

青南地区城镇污水处理厂综合效率评估分析

李广英¹, 何跃君^{2,1}, 冯朝晖³, 葛劲松¹, 王凌青^{1,3}, 关海钢¹, 罗梦超¹

1. 青海省生态环境规划和环保技术中心, 西宁 810007

2. 北华航天工业学院, 廊坊 065000

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘要: 青南地区地处青藏高原腹地, 是我国多条大江大河发源地, 该地区污水处理对下游江河水环境质量改善具有重要意义。对青南地区(玉树、果洛和黄南)污水处理厂的综合效率进行定量评估分析并指出制约其效率提升的因素, 对推动该地区污水处理产业的后续发展具有重要意义。因此, 本文以青南地区 11 座城镇污水处理厂为研究对象, 利用层次分析法和模糊综合分析法构建的模糊层次分析模型, 从技术性能、经济性能、运行管理三个层面选取指标对模型进行量化, 评估青南地区各污水处理厂的综合效率。结果表明: 污水处理厂的综合得分在 80 分以上的只有 1 座, 50—80 分的有 4 座, 50 分以下的有 6 座, 平均得分只有 50.88 分, 表明该区域污水处理厂综合运行效率并不理想。通过实地调研, 结合分析各污水处理厂表现较差的指标, 发现该地区雨水收集率较低、低温冻裂管网等问题是导致污水处理效率偏低的主要原因。同时, 未进行完备的污水处理设施建设与未完成提标改造是导致污水处理厂整体运行效果差等问题的重要原因。因此各污水处理厂应进一步加强设施建设, 采取改进措施提高污水处理效率, 防止管网等设备破裂导致污水污染环境, 节约药费、电耗、人工费等运行费用, 进一步提高青南地区污水处理厂的技术性能、运行管理和经济效益。

关键词: 层次分析法; 模糊层次分析; 污水处理厂; 水质达标率; 提标改造

Comprehensive evaluation of wastewater treatment plant in the southern Qinghai based on Fuzzy-AHP model

LI Guangying¹, HE Yuejun^{2,1}, FENG Zhaohui³, GE Jingsong¹, WANG Lingqing^{1,3}, GUAN Haigang¹, LUO Mengchao¹

1. Qinghai Ecological Environment Planning and Environmental Protection Technology Center, Xining 810007, China

2. North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China

3. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: *Background, aim, and scope* Qingnan area is located in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau, which is the birthplace of many major rivers in China. Wastewater treatment in this area is of great significance to improve the water quality of the downstream river. The purpose of this study is to quantitatively evaluate and analyze the comprehensive efficiency of wastewater treatment plants and point out the factors restricting

收稿日期: 2021-02-03; 录用日期: 2021-04-15; 网络出版: 2021-04-26

Received Date: 2021-02-03; Accepted Date: 2021-04-15; Online first: 2021-04-26

基金项目: 青海省重大科技专项 (2018-SF-A4)

Foundation Item: Major Science and Technology Projects of Qinghai Province (2018-SF-A4)

通信作者: 何跃君, E-mail: yuejunhe1981@163.com

Corresponding Author: HE Yuejun, E-mail: yuejunhe1981@163.com

引用格式: 李广英, 何跃君, 冯朝晖, 等. 2021. 青南地区城镇污水处理厂综合效率评估分析 [J]. 地球环境学报, 12(4): 436–446.

Citation: Li G Y, He Y J, Feng Z H, et al. 2021. Comprehensive evaluation of wastewater treatment plant in the southern Qinghai based on Fuzzy-AHP model [J]. *Journal of Earth Environment*, 12(4): 436–446.

their efficiency improvement, so as to promote the follow-up development of wastewater treatment industry in Qingnan area (including Yushu, Guoluo and Huangnan). **Materials and methods** Thus, 11 urban wastewater treatment plants in Qingnan area are taken as research objects in this study, analytic hierarchy process (AHP) and fuzzy comprehensive analysis (FCA) are used to construct the fuzzy comprehensive evaluation (FCE) model for evaluating the comprehensive efficiency of wastewater treatment plants. Typical indicators from three aspects like technical performance, economic performance, and operation management are chosen to concretize the model for evaluate comprehensive efficiency of wastewater treatment plants in Qingnan area. **Results** The results showed that only one wastewater treatment plant scored more than 80 points, 4 plants scored 50—80 points, and 6 plants scored less than 50 points. The average score of wastewater treatment plants was only 50.88 points. It shows that the comprehensive performance of most wastewater treatment plants in this area is not ideal. **Discussion** Through on-the-spot investigation and combined with the analysis of the poor performance indexes of each wastewater treatment plant, it is found that the low efficiency of wastewater treatment is caused by the low rainwater collection rate, low-temperature frost crack pipe network and other problems in this area. **Conclusions** Meanwhile, the overall operation effect is poor due to the incomplete upgrading and transformation, which needs the key construction and transformation of relevant departments. **Recommendations and perspectives** Each wastewater treatment plant should further strengthen the construction of facilities and take improvement measures to improve wastewater treatment efficiency and prevent wastewater in broken pip from polluting the environment, save the operation costs such as drug consumption, power consumption and labor cost. Only in this way can the technical performance, operation management and economic performance of the wastewater treatment plant in Qingnan area be improved.

Key words: analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive analysis; wastewater treatment plant; water quality standard-reaching rate; upgrading and reconstruction

近年来,我国水环境质量有所改善,但与建设美丽中国的要求相比,生态环境基础设施建设短板尚未补齐,水生态环境保护不平衡不协调的问题依然突出,水污染防治工作仍然十分艰巨、形势依然严峻(买亚宗等,2015)。城镇污水处理厂作为生活污水集中处理处置的重要基础设施,不仅可以减少水源污染,还可以提高水的利用率,是控制水体污染和改善流域水质的有效保障载体,有巨大的社会效益与经济效益(Chen et al, 2019; Zhou et al, 2019)。目前我国所有地级市和92%以上的县城均已建成污水处理厂,年处理污水总量超过540亿 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ (王凌,2020)。据《全国城镇污水处理管理信息系统》统计数据,截至2019年底,全国已有2913座城镇污水处理厂,其中53.2%的污水处理厂执行一级A标准(李激等,2020)。全国污水处理建设工作的发展与改善使我国的水环境质量取得较大改善,但青海地区污水处理发展依然存在如污水配套管网建设不完善、雨污分流不彻底、污泥尚未得到无害化处理、运营监管不到位等问题。

污水处理厂作为城镇发展过程中重要的配套工程,在稳定运行、达标排放的基础上,需兼顾污水处理效率与效益,实现最大限度的污水收集和处理和较低的污水处理费用是其运行效能评判的主要考量。因此需要建立科学合理的指标体系和分析方法,高效准确开展污水处理厂综合效率评估。目前,国内外相关研究对运行效率、污水处理单耗、运营管理、安全管理等方面进行了评价(刘开第等,2000;何雪梅和吴义锋,2006),研究多集中在从经济和技术层面评估分析各污水处理厂的表现。有研究采用模糊综合评判模型从定性与定量结合的角度进行综合评估(李如忠,2000;范祖悦和邹蔚,2002; Flores-Alsina et al, 2010)。还有研究采用数据包络分析(data envelopment assessment, DEA)、SBM-DEA模型(sackbased measure-DEA)等方法从电耗、运行成本、劳动力、污染物去除率、再生水量等方面评价污水处理厂,但没有考虑出水水质达标率的问题(Dong et al, 2017; Cheng et al, 2020; Jiang et al, 2020)。此外,有研究所进行的污水

处理厂效率评估是针对东部发达地区展开, 所选指标忽略地区间社会经济发展等差异性, 较少考虑具体地区的地形气候等自然环境条件, 难以满足具体地方尤其是西部地区的管理和应用 (李丹晨, 2019)。而模糊综合分析方法不仅可以定性定量地评估污水处理厂的运行效率, 而且可以针对青南地区污水处理薄弱环节综合全面地设计评价体系, 对该区域具有较高适用性 (Wu and Hu, 2020; Cao et al, 2021)。

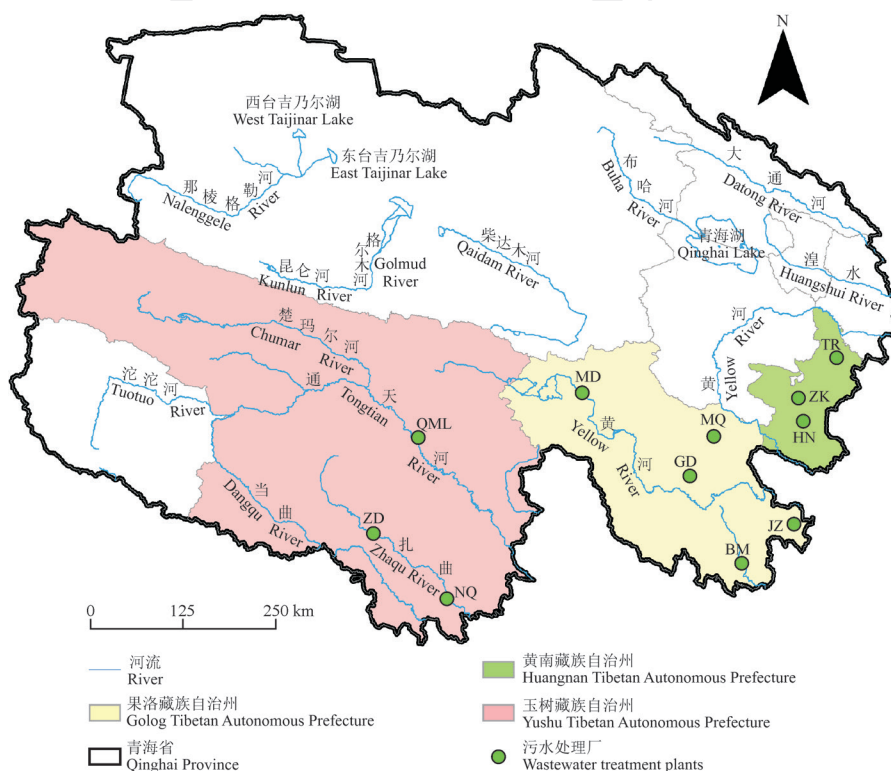
青南地区地处青藏高原腹地, 河流湖泊众多, 是我国长江、黄河、澜沧江三大水系源头汇水区, 包括玉树、果洛和黄南三个藏族自治州, 由于海拔高、气候高寒, 生态环境极为脆弱。青南地区城镇生活污水处理厂出水质量不仅关系到区域水环境安全, 也影响到我国诸多江河中下游生态环境的可持续发展 (杨玉霞等, 2020)。本文以青南地区为研究区域, 选取玉树、果洛和黄南三州 11 座城镇污水处理厂作为研究对象, 综合考虑污水处理厂技术性能、经济性能和运行管理等方面, 采用模糊层次分析法进行污水处理厂综合评估, 不仅运用模糊数学中的隶属度理论将各种指

标量化, 同时引入层次分析法确定模糊层次分析模型的各指标权重, 而且根据青海南部地区发展情况选取对本地影响污水处理效率与成本的关键指标进行评价, 以期为气候、环境等条件类似地区城镇污水处理厂的发展和改进提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

以青海南部区域 (以下简称青南地区) 作为研究区域, 共包括三个藏族自治州, 分别是玉树、果洛、黄南 (图 1)。该区主要自然资源为草原和河流湖泊, 植被覆盖以草地为主, 区域主体产业为畜牧业。青南地区作为我国长江、黄河、澜沧江源头区域, 该地区的水质保持与污水处理工作显得十分重要 (王士勇和赵满, 2020; 杨玉霞等, 2020; Fan and Fang, 2020; Wu et al, 2021)。同时该地区的经济发展较为落后, 很多污水收集设备与硬件设施建设并不完善, 导致污水处理的整体发展水平受到制约, 因此对该地区的污水处理厂整体运行效率进行评估并找出制约因素显得尤为必要 (Jiang, 2011; Liao et al, 2021)。



本图基于青海省自然资源厅网站 (<https://zrzyt.qinghai.gov.cn/text-?vid=34010>) 下载的青海省示意图标准画法 1 制作, 底图无修改。

图 1 青南地区污水处理厂分布示意图

Fig. 1 Distribution of wastewater treatment plants in Qingnan area

通过实地调查,主要以青南地区玉树、果洛、黄南三州内 11 座污水处理厂作为研究对象(图 1、表 1),以 2017—2019 年 11 座污水处理厂统计数据作为研究数据,统计指标包括污染物进

水水质、污染物出水水质、水质达标天数、污水处理厂正常运行天数、实际污水处理量、设计污水处理量、单位药耗、单位电耗、单位运行成本参数。

表 1 青南地区污水处理厂基本情况
Tab. 1 Basic situation of wastewater treatment plant in study area

地区 Area	污水处理厂 Wastewater treatment plants	处理工艺 Treatment process	设计处理能力 Design processing capacity ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	污水处理量 Wastewater treatment ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
玉树藏族自治州 Yushu Tibetan Autonomous Prefecture	NQ	活性污泥法 Activated sludge process	3500	700.00
	QML	曝气生物滤池工艺 Biological aerated filter process	1200	800.00
	ZD	活性污泥法 Activated sludge process	3000	365.00
果洛藏族自治州 Golog Tibetan Autonomous Prefecture	BM	氧化沟类工艺 Oxidation ditch process	1400	625.69
	GD	A2/O 工艺 A2/O process	3000	1117.67
	JZ	活性污泥法 Activated sludge process	1000	663.08
	MD	CAST 工艺 CAST process	1000	645.01
	MQ	A2/O 工艺 A2/O process	3000	2343.06
黄南藏族自治州 Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture	HN	一体氧化沟工艺 Integrated oxidation ditch process	3000	1795.33
	ZK	一体氧化沟工艺 Integrated oxidation ditch process	3000	1155.33
	TR	氧化沟类工艺 Oxidation ditch process	5000	5430.67

1.2 研究方法

1.2.1 层次分析法(AHP)

层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是结合定量和定性分析的系统分析,是把整个问题分解,并按照支配关系构造出层形结构;然后确定出每个指标的重要性;最后计算出各要素的权重(Baffoe, 2019; Achu et al, 2020)。该算法首先需要将问题分解,用指标建立起层次结构系统,然后采用 1—9 标度法(表 2)构建判断矩阵并计算各指标权重(李丹晨, 2019)。一致性指标 CI 的计算可参照公式(1):

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

公式(1)中: n 为指标权重矩阵阶数, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。然后按照公式(2)计算一致性

比例:

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

一般情况下,结果 ≤ 0.1 就可以认为其满足一致性的要求(公式(2)中的 RI 参照表 2)。

表 2 1—9 标度平均随机一致性检验指标
Tab. 2 1—9 scale average random consistency test index

维数 Dimension	RI
1	0.00
2	0.00
3	0.58
4	0.90
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45

依据层次分析法的基本原理,将青南地区污水处理厂的综合分析评价指标分成注重对出水质量评价的技术性能、体现污水处理厂运行效率的经济性能和运行管理三个层面,然后根据青南地区污水处理运行实际,选取各层面具有代表性、能揭示污水处理运行问题的典型指标构建评价指标体系(图 2)。

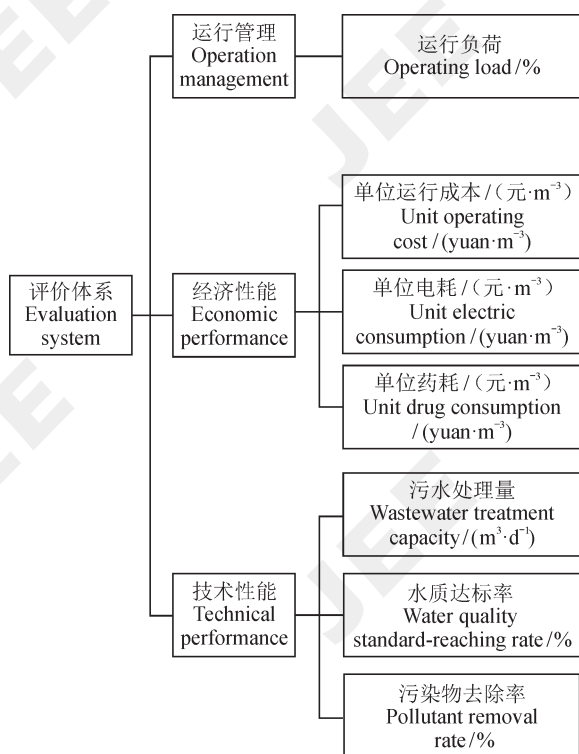


图 2 污水处理厂的评价体系

Fig. 2 Evaluation system of wastewater treatment plant

1.2.2 模糊综合分析法(FCE)

模糊综合分析法(fuzzy comprehensive evaluation, FCE)是运用隶属度理论量化指标,将其划分等级后再对其进行模糊评价,最终得到完整结论(Liu et al, 2014; Xie et al, 2017; Wu and Hu, 2020; Cao et al, 2021)。FCE需要先构造评价因素集并确定评价等级,然后计算隶属度矩阵 U 并通过模糊评价 $B=A \cdot U$ (A 为权重矩阵)实现模糊合成与决策。

1.2.3 模糊层次分析模型

模糊层次分析模型(fuzzy-analytic hierarchy process, F-AHP)是用层次分析方法与模糊综合分析法共同构造(Zabihi et al, 2020; Chawla et al, 2021),首先应用层次分析法将整体问题分解,确定出关键指标的权重,然后再用模糊综合分析

法将AHP求得的权重与隶属度矩阵共同计算,得到对所有研究对象的综合评价结果(Zhang et al, 2020)。通过综合运用两种算法构造的模型可以清楚直观地观测各指标对研究对象的影响(Islam et al, 2020)。本文在运用模糊层次分析模型的基础上,充分考虑青南地区的气候环境与经济条件,将层次分析的指标分为技术性能、经济性能、运行管理三个层面,使评估综合纳入污水处理效率、运行负荷、出水水质、经济因子等这些对青南地区污水处理厂有重要影响的指标,并灵活运用极大与极小值隶属度函数量化这些指标使结果可以科学合理地对污水处理工作进行综合评估。

2 结果与分析

2.1 污水处理厂综合效率的评估分析

2.1.1 层次分析法确定指标权重

层次分析中,以1.2.1节指标所构造的层次分析模型中 $A-B$ 层判断矩阵用1—9标度法进行指标权重确定后结果如表3所示。

表 3 $A-B$ 判断矩阵两两评价结果

Tab. 3 Evaluation results of $A-B$ judgment matrix

	A	B_1	B_2	B_3
技术性能指标	Technical indicators B_1	1	2	2
经济性能指标	Economic indicators B_2	1/2	1	1
运行管理指标	Operation management indicators B_3	1/2	1	1

用规范列平均法确定各指标的权重,对基于权重规范列平均法的指标权重矩阵的各行求平均,得到各指标权重值:[0.500, 0.250, 0.250]。判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}=3.000$,根据其值与公式(1)计算得到一致性检验指标 $CI=0.000$ 。参考表1的1—9标度平均随机一致性检验指标可知, $RI=0.58$ 。因此按照公式(2)计算可得 $CR=0.000 \leq 0.1$,所以可以认为所计算得到的权值是有效的。

同样用层次分析法计算 $B-C$ 层判断矩阵的指标权重(图3)。

由图3可以看出,以上各种指标的重要性由大到小排序依次为水质达标率>运行负荷>单位运行成本>污染物去除率>单位电耗>污水处理量>单位药耗,水质达标作为污水处理厂运行的最重要因素是其职责的根本体现,另外运行负荷也是处理厂设备安全正常高效运行的重要评价指标,运行成本则是其经济效益的重要体现,它们对污水处理厂的综合评价均有重要影响。

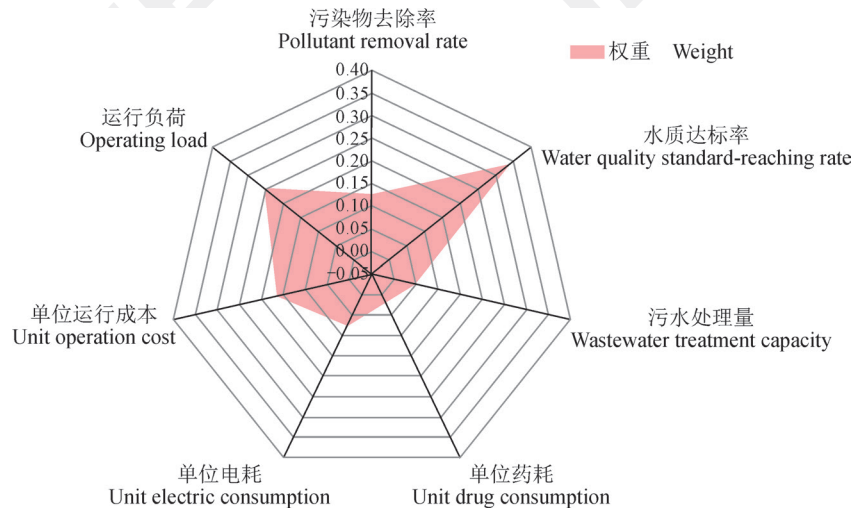


图3 城镇污水处理厂评价指标权重计算结果

Fig. 3 Weight calculation result of urban wastewater treatment plant

2.1.2 模糊层次分析模型

对于污水处理厂的综合评价,共选取了7个定量的评价指标,并且据2.3节得到权重集 $A=[0.122, 0.334, 0.044, 0.014, 0.074, 0.162, 0.250]$ 。然后用隶

属度函数对这些指标进行标准化处理。

(1) 污染物去除率 C_1

各污水处理厂的污染物去除率及用6分制对其打分后所计算的平均分如表4所示。

表4 青南地区城镇污水处理厂污染物去除率及平均分
Tab. 4 Pollutant removal rate of municipal wastewater treatment plant in Qingnan area

地区 Area	污水处理厂 Wastewater treatment plants	污染物去除率 Pollutant removal rate / %				平均分 Average points
		COD	SS	NH ₃ -N	TP	
玉树藏族自治州 Yushu Tibetan Autonomous Prefecture	NQ	68.04	66.80	65.27	34.62	1.50
	QML	74.63	92.32	92.57	91.95	5.00
	ZD	71.79	82.19	82.71	75.00	3.50
果洛藏族自治州 Golog Tibetan Autonomous Prefecture	BM	66.91	95.65	89.24	84.68	4.00
	GD	68.33	98.35	81.50	86.83	4.00
	JZ	82.91	98.33	85.71	80.95	5.25
	MD	80.33	97.22	86.53	84.53	5.00
黄南藏族自治州 Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture	MQ	66.38	85.48	56.52	96.19	3.00
	HN	86.66	96.43	95.61	79.79	5.75
	ZK	74.37	94.33	58.02	17.14	2.50
	TR	88.72	99.35	94.37	86.56	5.75

污染物去除率属于极大型指标,因此需要采用极大隶属度函数(Ding and Liu, 2019; Islam et al, 2020; Shao et al, 2020; Zabihi et al, 2020),如公式(3)所示。

$$\mu(x) = e^{-2.1(x_k^{\max} - x_k^i)/(x_k^{\max} - x_k^{\min})} \quad (3)$$

公式(3)中: $x_k^{\max}$ 是第 k 个指标的最大值, $x_k^{\min}$ 是最小值, x_k^i 是第 i 个污水处理厂的第 k 个指标。通过该指标计算得 $X_1=[0.123, 0.690, 0.329, 0.421, 0.421, 0.781, 0.690, 0.257, 1.000, 0.201, 1.000]^T$ 。

(2) 水质达标率 C_2

各污水处理厂水质达标率及其打分结果均值如表5。

利用公式(3)计算得 $X_2=[0.301, 0.472, 1.000, 0.861, 1.000, 1.000, 0.549, 0.123, 0.472, 0.472, 0.472]^T$ 。

(3) 污水处理量 C_3

各污水处理量如表6所示,通过该指标计算得 $X_3=[0.142, 0.149, 0.122, 0.132, 0.179, 0.129, 0.161, 0.368, 0.294, 0.215, 1.000]^T$ 。

表 5 青南地区城镇污水处理厂水质达标率及打分结果
Tab. 5 Water quality standard-reaching rate of urban wastewater treatment plants in Qingnan area

地区 Area	污水处理厂 Wastewater treatment plants	水质达标率 Water quality standard-reaching rate/%				平均值 Average points
		COD	SS	NH ₃ -N	TP	
玉树藏族自治州 Yushu Tibetan Autonomous Prefecture	NQ	81.02	49.64	99.27	80.29	4.00
	QML	48.84	94.19	99.42	98.26	4.75
	ZD	100.00	94.93	100.00	99.28	6.00
	BM	99.33	83.67	98.33	99.33	5.75
果洛藏族自治州 Golog Tibetan Autonomous Prefecture	GD	100.00	100.00	100.00	99.42	6.00
	JZ	99.45	99.73	100.00	99.73	6.00
	MD	96.70	65.00	88.49	92.88	5.00
	MQ	75.55	8.46	39.18	82.76	2.50
黄南藏族自治州 Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture	HN	99.45	67.12	89.59	83.01	4.75
	ZK	99.45	66.94	89.53	83.47	4.75
	TR	98.61	97.78	98.06	62.33	4.75

表 6 青南地区城镇污水处理厂经济性能指标及运行管理指标
Tab. 6 Economic index and operation management index of urban wastewater treatment plant in Qingnan area

地区 Area	污水处理厂 Wastewater treatment plants	单位药耗 /(元·m ⁻³) Unit drug consumption /(yuan·m ⁻³)	单位电耗 /(元·m ⁻³) Unit electric consumption /(yuan·m ⁻³)	单位运行成本 /(元·m ⁻³) Unit operating cost /(yuan·m ⁻³)	运行负荷 Operating load/%	污水处理量 Wastewater treatment capacity/(m ³ ·d ⁻¹)
玉树藏族自治州 Yushu Tibetan Autonomous Prefecture	NQ	0.55	0.95	4.46	20.00	700.00
	QML	0.10	0.55	5.00	66.67	800.00
	ZD	1.85	0.66	11.24	12.17	365.00
	BM	1.14	0.81	4.50	62.57	625.69
果洛藏族自治州 Golog Tibetan Autonomous Prefecture	GD	0.53	0.64	2.46	79.83	1117.67
	JZ	0.59	0.61	4.95	66.31	663.08
	MD	0.40	1.05	5.72	65.33	645.01
	MQ	1.29	0.64	1.12	77.67	2343.06
黄南藏族自治州 Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture	HN	0.32	0.56	2.24	59.84	1795.33
	ZK	0.37	0.57	3.53	38.51	1155.33
	TR	0.31	0.19	0.71	108.61	5430.67

(4) 经济性能指标与运行管理指标

各污水处理厂经济性能指标的具体数值如表 6, 它们均属于极小型指标, 因此需要采用极小隶属度函数, 如公式 (4) 所示。

$$\mu(x) = e^{-2.1(x_k^i - x_k^{\min}) / (x_k^{\max} - x_k^{\min})} \quad (4)$$

公式 (4) 中: $x_k^{\max}$ 是第 k 个指标的最大值, $x_k^{\min}$ 是最小值, x_k^i 是第 i 个污水处理厂的第 k 个指标。据公式 (4) 求得药耗的隶属度函数计算结果 $X_4 = [0.580, 1.000, 0.122, 0.287, 0.591, 0.555, 0.697, 0.240, 0.763, 0.723, 0.776]^T$ 。电耗的结果 $X_5 = [0.158, 0.415, 0.316, 0.218, 0.334, 0.361, 0.122, 0.330, 0.406, 0.392, 1.000]^T$ 。运行成本结果 $X_6 = [0.469, 0.422, 0.122, 0.470, 0.701, 0.443, 0.436, 0.896, 0.730, 0.598, 1.000]^T$ 。运行

负荷属于极大型指标, 采用极大隶属度函数得 $X_7 = [0.473, 0.425, 0.122, 0.469, 0.706, 0.429, 0.368, 0.921, 0.737, 0.570, 1.000]^T$ 。

由以上 (1) — (4) 可以得出对 7 个评价指标的得分构成的隶属度矩阵 $X = [X_1, X_2, \dots, X_7]^T$ 。又根据公式 (3) 的模糊决策可以计算得 $B = [0.255, 0.462, 0.455, 0.533, 0.674, 0.638, 0.449, 0.394, 0.539, 0.377, 0.821]^T$, 转换成绩效百分制的显示图 (图 4)。

2.2 污水处理厂运行效率综合评价与分析

以 2017—2019 年各污水处理厂的数据作为计算基础对综合运作性能进行评估, 采用基于模糊层次分析模型的方法从技术性能、经济性能、运行管理三个层面展开, 通过打分排名对研究区域

污水处理厂存在的普遍问题进行了分析。

NQ 污水处理厂在青南地区综合得分排名最低,其污染物去除率在所有污水处理厂中最低,因为它虽然加入温棚与采暖设施,但设备老化之后的低温导致管网破裂使得其污染物去除率偏低,降低其污水处理效率;QML 的污水处理量较少,且为间歇性进水,导致其处理成本较高,该原因与前人(葛察忠等,2005;李娟和王飞,2015;周国华等,2021)所述一致,是由于雨污分流模式的管网正在修建使得进水浓度低导致的。TR 污水处理厂在技术性能、经济性能、运行管理三个层面的综合评价得分最高,因为 TR 的管网并没有破裂问题,污染物去除率综合得分最高、污水处理量最大、且运行负荷率最高。可见管网设施建设极大地影响该区域的综合污水处理效率,因此各污水处理厂应当加强管网设施建设;同时针对本地的高寒气候环境,加强保温措施,防止管网冻裂影响污水处理效率及污水外流造成的环境污染。

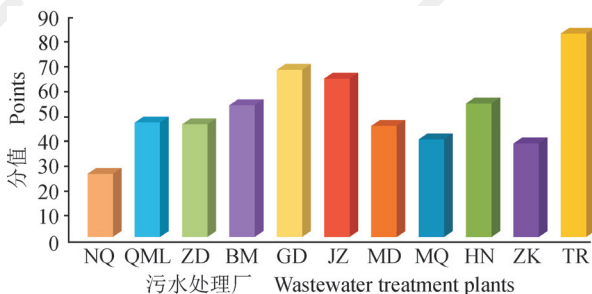


图4 青南地区各城镇生活污水处理厂绩效百分制

Fig. 4 Performance percentage system of municipal wastewater treatment plants in Qingnan area

ZK 的污染物去除率倒数第二,污水收集率低也使其运行负荷很低,只有 38.51%,使得其综合排名为青南地区倒数第二。HN 的污水处理量、运行负荷比 ZK 高,单位药耗、单位电耗与单位运行成本比 ZK 低,且污染物去除率与 TR 同样是青南地区最高的,因此排名高于 ZK。有研究指出,城镇排水设施建设会影响雨污分流,进而影响污水处理厂的运行效率(宋玉亮,2020),所以因设施缺陷导致雨污分流问题的污水处理厂都应当加强基础设施建设。ZD 污水处理厂水质达标率是所有污水处理厂中最高的,污染物去除率高于 NQ 但低于 QML 污水处理厂,总体的污水处理效率只排到第七位,污水处理量与运行负荷最低。污水处理量少是因为处于老城区,居民散居于自建房、

自来水未入户、污水收集管网不完善使污水收集困难、高原地区管网易冻裂、部分地区停电无法使污水处理厂正常运行;负荷率低则是因为停电时间长且地方上没有备用电机。因此对于研究区域出现的负荷率过低和雨污分流问题,青南地区应当加快推进供电设施建设,推进自来水入户工作与老城区的改建工作,使分散住户居住更加集中且具备齐全的供水供电设施,并且积极推进雨污分流设施建设,提高污水收集工作质量。

如王丽君等(2019)所述,生活污水处理排放标准对污水处理十分重要,提高污水处理效率需要先相应提高污水处理标准。本文中 QML 污水处理厂的水质达标率指标较低、运行成本偏高,技术性能指标均较低是因为其执行一级 B 并非一级 A 标准,因此该厂需要进一步提标改造以提高污水处理效率,提升污水处理标准以进一步提高水质达标率(李燕,2020)。一些水质达标率较高的污水处理厂会提高其污水处理整体水平,如 GD 的污染物去除率、污水处理量、运行负荷均低于 TR,药耗、电耗、运行成本均高于 TR,在只有水质达标率相较 TR 有优势的情况下,GD 的综合评估得分仍高居所有污水处理厂处理效率的第二位。还有果洛州各污水处理厂中 BM 污水处理厂技术性能、运行管理性能均低于 JZ,并且其药耗、电耗高于 JZ,但是它的水质达标率高居第二位,因此得分仍然较高。由于水质达标率对污水处理效率评估的重要指标,也对评价接纳水体风险十分关键(Cho et al, 2004; Lotfi et al, 2020),因此一些已经达到一级 A 排放标准的污水处理厂仍需要控制出水水质达标率的标准。一级 A 排放标准的 TR 污水处理厂虽然排名第一,但得分依然没有超过 90 分,因为它的水质达标率并不高,排名只有第六,属于中等水平。果洛州同样作为水质达标率最高的 GD、JZ 分别处于综合排名的二、三位;而 MQ、MD 这两个污水处理厂的综合评价排名靠后,因为 MQ 虽然已经提标改造,但水质达标率最低,只有 2.50 分,因此 MQ 仍然需要提升水质排放标准。由此可见,青南地区大部分污水处理厂在提标改造后仍然需要继续提升水质达标率才能保障处理后水质的排放标准;同时未完成提标改造的污水处理厂应该尽快进行提标改造,使污水处理标准提升至一级 A。

除了以上因素会影响污水处理的总体效率,

经济性能类的指标如药耗、电耗、运行成本等都会对污水处理效率产生影响,进而影响污水处理厂最终的得分与排名(李丹晨,2019;Hernández-Chover et al, 2019, 2020)。如本研究中的 JZ 虽然污染物去除率比 GD 高,但其单位药耗与单位运行成本均高于 GD,且污水处理量更少、运行负荷更低,因此使其综合得分也低于 GD 污水处理厂。而 MD 污水处理厂的单位电耗最高,且运行负荷较低,使得其总运行效率排名为倒数第四。因此各污水处理厂应该控制药耗、电耗及其他污水处理成本提高污水处理厂的整体运行效率。

3 结论

本文选取技术性能、经济性能、运行管理方面的 7 项指标对青南地区的 11 座污水处理厂进行综合效率评估分析。由构建的综合评价体系可以得出青南地区污水处理厂的评价中对结果影响最大的是技术性能指标,其次是经济性能指标和运行管理指标,从单个指标角度看水质达标率、运行负荷、单位运行成本等指标较为重要,但所选指标均对污水处理厂运行效率、经济性能等方面具有影响与指导意义。

从青南地区城镇污水处理厂的综合评价分析结果可以看出,该地区整体的评价得分偏低,这符合该地区的经济发展与人口分布状况。对于污水收集困难、高寒气候冻裂管网导致污染物去除率低、污水处理量与运行负荷低等问题,应当进一步加强设施建设与采取改进措施,防止污水污染环境。各指标执行标准会直接影响污水处理厂的综合处理效率,因此污水处理厂中不是一级 A 执行标准的要进行提标改造,标准提至一级 A;已经是一级 A 执行标准的污水处理厂也应该严格控制水质处理的达标率。最后要节省药耗、电耗、人力成本等运行成本,从经济性能层面提升污水处理厂运行效率。总之,青南地区仍然要促进经济发展保证设施建设条件;同时保护水环境,降低该区域的污水处理工作负荷。

参考文献

范祖悦,邹蔚. 2002. 污水处理扩建工程的模糊决策 [J]. *工业工程与管理*, 7(2): 61–63, 47. [Fan Z Y, Zou W. 2002. Fuzzy decision-making of the sewage disposal extension work [J]. *Industrial Engineering and Management*, 7(2): 61–63, 47.]

葛察忠,杨冬华,Grzegorz Peszko,等. 2005. 城市污水处理设施建设和运营资金缺口分析 [J]. *环境科学研究*, 18(5): 83–87. [Ge C Z, Yang D H, Peszko G, et al. 2005. Analyses on financing gaps of the construction and operation of urban wastewater treatment infrastructures [J]. *Research of Environmental Sciences*, 18(5): 83–87.]

何雪梅,吴义锋. 2006. 统计模型在污水处理厂试运行评价中的应用 [J]. *工程与建设*, 20(5): 521–523. [He X M, Wu Y F. 2006. Application of statistic model in running test for waste water treatment plants [J]. *Engineering and Construction*, 20(5): 521–523.]

李丹晨. 2019. 苏州地区城市污水处理厂处理工艺对比分析与评估 [D]. 苏州: 苏州科技大学. [Li D C. 2019. Comparative analysis and evaluation of treatment technology in Suzhou municipal sewage treatment plant [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology.]

李激,王燕,罗国兵,等. 2020. 城镇污水处理厂一级 A 标准运行评估与再提标重难点分析 [J]. *环境工程*, 38(7): 1–12. [Li J, Wang Y, Luo G B, et al. 2020. Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I -A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the standard [J]. *Environmental Engineering*, 38(7): 1–12.]

李娟,王飞. 2015. 城市污水管网对污水处理厂运行管理的影响 [J]. *资源节约与环保*, (8): 27. [Li J, Wang F. 2015. Influence of urban sewage pipe network on operation and management of sewage treatment plant [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, (8): 27.]

李如忠. 2000. 多层次模糊综合评判模型在城市污水处理中的应用 [J]. *淮南工业学院学报*, 20(4): 1–4. [Li R Z. 2000. Application of the multiplayer fuzzy synthetic evaluation model in wastewater treatment plant [J]. *Journal of Huainan Institute of Technology*, 20(4): 1–4.]

李燕. 2020. 复杂水质条件下的城镇污水处理厂提标改造工程 [J]. *供水技术*, 14(3): 34–37. [Li Y. 2020. Upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plant with complex water quality [J]. *Water Technology*, 14(3): 34–37.]

刘开第,李思敏,庞彦军. 2000. 污水处理厂运行管理效果评价模型 [J]. *中国给水排水*, 16(8): 45–47. [Liu K D, Li S M, Pang Y J. 2000. Evaluation model for operation and management of wastewater treatment plant [J]. *China*

- Water & Wastewater*, 16(8): 45–47.]
- 买亚宗, 肖婉婷, 石磊, 等. 2015. 我国城镇污水处理厂运行效率评价 [J]. *环境科学研究*, 28(11): 1789–1796. [Mai Y Z, Xiao W T, Shi L, et al. 2015. Evaluation of operating efficiencies of municipal wastewater treatment plants in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 28(11): 1789–1796.]
- 宋玉亮. 2020. 城市排水设施雨污分流对污水处理厂影响的研究 [J]. *环境与发展*, 32(10): 28, 30. [Song Y L. 2020. A study on the influence of rain and sewage diversion from urban drainage facilities on sewage treatment plants [J]. *Environment and Development*, 32(10): 28, 30.]
- 王丽君, 夏训峰, 朱建超, 等. 2019. 农村生活污水处理设施水污染物排放标准制订探讨 [J]. *环境科学研究*, 32(6): 921–928. [Wang L J, Xia X F, Zhu J C, et al. 2019. Discussion on the drafting of water pollutants discharge standard for rural domestic sewage treatment facilities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 32(6): 921–928.]
- 王凌. 2020. 提质增效要求下的太湖流域污水处理厂系统性评估与改进方案分析——以镇江某污水处理厂为例 [J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 21(1): 40–47. [Wang L. 2020. Systematic assessment and improvement plan analysis to Taihu Lake basin sewage treatment plant under the requirements of improving quality and efficiency—taking a sewage treatment plant in Zhenjiang as an example [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 21(1): 40–47.]
- 王士勇, 赵满. 2020. 青南藏区经济发展现状与对策分析 [J]. *青海师范大学学报(哲学社会科学版)*, 42(3): 34–42. [Wang S Y, Zhao M. 2020. Analysis of the economic development in the Tibetan areas of south Qinghai [J]. *Journal of Qinghai Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition)*, 42(3): 34–42.]
- 杨玉霞, 闫莉, 韩艳利, 等. 2020. 基于流域尺度的黄河水生生态补偿机制 [J]. *水资源保护*, 36(6): 18–23, 45. [Yang Y X, Yan L, Han Y L, et al. 2020. Compensation mechanism of the Yellow River water ecology based on watershed scale [J]. *Water Resources Protection*, 36(6): 18–23, 45.]
- 周国华, 张蓓, 王刚, 等. 2021. 中新天津生态城青坨子雨水泵站泵池及雨水管网臭味源分析 [J]. *环境工程*, 39(4): 30–35, 127. [Zhou G H, Zhang B, Wang G, et al. 2021. Analysis of odor sources in stormwater pump pool and stormwater pipe of a stormwater pump station in the Sino-Singapore Tianjin eco-city [J]. *Environmental Engineering*, 39(4): 30–35, 127.]
- Achu A L, Thomas J, Reghunath R. 2020. Multi-criteria decision analysis for delineation of groundwater potential zones in a tropical river basin using remote sensing GIS and analytical hierarchy process (AHP) [J]. *Groundwater for Sustainable Development*, 10: 100365. DOI: 10.1016/j.gsd.2020.100365.
- Baffoe G. 2019. Exploring the utility of analytic hierarchy process (AHP) in ranking livelihood activities for effective and sustainable rural development interventions in developing countries [J]. *Evaluation and Program Planning*, 72: 197–204.
- Cao S H, Ming P P, Zhao X. 2021. Fuzzy comprehensive evaluation of human thermal comfort in simulating natural wind environment [J]. *Building and Environment*, 188: 107447. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107447.
- Chawla V K, Chhabra D, Gupta P, et al. 2021. Evaluation of green operations management by fuzzy analytical hierarchy process [J]. *Materials Today: Proceedings*, 38: 274–279.
- Chen Q, Ai H S, Zhang Y B, et al. 2019. Marketization and water resource utilization efficiency in China [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 22: 32–43.
- Cheng P P, Jin Q, Jiang H, et al. 2020. Efficiency assessment of rural domestic sewage treatment facilities by a slacked-based DEA model [J]. *Journal of Cleaner Production*, 267: 122111. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122111.
- Cho J H, Sung K S, Ha S R. 2004. A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm [J]. *Journal of Environmental Management*, 73(3): 229–242.
- Ding L J, Liu Y H. 2019. Application of comprehensive water-saving irrigation development level model based on FCE in a regional area [J]. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*, 12(1): 98–102.
- Dong X, Zhang X Y, Zeng S Y. 2017. Measuring and explaining eco-efficiencies of wastewater treatment plants in China: an uncertainty analysis perspective [J]. *Water Research*, 112: 195–207.
- Fan Y P, Fang C L. 2020. A comprehensive insight into water

- pollution and driving forces in western China—case study of Qinghai [J]. *Journal of Cleaner Production*, 274: 123950. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123950.
- Flores-Alsina X, Gallego A, Feijoo G, et al. 2010. Multiple-objective evaluation of wastewater treatment plant control alternatives [J]. *Journal of Environmental Management*, 91(5): 1193–1201.
- Hernández-Chover V, Castellet-Viciano L, Hernández-Sancho F. 2019. Cost analysis of the facilities deterioration in wastewater treatment plants: a dynamic approach [J]. *Sustainable Cities and Society*, 49: 101613. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101613
- Hernández-Chover V, Castellet-Viciano L, Hernández-Sancho F. 2020. Preventive maintenance versus cost of repairs in asset management: an efficiency analysis in wastewater treatment plants [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 141: 215–221.
- Islam M, Kashem S, Morshed S. 2020. Integrating spatial information technologies and fuzzy analytic hierarchy process (F-AHP) approach for landfill siting [J]. *City and Environment Interactions*, 7: 100045. DOI: 10.1016/j.cacint.2020.100045.
- Jiang G G. 2011. Empirical analysis of regional circular economy development—study based on Jiangsu, Heilongjiang, Qinghai Province [J]. *Energy Procedia*, 5: 125–129.
- Jiang H, Hua M, Zhang J, et al. 2020. Sustainability efficiency assessment of wastewater treatment plants in China: a data envelopment analysis based on cluster benchmarking [J]. *Journal of Cleaner Production*, 244: 118729. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118729.
- Liao C, Fei D, Huang Q X, et al. 2021. Targeted poverty alleviation through photovoltaic-based intervention: rhetoric and reality in Qinghai, China [J]. *World Development*, 137: 105117. DOI: 10.1016/j.worlddev.2020.105117.
- Liu Y H, Fang P P, Bian D D, et al. 2014. Fuzzy comprehensive evaluation for the motion performance of autonomous underwater vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 88: 568–577.
- Lotfi K, Bonakdari H, Ebtehaj I, et al. 2020. A novel stochastic wastewater quality modeling based on fuzzy techniques [J]. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18: 1099–1120.
- Shao Z F, Huq M E, Cai B W, et al. 2020. Integrated remote sensing and GIS approach using Fuzzy-AHP to delineate and identify groundwater potential zones in semi-arid Shanxi Province, China [J]. *Environmental Modelling & Software*, 134: 104868. DOI: 10.1016/j.envsoft.2020.104868.
- Wu X L, Hu F. 2020. Analysis of ecological carrying capacity using a fuzzy comprehensive evaluation method [J]. *Ecological Indicators*, 113: 106243. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106243.
- Wu Y, Wang S R, Ni Z K, et al. 2021. Emerging water pollution in the world's least disturbed lakes on Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environmental Pollution*, 272: 116032. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116032.
- Xie Q J, Ni J Q, Su Z B. 2017. Fuzzy comprehensive evaluation of multiple environmental factors for swine building assessment and control [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 340: 463–471.
- Zabihi H, Alizadeh M, Wolf I D, et al. 2020. A GIS-based fuzzy-analytic hierarchy process (F-AHP) for ecotourism suitability decision making: a case study of Babol in Iran [J]. *Tourism Management Perspectives*, 36: 100726. DOI: 10.1016/j.tmp.2020.100726.
- Zhang Y, Wang R H, Huang P F, et al. 2020. Risk evaluation of large-scale seawater desalination projects based on an integrated fuzzy comprehensive evaluation and analytic hierarchy process method [J]. *Desalination*, 478: 114286. DOI: 10.1016/j.desal.2019.114286.
- Zhou Z X, Wu H Q, Song P F. 2019. Measuring the resource and environmental efficiency of industrial water consumption in China: a non-radial directional distance function [J]. *Journal of Cleaner Production*, 240(10): 118169. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118169.