



文章栏目：研究综述

DOI 10.12030/j.cjee.202309038

中图分类号 TU992

文献标识码 A

闫明, 王红武, 刘志刚, 等. 城镇排水系统运行效能评价指标体系的构建与研究[J]. 环境工程学报, 2023, 17(10): 3124-3136. [YAN Ming, WANG Hongwu, LIU Zhigang, et al. Establishment and study on the evaluation index system for operational efficiency of urban drainage systems[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023, 17(10): 3124-3136.]

# 城镇排水系统运行效能评价指标体系的构建与研究

闫明, 王红武<sup>✉</sup>, 刘志刚, 宫徽, 戴晓虎

同济大学环境科学与工程学院, 水利部长三角城镇供水节水及水环境治理重点实验室, 上海 200082

**摘要** 排水系统是城镇一个重要的基础设施, 其运行效能评价对于城镇水环境治理维护和绿色低碳发展具有重要意义。对国内外相关研究成果从以下三方面进行了梳理和分析: 首先, 运行效能评价研究按评价目标的不同可分为内涝和溢流的控制、管网性能的预测与诊断、排水系统的规划与运营、安全风险类评估和综合性评价五类, 阐明了这五类评价指标体系的研究现状, 总结了其常用指标; 其次, 分析各评价指标体系的构建流程, 可归纳为“调研准备”“指标构建”“赋分评价”三个阶段, 归纳了常用评价指标筛选方法, 并指出其中最关键的部分在于第三阶段的评价方法的选择, 即指标赋分和最终评价结果的计算; 最后, 对文献中的各类评价方法进行了分析, 结果表明基于层次分析主观规定权法的综合评价法是当前研究中的常用方法, 可以解决评价过程中产生的不确定性、不一致性、模糊化、量化等问题; 同时也概述了客观规定权方法如熵权法、神经网络、组合定权等方法的特点和适用性。研究指出关于智慧水务和平稳输送的效能评价还比较缺乏, 而随着物联网、人工智能、在线监测等技术的快速发展以及海量可靠的排水系统相关数据的出现, 将给以客观规定权法为主流的新评价方法的开发应用带来契机。本研究可为完善排水系统运行效能评价指标体系并计算准确评价结果提供参考。

**关键词** 排水系统; 排水管网性能; 运行效能; 评价指标体系; 评价方法

排水系统作为城镇重要基础设施, 其规模逐渐增大。根据我国《2021 年城乡建设统计年鉴》<sup>[1]</sup>, 我国已建成的排水管道总长度已超过  $8.72 \times 10^5$  km, 管网密度接近  $12 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ , 排水设施投资达  $2\,078.8 \times 10^8$  元。排水系统在城镇污水收集运输、内涝风险预防、水环境保护等方面发挥重要作用。对排水系统的运行效能进行评价可以发现排水系统的问题、评估排水系统现状、预测各类风险, 同时可为排水系统的发展、决策和优化提供指导性意见或参考。

当前我国人工智能、数字孪生、物联网等新技术的兴起推动了“智慧水务”的快速发展<sup>[2]</sup>, 以“低碳、绿色、资源、科技、和谐”为指导思想而提出了诸多“城镇排水系统智慧化处理关键技术”, 排水系统运行效能评价是其中的重要内容, 国内在这一方面的研究相对起步较晚, 近年来更多集中于排水系统末端污水处理厂的运行效能评价研究<sup>[3-5]</sup>, 对于排水管网本身, 则开展了一些以排水系统内涝、溢流或爆管等运行事故风险为目标的评价研究<sup>[6]</sup>, 但综合加以考虑平稳输送、低碳运维及智慧化等的综合评价的相关研究成果还很缺乏。由此对排水系统运行效能评价的国内外现状进行总结和评述, 以期完善评价方法和评价体系提供参考。

## 1 排水系统运行效能评价分类

排水系统的评价最早开始于欧洲, 英国水研究中心在上世纪 80 年代制作了首部排水管道闭路电视成像 (CCTV) 检测评估的编码手册, 在此之后, 欧美各国也相继发布了有关排水系统状态或运行效能评估的各类

收稿日期: 2023-09-10; 录用日期: 2023-10-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC3201500, 2021YFC3201300); 上海市科委科技创新项目 (20dz1204600)

第一作者: 闫明 (1996—), 男, 硕士研究生, [yanming357@163.com](mailto:yanming357@163.com); 通信作者: 王红武 (1970—), 女, 博士, 副教授, [wanghongwu@tongji.edu.cn](mailto:wanghongwu@tongji.edu.cn)

标准协议，比如美国材料与试验协会 (ASTM)、欧洲标准委员会 (CEN)、国际水协会 (IWA) 等机构相继发布了的其排水管道评估协议<sup>[7]</sup>，系统地阐述了排水管道分级评价方法。早期的运行效能评价主要是针对排水管道自身的运行状态及其性能参数，其评价范围相对较小。

随着时代的发展，排水系统运行的内涵意义越来越宽泛，评价所包含的范围也越来越广，加之研究方法的创新和科学技术的进步，现今对于排水系统运行效能的评价不再仅仅局限于排水管道本身，而是将排水管道拓展为整个城镇的排水系统，从整体、系统的角度对排水系统进行综合性的评价。

在经济学与管理学中，效能是达成目标要求的程度<sup>[8]</sup>。本综述参考此概念，将排水系统运行效能定义为排水系统运行时需要满足的一系列特定目标要求的程度的度量，体现了排水系统在运行时某些功能达到的程度及其自身运行状态的正常程度等。

分析和研究了排水系统运行效能评价相关的国内外文献 (表 1 所示) 共 66 篇，其中包括了 2015 年后国内大部分的相关研究，以及国内研究参考较多的国内外论文。据此排水系统运行效能评价的研究可按照评价目标分为以下五种类别：1) 内涝风险和溢流污染的预警与控制；2) 管网性能的预测和诊断；3) 排水系统的规划和运营；4) 安全风险类评估；5) 排水系统综合性评价。

表 1 排水系统运行效能评价目标分类汇总

Table 1 Summary of classification of drainage system operation efficiency evaluation objectives

评价目标	常用指标	论文数	参考文献
内涝风险预警和溢流污染控制	描述性指标：内涝节点数、内涝水量、内涝时长、内涝面积、内涝深度、溢流水量、溢流时长、溢流分布等； 预测性指标：内涝管段占比、内涝潜在危害、溢流量占比、溢流潜在污染等； 指导性指标：内涝削减潜力、溢流削减潜力、调蓄能力、调度能力等。	18	[9-26]
管网性能的预测和诊断	管网设计指标：排水管径、雨水口高程、调度能力、调蓄能力等； 水力性能指标：管道水深、管道流速、管道充满度、管线承载力等； 管道状态指标：管龄、管材、埋深、管道堵塞、管道检查、管道维护等。	18	[27-44]
管网运营和管网规划的评估	生态效应指标：温室气体排放、排水污染情况、环境效益等； 社会效应指标：服务人口、客户服务满意度等； 经济效应指标：维护成本、固定资产投入等； 管网规划指标：管网覆盖率、管网密度、各级管网结构等。	10	[45-54]
排水系统安全风险评估	爆炸风险、中毒风险、溢流污染风险和環境风险等。	9	[55-63]
排水系统综合性评价	污水处理能力、排水管网密度、污水处理率、节约低碳、循环利用、自然共生、价值创造、智慧管控等。	11	[64-74]

### 1.1 内涝风险和溢流污染的预警和控制

随着城市化快速发展，城市内涝和溢流污染问题日益凸显<sup>[75]</sup>，对城市居民生命财产安全以及城市水环境质量产生威胁，内涝防治和溢流污染控制逐渐成为评价的重点目标。城镇排水系统会收集并处理生活污水、工业废水和雨水，在正常情况下，所有污水都会通过排水管网输送到污水处理厂，但在雨天随着雨量的增加，可能会出现溢流和内涝。

此类评价有三个关键点，首先是能够表征溢流污染和内涝危害的情况和程度，其次是能够对溢流、内涝的发生及其产生的危害性后果进行预测，最后是能够表征排水系统的溢流控制能力和内涝防治能力。陈丰<sup>[11]</sup>将评价指标分为了描述性、预测性和指导性三类，分别对应上述的三个关键点，因此对内涝风险和溢流污染控制的评价指标可分为描述性指标、预测性指标和指导性指标三类。

指导性指标一般为排水系统的水力性能指标或监测数据，国内外诸多学者<sup>[76-79]</sup>采用了管道水深、管道坡降比、内涝深度、内涝节点数、内涝水量、内涝时长、内涝面积、溢流量、溢流分布和溢流时长等指标。预测性指标为可对溢流、内涝后果进行定性或定量评价的指标，例如 NIE L 等<sup>[9]</sup>、孙樱珊<sup>[19]</sup>、陈丰<sup>[15]</sup>等人采用了内涝管段占比、内涝潜在危害、溢流量占比、溢流潜在污染等指标。指导性指标一般为排水系统对内涝和溢流的控制能力，例如陈丰<sup>[15]</sup>采用的内涝削减潜力、溢流削减潜力等，还比如调蓄能力、调度能力等。

为了实现对内涝风险和溢流污染的预警,需要将描述性指标和预测性指标结合使用,首先通过描述性指标(各类监测数据和水力性能)评估排水系统的现状,然后基于此来计算预测性指标(如可能发生内涝的管段、区域、危害情况等),最后通过预测性指标评估排水系统可能发生内涝或溢流的严重程度及其造成的后果的严重程度,从而进行预警。进一步地,基于排水系统可能发生的内涝或溢流风险来计算指导性指标(削减潜力、调蓄能力、调度能力等),从而得出排水系统控制内涝和溢流所需的能力,并指导排水系统进行相应操作或改造从而达到对溢流和内涝的控制。

此外,也有学者采用了情景模拟的方式对内涝和溢流风险进行评估,即通过某些特定情景下的模拟得到筛选出特定指标值,从而完成对排水系统的内涝或溢流风险评价。这种方式可以在缺乏足够数据支持的情况下,通过预设一定降雨条件或事故情况等并以某些特定指标来表征排水系统的内涝或溢流风险,该评价方式在具体研究中灵活性较大,既可以采用几个指标的简单评价,也可以结合情景模拟、事故模拟和理论分析进行较全面的评价。例如,王迟<sup>[17]</sup>、蔡甜等<sup>[25]</sup>、黄曦涛等<sup>[22]</sup>基于构建排水系统模型如事故树、PSR等模型,通过外部环境、管网排水能力、危险性、敏感性、脆弱性等方面来评价城市的内涝风险;陈伯南<sup>[20]</sup>基于气候变化适应性理论,构建出了城市排水系统适应性评价体系,以评价其在不同强度降水下排水系统的适应能力。

## 1.2 管网性能的预测和诊断

城镇的排水管网有着复杂的拓扑结构,并且排水管网自身的性能及其状态对于整个排水系统的运行效能至关重要。该类评价的重点是排水管网性能对城市排水系统运行效能的影响,即排水系统运行效能的不确定性是由排水管网的管网设计、水力性能、管道状态等造成的,因此,以管网性能的预测和诊断为评价目标的评价体系研究中,评价指标可以分为管网设计指标、水力性能指标和管道状态指标三类。

其中管网设计指标用于表征管网建设的分布、设计、结构等合理性的指标,龙浩等<sup>[30]</sup>在雨水系统内部属性中采用了排水管径、雨水口高程、调度能力、调蓄能力等指标,并与脆弱度VPM理论相结合相对全面的评价了武汉、长沙两地的某些区域的管网脆弱度。水力性能指标是用于表征管道内水力特性的指标,其数据来源一般由实际监测产生,例如张驰<sup>[33]</sup>、HOSSEIN等<sup>[28]</sup>采用了管道水深、管道流速、管道充满度、管线承载力等指标对排水系统的排水能力进行了评估。管道状态指标则用于表征管道本身对于运送雨水、污水时的可靠性、适用性以及是否异常,例如OKWORI等<sup>[35]</sup>、杨秋侠等<sup>[31]</sup>、杨利伟等<sup>[37]</sup>、邢雯雯<sup>[38]</sup>采用了管龄、管材、埋深、垫层、管道堵塞、管道检查、管道维护等指标,这类指标对于管网的诊断和预测起到关键作用。

从上述的管网设计、水力性能和管道状态这三类指标选择出合适的指标,与合适的方法相结合就可以对排水管网的性能进行预测和判断。如将管道的使用年龄换算成真实年龄<sup>[25]</sup>,这样就可以根据管道在不同运营条件和环境下的老化特征,更加可靠地评估管道的失效风险。也可以与模糊集、模糊数学、优化算法等相结合,对评价结果进行合理量化,如模糊马尔可夫<sup>[27]</sup>、极限学习机<sup>[34]</sup>、神经网络<sup>[37-38]</sup>等方法,依据评价结果来判断排水管道是否失效以及预测其可能造成的后果,并进一步通过优化模拟来推测该后果可能造成的风险。

## 1.3 排水系统的运营和规划

排水系统的运营和规划类评价是以经济学和管理学的角度从绩效、运营、服务、规划等方面对排水系统的运行效能进行评价。各种国际组织,如国际水协会(IWA)<sup>[80]</sup>、国际供排水绩效标杆管理网络(IBNET)<sup>[81]</sup>、水服务办公室(OFWAT)<sup>[82]</sup>、美国环境保护局(US EPA)<sup>[83]</sup>和美国水工程协会(AWWA)<sup>[84]</sup>,都提出了不同的评价指标如表2所示,涵盖了大部分关于排水系统运营和规划的效能评价。根据指标的特点,可以分为生态效应、社会效应、经济效应以及管网规划四类指标。

国内外相关研究中,对管网运营和规划的评价一般会与后续改进或优化的方案相联系,比如管网的修复干预措施<sup>[48]</sup>、城市水环境恶化改善方案<sup>[49]</sup>、提出市政管网改善政策性建议<sup>[53]</sup>等,这往往涉及到多目标决策问题。因此该类评价指标体系在构建时需要考虑评价后的多目标决策优化问题,建议以此为出发点来选择合适的评价指标以及评价方法或模型。比如BEN等<sup>[47]</sup>采用了模糊数学的相关方法,基于模糊系统对后续污水管网修复方案进行了排序,以此选择出最优方案。

除了国际机构提出性能指标外,一些学者研究了排水系统运营和规划的特点而提出了其他的评价指标。对于管网规划,LEE等<sup>[52]</sup>提出了排水管网密度、排水管网结构类型等指标,并用采用这些指标对韩国的首尔、釜山等5个城市的雨水管网结构规划进行了评价。程永前等<sup>[45-46]</sup>在对排水规划评价中引入了分形维数,

表 2 国际机构发布的排水效能指标

Table 2 Drainage operation efficiency indicators published by international organizations

IWA	IBNET	OFWAT	US EPA	AWWA
水资源	服务覆盖范围	下水道溢流	服务人口	排水管道使用年限
人员指标	水的消耗和产生	适用排水非基础设施	排水管道总长	每公里管道废水收集成本
运行指标	处理水量	适用性排水基础设施	管道内外部状态	客户服务满意度
固定资产	管网性能	漏水量	管道坡度	每公里管道运行维护成本
服务质量	成本和人员	温室气体排放	管长、管径、管材等	废水处理设施数量
财务情况	服务质量	严重污染事件	附属排水设施建设情况	处理水量
	固定资产投资	排放合规情况	附属排水设施使用情况	污水处理效率
	收支情况	经济性指标		收支状况
	财务表现			管网覆盖率

注：IWA —— 国际水协会；IBNET —— 国际供排水绩效标杆管理网络；OFWAT —— 水服务办公室；US EPA —— 美国环境署；AWWA —— 美国水工程协会。

将其与排水管网的分布特征相结合，并据此对排水系统各级管网的结构、规模等方面进行量化评价同时构建了评价体系。此外，有研究提出了排水管网末端到污水处理厂平稳输送的问题<sup>[85]</sup>，这会影响到排水系统的运营和规划的同时，也影响到污水处理的效果，但针对这一方面的评价还缺乏相关的研究。

#### 1.4 排水系统安全风险评估

排水管网大部分建设于地下，其运行环境复杂且维护管理难度大，存在着管道老化破损、管道维护巡检不全面、管网设计规划存在缺陷等问题，由此可能引发城市内涝、污水溢流、道路内陷、管道爆炸等事故，严重威胁了城市排水系统的安全运行。因此，国内外也有学者对排水系统安全风险进行了评估。

对于排水系统的安全评价着重于爆炸风险、中毒风险、溢流污染风险和環境风险等，巴振宁等<sup>[62-63]</sup>、张莹等<sup>[6]</sup>研究总结了管道中存在的风险问题，并以爆炸风险、中毒风险、溢流污染风险和環境风险等四类风险构建风险评价体系，用以评估排水系统的安全风险。也有学者以安全事故的发生为出发点对排水系统进行相对综合性评估，如王智恺<sup>[60]</sup>基于网络层次结构，通过人为、管理、机器设备、环境等多维度对排水管网的安全类风险进行了综合性评估。

排水管道安全风险评估的研究方法主要为风险矩阵法和综合评估法两类。风险矩阵法可以将排水系统所遇到的安全问题和危害程度相对完整的列出，通过风险发生概率和危害等级相结合来进行评价，也是当前安全评价的常用方法，SALMAN 等<sup>[55]</sup>、BAAH 等<sup>[56]</sup>都是基于风险矩阵法耦合其他方法对排水管道安全进行了评估。综合评估法是基于多目标多准则的安全风险评估，常用的有模糊综合评价、AHP、灰色系统理论等方法。如 AHP 法耦合灰色关联分析法<sup>[58]</sup>，对合流制污水管道的安全风险进行评价；基于 ANP 模糊综合评价法<sup>[60]</sup>，以预测和判断管道失效为目标，对排水管网运行的安全风险进行评估。

#### 1.5 排水系统综合性评价

近年来，由于国内排水管网的大量建设以及“提质增效”“绿色低碳”的不断推进，国内对排水系统运行效能综合性评价的研究愈发重视，国外对于这方面的研究较少，此类评价能够全面、系统、宏观的反映出排水系统整体的运行效能，可以为多目标决策提供参考依据。排水系统运行效能的综合性评价也即从多方面、多角度对排水系统的运行状态、运营管理和维护建设等进行评估，因此一般根据其评价目的来构建评价模型和筛选评价指标。

排水系统运行效能综合评价的内容和形式相对自由，可以根据研究需要来补充和添加。如将可持续发展理念与排水系统的生命周期相结合<sup>[65]</sup>，从环境、技术性能、经济和社会效益四个方面进行评价；根据我国城镇排水管网系统的特点<sup>[66]</sup>，以基础属性、服务属性、驱动属性三方面来对排水管网进行综合性评价；数理统计模型、神经网络、卫星识别等多种方式相结合<sup>[67]</sup>，对天府新区的海绵城市建设潜力进行了定量评价；基于生态网络分析法 (ENA) 构建排水系统的网络结构模型<sup>[72]</sup>，并通过效用分析和结构分析对排水系统运行状态进

行评价；把系统论思想与排水系统相结合<sup>[64]</sup>，以供需关系的角度对排水系统进行评价；通过分析各地级市的排水系统数据<sup>[68]</sup>，对个地级市排水系统的时间和空间分布特征进行综合性评价。

## 2 排水系统运行效能评价流程

本综述将排水系统运行效能评价的流程分为三大阶段，分别为调研准备阶段、建立指标体系框架阶段和定权赋分评价阶段，且列出了每一阶段的具体步骤如图 1，该流程适用于多数排水系统运行效能的评价问题。

调研准备阶段，首先要了解评价对象并确定评价目标，为整个研究定下方向和基调；然后寻找可以利用的资源、文献和数据，并进行整合为后续的评价指标体系的建立提供可靠依据。数据收集时建议与信息化、数字化的技术相结合，如借助地理信息系统 (GIS)、排水管网数据采集与监视控制系统 (SCADA)、闭路电视成像系统 (CCTV) 等，也可以基于排水建模软件如 SWMM、Infoworks、MIKE URBAN 来模拟计算需要的相关数据。

构建指标体系框架，该阶段主要是对评价指标的选择，要求选出的评价指标能够合理的表征排水系统的运行效能，并以此构建出评价指标体系。因此，评价指标筛选方法是该阶段的核心问题，表 3 列出了常用的指标筛选方法。

定权赋分评价，是整个排水系统运行效能评价最重要的阶段，其中指标权重计算方法和评价结果计算方法统称为评价方法，也是这一阶段的关键点。生成评价和应用检验会涉及到后续的多目标优化问题和多目标决策问题，本综述对此不进行深入讨论，重点对评价方法进行总结，如下文所述。

## 3 排水系统运行效能评价方法

经分析，本综述将排水系统运行效能的评价方法分为指标权重的计算方法和评价结果的计算方法两部分。前者将对整个评价指标体系中的各级指标的重要性或关键性程度进行排序，排序结果的量化就是指标被赋予的权重，从而使指标体系更加合理。后者则是在前者的基础上，即把已经确定好权重的指标体系进行评价操作时，所使用的量化方法，直接影响最终评价结果。简言之，前者是评价指标的赋权方法，后者是计算评价最终得分的方法。

指标权重的计算方法主要分为主观定权法、客观定权法和组合赋权法三类，其中主观定权法以专家打分法和层次分析法 (AHP) 为代表；客观定权法以熵权法、主成分分析法、变异系数法等为代表；组合定权法是将不同定权方法的指标权重以某种组合方式进行定权的方法。

评价结果的计算方法有很多，当前应用较多的有模糊综合评价 (FCE)、理想优劣解距离法 (TOPSIS)、灰色关联分析以及数据包络法 (DEA) 等。可以看出，上述方法能够解决决定性指标的量化、多准则综合评价以及后续方案的多目标决策、优化等问题，对于排水系统运行效能评价的研究相对契合。

接下来，本综述将对研究中出现的不同评价方法进行归纳分析。从指标权重的计算方法角度出发，分析包括以下两大部分：其一归纳总结了层次分析及其改进方法与不同评价结果计算方法的组合应用案例及特点；其二总结了熵权法及其他定权方法与不同评价结果计算方法的组合应用案例及特点。

### 3.1 层次分析及其改进方法

层次分析法 (AHP) 是由美国运筹学家 SAATY 提出的一种主观赋权法<sup>[86]</sup>，具有简单、易用、灵活的特点，自该方法提出以来几乎在所有与多准则评价、决策、优化相关的问题都进行了研究和应用<sup>[87]</sup>。AHP 也随着实践和需求的发展，出现了各种各样的改进方法。层次分析及其改进方法在排水系统运行效能评价的领域内也有广泛的应用，如表 4 所示。AHP 的改进方法主要分为两种，一种是在确定权重时的改进，一种是在评

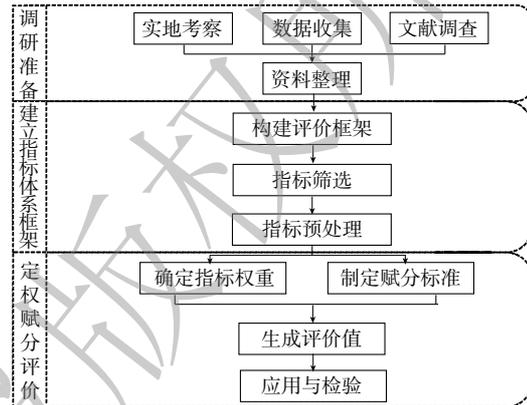


图 1 排水系统运行效能评价流程图

Fig. 1 Flow chart of drainage system operation efficiency evaluation

表 3 评价指标筛选方法

Table 3 Evaluation index screening methodology

筛选方法	特点	优势与局限	应用案例
生命周期评估 (LCA)	以排水系统的整个生命周期为研究对象筛选指标	优势：LCA有ISO-14040等国际规范，可以做到系统化、量化、标准化。 局限：据受收集到的数据质量的影响较大，难以界定评价范围。	对排水系统整个生命周期产生的环境负荷和环境效益进行量化研究 <sup>[65]</sup>
理论模型法	基于已有客观数据构建排水模型，并据此选择合适的指标	优势：通过理论模型结合实测数据，选出的指标更具有实用性和可靠性。 局限：理论模型参数多，计算过程复杂，率定困难。	根据 Cutter提出的 VPM模型对排水系统的脆弱性进行评价 <sup>[30]</sup>
专家建议法	基于专家主观意见的筛选方法	优势：充分利用了专家的实践经验，考虑因素比较全面。 局限：主观性过强，可能导致无法选出客观合理的指标。	将城市的排水管网作为整体研究运营绩效 <sup>[49]</sup>
频度统计法	基于指标的代表性，筛选相关文献中采用次数较多的指标	优势：选取的指标具有代表性好、效率高、可靠性强的特点。 局限：易受限文献统计的范围和数量不足或缺失的影响。	在借鉴以往研究成果并结合淮安市排水管网现状，对城市排水管网状态和运行效能评价 <sup>[71]</sup>
因子分析法	基于指标的代表性，选出相关性大的新因子作为指标	优势：将多指标简化为几个因子项进行评价。 局限：新因子的意义不能完全确定，且部分信息无法表现。	通过因子分析法筛选一级指标和二级指标，并以此构建评价体系 <sup>[19]</sup>
层次分析法 (AHP)	基于指标的一致性，删除低权重的指标	优势：避免了权重过小的指标危害到整体判断矩阵的不一致性。 局限：受主观因素影响较大。	筛除弱权重的指标，使核心指标贡献率为80%以上 <sup>[37]</sup>
变异系数法	基于指标的区分度，根据变异系数判断指标的可用性	优势：筛选出重要性程度高且认可度高的指标。 局限：受主观因素影响较大。	专家对指标重要性程度进行打分，并依据打分结果的变异系数来筛选合适的指标 <sup>[20]</sup>
情景模拟法	基于指标的适用性，在各种情景下指标的应用	优点：注重各情景下指标的适用性，筛选出可参考性强的指标。 局限：受限于情景模拟数据的准确性、逻辑性。	根据研究区域的4种典型的降雨强度，通过模型模拟结果选择指标 <sup>[39]</sup>
主成分分析法 (PCA)	基于指标的代表性，通过主成分因子实现降维	优点：可在保留大部分数据信息下，进行降维，简化模型。 局限：主成分因子的定义说明具有模糊性。	通过对选定的25个进行主成分分析，得出了6项主成分因子并对31个省域的防涝能力进行评估 <sup>[23]</sup>

价结果计算时的改进。

AHP 确定权重的改进方法，主要包括属性层次分析法 (AHM)、网络层次分析法 (ANP) 和模糊层次分析法 (FAHP) 三类。AHM 区别于 AHP 的重量模型，AHM 是比赛模型<sup>[88-89]</sup>，通过对同一准则下的每个指标相对其他指标的测度进行排序，从而构建属性判断矩阵，适用于权重需要两两比较的指标体系，且不用求解特征根，计算简单。ANP 与 AHP 的层次结构有所不同，AHP 层次结构如图 2 所示，由目标层、准则层和指标层组成结构分明，ANP 层次结构如图 3 所示，由控制层和网络层组成，可以看出 ANP 在控制层与 AHP 结构一致，但在网络层允许元素之间相互依存和影响，层次结构模糊，适用于指标间关联度高的复杂系统。FAHP 在构建判断矩阵时引入模糊数或构造构建模糊判断矩阵，该方法降低了判断矩阵一致性检验的难度。

AHP 评价结果计算的改进方法，主要是与其他评价结果计算方法结合使用也称为综合评价方法，本综述重点介绍使用较多的模糊综合评价、灰色关联分析、TOPSIS 和 DEA 四种方法。模糊综合评价是通过构建模糊隶属度函数、划分论域等级，与 AHP 及其改进法的定权结果相结合得出评价结果，可以解决多个定性指标难以量化的问题，需要注意与 FAHP 的区别，二者都是与模糊数学理论相结合，但是模糊化的流程不同，如图 4 所示，一个是对定权过程的模糊，一个是对评价结果的模糊。灰色关联分析是一种对线性关系的

表 4 层次分析法及其改进定权方法总结

Table 4 Summary of Analytical Hierarchy Process and Improved Weight Determination Method

指标权重 计算方法	评价结果 计算方法	方法特点	应用案例
AHP	直接计算	主观定权, 适用于咨询经验丰富的专家, 方便高效, 但主观性过强	综合评价长沙市、岳阳市和宁乡县排水管网系统的运行效能 <sup>[66]</sup> , 评估城市排水系统对强降水的适应能力 <sup>[20]</sup> , 评价乌鲁木齐市市政管网的生态、社会和经济效应 <sup>[53]</sup> , 以绿色、低碳、安全为目标评价排水管道的效能 <sup>[73]</sup> , 深圳排水管网运营绩效评估 <sup>[49]</sup>
AHP	归一化处理	主观定权, 经过规范化、归一化处理, 不同量纲的指标具有可比性	评估韩国下水道系统运行的绩效 <sup>[69]</sup> , 评估在不同降雨强度下排水管网超载的风险 <sup>[59]</sup>
AHP	模糊综合评价	主观定权, 可将定性指标通过隶属度函数进行量化处理	对淮安市某区域的排水管网状态和运行效能进行了综合评价 <sup>[71]</sup>
AHP	DEA	主观定权, 适用于多准则的评价及其后续优化和改进, 显著提高评价体系的最优性和公正性	结合贝叶斯网络评估污水管道的故障概率及故障后果 <sup>[36]</sup>
AHP	TOPSIS	主观定权, 适用于多目标评价或排序	基于水力模型的雨水管网健康度来评价管网健康状态 <sup>[40]</sup>
AHP	灰色关联度	主观定权, 适用于样本数据较少无法进行回归分析的问题, 通过加权灰色关联度计算得分	合肥夏季具有代表性的合流排水管道进行风险评估 <sup>[58]</sup> , 评估管道的安全分值、判断其风险情况以及检修的优先级 <sup>[59]</sup>
AHP	基于水力模型	主观定权, 可以依据水力模型的指数的计算值来划分评价等级的论域	基于灾害系统理论PSR模型对城市内涝脆弱度进行评价 <sup>[22]</sup> , 依据加权叠加分析城市内涝积水的危险等级划分 <sup>[16]</sup>
AHP+神经网络	模糊综合评价	主客观相结合的组合定权, 适用于有大量数据应用的评价模型	建立GA优化BP神经网络的评估模型, 对排水管道的健康状况进行评估 <sup>[37]</sup>
FAHP	直接计算	主观定权, 降低了判断矩阵的一致性的难度, 但不确定性更大	构建内涝风险评价模型对滨西北某市的 6 个汇水区域进行风险评价 <sup>[71]</sup> , 对渭南市排水管网的现状、结构性隐患等进行了综合评价分析 <sup>[50]</sup> , 以太湖流域为研究对象对各行行政区域的排涝权进行分配 <sup>[24]</sup>
AHM	可拓综合评价	主观定权, 区别于AHP重量模型, AHM是比赛模型, 对同一准则下的各指标的相对测度进行排序	构建了城市雨水管道风险评估模型并对合肥市某路段的雨水管道风险极性进行了风险评估 <sup>[58]</sup>
ANP	模糊综合评价	主观定权, 允许指标间互相控制和影响, 适用于复杂系统	采用风险评估半定量分析法, 以某市园区内的市政排水管网作为实例进行评估 <sup>[60]</sup> , 基于排水管网的故障损失对苏州工业园区排水系统进行了风险评估 <sup>[63]</sup>

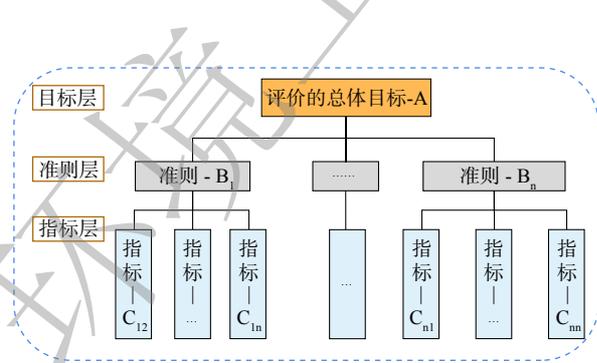


图 2 AHP 层次结构

Fig. 2 The structure of AHP method

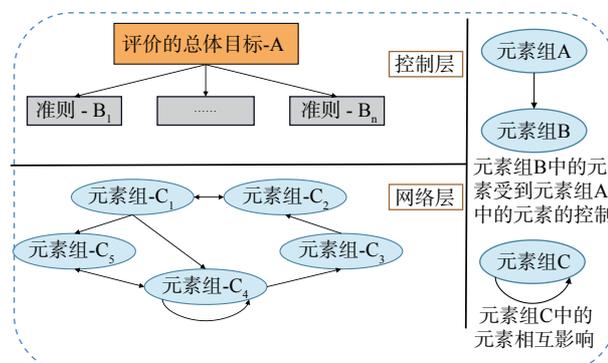


图 3 ANP 层次结构

Fig. 3 The structure of ANP method

系统系分析, 能够以较少的样本数据进行评价, 可以解决评价结果具有不确定性的问题。TOPSIS 是利用欧式加权距离来衡量加权程度的一种排序方法, 可以解决评价结果和决策方案的排序问题。DEA 是一种多目标

规划方法，可以依据评价指标的数据构建投入产出模型如 CCR 模型，从而进行效率评价，可以解决后续的多目标决策及优化的问题。

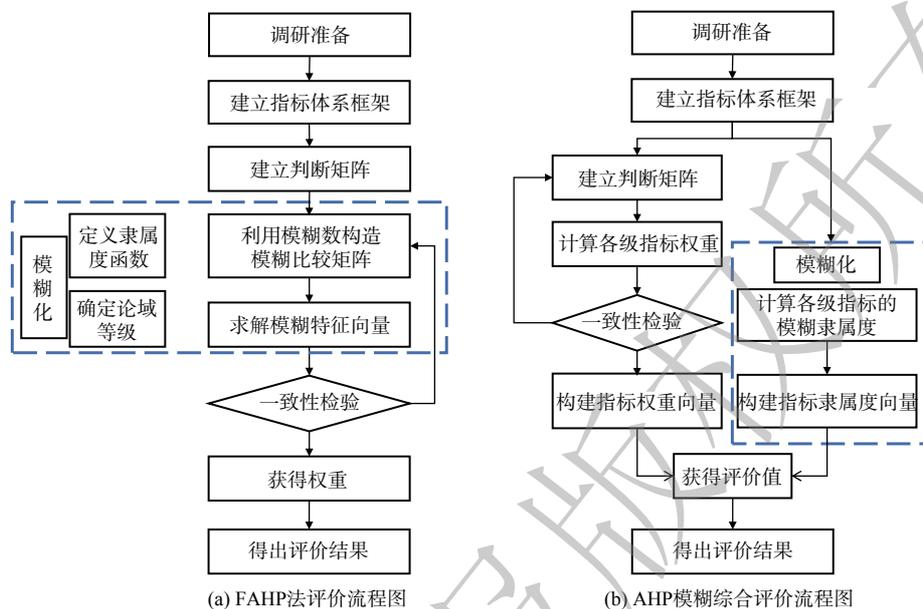


图 4 AHP 与模糊数学相结合的方法流程图

Fig. 4 Flow chart of the method combining AHP and fuzzy mathematics

### 3.2 熵权法及其他方法

熵权法也是一种常用的客观定权法，通过信息熵来表征各个指标的离散程度，指标的熵值越小则离散程度越大，也即该指标的权重越大，且其具有客观性，可以为评价指标体系提供定权依据。此外还有很多指标权重的计算方法如表 5 所示。

除此之外，神经网络法和组合定权法也是常用的定权方法。神经网络法是模拟人类思维模式的非线性评价方法，该方法具有自适应的学习能力，且有很强的容错能力，适用于拥有大量数据集的评价指标体系，能够提高指标权重和评价结果的准确性和可靠性。组合定权法是指采用多种定权方法，按照一定方式进行组合定权，多为主观定权法与客观定权法相结合的方式<sup>[87]</sup>，也有多种方法组合的方式如 Borda 组合评价法<sup>[44]</sup>，组合方式可分为线性组合定权和非线性组合定权。AHP 与熵权法组合定权较为常见，AHP 与熵权法组合定权结合模糊综合评价的流程如图 5 所示。

### 3.3 评价方法选用建议

出于合理性和完整性的考虑，排水系统运行效能的评价方法应包括两个部分：指标权重的计算和评价结果的计算。研究者应避免对上述两部分进行简单化、主观化处理，如直接赋权、无根据分级打分、缺少定性或定量方法等，如此操作将直接导致评价结果失真，致使评价指标体系无法用于实践。对于不同应用场景下评价方法的选择，有如下建议。

1) 排水系统本身极其复杂，但其设计与运行又具有规范性，因此，对于排水系统进行评价时应尽量避免主观性过强的方法（如专家函询、传统 AHP 法），因该系统本身有其定量化参数，而对其进行评价往往也存在定量化需求，如果使用了主观性过强的方法，则评价结果可能失与偏颇。建议通过使用综合评价法（如结合模糊集理论、灰色系统理论、神经网络、规划模型理论等）或组合赋权法（与客观赋权法相结合），可降低主观性、不确定性和模糊性，同时提高评价结果的准确性。

2) 权重计算方法的选择需要根据可采集到的有效数据的情况来确定，在有大量可靠数据的情况下，客观赋权法（熵权法、主成分分析法、神经网络等）可以通过各指标间的相关程度、敏感度、贡献程度、信息熵等得出合理指标权重；如果缺乏足够的可靠数据，评价指标的赋权则需要采用主观赋权法，同时结合经验丰富的行业内专家帮助决策，专家的赋权结果可以基于其背景信息（如专业性、权威性、熟悉程度等）来修正

表 5 熵权法以及其他定权方法总结

Table 5 Summary of entropy weight method and other weight determination methods

指标权重计算方法	评价结果计算方法	方法特点	应用案例
熵权法	加权平均结合主观分级	客观定权, 适用与实践经验对权重影响较小的情况, 利用信息熵计算权重	对某市某排水区域内雨水管网的承载力进行判别 <sup>[33]</sup>
熵权法	TOPSIS	客观定权, 适用于多目标评价的排序或对比问题	对31个省域的防涝减灾能力进行了评估 <sup>[23]</sup>
熵权法	模糊综合评价	客观定权, 将定性指标通过隶属度函数量化处理	天府新区洪涝灾害风险性评估 <sup>[67]</sup>
AHP+熵权法	模糊综合评价	组合定权, 既降低了AHP的主观性, 也避免了熵权法对数据的敏感性, 并利用隶属度函数量化评价结果	黑龙江某市雨水混凝土管道性能评估 <sup>[42]</sup>
AHP+熵权法	风险矩阵	组合定权, 既AHP主观性强的问题, 也避免了熵权法对数据敏感的问题, 并利用风险矩阵进行定性评价	基于市政管网事故的激励对某城市区域排水管网进行了风险评估 <sup>[61]</sup>
变异系数法	归一化处理	客观定权, 经过规范化、归一化处理, 不同量纲的指标具有可比性	对全国的城镇排水系统进行综合评价, 并分析其时间上的演变规律和空间上的分布特征 <sup>[74]</sup>
回归模型法	DEA	客观定权, 从投入产出角度建立的规划模型, 可以进行多目标的优化及决策	衡量澳大利亚污水处理服务的经济效率 <sup>[54]</sup> , 利用tobit回归分析法评估市政污水处理公司的效率 <sup>[51]</sup>
ENA	TOPSIS	主观定权, 适用于多目标评价或排序, 可以表征各个指标间的关联结构	依据ENA法将城市排水系统视为1个生态学研究对象进行评估 <sup>[72]</sup>
神经网络	模糊综合评价	客观定权, 具有自适应的学习能力, 适用于有大量高质量的评价体系	综合评估城镇排水防涝设施现有能力和内涝风险 <sup>[26]</sup>
神经网络	混淆矩阵	客观定权, 具有自适应的学习能力, 适用于有大量高质量的评价体系	采用PSO-ELM模型对上海市浦东新区洋山港保税港区的排水管道进行预测和诊断 <sup>[34]</sup>
模糊Borda组合评价法		组合定权, 多种评价方法相结合, 从多角度进行评价	将熵权法、TOPSIS、功效系数、模糊综合评价等通过Borda组合评价法相结合, 对雨水管网的脆弱性进行评估 <sup>[44]</sup>
专家打分法	模糊综合评价	主观定权, 主观性过强而易导致评价结果失真	从危险性、敏感性、脆弱性三方面对江西省宜丰县的内涝风险进行评估 <sup>[25]</sup>
专家打分法	专家打分法	主观定权, 且主观评分, 主观性过强而易导致评价结果失真	北京某合流片区溢流污染控制方案的决策 <sup>[19]</sup>

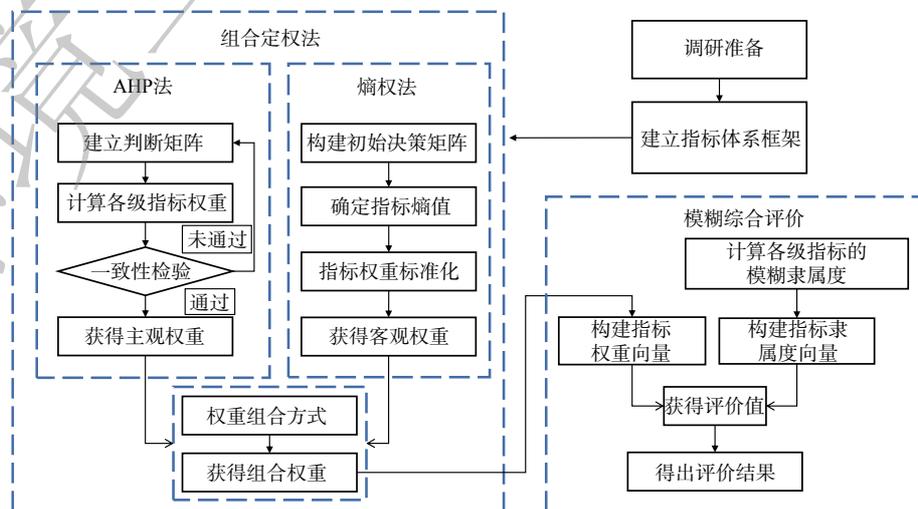


图 5 AHP 与熵权法组合赋权流程图

Fig. 5 Flow chart of the combination of AHP and entropy weighting method of empowerment

结果。

3) 评价结果计算方法的选择需要根据评价的目标来确定, 基于评价结果的排序可选择 TOPSIS, 基于评价结果的优化可选择投入产出模型 (如 DEA、线性规划模型等), 基于评价结果的准确性可选择模糊综合评价法等。

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

排水系统运行效能评价已经从单个指标的评价发展到多准则指标体系的综合评价。从排水系统运行效能评价的目标、流程和评价方法进行总结, 可得到主要结论如下。

1) 排水系统运行效能评价目前根据评价目标分为五类: 内涝风险和溢流污染的预警与控制, 管网性能的预测和诊断, 排水系统的规划和运营, 安全风险类评估, 排水系统综合性评价。各类评价指标体系都有其重要表征指标, 并对这些指标进行了汇总。

2) 完整的运行效能评价一般包括调研准备阶段、建立指标体系框架阶段和定权赋分评价阶段, 其中的关键是筛选评价指标、确定指标权重和计算评价结果三个步骤, 三个步骤各有其对应的处理方法, 研究者需要根据实际情况和客观需要选择科学、合理、可靠、合适的方法。

3) 排水系统运行效能评价的常用评价方法分为指标权重计算方法和评价结果计算方法两部分。其中指标权重计算方法主要包含主观定权法、客观定权法和组合定权法三类, 评价结果计算方法常用方法有模糊综合评价法、TOPSIS 法、灰色关联分析法、神经网络法、DEA 等方法。当前研究中, 为了解决评价过程中的不确定性、模糊性、不一致性、难量化等问题, 更多的是混合使用多种方法, 即综合评价方法, 研究者可以根据需要解决的问题而选择合适的综合评价方法。

通过文献分析可以得出: 当前研究中, 排水系统运行效能评价中缺乏有关排水系统信息化和智能化程度的指标体系, 从而难以评价某一地区排水系统的智慧化水平。此外, 在提质增效和节能减排的运行效能评价中, 排水管网到污水处理厂的平稳输送是不可忽视的重要部分, 但对于表征平稳输送运行效能评价指标的研究却很少。未来在对排水系统评价指标体系的完善中, 应当加强对排水系统智慧化和末端平稳输送这两方面运行效能评价的研究。

### 4.2 展望

随着物联网、人工智能、在线监测等新兴技术的快速发展, 研究者们将得到海量排水系统的相关数据, 届时评价指标体系的构建不再以主观经验为主导, 而是通过对海量数据的处理从而对各指标间的关联度、隶属度、贡献度、敏感度等方式进行分析, 进而得到一套完全量化的评价指标体系。原先评价指标体系中的定量指标和定性指标将由结构化数据和非结构化数据代替, 通过对各类型数据的量化计算而得出更加精准的评价结果, 并且可以基于实时的数据对排水系统进行实时评价, 为智慧水务、智能管控、智能调度提供可靠的参考意见和指导方向。由于海量可靠数据的出现, 当前常用的层次分析主观定权法将被基于实际数据分析的客观定权法所取代。因此, 本综述认为排水系统运行效能评价的未来研究重点为: 1) 排水系统大数据的处理, 主要是对短时间尺度 (秒级、分钟级、小时级) 的监测数据和水力性能的及时测算、处理与分析, 为实时的效能评价、调度控制和方案决策等提供数据支持; 2) 评价指标体系内指标间和各层级的关系分析, 包括关联度、隶属度、敏感度、贡献度等; 3) 发展合适的客观定权和评价方法来完善排水系统的多目标评价体系。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2021 年城乡建设统计年鉴 [EB/OL]. [2023-09-10]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [2] 尹海龙, 张惠瑾, 徐祖信. 城市排水系统智慧决策技术研究综述 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2021, 49(10): 1426-1434.
- [3] 董传强, 成官文, 吴琼芳, 等. 基于模糊综合评价的贵州省县级城镇污水处理厂主要工艺评价 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(1): 107-112.
- [4] 苏魏, 杜鹏飞, 陈吉宁. 城市污水处理厂运行稳定性评估方法初探 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2005(8): 84-87.
- [5] 孟繁宇, 樊庆铎, 纪楠, 等. 城市污水处理厂综合评价指标体系构建与应用研究 [J]. 环境与可持续发展, 2012, 37(2): 84-90.
- [6] 张莹. 城市排水管网运行风险评估研究进展 [J]. 城市道桥与防洪, 2022(6): 104-109+74+16.

- [7] 安关峰, 王和平, 周志勇. 《城镇公共排水管道检测与评估技术规程》DB44/T1025-2012 主要内容解析[J]. 建筑监督检测与造价, 2012, 5(6): 25-29+35.
- [8] 李焕荣, 苏敷胜. 企业战略人力资源管理效能研究[J]. 工业技术经济, 2008, 27(12): 2-5.
- [9] NIE L, LINDHOLM O, LINDHOLM G, et al. Impacts of climate change on urban drainage systems - a case study in Fredrikstad, Norway[J]. *Urban Water Journal*. 2009, 6(4): 323-332.
- [10] NILSEN V, LIER J A, BJERKHOLT J T, et al. Analysing urban floods and combined sewer overflows in a changing climate[J]. *Journal of Water and Climate Change*. 2011, 2(4): 260-271.
- [11] FONTANAZZA C M, FRENI G, LA LOGGIA G, et al. Uncertainty evaluation of design rainfall for urban flood risk analysis[J]. *Water Science and Technology*. 2011, 63(11): 2641-2650.
- [12] MOEDERL M, KLEIDORFER M, RAUCH W. Influence of characteristics on combined sewer performance[J]. *Water Science and Technology*. 2012, 66(5): 1052-1060.
- [13] SITZENFREI R, URICH C, MOEDERL M, et al. Assessing the efficiency of different CSO positions based on network graph characteristics[J]. *Water Science and Technology*. 2013, 67(7): 1574-1580.
- [14] FU G, KAPELAN Z. Flood analysis of urban drainage systems: Probabilistic dependence structure of rainfall characteristics and fuzzy model parameters[J]. *Journal of Hydroinformatics*. 2013, 15(3): 687-699.
- [15] 陈丰. 城市排水系统内涝与溢流控制性能评价与优化研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [16] 黄维. 城市排水管网水力模拟及内涝风险评估[D]. 广东: 华南理工大学, 2016.
- [17] 王迟. 基于事故树法的排水系统对城市内涝风险的评价研究[D]. 云南: 昆明理工大学, 2016.
- [18] LEIMGRUBER J, STEFFELBAUER D B, KREBS G, et al. Selecting a series of storm events for a model-based assessment of combined sewer overflows[J]. *Urban Water Journal*. 2018, 15(5): 453-460.
- [19] 孙樱珊. 基于 Mike Urban 模型的北京市老城区合流制溢流污染控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [20] 陈伯南. 城市水系统适应强降雨能力评估方法研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019.
- [21] 沈才华, 王浩越, 褚明生. 构建内涝势冲量的海绵城市内涝程度评价方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(3): 193-200.
- [22] 黄曦涛, 李怀恩, 张瑜, 等. 基于 PSR 和 AHP 方法的西安市城市内涝脆弱性评价体系构建与脆弱度评估[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 167-175.
- [23] 姜章泽君. 基于熵值赋权与 GIS 的多情景内涝风险评估研究[D]. 江西: 南昌大学, 2020.
- [24] ZHANG D D, SHEN J Q, LIU P F, et al. Use of Fuzzy Analytic Hierarchy Process and Environmental Gini Coefficient for Allocation of Regional Flood Drainage Rights[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(6).
- [25] 蔡甜, 王佳. 排水模型和 GIS 模糊综合评价在内涝风险评估中的应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(11): 117-124.
- [26] CAI Z, LI D, DENG L. Risk evaluation of urban rainwater system waterlogging based on neural network and dynamic hydraulic model[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*. 2020, 39(4): 5661-5671.
- [27] KLEINER Y, RAJANI B, SADIQ R. Failure risk management of buried infrastructure using fuzzy-based techniques[J]. *Journal of Water Supply Research and Technology-Aqua*. 2006, 55(2): 81-94.
- [28] HOSSEINI S M, GHASEMI A. Hydraulic performance analysis of sewer systems with uncertain parameters[J]. *Journal of Hydroinformatics*. 2012, 14(3): 682-696.
- [29] SYACHRANI S, JEONG H D, CHUNG C S. Advanced criticality assessment method for sewer pipeline assets[J]. *Water Science and Technology*. 2013, 67(6): 1302-1309.
- [30] 龙浩, 李翠梅. 城市雨水管网系统脆弱性评价[J]. 深圳大学学报(理工版), 2014, 31(6): 593-599.
- [31] 杨秋侠, 赵瑞垠. 基于网络最大流的城市雨水管网系统脆弱性评价[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(11): 2987-2992.
- [32] 赵瑞垠. 城市雨水管网系统脆弱性评价及脆弱管段判定[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2018.
- [33] 张弛. 基于 GIS 与 SWMM 的城市雨水管线承载力评价与优化[D]. 陕西: 西安建筑科技大学, 2019.
- [34] 郑茂辉, 刘少非, 柳娅楠, 等. 基于粒子群优化极限学习机的排水管网结构状况评价[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 513-516+51.
- [35] OKWORI E, VIKLANDER M, HEDSTROM A. Performance assessment of Swedish sewer pipe networks using pipe blockage and other associated performance indicators[J]. *H2open Journal*. 2020, 3(1): 46-57.
- [36] GHAVAMI S M, BORZOOEI Z, MALEKI J. An effective approach for assessing risk of failure in urban sewer pipelines using a combination of GIS and AHP-DEA[J]. *Process Safety and Environmental Protection*. 2020, 133: 275-285.
- [37] 杨利伟, 邢雯雯, 张莉平, 等. 基于 GA 优化 BP 神经网络模型的污水管道系统健康状况评估[J]. 给水排水, 2021, 57(9): 123-131.
- [38] 邢雯雯. 基于 GA-BP 神经网络模型的排水管道系统健康状况评估[D]. 陕西: 长安大学, 2021.
- [39] 刘耀台. 城市排水管网模拟评价与径流控制方案优化[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [40] 马晴晴, 吴珊, 王昊, 等. 雨水管网健康度评价与应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(3): 195-204.
- [41] LIANG X, HE J, WEN W, et al. Drainage Capacity Evaluation of Sewer Networks Based on Comprehensive Hydraulic Performance Index and Its Application[J]. *China Water & Wastewater*. 2022, 38(22): 22-27.
- [42] JIN H, JIN X, JIN J, et al. Performance Assessment Framework for Reinforced Concrete Pipes in Rainwater Drainage System Using a Combined Weights-Fuzzy Theory[J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2021, 35(2).
- [43] WANG Z, YANG Y, WANG H, et al. A Comprehensive Failure Risk Analysis of Drainage Pipes Utilizing Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis and Evidential Reasoning[J]. *Buildings*, 2023, 13(3).
- [44] HE F, CHENG S, ZHU J. Enhancing the Vulnerability Assessment of Rainwater Pipe Networks: An Advanced Fuzzy Borda Combination Evaluation Approach[J]. *Buildings*, 2023, 13(6).

- [45] 程永前, 宋乾武, 张玥, 等. 排水管网规划评价指标体系构建及分形维数应用[J]. 环境科学研究, 2011, 24(4): 446-451.
- [46] 程永前, 张玥, 宋乾武, 等. 分形维数在城市排水管网规划中的应用[J]. 环境科学研究, 2012, 25(1): 89-94.
- [47] BEN TAGHEROUI W, BENNIS S, BENGASSEM J. A Fuzzy Expert System for Prioritizing Rehabilitation of Sewer Networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2011, 26(2): 146-152.
- [48] CARRICO N, COVAS D I C, CEU ALMEIDA M, et al. Prioritization of rehabilitation interventions for urban water assets using multiple criteria decision-aid methods[J]. *Water Science and Technology*. 2012, 66(5): 1007-1014.
- [49] 杨文健, 李婷婷. 深圳特区内排水管网运营绩效评价研究与应用[J]. 建筑节能, 2016, 44(3): 64-67+71.
- [50] 李晓静, 陈勇, 胡本刚, 等. 城市地下排水管道评价体系探究——以渭南市为例[J]. 测绘, 2018, 41(5): 208-213.
- [51] YOUNG J S, SUHO B. Evaluating the Efficiency of Public Sewer Systems in Korean Local Governments: Focusing on Economies of Scale, Density, and Scope[J]. *The Korean Journal of Local Public Enterprises*. 2017, 13(2): 1-28.
- [52] LEE J, CHUNG G, PARK H, et al. Evaluation of the Structure of Urban Stormwater Pipe Network Using Drainage Density[J]. *Water*, 2018, 10 (10) .
- [53] 李琳, 姚娟. 乌鲁木齐市市政排水管网建设效应评价体系研究[J]. 化工管理, 2019(36): 103-104.
- [54] ANANDA J. Assessing the operational efficiency of wastewater services whilst accounting for data uncertainty and service quality: a semi-parametric approach[J]. *Water International*. 2020, 45(7-8): 921-944.
- [55] SALMAN B, SALEM O. Risk Assessment of Wastewater Collection Lines Using Failure Models and Criticality Ratings[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2012, 3(3): 68-76.
- [56] BAAH K, DUBEY B, HARVEY R, et al. A risk-based approach to sanitary sewer pipe asset management[J]. *Science of the Total Environment*. 2015, 505: 1011-1017.
- [57] 徐得潜, 卫允澜. 基于 AHM-可拓评价法的城市雨水管道风险评估[J]. 水电能源科学, 2019, 37(9): 92-95.
- [58] 徐得潜, 张倩. 基于 AHP-GRA 的合流制污水管道风险评估[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(4): 1149-1154.
- [59] 张倩. 城市污水管道风险评估与污水泵站优化运行研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2019.
- [60] 王智恺. 城市市政排水管网运行安全风险评估及工程示范[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [61] 刘威, 董婉琪. 基于 AHP-熵权法组合赋权的排水管网风险评估方法研究[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 949-956.
- [62] 巴振宇, 匡田, 梁建文, 等. 城市排水管网风险评估研究[J]. 市政技术, 2021, 39(1): 90-93.
- [63] BA Z N, FU J S, LIANG J W, et al. Risk Assessment Method of Drainage Network Operation Based on Fuzzy Comprehensive Evaluation Combined with Analytic Network Process[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2021, 12 (2) .
- [64] 王黎明, 孙钰. 基于主成分分析的城市排水系统供求协调度研究[J]. 天津经济, 2014(11): 48-51.
- [65] 建娜, 胡玉婷, 肖雪莹. 城镇排水系统量化指标体系研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2015, 32(10): 22-27.
- [66] 冷雪. 城镇排水管网系统运行效能评价体系研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2017.
- [67] 王志杰, 周平, 刘川昆, 等. 海绵城市潜力评估方法及地下排水系统[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 118-127.
- [68] 梁珊, 刘毅, 董欣. 中国排水系统现状及综合评价与未来政策建议[J]. 给水排水, 2018, 54(5): 132-140.
- [69] NAM S N, NGUYEN T T, OH J. Performance Indicators Framework for Assessment of a Sanitary Sewer System Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) [J]. *Sustainability*, 2019, 11 (10) .
- [70] 邓玉莲. 城市排水管网状态和运行效能评估方法的研究与应用[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021.
- [71] 王俊岭, 熊玉华, 张现国, 等. 基于 AHP-模糊综合评价法的城市排水管网状态和运行效能评价——以淮安市淮安区为例[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(4): 1162-1169.
- [72] 李晴, 曾维华, 唐小翕, 等. 城市排水系统运行状态评价与调控方案优选: 以昆明市为例[C]//中国环境科学学会环境工程分会. 中国环境科学学会 2022 年科学技术年会--环境工程技术创新与应用分会场论文集(四). 南昌, 2022: 806-813.
- [73] 王金丽, 孙永利, 郑兴灿, 等. 城市绿色排水系统内涵与规划评价技术研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 16-23.
- [74] 黄悦, 刘广奇. 我国城镇排水系统综合评价及时空分异特征[J]. 中国给水排水, 2023, 39(2): 26-31.
- [75] 付意成, 魏传江, 王启猛, 等. 区域洪灾风险评估体系研究[J]. 灾害学, 2009, 24(3): 27-32.
- [76] 何俊超, 李明明, 刘睿, 等. 国内外合流制溢流污染管控体系研究[J]. 环境工程, 2021, 39(4): 42-49.
- [77] 刘徽, 王帅, 杨伟卫, 等. 基于多因子分级加权指数和法的城市洪涝灾害风险评估[J]. 冶金管理, 2022(5): 106-108.
- [78] 刘妍, 司海燕, 杨泽运, 等. 智慧城市内涝灾害评估体系构建[J]. 测绘工程, 2022, 31(4): 57-66.
- [79] 杨正, 车伍, 赵杨. 城市“合改分”与合流制溢流控制的总体策略与科学决策[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 46-55.
- [80] MATOS R C, A. ; DUARTE, P. ; ASHLEY, R. ; MOLINARI, A. ; SCHULZ, A. Performance Indicators for Wastewater Services[M]. London, UK: IWA, 2003.
- [81] DANILENKO A B, C. ; MACHEVE, B. ; MOFITT, L. The IBNET Water Supply and Sanitation Blue Book 2014[M]. Washington, DC, USA: World Bank, 2014.
- [82] OFWAT. Key Performance Indicators—Guidance[M]. Birmingham, UK: Water Services Regulation Authority, 2013.
- [83] EPA U S. Guide for Evaluation Capacity, Management, Operation, and Maintenance (CMOM) Programs at Sanitary Sewer Collection Systems[M]. Cincinnati, OH, USA: United States Environmental Protection Agency, 2005.
- [84] AWWA. Benchmarking Performance Indicators for Water and Wastewater Utilities—2013 Survey Data and Analyses Report[M]. Denver, CO, USA: American Water Works Association, 2015.
- [85] 廖青桃, 谭琼, 时珍宝, 等. 城市污水处理厂厂网联动平稳输送运行优化研究[J]. 给水排水, 2016, 52(12): 20-24.
- [86] SAATY T L. HOW TO MAKE A DECISION - THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS[J]. *European Journal of Operational Research*. 1990, 48(1): 9-26.

- [87] HO W, MA X. The state-of-the-art integrations and applications of the analytic hierarchy process[J]. *European Journal of Operational Research*. 2018, 267(2): 399-414.
- [88] 程乾生. 层次分析法 AHP 和属性层次模型 AHM[J]. *系统工程理论与实践*, 1997(11): 26-29.
- [89] 程乾生. 属性层次模型 AHM——一种新的无结构决策方法[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998(1): 12-16.

(责任编辑:金曙光)

## Establishment and study on the evaluation index system for operational efficiency of urban drainage systems

YAN Ming, WANG Hongwu\*, LIU Zhigang, GONG Hui, DAI Xiaohu

College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Key Laboratory of Urban Water Supply, Water Saving and Water Environment Governance in the Yangtze River Delta of Ministry of Water Resources, Shanghai 200092, China

\*Corresponding author, E-mail: WANG Hongwu, wanghongwu@tongji.edu.cn

**Abstract** The drainage system is an important infrastructure in urban areas, of which the operational efficiency evaluation is of great significance for urban water environment governance and maintenance, as well as green and low-carbon development. This article summarized and analyzed the relevant research achievements at home and abroad from the following three aspects: firstly, operational efficiency evaluation research can be divided into five categories according to different evaluation objectives: control of waterlogging and overflow, prediction and diagnosis of pipeline network performance, planning and operation of drainage systems, safety risk assessment, and comprehensive evaluation. The research status of these five types of evaluation indicator systems was clarified, and their commonly used indicators were summarized. Secondly, the establishment process of each evaluation indicator system was analyzed, which can be summarized into three stages: "research preparation", "indicator construction", and "scoring evaluation". The commonly used evaluation indicator screening methods was summarized. It was pointed out that the most crucial part lied in the third stage, namely indicator weighting and calculation of the final evaluation results. Finally, various evaluation methods in the literature were analyzed and the results showed that the comprehensive evaluation method based on the subjective weighting method of Analytic Hierarchy Process (AHP) was a commonly used method in current research, which can solve problems such as uncertainty, inconsistency, fuzzification, and quantification that arise during the evaluation process. Moreover, it also outlined the characteristics and applicability of objective weighting methods such as entropy weighting, neural networks, and combination weighting and so on. The article pointed out that there was still a lack of efficiency evaluation on smart water services and smooth transportation. With the rapid development of technologies such as IOT, artificial intelligence, and online monitoring, as well as the emergence of massive and reliable data related to drainage systems, the development and application of new evaluation methods with objective weighting as the mainstream will be given opportunities. This study can provide reference for improving the evaluation index system for the operational efficiency of drainage systems and calculating accurate evaluation results.

**Keywords** drainage system; drainage network performance; operation efficiency; evaluation index system; evaluation method