

基于组合赋权和灰色 TOPSIS 法的 温榆河水质评价

幸艳玲 门宝辉 王珂珂

(华北电力大学 北京 102206)

摘要 依据拉格朗日条件极值原理,结合G1法、变异系数法和改进的CRITIC法确定指标权重,计算出主、客观因素兼顾的组合权重,提出灰色TOPSIS模型,利用温榆河5个断面2019年1—12月的DO、COD、NH₃-N和pH值监测数据进行水质综合评价。结果显示:温榆河监测断面处水质基本为V类,不满足水质要求,相关部门需采取相应措施加以改善,特别是加强排污控制。本研究对温榆河水质给出了合理的评价结果,可为温榆河治理提供一定参考。

关键词 温榆河;水质综合评价;组合赋权;灰色TOPSIS法

DOI: 10.19671/j.1673-4637.2022.06.009

中图分类号 X825

文献标志码 A

文章编号 1673-4637(2022)06-0044-05

Water quality evaluation of Wenyu River based on combined weighting and grey TOPSIS method

XING Yanling MEN Baohui WANG Keke

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract According to the Lagrangian conditional extreme value principle, this paper combines G1 method, coefficient of variation method and improved CRITIC method to determine the index weight. After that, the combination weight of subjective and objective factors is calculated, and the grey TOPSIS model is proposed. The monitoring data of DO, COD, NH₃-N and pH in five sections of Wenyu River from January to December 2019 were comprehensively evaluated for water quality. The results show that the water quality at the monitoring section of Wenyu River is basically Class V, which does not meet the water quality requirements. Therefore, relevant departments need to take corresponding measures to improve, especially to strengthen pollution control. The reasonable evaluation results of the water quality of Wenyu River are given, which can provide some reference for the management.

Keywords Wenyu River; comprehensive evaluation of water quality; combined weighting; gray TOPSIS method

随着社会发展,水质评价在水资源的开发利用和水环境保护中越来越具有重要意义。目前世界上采用的水质评价方法有很多^[1],其中优劣解距离法TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)能充分利用原始数据进行

排序,近年来被广泛用于水环境质量综合评价^[2]、水资源承载力评价^{[3][203]}等方面,并取得了较为满意的成果。

传统TOPSIS法以欧氏距离为尺度,容易产生样点与正、负理想点等距的混乱问题,且事

收稿日期:2022-02-28

第一作者简介:幸艳玲(2000—),女,本科。

先选择的属性权重主观性较强。对此,近年来,许多学者对TOPSIS法的改进展开了研究。郑恺原等^[4]将层次分析法和有序加权平均法OWA(Ordered Weighted Averaging)算子理论结合以确认权重,并通过TOPSIS法对重庆市公园的水质情况进行了综合评价;张智等^[5]基于灰色关联分析与TOPSIS耦合模型,提出了最优的水肥配施方案。

传统加权方法包括主观加权方法和客观加权方法。其中,序关系分析法G1法^{[6][9]}是基于改进特征值的一种主观评价方法,具有层次分析方法的优点,且不需要进行一致性检验;客观加权方法中,变异系数法主要确定指标的差别档次,强调指标的相对重要性^[7],改进的客观权重赋权法CRITIC(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation)考虑了各种指标之间的冲突性和对比度^{[8][23]}。单一赋权方法往往存在顾此失彼的缺点,而组合赋权兼顾主、客观因素,使得综合评价结果更加科学合理。

鉴于此,本文通过拉格朗日极值定理,结合G1法、变异系数法和改进的CRITIC法进行组合赋权,建立可反映数据动态变化的灰色TOPSIS模型,对温榆河水质进行综合评价。

1 研究区调查

1.1 概况

温榆河地处北京市东北部,作为城市主要防

洪通道和日承受百吨污水的排污河道,其重要性不言而喻。然而,近年来随着流域内两岸人口增多、企业密集,大量生活和工业废水排入河流,温榆河的水质及生态环境治理问题日益突出。

1.2 数据资料

监测断面需宏观反映水系或区域内水环境质量状况;因此,在温榆河选取5个断面进行监测分析。断面1为沙河闸(116°20'32"N, 40°7'47"E);断面2为马坊(116°23'45"N, 40°8'31"E);断面3为鲁疃闸水文站(116°28'12"N, 40°7'14"E);断面4为辛堡闸(116°31'46"N, 40°3'55"E);断面5为排污口附近(116°31'51"N, 40°3'51"E)。

根据温榆河污染特征,从2019年1—12月,每月对河段溶解氧DO、化学需氧量COD、氨氮NH₃-N和pH值指标进行测量,测量共得到58组数据。指标数值变化如图1所示。

同时,采用GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[9]作为水质评价标准,其各级指标的数值见表1。

表1 地表水环境水质标准分类

类别	DO	COD	NH ₃ -N	pH值
I	7.5	15	0.15	6.5
II	6.0	15	0.50	7.5
III	5.0	20	1.00	7.5
IV	3.0	30	1.50	8.5
V	2.0	40	2.00	9.0

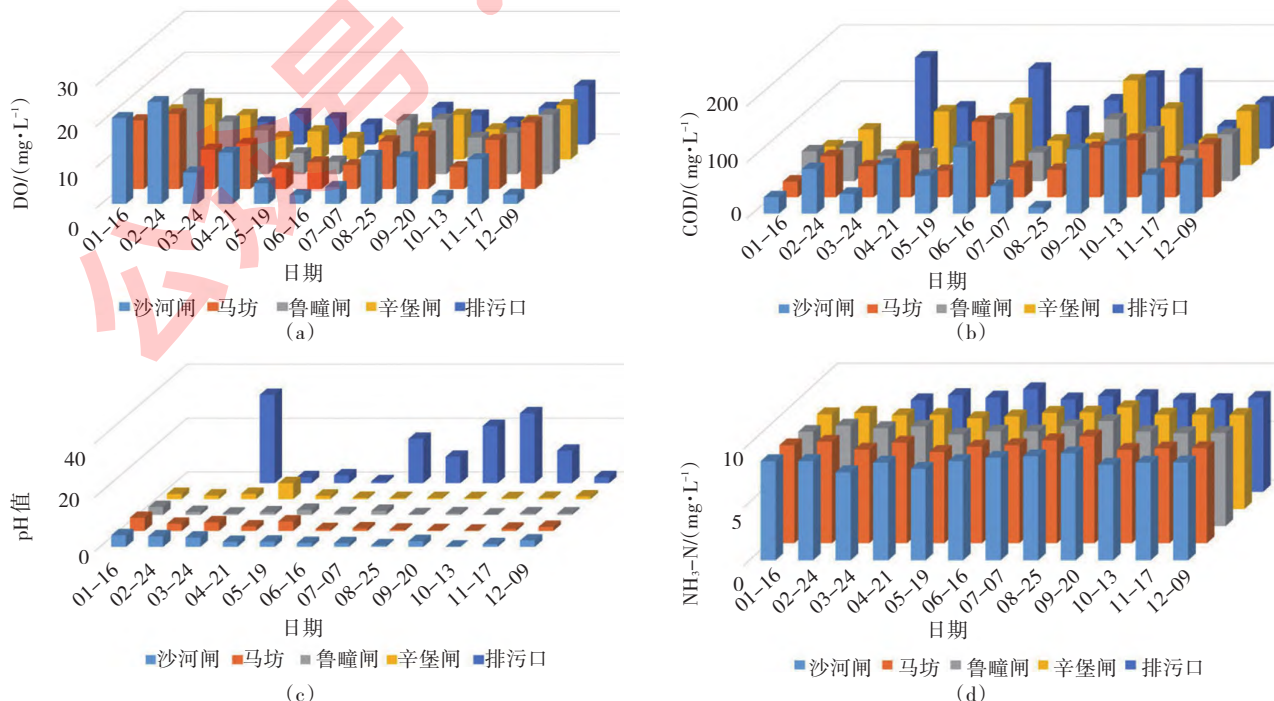


图1 2019年水质指标监测数据统计

2 研究方法

针对相应数据构建 m 个评价对象、 n 个评价指标的多属性决策矩阵, 并进行归一化处理, 得到无量纲化矩阵 $\{b_{ij}\} (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n)$ 。

2.1 权重确定

2.1.1 G1 法

以 a_j 表示按序关系排序的第 j 个评价指标, G1 法^{[6]93}确定主观权重公式为:

$$\begin{cases} w_j = (1 + \sum_{j=2}^n \prod_{i=j}^n r_i)^{-1} \\ w_{j-1} = r_j w_j \end{cases} \quad (1)$$

式中: r_j 为两相邻指标 a_{j-1} 和 a_j 的相对重要程度, 向量 $r = \{r_2, r_3, \dots, r_n\}$; w_j 为第 j 个评价指标的权重。

2.1.2 变异系数法

变异系数法^{[3]201}确定客观权重公式为:

$$\delta_j = d_j / b_j; \quad (2)$$

$$w_j = \frac{\delta_j}{\sum_{j=1}^n \delta_j} \quad (3)$$

式中: d_j 、 b_j 和 δ_j 分别表示第 j 个指标的均值、均方差和变异系数, 向量 $\delta = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n\}$ 。

2.1.3 改进的 CRITIC 法

CRITIC 法是一种兼顾指标在不同样本中的差异性和冲突性的客观赋权方法, 但在计算过程中, 负值相关系数会对权重计算结果产生影响。通过取相关系数的绝对值, 可消除这种影响, 完成对 CRITIC 法的改进^{[8]23}。改进的 CRITIC 法确定客观权重公式为:

$$C_j = \frac{d_j}{b_j} \sum_{i=1}^n (1 - |e_{ij}|); \quad (4)$$

$$w_j = C_j / \sum_{i=1}^n C_i \quad (5)$$

式中: e_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标的相关系数; C_j 表示第 j 个评价指标的改进的 CRITIC 法信息量, 向量 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。

2.1.4 组合赋权法

设 $k_x (x=1, 2, 3)$ 为待定组合系数, 由以上 3 种方法求出的权重为 w_{jx} , 组合赋权法^[10]求得的组合权重为 w_j , 公式为:

$$w_j = \sum_{x=1}^3 k_x w_{jx} \quad (6)$$

将组合赋权问题转化为求最优化问题, 再根据拉格朗日条件极值原理和归一化原理得出:

$$k'_x = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{jx} b_{ij}}{\sqrt{(\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{j1} b_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{j2} b_{ij})^2 + (\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_{j3} b_{ij})^2}}, (x=1, 2, 3); \quad (7)$$

$$k_x = k'_x / \sum_{x=1}^3 k'_x \quad (8)$$

式中: k'_x 为未经归一化处理的组合系数。

2.2 灰色 TOPSIS 模型

采取 5 步建立灰色 TOPSIS 模型^[11]。

(1) 建立加权规范化矩阵 H , 即:

$$H = (h_{ij})_{m \times n} = (w_j b_{ij})_{m \times n} \quad (9)$$

进一步得到正负理想解: $h_j^+ = \max h_{ij}$, $h_j^- = \min h_{ij}$ 。

(2) 计算各评价状态与正、负理想解状态的欧氏距离 ε_i^{\pm} , 公式为:

$$\varepsilon_i^{\pm} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (h_{ij} - h_j^{\pm})^2} \quad (10)$$

(3) 计算灰色关联度。灰色关联系数 λ_{ij}^{\pm} 为:

$$\lambda_{ij}^{\pm} = \frac{\min \min |h_j^+ - h_{ij}| + \alpha \max \max |h_j^+ - h_{ij}|}{|h_j^+ - h_{ij}| + \alpha \max \max |h_j^+ - h_{ij}|} \quad (11)$$

式中: α 为分辨系数, 其作用是提高关联系数之间的差异显著性, 此处取 $\alpha=0.5$ 。取灰色关联系数的平均值, 从而得到灰色关联度 λ_i^{\pm} , 即:

$$\lambda_i^{\pm} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \lambda_{ij}^{\pm} \quad (12)$$

(4) 计算灰色相对关联度 s_i^{\pm} 。 μ 、 ν 为偏好系数, $\mu + \nu = 1$, μ 、 $\nu > 0$, 取 $\mu = \nu = 0.5$; 公式为:

$$s_i^{\pm} = \mu \varepsilon_i^+ + \nu \lambda_i^+ \quad (13)$$

(5) 计算灰色相对贴近度 t_i^{\pm} 并排序, 即:

$$t_i^{\pm} = \frac{s_i^+}{s_i^+ + s_i^-} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (14)$$

3 结果分析和讨论

3.1 组合赋权

将表 1 中各级水质标准数值代入上述公式计算, 总共有 63 个评价对象、4 个评价指标。由参考资料^{[12]87、[13]}可知, 近年来温榆河 COD 污染已经得到一定程度的控制, 而 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染明显, 由此得到 $r = \{1.0, 1.4, 1.6\}$; 算出各指标的均值和标准差后, 进一步计算得到 DO、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 pH 值的 $\delta = \{0.618, 0.405, 0.205, 0.470\}$; 计算出各指标间的相关系数后, 利用公式 (4) 得出 DO、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 pH 值的 $C = \{1.537, 0.927, 0.477, 1.077\}$ 。由 G1 法、变异系数法、改进的 CRITIC 法计算得到的权重如表 2 所示。

表2 指标赋权结果对比分析

评价指标	w_j			
	G1法	变异系数法	改进的CRITIC法	组合赋权
DO	0.177	0.364	0.383	0.255
COD	0.248	0.239	0.231	0.246
NH ₃ -N	0.397	0.121	0.119	0.269
pH值	0.177	0.277	0.268	0.230

将3种权重计算方法结合,对温榆河水质指标的占比进行评判。基于拉格朗日条件极值原理以及归一化原理,得到G1法、变异系数法、改进的CRITIC法的组合系数分别为0.401、0.301、0.299,由公式(6)得到的组合赋权值如表2所示。

分析表2数据,以DO权重为例,G1法求得结果为0.177,变异系数法和改进的CRITIC法求得结果分别为0.364、0.383,而融合主、客观权重的组

合赋权值为0.255。这说明了主、客观权重值有较大差异,而组合赋权兼顾了原始数据的信息和专家的经验,可得到更符合实际、更合理的指标权重值。

3.2 综合评价

利用灰色TOPSIS模型,耦合欧氏距离和灰色关联度,以避免等距排序紊乱等问题,同时以灰色相对贴度为尺度进行排序,相对贴度值越大,水质状况越好。

将各指标数值代入前边公式(1)~(4),构建得到加权规范矩阵,得到DO、COD、NH₃-N和pH值的正理想解,分别为0.295、0.240、0.231、0.234,负理想解均为0。由公式(10)~(12)得5个断面每月评价状态与正负理想解状态的欧氏距离和灰色关联度,数值见表3、表4。观察表3可看

表3 各评价对象与正、负理想解状态的欧氏距离

月份	沙河闸下		马坊		鲁疃闸水文站		辛堡闸		排污口	
	ε_i^+	ε_i^-	ε_i^+	ε_i^-	ε_i^+	ε_i^-	ε_i^+	ε_i^-	ε_i^+	ε_i^-
1	0.186 3	0.385 3	0.199 2	0.354 3	0.221 7	0.318 9	0.217 7	0.339 5	—	—
2	0.209 5	0.385 9	0.232 4	0.334 9	0.212 7	0.360 4	0.225 2	0.321 9	—	—
3	0.237 9	0.330 9	0.244 2	0.305 2	0.230 4	0.334 0	0.223 7	0.337 8	0.428 2	0.127 7
4	0.255 8	0.294 6	0.279 6	0.284 3	0.258 3	0.315 6	0.311 6	0.243 8	0.285 9	0.279 8
5	0.289 0	0.292 5	0.280 2	0.302 6	0.273 1	0.347 8	0.250 7	0.353 6	0.271 8	0.311 8
6	0.374 2	0.239 9	0.339 1	0.252 9	0.344 7	0.259 0	0.315 6	0.271 7	0.381 9	0.235 9
7	0.333 5	0.288 5	0.298 2	0.295 2	0.334 6	0.295 7	0.287 6	0.311 8	0.307 7	0.227 0
8	0.267 6	0.354 8	0.268 7	0.318 4	0.235 5	0.342 9	0.272 2	0.313 1	0.285 2	0.238 6
9	0.331 9	0.262 4	0.303 0	0.295 7	0.306 6	0.285 7	0.341 9	0.263 0	0.358 3	0.148 7
10	0.366 8	0.254 4	0.312 6	0.274 4	0.270 4	0.292 6	0.295 1	0.277 8	0.380 0	0.140 7
11	0.256 7	0.302 3	0.229 6	0.319 9	0.235 8	0.321 8	0.243 8	0.325 5	0.251 8	0.283 5
12	0.349 4	0.254 9	0.224 8	0.321 4	0.216 6	0.325 3	0.241 5	0.305 2	0.221 1	0.314 6

表4 各评价对象的灰色关联度

月份	沙河闸下		马坊		鲁疃闸水文站		辛堡闸		排污口	
	λ_i^+	λ_i^-	λ_i^+	λ_i^-	λ_i^+	λ_i^-	λ_i^+	λ_i^-	λ_i^+	λ_i^-
1	0.685 8	0.441 8	0.645 8	0.449 1	0.606 9	0.458 5	0.648 5	0.450 0	—	—
2	0.682 9	0.461 1	0.608 2	0.489 7	0.653 8	0.466 8	0.615 1	0.464 7	—	—
3	0.636 4	0.457 8	0.592 8	0.473 7	0.641 7	0.466 7	0.649 6	0.451 6	0.385 9	0.809 3
4	0.577 3	0.496 1	0.566 5	0.523 4	0.615 7	0.493 2	0.512 2	0.548 0	0.565 7	0.516 3
5	0.585 2	0.512 5	0.592 9	0.502 3	0.693 1	0.483 1	0.701 5	0.460 9	0.610 8	0.493 2
6	0.520 5	0.641 7	0.541 8	0.589 7	0.549 5	0.588 5	0.568 7	0.546 3	0.517 6	0.667 8
7	0.579 3	0.581 7	0.593 7	0.526 6	0.587 3	0.578 6	0.623 1	0.509 3	0.485 7	0.547 4
8	0.694 6	0.510 8	0.617 7	0.514 9	0.657 6	0.473 6	0.623 2	0.495 3	0.497 4	0.526 4
9	0.528 1	0.624 6	0.578 7	0.583 0	0.563 7	0.579 5	0.543 3	0.623 5	0.416 7	0.631 3
10	0.546 4	0.625 7	0.574 5	0.541 8	0.594 1	0.497 7	0.576 2	0.523 6	0.409 5	0.668 1
11	0.596 3	0.490 9	0.620 3	0.463 2	0.630 1	0.462 3	0.638 7	0.467 8	0.552 2	0.484 5
12	0.533 0	0.600 9	0.605 0	0.470 2	0.622 5	0.456 9	0.595 3	0.479 3	0.597 4	0.463 4

出,按欧式距离进行排序时,易出现评价对象与正、负理想解的欧氏距离相近的现象,说明采用欧式距离有时不能准确表示出各评价对象的水质优劣性,而将欧式距离和灰色关联度耦合,以灰色相对贴近度进行排序,则具有较强的稳定性和客观性。

灰色相对贴近度最大值出现在辛堡闸断面的5月份,其值为0.583 9,表明其水质状况最好;最小值出现在排污口附近断面的3月份,其值为0.464 9,水质状况最差。结合公式(13)~(14),得到各评价状态的灰色相对贴近度。对每个断面的灰色相对贴近度求均值,可绘出如图2所示雷达图。计算得到的I~V级水质标准数值对应的灰色相对贴近度分别为0.559 9、0.541 1、0.536 7、0.519 4、0.502 4。根据这5个值,对各断面每月的水质进行等级划分,结果如表5所示。

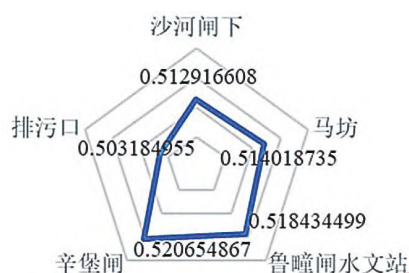


图2 各断面月均灰色相对贴近度雷达图

表5 5个断面水质评价结果

月份	沙河闸下	马坊	鲁疃闸水文站	辛堡闸	排污口
1	V	V	V	IV	—
2	V	V	V	V	—
3	IV	V	IV	IV	劣V
4	V	V	IV	V	V
5	IV	IV	III	III	IV
6	V	V	V	IV	劣V
7	V	IV	V	IV	V
8	IV	V	IV	IV	V
9	劣V	劣V	劣V	劣V	劣V
10	V	IV	IV	IV	劣V
11	V	IV	IV	IV	V
12	V	V	V	V	V

从雷达图2和表5发现:辛堡闸断面处平均灰色相对贴近度为0.520 7,出现IV类水的月份最多;排污口附近断面的平均灰色相对贴近度为0.503 2,出现多次V类水和劣V类水情况,这表明污水的集中排放使得水体质量明显变差;5个监测断面的水质状况由优到劣排序为:辛堡闸>鲁疃闸

水文站>马坊>沙河闸>排污口附近。研究的河段内,下游水质不一定比上游水质差,例如沙河闸断面虽然处于上游位置,但其水质却劣于马坊、鲁疃闸水文站、辛堡闸断面的水质。推测导致这种现象出现的原因是:相应断面间有水质较好的支流汇入,进而使得主河道整体水质变好;此外,位于鲁疃闸水文站附近的未来城滨水公园和靠近辛堡闸的北京温榆河公园也在一定程度上改善了水体质量。

对表5中数据纵向对比分析可得:5月份水质最佳,整体上汛期水质比非汛期水质好,这与汛期大量雨水进入河道、稀释了污染物有关;而9月底的水质变差,原因在于污染因子浓度在雨季后期随着雨水减少而回升。综上,温榆河研究区域内水体质量相较于之前的劣V类水^{[12]91}有所改善,这得益于近年来相关部门积极采取的水环境治理措施;然而,水体基本为V类水的评价结果仍不乐观,研究河段属于非直接接触的景观娱乐用水区域,实际水质不满足规定的IV类水等级要求;同时在监测过程中发现,排污口附近水体发绿发臭,水下块状物表面附着大量的灰白色絮状物质,还存在一定程度的污染,仍有大量的水质改善工作需要开展。

3.3 结果比较

文献[14]和[15]均得出温榆河水体基本为V类水的结论,本文评价结果与其一致,说明基于组合赋权的灰色TOPSIS模型,在运用于河流综合水质评价时,具有很好的准确度和合理性。

4 结论

通过对温榆河监测河段的水质综合评价,主要得到以下结论。

(1)结合G1法、变异系数法和改进的CRIT-IC法进行组合赋权,获得了主、客观因素兼顾的权重值。

(2)建立灰色TOPSIS模型进行水质评价,结果显示,2019年温榆河水体基本为V类,评价结果与实际相符,说明该模型运用于河流综合水质评价时,可靠性较强。

(3)温榆河水体质量较之前的劣V类水有所改善,但仍不满足规定的的质量要求,特别是排污口处水体发臭发绿,需要加强对污水排放的管控。

(下转第64页)

6 结论

(1) 2021年汛期, 怀柔水库流域暴雨范围大、场次多及持续时间长, 给水旱灾害防御工作带来很大压力。水库管理部门将怀柔水库、京密引水渠及调蓄工程作为一个整体统筹调度, 提出供水与防洪相结合、正向调度与反向调度相结合的调度方式, 在缓解防洪压力的同时, 为下游河道进行生态补水, 在经济、社会及生态等方面均取得了显著效益, 对同类型工程洪水调度工作具有一定的借鉴意义。

(2) 近年来, 极端天气事件频繁发生, 发生大洪水的可能性不断增大。怀柔水库库区紧邻怀柔城区, 下游行洪区域又有定位于“世界级原始创新战略高地”的北京怀柔科学城, 保障作用极为显著。在运行过程中应充分总结调度经验, 推进配套工程升级改造, 完善自动测报系统, 加强水库防洪淹没风险分析, 提高在应急状态下的应对效率。

参 考 文 献

- [1] 北京市水利规划设计研究院. 怀柔水库提高防洪标准工程初步设计报告[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 1987.
- [2] 杨秀芳. 怀柔水库流域暴雨洪水特征分析[J]. 北京水务, 2020(1): 41-44
- [3] 邢贵海, 王学忠. 怀柔水库防洪安全与供水保障[J]. 北

(上接第48页)

参 考 文 献

- [1] 夏凡, 胡圣, 龚治娟, 等. 不同水质评价方法的应用比较研究: 以丹江口水库入库河流为例[J]. 人民长江, 2017, 48(17): 11-15, 24.
- [2] 刘明宇, 华路, 王世岩, 等. 基于改进TOPSIS方法的温榆河水环境质量综合评价研究[J]. 南水北调与水利科技, 2007(3): 57-60.
- [3] 门宝辉, 夏军, 刘昌明. 基于变异系数权重的TOPSIS法在区域水资源承载力评价中的应用[C]//水与社会经济发展的相互影响及作用: 全国第三届水问题研究学术研讨会论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2005: 200-203.
- [4] 郑恺原, 潘若云, 黄峰. 算子优化层次分析的TOPSIS模型评价大沽河流域地下水水质研究[J]. 节水灌溉, 2020(5): 88-92.
- [5] 张智, 杨志, 黎景来, 等. 基于灰色关联与TOPSIS耦合模型的甜瓜水肥灌溉决策[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 302-311, 330.
- [6] 陈端, 曹阳, 夏辉, 等. 基于熵权法和G1法的大坝监测指标权重融合[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 92-94.
- [7] 马辉. 综合评价系统中的客观赋权方法[J]. 合作经济与科技, 2009(17): 50-51.
- [8] 傅为忠, 刘芳芳. 基于改进CRITIC—GRAP模型的“互

京水务, 2012(S1): 48-51

- [4] 北京市京密引水管理处. 水务管理理论与实践[R]. 北京: 北京市京密引水管理处, 2012.
- [5] 北京市水利规划设计研究院. 北京市南水北调配套工程南水北调来水调入密云水库调蓄工程初步设计报告总说明[R]. 北京: 北京市水利规划设计研究院, 2013.
- [6] 杜鹏, 孙冉, 于洋, 等. 南水北调来水对怀柔水库水质影响评价分析[J]. 北京水务, 2018(S1): 16-19
- [7] 刘力强. 南湾水库2020年暴雨洪水调度分析[J]. 河南水利与南水北调, 2021, 50(8): 8-9
- [8] 赵小伟, 王阳, 范庆莲, 等. 北京市2018“7·16”暴雨洪水分析研究[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(3): 46-50
- [9] 赵小伟, 王亚娟, 赵洪岩, 等. 北京2016“07·20”暴雨与2012“07·21”暴雨对比分析[J]. 北京水务, 2017(4): 33-37
- [10] 王亦尘, 王美荣, 杜龙刚. 2018年北京市汛期雨水情分析[J]. 北京水务, 2018(6): 54-58
- [11] 周宁, 应爽, 王艳梅. 推理公式法在怀柔水库洪水预报中的应用研究[J]. 北京水务, 2018(S1): 8-11
- [12] 北京市京密引水管理处, 中国水利水电科学研究院. 怀柔水库洪水淹没风险分析评估成果报告[R]. 北京: 北京市京密引水管理处, 2021.
- [13] 北京市京密引水管理处, 北京市工程地质研究所. 北京市怀柔应急备用地下水源地2021年度地下水动态监测报告[R]. 北京: 北京市京密引水管理处, 2021.

(责任编辑: 林跃朝)

- 联网+工业”融合发展评价研究[J]. 工业技术经济, 2016, 35(10): 21-29.
- [9] 国家环境保护总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [10] 刘加伶, 付明明, 冯欣, 等. 最优组合赋权法在信息安全风险评估中的应用[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2016, 30(3): 87-93.
- [11] 赵洪山, 李静璇, 米增强, 等. 基于CRITIC和改进Grey—TOPSIS的电能质量分级评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(3): 1-8.
- [12] 郭婧, 田颖, 梁云平, 等. 1998—2017年温榆河流域水质变化特征[J]. 中国环境监测, 2019, 35(4): 85-92.
- [13] 李晓玉, 王鹏, 邵光艺, 等. 基于水面无人船快速监测的温榆河—北运河水质分析与评价[J]. 环境化学, 2022, 41(5): 1568-1578.
- [14] 蔡常鑫, 门宝辉, 刘灿均. 基于属性识别理论的温榆河水水质评价[J]. 北京水务, 2019(3): 26-30.
- [15] 于健, 谷洪彪, 王贺, 等. 基于核Fisher判别分析方法对北京温榆河及部分支流水质综合评价[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(22): 103-110.

(责任编辑: 侯 德)