运行技术效能评价模型，并将所建模型用于 A、B、C、D 4 座给水厂技术效能评价，在排除进水水质对工艺运行效果和紫外设备运行的影响下，最终得到 B、C 厂工艺出水水质较佳，水质类别为 II 类。然后，将评价结果与实际水质情况进行对比分析，初步验证了技术效能评价模型的合理性。

2) 基于技术成本效益模型建立了紫外-氯工艺运行技术经济收益评价模型，同时将所建模型用于 A、B、C、D 4 座给水厂经济收益评价，得到 C 厂经济收益率最佳，为 0.208%。将评价结果与工艺实际收益情况进行了对比分析，结果表明，技术经济收益模型具有一定可靠性。

3) 综合考虑紫外-氯工艺运行技术效能和经济收益，对前述评价结果进行了综合分析。结果表明：在不考虑进水水质影响的情况下，C 厂紫外-氯工艺运行综合效能最佳，可以在满足工艺效能最佳时保证经济收益较优，因此，其他厂在工艺进水水质相近的情况下，可参考 C 厂工艺的运行参数(有效紫外消毒剂量为 $42.8 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ，有效氯投加量为 $1.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)进行调试运行。

表 10 评价结果与实际效益的对比分析

Table 10 Comparative analysis of evaluation results and actual benefits of water plants

给水厂编号	评价结果收益率/%	实际收益情况
A	0.064	良
B	0.058	良
C	0.208	优
D	0.021	中

表 11 评价给水厂综合评价结果

Table 11 Comprehensive assessment results of water plants

给水厂编号	技术效能评价	收益率/%	综合评分
A	Ⅲ类(0.6)	0.064	0.385 6
B	Ⅱ类(0.8)	0.058	0.503 2
C	Ⅱ类(0.8)	0.208	0.563 2
D	Ⅲ类(0.6)	0.021	0.368 4

参考文献

- [1] 李亚峰, 张子一. 饮用水消毒技术现状及发展趋势[J]. 建筑与预算, 2019(9): 62-69.
- [2] 黄慧婷, 张明明, 王敏, 等. 紫外/氯消毒在饮用水处理中的应用[J]. 净水技术, 2018, 37(10): 44-48.
- [3] SANCHES S, BARRETO CRESPO M T, PEREIRA V J. Drinking water treatment of priority pesticides using low pressure UV photolysis and advanced oxidation processes[J]. *Water Research*, 2010, 44(6): 1809-1818.
- [4] BARSTOW C K, DOTSON A D, LINDEN K G. Assessing point-of-use ultraviolet disinfection for safe water in urban developing communities[J]. *Journal of Water and Health*, 2014, 12(4): 663-669.
- [5] ZHOU X, ZHAO J, LI Z, et al. Influence of ultrasound enhancement on chlorine dioxide consumption and disinfection by-products formation for secondary effluents disinfection[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 28: 376-381.
- [6] GRIMAUD G, PERRY N, LARATTE B. Decision support methodology for designing sustainable recycling process based on ETV standards[J]. *Procedia Manufacturing*, 2017, 7: 72-78.
- [7] 金涛, 唐非. 饮用水氯化消毒副产物及其对健康的潜在危害[J]. 中国消毒学杂志, 2013, 30(3): 255-258.
- [8] 徐卫国. 灰色聚类白化函数探析[J]. 数学的实践与认识, 2016, 46(21): 141-150.
- [9] 徐卫国, 张清宇, 郭慧, 等. 灰色聚类模型的改进及应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2006(6): 200-205.
- [10] 陈泉, 李灿, 朱尚斌, 等. 改进灰色聚类关联分析法的综合评价及应用[J]. *建筑热能通风空调*, 2019, 38(1): 50-54.
- [11] HAO R X, LIU F, REN H Q, et al. Study on a comprehensive evaluation method for the assessment of the operational efficiency of wastewater treatment plants[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2013, 27(3): 747-756.
- [12] 史建勇. 燃煤电站烟气脱硫脱硝技术成本效益分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.

(责任编辑: 靳炜)

Comprehensive evaluation of operational efficiency of UV-chlorine disinfection process in urban water supply plants

HE Bin, ZHANG Jingyi, LI Weiguang*

School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

*Corresponding author, E-mail: hitlwg@126.com

Abstract For lack of standard document guidance and insufficient management regarding application of UV-chlorine disinfection, a comprehensive evaluation model of UV-chlorine process operation management technology was established to obtain the optimal operating parameters of UV-chlorine process under certain conditions, thus providing guidance for operating municipal water supply plants. Based on the grey cluster correlation analysis model and the cost-benefit model, the efficiency evaluation model and economic benefit evaluation model of UV-chlorine process operation management technology were established respectively. The comprehensive efficiencies of process operation of 4 water plants (A, B, C and D) in different regions were evaluated in the aspects of technical efficiency and economic benefit. The results showed that the comprehensive efficiency of UV-chlorine process in C water plant was the highest, and the main process parameters were as follows: the UV and effective chlorine doses are $42.8 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $1.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. The outcome of this study could provide guidance for tuning and operation of UV-chlorine process in water supply facilities.

Keywords UV-chlorine disinfection process; urban water supply plants; grey clustering association analysis; cost-benefit analysis