

以天津市为例的城市水代谢系统安全评价研究

徐 瑾^{1,2}, 于志昊^{1,2}, 李梅彤^{1,3}, 李斌柯¹

(1. 天津理工大学 管理学院, 天津 300384; 2. 天津大学 环境科学与工程学院, 天津 300072; 3. 天津大学 化工学院, 天津 300072)

摘 要: 城市水代谢系统的持续正常运转是保证城市可持续健康发展的重要前提与基础。引入物质流分析法(MFA)的基本框架,构建天津市水代谢系统安全评价指标体系,采用熵权法并结合层次分析法对评价指标体系进行赋权,基于天津市近10年的城市水代谢相关数据,对天津市城市水代谢系统安全水平进行了评估与分析。研究表明,2005年—2014年,天津市水代谢系统的安全状态先后经历了3个阶段,即前期持续性改善,中期发生下滑态势,后期逐渐趋于平稳。为了保证天津市水代谢系统的安全发展,应充分汲取后期的治理经验,保障稳定的水源供给,提高废水的再利用效率,提倡水资源高效利用与节约意识。

关键词: 城市水代谢系统; 安全评价; 物质流分析法; 熵权法; 层次分析法

中图分类号: TU993.1 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)01-0077-05

Research on Safety Evaluation of Urban Water Metabolism System: Taking Tianjin as an Example

XU Jin^{1,2}, YU Zhi-hao^{1,2}, LI Mei-tong^{1,3}, LI Bin-ke¹

(1. School of Management, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The stable and continuous operation of an urban water metabolism system is an important prerequisite and basis for ensuring the sustainable and healthy development of a city. This paper introduced the basic framework of material flow analysis (MFA), developed a safety evaluation index system for Tianjin water metabolism system, used an entropy weight method and an analytic hierarchy process to calibrate the evaluation index system, based on urban water metabolism data in Tianjin in recent ten years. The safety level of the urban water metabolism system in Tianjin was analyzed and evaluated. The results showed that the safety status of the water metabolism system in Tianjin had experienced three stages from 2005 to 2014: continuous improvement in the early stage, decline in the middle stage, and gradual stabilization in the latest stage. In order to ensure the safety and development of the urban water metabolism system, the government should learn from the management experience in the latest stage, to guarantee a stable water supply, to improve the efficiency of urban wastewater reuse, to promote

基金项目: 天津市第二批人才发展特殊支持计划——危险废弃物安全处置与资源化创新团队; 天津市科技重大专项与工程项目(16YFXTSF00270); 天津市科技计划项目(16ZXFWGX00090); 教育部人文社科基金资助项目(14YJC630211); 水利工程仿真与安全国家重点实验室开放基金资助项目(HESS-1701)

通信作者: 李梅彤 E-mail: limeitong@tjut.edu.cn

efficient utilization of water resources and conservation awareness.

Key words: urban water metabolism system; safety evaluation; MFA; entropy method; AHP

目前,城市水代谢系统安全的基本内涵及相关概念体系已得到普遍认同,而城市水代谢系统安全的评价理论与方法研究正逐渐走向深入,常见的研究方法有模糊集^[1,2]、熵权法^[3]、聚类分析^[4]、多元回归模型^[5]、水足迹^[6,7]等,不一而足且各有优劣。笔者认为,系统性评价应建立在对评价对象内涵结构及运作机理的深刻理解之上,而以往研究对此部分的分析论述则并不十分充分。鉴于此,笔者将以天津市为例,创新性引入物质流分析方法(MFA)的基本分析框架,藉此以进一步构建城市水代谢系统安全的评价指标体系,采用熵权法(客观评价)并结合层次分析法(主观评价)对评价指标体系进行赋权,进而对城市水代谢系统的安全水平进行评价。

1 指标评价体系与分析方法

1.1 物质流分析法

城市水代谢系统的物质流分析框架见图1。

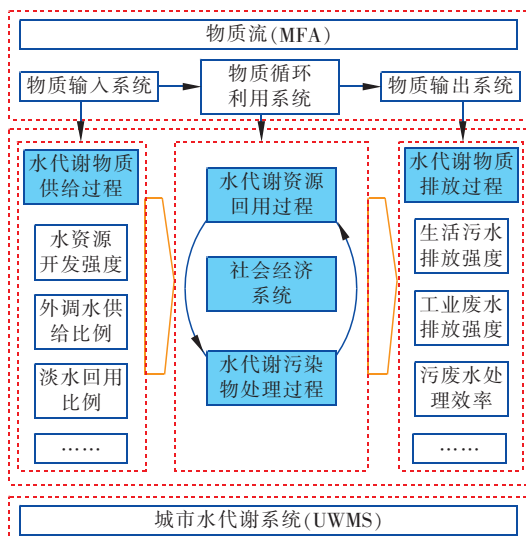


图1 城市水代谢系统的物质流分析框架

Fig.1 Framework of material flow analysis for urban water metabolism system

物质流分析法是用以描述特定对象范围内代谢物质流通过程的重要技术方法^[8,9],可充分描述城市水代谢的流通过程,并可进一步追踪城市水代谢系统的代谢物质流动轨迹,便于对城市水代谢过程及其特征进行刻画,进而筛选出城市水代谢系统

安全指标,从而构建可系统评价水代谢系统安全的指标体系^[10]。

1.2 指标体系的构建

为确保指标体系的合理性与可用性,依据城市水代谢的流通过程及其系统特征,依据评价目标,采用MFA提取用以衡量城市水代谢系统安全程度的评价指标,同时兼顾天津市水代谢系统现状,进行天津市城市水代谢系统安全评价指标体系的构建。综上,遵循自上而下的基本路径,将指标体系分解为目标层(A)、准则层(B)以及指标层(C),见表1。

表1 天津市城市水代谢系统安全评价指标体系

Tab.1 Safety evaluation index system of urban water metabolism system in Tianjin

目标层(A)	准则层(B)	指标层(C)	原指标(D)	性质
天津市城市水代谢系统	水代谢供给物质输入系统(B ₁)	水资源总量(C ₁)	当地水源 + 外调水 + 雨水	正
		总用水量(C ₂)		负
		水资源开发率(C ₃)	总用水量/水资源总量	负
		淡水回用率(C ₄)	污废水回用量/污废水产生总量	正
		海水淡化量(C ₅)		正
	水代谢累积物质利用系统(B ₂)	人口自然增长率(C ₆)		负
		人均用水量(C ₇)	总用水量/该地区常住人口数	负
		生产用水比例(C ₈)	生产用水/总用水量	负
		水均GRP(C ₉)	GRP/总用水量	正
		生态用水比例(C ₁₀)	生态用水量/总用水量	正
	水代谢处理物质输出系统(B ₃)	废水治理投资(C ₁₁)		正
		污水处理率(C ₁₂)	污水处理量/污水排放总量	正
		工业废水排放率(C ₁₃)	工业污废水排放量/污废水排放总量	负
		生活污水排放率(C ₁₄)	生活污水排放量/污废水排放总量	负
		污水再生利用率(C ₁₅)	污水再生利用量/污水处理总量	正

如表 1 所示,目标层是天津市城市水代谢系统;准则层则包括水代谢供给物质输入系统、水代谢累积物质利用系统以及水代谢处理物质输出系统这 3 个复合指标;指标层是指具体且可以量化计算的指标,它是在准则层的基础上细分所得到的,共选取了 15 个。

1.3 指标权重的确定

鉴于单一的主观评价方法的准确程度多依赖于评价者的经验水平,往往存在不可避免的结果偏差并造成评价结果与事实不符,因此为最大可能地控制干扰项,保证评价结果的严谨可信程度,采用客观赋权(即熵权法)并结合主观赋权(即层次分析法)的方法确定城市水代谢系统安全程度评价指标的权重,进而计算安全水平指数,并将两种方法得到的权重值加以综合[见式(1)],以期更加全面、准确地反映评价指标的重要程度。

$$Q_j = \frac{(W_j + Z_j')}{2} \quad (1)$$

式中, Q_j 为评价指标的组合权重; Z_j' 为采用 AHP 法确定的指标权重; W_j 为采用熵权法确定的指标权重。

1.3.1 数据标准化处理

鉴于城市水代谢系统安全水平综合评价指标体系中指标数量较多,所采用指标计量单位难免会存在一定差异,这些问题将使得后续确定的指标权重出现较大误差。另外,不同指标对城市水代谢系统安全水平发生的作用性质差异导致其发挥的作用方向(正向与负向)亦互异,如表 1 所示。因此,量纲标准化处理所采集的指标初始数据必不可少。对于正向(指标增加将提高系统的安全水平)和负向(指标增加将降低系统的安全水平)作用性质的评价指标,其标准化公式分别见式(2)、(3)。

$$x_{ij}' = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

$$x_{ij}' = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 表示评价对象指标的原始值, x_{ij}' 为经过量纲标准化处理后的标准指标值, x_{\max} 与 x_{\min} 则分别为原评价指标的最大和最小值。

1.3.2 熵权法计算指标权重

数据经过标准化处理后,借助熵权法确定各评价指标的权重,具体计算过程如下:

$$\begin{cases} y_{ij} = \frac{x_{ij}'}{\sum_{i=1}^m x_{ij}'} (0 < y_{ij} < 1) \\ h_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij} \\ W_j = \frac{1 - h_j}{\sum_{i=1}^n (1 - h_j)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, h_j 为各评价指标信息熵值, W_j 为各评价指标熵权。

1.3.3 层次分析法计算权重

层次分析法的基本作用原理是将一个复杂性较高的问题解构为相对有序的递阶层次结构,通过定性判断和定量计算使得经验判断量化,最终对待决策方案进行排序^[11]。本文基于表 1 的评价指标体系层次结构,邀请专家按照 9 位标度法给出判断,然后分别对准则层和指标层各因素重要性进行两两比较,最终构建出准则层判断矩阵以及指标层判断矩阵。具体操作步骤如下:

① 对指标层各判断矩阵按列进行归一化处理,得到判断矩阵元素,见式(5)。

$$\begin{aligned} \overline{B}_{ijj'} &= \frac{B_{ijj'}}{\sum_{j'=1}^{n_i} B_{ijj'}} \\ (i &= 1, 2, \dots, 5; j' = 11, 21, \dots, n_i 1) \end{aligned} \quad (5)$$

② 对归一化矩阵的每一行元素求平均值得到指标层权重向量元素,并进行一致性检验,见式(6)。

$$z_{ij} = \frac{\sum_{j'=1}^{n_i} \overline{B}_{ijj'}}{n_i} (i = 1, 2, \dots, 5; j = 1, 2, \dots, n_i) \quad (6)$$

③ 以同样方法对准则层判断矩阵进行计算得到其权重。自下而上综合计算得到评价总目标的总排序向量,见式(7)。

$$\begin{aligned} Z' &= [z_j'] = [z_i] \cdot [z_{ij}]^T = [z_i \cdot z_{ij}] \\ (j &= 1, 2, \dots, n; n = \sum_{i=1}^3 n_i) \end{aligned} \quad (7)$$

2 城市水代谢系统安全评价

根据表 1 的指标体系,选取了天津市 2005 年—2014 年的相关数据,这些数据来源于天津市 2015 年度统计年鉴、天津市水资源公报、国家统计局、天津市统计局、天津市水务局等网站,以保证数据的可靠性和权威性。并根据以上相关数据计算城市水代谢系统安全评价指标体系的综合权重,如表 2 所示。

表2 城市水代谢系统安全评价指标体系权重
Tab.2 Weight of urban water metabolism system safety evaluation index

指标层 C	准则层权重	熵权	AHP 权	综合权重
水资源总量 C_1	0.186 5	0.059 4	0.034 9	0.047 2
总用水量 C_2		0.058 2	0.039 8	0.049 0
水资源开发率 C_3		0.064 7	0.041 2	0.053 0
淡水回用率 C_4		0.065 2	0.036 5	0.050 9
海水淡化量 C_5		0.056 1	0.034 1	0.045 1
人口自然增长率 C_6	0.599 4	0.058 7	0.435 8	0.247 3
人均用水量 C_7		0.057 9	0.043 7	0.050 8
生产用水比例 C_8		0.059 1	0.042 6	0.050 9
水均 GRP C_9		0.062 4	0.034 6	0.048 5
生态用水比例 C_{10}		0.060 7	0.042 7	0.051 7
废水治理投资 C_{11}	0.214 1	0.091 3	0.050 4	0.070 9
污水处理率 C_{12}		0.094 5	0.048 9	0.071 7
工业污水排放率 C_{13}		0.080 7	0.026 7	0.053 7
生活污水排放率 C_{14}		0.074 8	0.035 3	0.055 1
污水再生利用率 C_{15}		0.056 3	0.052 8	0.054 6

基于表2中指标的权重,采用天津市2005年—2014年各指标数据,计算出天津市城市水代谢系统历年安全综合指数,如表3所示。

表3 天津市水代谢系统安全综合评价指数
Tab.3 Comprehensive evaluation index of urban water metabolism system safety in Tianjin City

项 目	B1	B2	B3	总评分
2005 年	0.153 7	0.150 2	0.175 1	0.479 1
2006 年	0.201 3	0.225 5	0.189 2	0.616 0
2007 年	0.197 4	0.311 4	0.198 4	0.707 2
2008 年	0.139 5	0.308 4	0.159 8	0.607 7
2009 年	0.170 5	0.376 9	0.154 4	0.701 9
2010 年	0.120 3	0.341 8	0.125 4	0.587 6
2011 年	0.129 5	0.315 3	0.164 7	0.609 6
2012 年	0.144 0	0.311 2	0.162 3	0.617 5
2013 年	0.158 3	0.317 0	0.179 4	0.654 6
2014 年	0.164 9	0.355 6	0.180 1	0.701 6

基于表2、3,对天津市城市水代谢系统安全状态进行综合分析。可以看出,2005年—2007年天津市水代谢系统的安全状态发生持续性改善,2010年—2014年的水代谢安全状态保持着良好健康发展态势并逐渐趋于稳定,但2008年—2010年其水代谢程度发生大幅下降并呈现不确定波动状态。总体而言,天津市城市水代谢安全状况并不理想,而根据来自相关资料(如历年天津市水资源公报等公开数据)的实际反馈,这种总体趋势可较好地解释天

津市历年水代谢演变过程。2007年及以前天津市长期处于城市水资源短缺和水资源保护不利的状况,水资源供给关系紧张以及城市水污染情况严重等紧迫情形,为应对并缓解天津市水代谢危机,相关部门积极进行了引滦、引黄入津以及水资源保护等响应性措施并取得显著成效。同时,随着相关政策(如调水工程、用水限制、污水治理等)的落地以及水资源高效利用与节约意识的提高,而且相关水处理设施稳定运行,使得后期(2011年—2014年)迎来了天津市水代谢安全状况的持续改善。

中期(2008年—2010年)城市水代谢安全状况并不理想,甚至出现大幅起伏与跌落。通过对天津市水代谢历史数据的调研发现,造成上述情况发生的主要原因如下:①2008年起,随着人口的持续快速增长,降水开始进入偏枯水年(2009年为平水年),并伴随降水量时空不均匀分布现象,2010年全市水资源量为10年来最低,而随着用水强度的不断增加导致水供需关系紊乱;②2010年污废水产量快速增长,达到了 $5.38 \times 10^8 \text{ m}^3$,相比2008年增加了14.76%,而这一时期水治理的相关设施仍处于建设期,污废水不能得到有效处理,加剧了水体污染。

3 结论

采用MFA方法构建了城市水代谢系统安全综合评价指标体系,采用熵值法并结合层次分析法对评价指标进行赋权。数据来源于可获得的天津市城市水资源发展相关指标信息,时间设定范围为2005年—2014年,从城市水代谢系统的物质输入系统、物质循环利用系统与物质输出系统3方面进行了关键影响因素的识别,并基于此对天津市水代谢系统的安全程度进行了系统评价。研究结果表明,2005年—2014年,天津市水代谢系统的安全状态先后经历了3个阶段,即前期持续性改善,中期发生下滑态势,后期逐渐趋于平稳。其中,中期水代谢程度发生大幅度下降并呈现不确定波动状态,其原因主要来自于天津市人口的快速增长以及水治理设施配套服务的相对迟缓对天津市水代谢系统造成的压力。为保证天津市水代谢系统的安全发展,应充分汲取后期的治理经验,保障稳定的水源供给,提高城市废水的再利用效率,提倡水资源高效利用与节约意识。

参考文献:

- [1] Lu S, Bao H, Pan H. Urban water security evaluation

- based on similarity measure model of Vague sets[J]. Int J Hydrogen Energy, 2016, 41(35): 15944 – 15950.
- [2] Lu S, Wang J, Bao H. Study on urban water security evaluation based on the Vague set similarity model[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 309 – 312.
- [3] Han B, Liu H, Wang R. Urban ecological security assessment for cities in the Beijing – Tianjin – Hebei metropolitan region based on fuzzy and entropy methods[J]. Ecol Model, 2015, 318: 217 – 225.
- [4] Noiva K, Fernández J E, Jr J L W. Cluster analysis of urban water supply and demand: Toward large-scale comparative sustainability planning[J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 27: 484 – 496.
- [5] Eslamian S A, Li S S, Haghighat F. A new multiple regression model for predictions of urban water use[J]. Sustainable Cities and Society, 2016, 27: 419 – 429.
- [6] Veetil A V, Mishra A K. Water security assessment using blue and green water footprint concepts[J]. J Hydrol, 2016, 542: 589 – 602.
- [7] 马晶, 彭建. 水足迹研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5458 – 5466.
- [8] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [9] Huang C L, Vause J, Ma H W, et al. Using material/

substance flow analysis to support sustainable development assessment: A literature review and outlook[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012, 68: 104 – 116.

- [10] 石焱, 杨建新, 刘晶茹, 等. 基于 MFA 的生态工业园区物质代谢研究方法探析[J]. 生态学报, 2010, 30(1): 228 – 237.
- [11] 邵东国, 杨丰顺, 刘玉龙, 等. 城市水安全指数及其评价标准[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(1): 122 – 126.



作者简介: 徐瑾(1980 –), 女, 天津人, 博士, 副教授, 研究方向为水资源系统优化与决策。

E-mail: xujinbox@163.com

收稿日期: 2017-07-12

(上接第 76 页)

氧利用率不断降低, 但是催化臭氧氧化的臭氧利用率始终高于单独臭氧氧化反应。

3 结论

① 在一定范围内, 提高臭氧浓度、延长接触反应时间都能有效提高催化臭氧氧化对 COD 的去除率。

② 与单独臭氧氧化工艺相比, 催化臭氧氧化工艺具有更快的反应速率、更高的臭氧利用率以及更低的去除单位质量 COD 的臭氧消耗量, 在处理市政污水中将有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 陈莉, 雷睿, 刘洋, 等. 反硝化深床滤池/电磁催化臭氧氧化用于污水厂升级改造[J]. 中国给水排水, 2016, 32(20): 44 – 47.
- [2] Nawrocki J. Catalytic ozonation in water: Controversies and questions[J]. Appl Catal B, 2013, 142/143: 465 –

471.



作者简介: 孙逊(1971 –), 男, 山东烟台人, 大学本科, 研究员, 研究方向为水污染控制。

E-mail: sx@jnszy.com

收稿日期: 2017-07-12