

基于FCE-AHP模型的我国地下 污水处理厂效能评估

孙嘉莹, 卢厚清

陆军工程大学野战工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2024年4月30日; 录用日期: 2024年5月23日; 发布日期: 2024年5月31日

摘要

近年来, 地下污水处理厂的发展突飞猛进, 国内各大城市相继规划建设地下污水处理厂, 目前已建成的地下式污水处理厂已达一百余座。但当前关于我国地下污水处理厂的资料统计不够系统规范, 相关信息不够清晰全面, 本文通过资料收集整理出目前国内已建成地下污水处理厂, 并对其地理分布、所在城市类型、采用工艺数量及变化、各工艺总处理量等进行对比分析, 并总结相应的发展规律。针对目前国内地下污水处理厂效能评估的空白, 本文引入FCE-AHP评价方法, 构建了一套适用于地下污水处理厂评价指标体系及权重, 通过对各地下污水处理厂的信息输入, 即可根据该套评估方法, 对各地下污水处理厂进行相应的效能评估, 以此确定国内各地下污水处理厂的优劣性, 为国内地下污水处理厂的研究发展提供了新的思路。

关键词

地下污水处理厂, AAO + MBR工艺, 数据离散化, FCE-AHP评价模型

Efficiency Evaluation of Underground Sewage Treatment Plants in China Based on FCE-AHP Model

Jiaying Sun, Houqing Lu

College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing Jiangsu

Received: Apr. 30th, 2024; accepted: May. 23rd, 2024; published: May. 31st, 2024

Abstract

In recent years, the development of underground sewage treatment plants has been advancing by

leaps and bounds. Major cities in China have successively planned and constructed underground sewage treatment plants. At present, more than one hundred underground sewage treatment plants have been built. However, the current data statistics on underground sewage treatment plants in China are not systematic and standardized, and the relevant information is not clear and comprehensive. This paper collects and sorts out the underground sewage treatment plants that have been built in China, and compares and analyzes their geographical distribution, city types, number and changes of processes adopted, and total processing capacity of each process, and summarizes the corresponding development laws. In view of the current gap in the effectiveness evaluation of underground sewage treatment plants in China, this paper introduces the FCE-AHP evaluation method, and constructs a set of evaluation index system and weight suitable for underground sewage treatment plants. By inputting the information of underground sewage treatment plants, the corresponding effectiveness evaluation of underground sewage treatment plants can be carried out according to the evaluation method, so as to determine the advantages and disadvantages of underground sewage treatment plants in China, which provides a new idea for the research and development of underground sewage treatment plants in China.

Keywords

Underground Sewage Treatment Plant, AAO + MBR Process, Data Discretization, FCE-AHP Evaluation Model

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

基础设施的更新迭代是一座城市快速发展的重要保障, 污水处理厂作为城市重要的市政基础设施, 其对城市的可持续发展作出不可磨灭的贡献。近年来, 随着城市人口的急剧增长和对污水排放更加严格的要求, 大多数城市污水处理厂不得不扩大其处理能力和升级现有的工艺技术, 这急速加剧了城市土地资源的供需矛盾[1]。为保障城市的可持续性发展, 适当将市政设施地下化, 能够避免部分城市因市政设施的安置而带来的环境问题和社会问题, 优化市政设施的可持续性, 改善城市可持续发展的环境条件和社会条件[2]。目前, 国内对于这种环境友好型的市政建设项目越来越重视, 国家相关协会加快规范地下污水处理厂标准的制定, 分别颁布了《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》T/CAEPI 23-2019, 《城镇地下式污水处理厂技术规程》T/CECS 729-2020 [3]。可见, 国家和地方政府部门正逐渐认可地下污水处理厂所带来的正面价值并逐步对其标准规范化, 这与当前国家大力提倡建设生态文明型城市息息相关, 也符合联合国可持续发展的宗旨, 但也不能因此而忽视了其存在的问题。

自我国首座地下污水处理厂于 2010 年投入运营以来, 地下污水处理厂在我国经历了快速的发展, 但目前仅少数文献对全国各地的地下污水处理厂发展进行综合评价, 大多是基于较少的数据从宏观上对比地上地下的差异来分析地下污水处理厂优劣。此外, 地下污水处理厂相较于地上污水处理厂在处理规模、工艺选择上也有很大的区别, 《城市污水处理工程项目建设标准》中对地上污水处理厂的规模分类并不适用于地下, 而目前也并没有相关的分类方法, 分类标准不清晰, 这将会阻碍未来地下污水处理厂的设计建设与发展。

本文依据 110 多座现有地下污水处理厂的信息资料, 通过聚类划分与工艺对比, 对地下污水处理厂的处理规模和工艺技术进行比较分析, 划分出与地上污水处理厂相对应的规模等级, 并对对比分析几种常

用于地下污水处理厂工艺的优劣性。然后依据文献综述、FCE-AHP 综合评价等方法构建了地下污水处理厂的评价指标体系, 基本构造出用于评价地下污水处理厂综合效益的模糊综合评价模型, 为当前国内地下污水处理厂的评价分析提供了新的思路。使人们更加了解当前国内地下污水处理厂的发展情况, 帮助决策者和工程师以最佳方式建设和升级地下污水处理厂[1][4]。

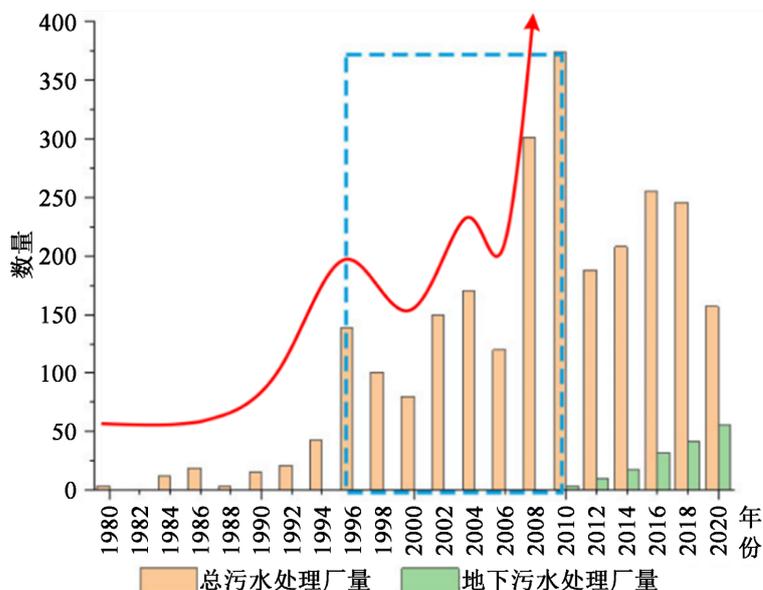
2. 国内地下污水处理厂的发展

2.1. 规范概念

《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》与《城镇地下式污水处理厂技术规程》颁布后, 定义地下污水处理厂为“污水处理构筑物位于地面以下, 设备操作层封闭, 地面层进行综合利用的城镇污水处理厂, 包括全地下、半地下等形式。当地下箱体顶板平均标高低于规划地面标高, 或二者标高差小于操作层平均净高 1/2 时为全地下式污水处理厂, 当地下箱体顶板平均标高大于规划地面标高时为半地下式污水处理厂”。地下污水处理厂概念的规范化, 解决了术语混淆的问题, 并在各省市等地方标准中进行沿用[5]。

2.2. 统计分析

根据国家住房和城乡建设部统计年鉴, 国内于 1980~2020 年新增的污水处理厂的数量如图 1 所示。结果表明: 自 1980 年以来, 我国污水处理厂开始逐年增加, 在 1996 年至 2010 年前后实现快速增长, 并于 2010 年达到增速的峰值。以 2010 年为界, 其后污水处理厂年增加量出现波动, 且整体呈下降趋势, 这标志着我国污水处理行业趋近于饱和状态, 开始由重数量转而向重质量发展, 同时我国首座全地下式污水处理厂正式建成运营, 其凭借良好的城市融合性被各大城市所青睐, 几年里呈现快速增长, 促使我国污水处理厂更加多元化。



(数据取自中华人民共和国住房和城乡建设部统计年鉴)

Figure 1. Annual number of new sewage treatment plants in mainland China from 1980 to 2020

图 1. 1980~2020 年中国大陆年新增污水处理厂数量

国内首座地下污水处理厂建成后, 各项工艺技术发展非常迅速, 经过不断地更新迭代, 逐渐趋向于以 AAO 和 MBR 为基础的复合工艺体系, 建设理念向着占地面积体积更小, 节能环保效果更佳的方向发

展。目前, 单座地下污水处理厂的规模从最小的 0.8 万立方米/日到最大的北京槐房再生水厂 60 万立方米/日不等, 出水水质根据各地区排放要求能够满足一级 A、京标 A、地表IV类至地表III类的标准, 进一步处理后可满足中水要求用于再生水的循环使用, 国内地下污水处理厂有着非常广阔的发展前景[5]。

通过浏览大量文献和查阅资料汇总, 总结了国内近 80 座地下污水处理厂的相关信息, 包含了目前国内已建成的大部分全地下污水处理厂和少部分半地下污水处理厂, 按照地理位置和城市类型对地下污水处理厂的分布情况进行划分, 如图 2、图 3 所示, 可知国内不同地区的地下污水处理厂分布情况存在显著差异。

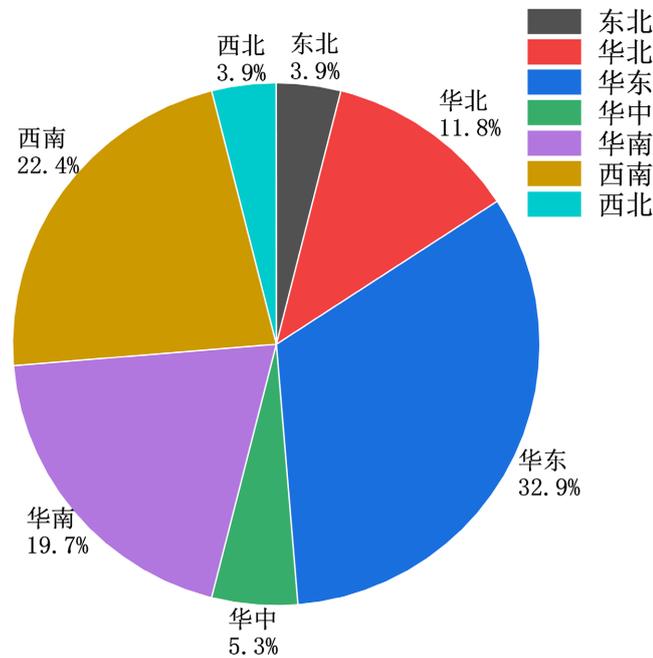


Figure 2. Geographical distribution of the city where the underground sewage treatment plant is located
图 2. 地下污水处理厂所在城市的地理分布

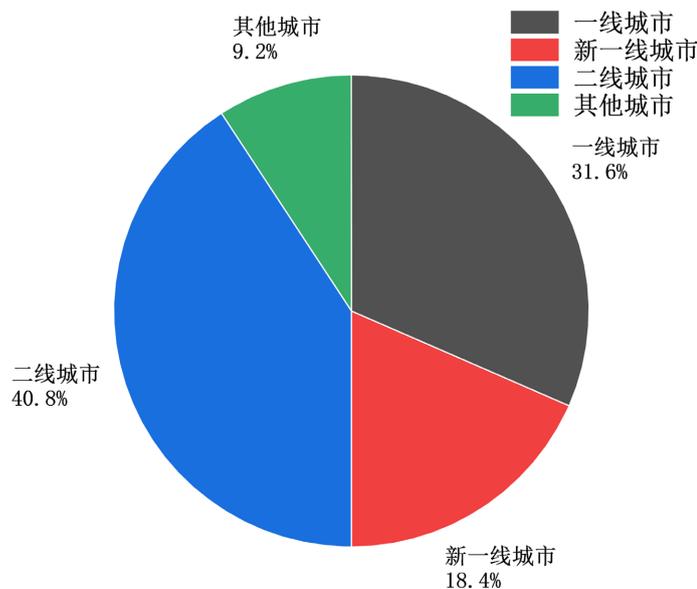


Figure 3. Hierarchical classification of cities where underground sewage treatment plants are located
图 3. 地下污水处理厂所在城市的层次分类

城市污水处理工艺的发展与城市的发展状况、环境标准的要求以及科学技术的进步密切相关。早在二十世纪中期, 污水处理厂的邻避问题在欧洲等地区受到越来越多的关注[6]。据统计可知, 2000年以前城镇的发展较差, 排放污染物构成较简单, 相关规定政策只规范 COD、氮和部分悬浮物含量排放标准, 故而全球十座地下污水处理厂均仅使用较原始的活性污泥法, 以满足城市污水处理的需要。2000年至2010年间, 全球地下污水处理厂保持平稳发展, 至2010年达到二十余座。十年间伴随着城镇的不断发展, 虽然整体数量变化较小, 但处理工艺发生了显著改变, 由仅使用活性污泥法的单一处理工艺, 转变为包括 AAO、BAF、SBR、MBR 等多种处理工艺复合处理。2020年地下污水处理厂使用的污水处理工艺中, AAO 占 14%, MBR 占 13%, AAO + MBR 占 22%, 基于 AAO + MBR 基础的改良工艺占 22%。地下污水处理厂所采用工艺的类型和数量及年变化趋势如图 4 所示。

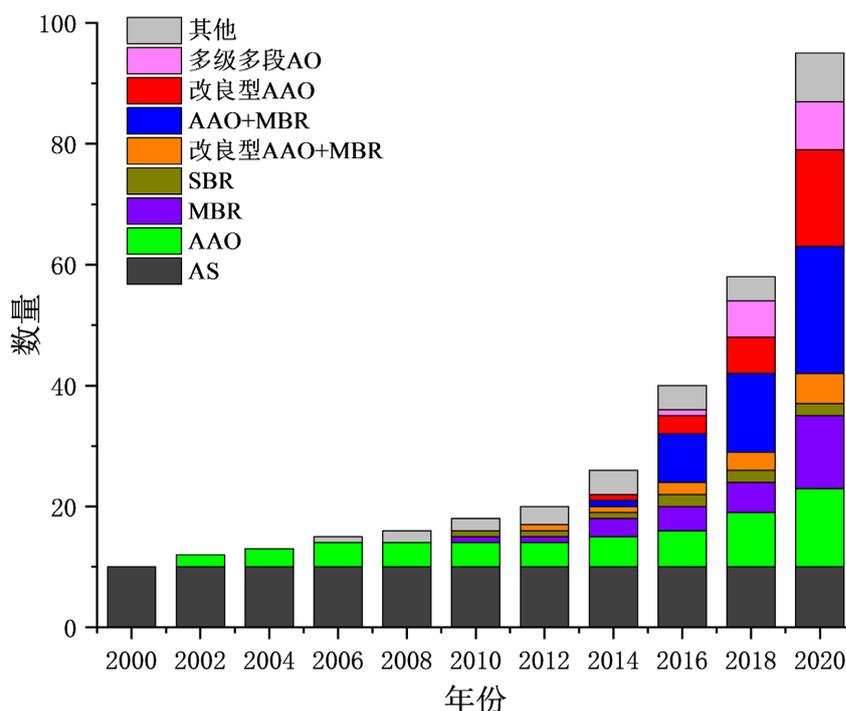


Figure 4. Annual variation of process in underground sewage treatment plant
图 4. 地下污水处理厂采用工艺年变化

地下污水处理厂各工艺处理总量及数量趋势如图 5 所示, 地上污水处理厂与地下污水处理厂在技术设计、开挖建设、环境影响等方面有着不同的侧重, 因此工艺流程短、处理单元少、占地面积小、处理效率高的优化组合工艺在地下污水处理厂中得到更广泛的应用。如图 4、图 5 所示, 采用 AAO+MBR 与 MBR 和改良型 AAO 工艺的地下污水处理厂数量达 49 座, 日处理量超过 900 万立方米, 由此可知 AAO 和 MBR 的组合及其改良工艺, 在污水处理规模和污水处理数量上比其他工艺具有更大的优势。

3. 地下污水处理厂规模分级与工艺对比

3.1. 地下污水处理厂规模分级

污水处理厂建设中首要考虑因素是其处理规模的大小, 这取决于其所服务区域的人口数量、用水单位数量、公共设施用水量和其他[7] [8]。污水处理厂的处理规模不同, 所选取的工艺也不尽相同, 建设的费用和运营成本也将有较大的差异[9]。

传统的地上污水处理厂可根据《城市污水处理工程项目建设标准》中的规定对污水处理厂按规模划分为如下五类, 如表 1 所示。

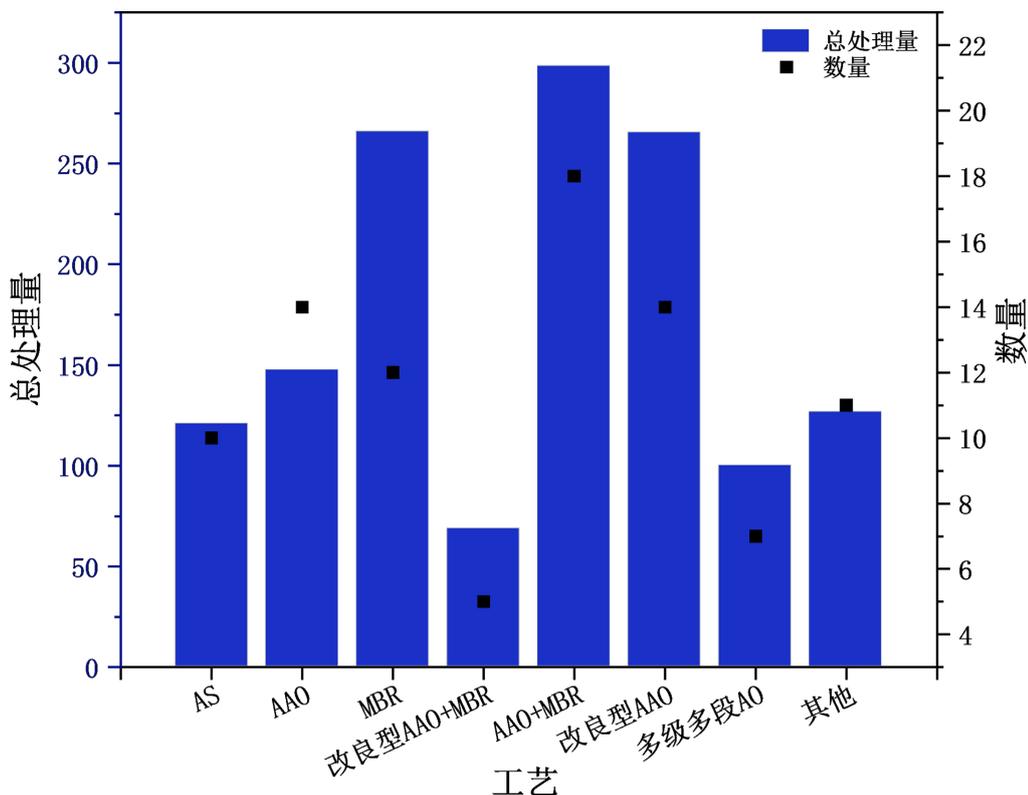


Figure 5. Comparison of the total amount and quantity of each process in underground sewage treatment plant
图 5. 地下污水处理厂各工艺处理总量及数量比较

Table 1. Scale division standard of sewage treatment plant
表 1. 污水处理厂规模划分标准

分类	I类	II类	III类	IV类	V类
规模(万 m³/d)	50~100	20~50	10~20	5~10	1~5

注: 以上规模分类含上限值, 不含下限值; 建设规模大于 100 万 m³/d 和小于 1 万 m³/d 的污水厂可参考I类和V类。

目前, 地下污水处理厂的规模还没有具体分类标准, 因为其特殊建设方式及紧凑密集的布置形式与地上污水处理厂的运行有较大差异, 若以地上污水处理厂的规模类型来划分地下污水处理厂, 将会对地下污水处理厂的建设和运行以及后续的其他研究造成较大的误差影响。因此, 为解决此问题, 本文依据当前地下污水处理厂的相关统计资料, 采用数据离散化的方法, 对其进行规模的聚类, 以实现地下污水处理厂的规模划分。

具体操作方法如下:

① 中心点初始化: 将数据集中 N 个样本分成 V 组, 为 V 个聚类分组选择初始的中心点, 称为中心点

$M_{i(i=I,II,III,IV,V)}$;

② 计算距离: 对 N 个样本数据分别到各个中心点 $M_{i(i=I,II,III,IV,V)}$ 的距离计算; 计算公式采用曼哈顿距离计算方法, 即 $c = |x_1 - y_1| + |x_2 - y_2| + \dots + |x_n - y_n|$;

③ 聚类分组: 当计算出每个样本 N 点与中心点 $M_{i(i=I,II,III,IV,V)}$ 的距离后, 对 N 个样本分配到各自距离最近的中心点 $M_{i(i=I,II,III,IV,V)}$, 即形成初步聚类;

④ 计算中心点: 在形成的样本初步聚类范围内, 再一次采用曼哈顿距离计算公式计算新的中心点;

⑤ 迭代直至收敛: 对上述的②③④步骤反复训练迭代, 直到聚类算法收敛为止, 即中心点和分组经过多少次迭代都不再改变, 则迭代结束;

⑥ 结果: 迭代停止后, 所得到的点即为所需中心点, 围绕各中心点聚类的样本即为最终聚类样本组, 该样本组中的最大值和最小值为样本组的上限与下限。

根据上述方法, 运用 MATLAB 对当前统计的 80 余组地下污水处理厂样本进行聚类, 经过多次迭代后形成五组, 五组边界值分别为: (0, 5)、[5, 10)、[10, 15)、[15, 30)、[30, 60)。

因此, 基于数据聚类离散化模型而形成的地下污水处理厂规模划分为如下五类, 如表 2 所示。

Table 2. Scale division standard of underground sewage treatment plant

表 2. 地下污水处理厂规模划分标准

分类	I类	II类	III类	IV类	V类
规模(万 m ³ /d)	30~60	15~30	10~15	5~10	1~5

注: 以上规模分类含下限值, 不含上限值。建设规模大于 60 万 m³/d 和小于 1 万 m³/d 的污水厂可参考I类和V类。

鉴于目前地下污水处理厂并没有相应的规模分类标准, 上述基于现有的实际案例, 运用数学聚类模型进行划分, 具有一定的实际意义, 可为地下污水处理厂的的实际设计建造与运营提供理论指导的作用。

3.2. 地下污水处理厂工艺对比

为了更好地讨论每种工艺在地下污水处理厂中的使用情况, 根据地下污水处理厂处理规模的相关资料, 总结了几种常见工艺的占地情况、适用范围、投资管理费用以及优缺点, 并对相关数据进行了正态分布拟合, 选取界定的规模范围, 分别得出不同处理工艺的最佳处理规模, 如表 3 所示[10]-[15]。

Table 3. Comparison of different treatment processes of underground sewage treatment plants [10]-[15]

表 3. 地下污水处理厂的不同处理工艺比较[10]-[15]

工艺	占地	规模 10 ⁴ m ³ /d	出水 水质	投资 成本	管理与运 营成本	优势	劣势
AS	较大	15~30	较差	中等	较低	中等负荷处理工艺, 运行管理较简单, 工艺成熟, 积累运行经验多, 适用于对出水要求不高的大中型污水处理厂。	对进水水质变化适应能力不强; 所供氧气不能充分利用, 影响处理效果; 脱氮除磷效果差, 通常只有 10%~30%, 产泥量高。
AAO	最大	0~20	除磷 水平 较好	高	一般	水力停留时间较少, 脱氮除磷效果明显, 去除效率高, 污泥较稳定; 工艺相对成熟, 可与其他工艺结合使用。	构筑物多、占地大、造价较高; 污泥内回流量大, 耗能较高; 运行工艺参数较多, 操作要求高, 自控程度低。
MBR	最小	0~30	好	高	较高	抗负荷冲击能力强, 污泥沉降性能好, 设备紧凑, 省去二沉池; 排泥周期长, 污泥不宜膨胀宜分离; 耗能低、脱氮除磷效率高、运行稳定, 适用于二次/深度处理。	建设投资高(为普通污水处理工艺的 1.5~2 倍), 运行维护及更换费用较高; 对环境温度的要求较高, 气温过高过低都会影响生物膜的活性, 引起生物膜坏死和脱落。

续表

SBR	小	0~10	一般	较少	高	自控程度高, 工艺运行灵活, 可根据水质、水量调整; 一体化集约构筑物, 处理设备少, 占地小, 利于扩建和改造; 污水在理想静止状态下沉淀, 所需时间短, 效率高, 有效控制活性污泥膨胀; 产泥量低, 污泥可不作稳定处理而直接处置或应用, 简化了运行管理。
多段多级AO	大	0~20	脱氮水平较高	高	一般	体积负荷高, 生物浓度高、活性高, 抗冲击负荷能力强; 停留时间短, 污泥产量低, 动力消耗低, 污泥膨胀少。由于污泥不稳定, 增加了稳定处理运行环节, 加大了基建投资。

根据表 3 可知, 活性污泥法和 SBR 工艺在处理过程中局限性较大, 活性污泥法工艺的处理能力有限, 随着污水中污染物质类型和数量的不断增加, 活性污泥法已无法满足当前出水水质的要求, SBR 工艺因其自动化控制技术要求较高且不宜处理较大规模的污水量, 所以活性污泥法与 SBR 工艺在地下污水处理厂中的应用较少。AAO 工艺与多段多级 AO 工艺的抗冲击负荷较强, 处理能力好, 具有较高的脱氮除磷效果, 但其单体占地面积大, 投资成本高, 制约了工艺的发展, 反而在 AAO 基础上进行的改良工艺在地下污水处理厂中使用较多。MBR 工艺的占地面积仅为普通工艺的 60%, 出水水质好, 剩余污泥量少, 它不仅可作为脱氮除磷的二级处理, 还可与 AAO 工艺相结合作为深度处理环节使用[7]。采用 AAO+MBR 的深度处理工艺可节约占地的同时又提高了污水处理效率, 且其处理后的出水水质较好, 可基本满足景观用水或中水回用的标准, 因此 MBR 工艺或与 AAO 的组合工艺在许多地下污水处理厂中常作为首选的工艺使用。但 MBR 工艺有着较高的运行维护费用, 其所采用的膜工艺比普通工艺高出 40%~80% 不等, 较高的投资和运行维护费用影响着 MBR 工艺的进一步应用。因此, 地下污水处理厂在工艺的选择中还需要进一步探索更加合适和降低工艺成本的方法。

4. 地下污水处理厂效能评估

当前, 综合评价方法的理论研究和实践应用已经相对成熟, 关于地下污水处理厂的效能评估, 既需要主观认知、经验、判断的评价, 也需要客观的数据作为基础依据[16]。因此, 在评价过程中必须兼顾考虑客观数据与主观因素, 若采用精确数学方法则因过于追求模型的精确化, 而导致主观信息无法量化难以进行有效的效能评价, 反而基于模糊数学的理论建立的模糊综合评价模型, 更适宜地下污水处理厂中各主观与客观因素的评价[9]。地下污水处理厂的建设运营受多种因素的影响, 即指标体系的组成元素呈多样化, 不同的目的导向将构建差异化的指标体系。本文所构建的评价模型旨在对地下污水处理厂的综合效益分析, 重点针对地下污水处理厂与城市环境的协调融合及运营状态下工艺处理状况进行评估, 在体系构建中结合研究导向选择各指标, 并根据各指标的作用程度、指标信息的可靠度等原则构建合理的指标与权重分配体系。

本文通过文献综述法结合层次分析法构建两层评价指标体系, 第一层为一级决策指标, 第二层为一级决策指标中各指标的细分。通过文献归纳选定指标体系后初步拟定各影响因素的指标, 并整理得出各权重区间, 为体现各个评价指标在该套评价指标体系中的作用及重要程度, 确定各自的权重系数。根据本文研究目的与研究内容, 采用立意抽样中最大差异抽样的方式, 选取多名城市地下空间规划行业专家、环保行业专家、长期位于污水处理厂一线的技术工作者以及具有多年污水处理经验的从业人员作为访谈对象, 通过对专家反馈和访谈结果的归纳与梳理, 最终确定指标内容[10] [14] [17] [18] [19] [20] [21]及体系结构图, 如图 6 所示, 为后文开展定量分析提供了丰富的可借鉴资料。

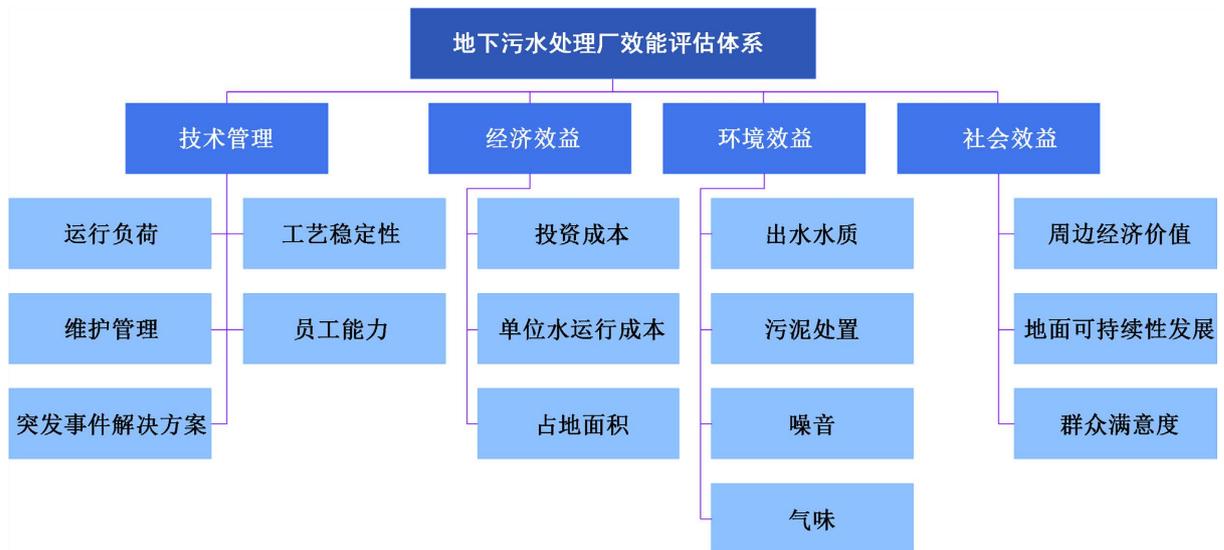


Figure 6. Analytic hierarchy process structure diagram of index system of underground sewage treatment plant
图 6. 地下污水处理厂指标体系层次分析结构图

在对各因素策略强度评分环节, 本文邀请专家学者及一线工作者对两两因素间强度进行 1~9 度标度法的比较评分, 如表 4 所示, 并打出对应分值, 构建判断矩阵。

Table 4. Judgement scale table
表 4. 判断标度表

标度(b_{ij})	含义
1	B_i 与 B_j 同样重要
3	B_i 与 B_j 稍微重要
5	B_i 与 B_j 明显重要
7	B_i 与 B_j 非常重要
9	B_i 与 B_j 极其重要
2, 4, 6, 8	B_i 与 B_j 比, 在上述两个相邻标度的中间取值
倒数	当指标元素 B_i 和 B_j 的判断值为 b_{ij} 时, 那么 B_j 和 B_i 的判断值为 $b_{ji} = 1/b_{ij}$

首先基于判断矩阵, 实现最大特征值的特征向量计算; 然后通过归一化, 处理计算指标权重向量; 最后进行一致性判断, 计算公式为:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

式中, CR 是一致性比率; RI 是平均随机一致性指标, 可通过判断矩阵的阶数查表取值, 具体如表 5。

Table 5. Average random consistency index table
表 5. 平均随机一致性指标取值表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

CI 是一致性偏离程度指标:

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

式中, λ_{\max} 是判断矩阵的最大特征值; n 是判断矩阵的阶数。

当 $CR < 0.10$ 时, 表示指标权重值分配合理; 当 $CR > 0.10$ 时, 需要对判断矩阵进行重新调整, 直到满足 $CR < 0.10$ 。

构建好相应的指标体系与权重后, 即可采用模糊综合评价法对地下污水处理厂进行评价, 具体评价方法的基本步骤如下:

(1) 评价因素为二层决策指标, 划分因素 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 为一级决策指标集, 其中又将 $U_i = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 划分为二级决策指标集。

(2) 确定评语集 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 由于每个指标的评价值的不同, 往往会形成不同的等级, 该集合对评价因素中的不同定性指标和定量指标分别评级。

(3) 确定各因素的权重, 根据各评价因素对评价结果的影响程度确定合适的权重向量, 它是 U 上的一个模糊向量, 记为 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 。式中 a_i 为第 i 个因素的权重, 且满足 $\sum_{i=1}^m a_i = 1$ 。

(4) 确定模糊综合判断矩阵, 首先对因素集中的二级指标 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 作单因素评判, 从因素 u_i 着眼, 该事物对评语等级 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 的隶属度为 r_{ij} , 这样就得出第 i 个指标 u_i 的评判集 $r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in})$ 。于是, m 个二级指标评价集从 U 到 V 的模糊综合判断矩阵 R 为:

$$R = (r_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

(5) 综合评判, 将上述模糊综合判断矩阵 R 和权重向量 A_i 进行合成, 得二级因素模糊综合评价结果向量 B :

$$B = (b_1, b_1, \dots, b_n) = (a_1, a_1, \dots, a_m) \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

再重复上述方法对第一级指标 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$ 进行综合评判, 其中权重为 A_i , $R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_k \end{bmatrix}$, 综合

评判有 $B = A \times R$ 。

最后, 按照相关隶属度原则即可对不同地下污水处理厂进行相应评定与分级。

SWOT-AHP 定量模型构建, 最终评定各指标的权重结果如表 6 所示。

层次分析法(AHP)在本研究中的运用合理填补了定性分析的不足, 对各项数据赋予了量的标准, 从而使本研究实现了定性定量相结合, 为地下污水处理厂的综合效益最优化提供了科学的策略选择。

地下污水处理厂的评价指标体系中包含着定量指标和定性指标, 定性指标多为工艺运行稳定性、员工经验能力、管理水平、对周边经济影响等宏观性指标, 而定量指标能够直观表明地下污水处理厂的各项具体数值情况, 定性指标与定量指标相结合, 可使得评价范围更加综合全面。对文中所构建的指标体

系按定性和定量划分如表 7 所示。

Table 6. Evaluation index and weight
表 6. 评价指标与权重

一级决策指标	权重区间	二级决策指标	权重区间	备注
技术管理	0.25	运行负荷	0.15	水力负荷为主, 包括抗冲击负荷能力
		工艺稳定性	0.3	包括工艺的成熟度
		维护管理	0.2	包括设备完好率、设备操作的难易度
		员工数量及能力经验	0.2	包括员工文化水平及管理水平
		突发事件解决方案	0.15	
经济效益	0.3	投资成本	0.5	建设成本
		单位水运行成本	0.3	包括能耗、物耗成本
		占用土地价格	0.2	
环境效益	0.3	出水水质	0.35	包括中水回用率
		污泥处置	0.15	包括污泥利用率
		噪音	0.25	气体、噪音的收集处理、隔绝水平
		气味	0.25	
社会效益	0.15	周边经济价值	0.3	与周边经济的相互影响
		地面可持续性发展	0.4	地面用途的多样性
		群众满意度	0.3	

Table 7. Evaluation index classification
表 7. 评价指标分类

分类	指标
定性指标	工艺稳定性、员工数量及能力经验、突发事件解决方案、周边经济价值、地面可持续性发展、群众满意度
定量指标	运行负荷、维护管理、投资成本、单位水运行成本、占地面积、出水水质、污泥处置、噪音、气味

评估体系同时包含定性和定量指标, 由于定性指标的不可公度性, 采取十分制来表征各指标获得的分值。根据文献调研、相关标准规定、专家意见以及实地考察数据确定各类别指标的评判标准[5] [22]-[26], 如下表 8 所示。

Table 8. Evaluation criteria of each evaluation index
表 8. 各评价指标评判标准

指标	分值	10~8	8~6	6~4	4~2	2~0
	运行负荷		75%~85%	85%~100%	60%~75%	<60%
工艺稳定性		好	较好	中等	较差	差
维护管理(元/m ³)		<1.2	1.2~1.4	1.4~1.6	1.6~1.8	>1.8
员工数量及能力经验		高	较高	普通	较低	低

续表

突发事件解决方案	强	较强	一般	较弱	弱
投资成本(元/m ³)	<4000	4000~5000	5000~6000	6000~7000	>7000
单位水运行成本(元/立方米)	<0.5	0.5~0.6	0.6~0.7	0.7~0.9	>0.9
占地面积(m ² /m ³)	<0.25	0.25~0.35	0.35~0.5	0.5~0.7	>0.7
出水水质	地表Ⅲ类	地表Ⅳ类	类地表Ⅳ类	优于一级 A	一级 A
污泥处置	100%	90%~100%	80%~90%	70%~80%	<70%
噪音(昼/夜 dB(A))	50/40	55/45	60/50	65/55	70/55
气味	无明显感知	轻微感知	有明显感知	较强烈感知	无法忍受
周边经济价值		正向	无	负向	
地面可持续性发展	商务综合体	科普建筑物	绿色产业	绿地公园	封闭
群众满意度	非常满意	满意	一般	不满意	反感

5. 结论

近年来, 国内地下污水处理厂发展突飞猛进, 各大城市都相继规划建设地下污水处理厂, 国内已建成的地下式污水处理厂就已有百余座。然而, 目前各研究学者对地下污水处理厂的资料统计不全, 全国各地地下污水处理厂的信息掌握不清晰, 本文通过资料收集整理出目前国内已建成大多数地下污水处理厂, 并对其地理分布、所在城市类型、采用工艺年变化、各工艺总处理量及数量等进行对比分析, 并总结相应的发展规律。

针对目前国内地下污水处理厂效能评价的空白, 本文引入模糊综合评价的方法, 构建了一套适用于地下污水处理厂评价指标体系及权重, 通过对各地下污水处理厂信息输入, 即可根据该套评价方法对各个地下污水处理厂进行相应的效能评价, 以此确定国内各地下污水处理厂的优劣性, 为国内地下污水处理厂的研究提供了新的思路。

参考文献

- [1] He, Y., Zhu, Y., Chen, J., et al. (2018) Assessment of Land Occupation of Municipal Wastewater Treatment Plants in China. *Environmental Science: Water Research & Technology*, **4**, 1988-1996. <https://doi.org/10.1039/C8EW00344K>
- [2] Zargarian, R. (2018) Exploring the Appropriateness of Urban Underground Space (UUS) for Sustainability Improvement. University of Birmingham, Birmingham.
- [3] 侯锋, 王凯军, 曹效鑫, 庞洪涛, 邵彦青, 宫徽, 周晓, 张明杰, 车淑娟, 李鑫玮, 张连国, 张进. 《地下式城镇污水处理厂工程技术指南》解读[J]. 中国环保产业, 2020(1): 20-25.
- [4] 包太, 朱可善, 刘新荣. 国内外城市地下污水处理厂概况浅析[J]. 地下空间, 2003(3): 335-340+346.
- [5] Wang, M. and Gong, H. (2018) Not-in-My-Backyard: Legislation Requirements and Economic Analysis for Developing Underground Wastewater Treatment Plant in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **15**, 2339. <https://doi.org/10.3390/ijerph15112339>
- [6] Wang, Z., Xu, X., Gong, Z., et al. (2012) Removal of COD, Phenols and Ammonium from Lurgi Coal Gasification Wastewater Using A2O-MBR System. *Journal of Hazardous Materials*, **235**, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.012>
- [7] 林晓明. 论城市污水处理厂建设规模与处理标准的确定[J]. 给水排水, 1997(9): 20-23+2.
- [8] 刘杰, 郑西来, 高超, 陈蕾. 城镇污水处理厂用地、运行及建设费用研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(11): 2522-2526.
- [9] 唐然. 城镇污水处理工艺优选决策模型研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2008.

- [10] 冯杰. 城市污水处理工艺综合比选研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [11] 刘志红. 城市污水处理工艺对水质提升效果的比较研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [12] 吴玉珍. 基于生命周期评价的污水生化处理工艺对比及选择研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2018.
- [13] Huh, S.Y., Shin, J. and Ryu, J. (2020) Expand, Relocate, or Underground? Social Acceptance of Upgrading Wastewater Treatment Plants. *Environmental Science and Pollution Research*, **27**, 45618-45628. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10442-7>
- [14] 钱宇婷. 中小城镇污水处理工艺选择的优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [15] 许雪燕. 模糊综合评价模型的研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- [16] Sala-Garrido, R., Hernández-Sancho, F. and Molinos-Senante, M. (2012) Assessing the Efficiency of Wastewater Treatment Plants in an Uncertain Context: A DEA with Tolerances Approach. *Environmental Science & Policy*, **18**, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.12.012>
- [17] Marković, J.T., Mučenski, V., Savić, D., *et al.* (2021) Risk Assessment Model for Planning and Design Processes of Wastewater Treatment Plants. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, **65**, 181-190.
- [18] 杨硕. 污水处理厂绩效评价的多目标树图分析[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [19] 叶浩恒. 我国城市污水处理厂绩效评估指标研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019. <https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.002197>
- [20] 邱忠莉. 小城镇污水处理厂运行绩效评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [21] 蒋慧. 城市污水处理厂绩效评估[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2020. <https://doi.org/10.27307/d.cnki.gsju.2020.001766>
- [22] 邹淑慧. 基于 ESG+E 的污水处理厂绩效评价体系研究[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2020. <https://doi.org/10.27050/d.cnki.gglgc.2020.000559>
- [23] 马文宝, 杨坤. 地下式污水处理厂投资分析[J]. 科学与信息化, 2016(21): 124-126.
- [24] CJJ 60-2011, 城镇污水处理厂运行、维护及安全技术规程[S]. 北京: 光明日报出版社, 2011.
- [25] 杨家麒. 《工业企业厂界环境噪声排放标准》(GB 12348-2008)与《社会生活环境噪声排放标准》(GB22337-2008)的异同[J]. 资源节约与环保, 2017(7): 108-109. <https://doi.org/10.16317/j.cnki.12-1377/x.2017.07.062>
- [26] Dong, Y.H., Peng, F.L., Qiao, Y.K., *et al.* (2021) Measuring the Monetary Value of Environmental Externalities Derived from Urban Underground Facilities: Towards a Better Understanding of Sustainable Underground Spaces. *Energy and Buildings*, **250**, Article ID: 111313. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111313>